

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

事後評価報告書

2021年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

2021年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 石塚 博昭 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 小林 直人

NEDO技術委員・技術委員会等規程第34条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

事後評価報告書

2021年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

研究評価委員会

目 次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
評価概要	4
研究評価委員会委員名簿	6
研究評価委員会コメント	7
第1章 評価	
1. 総合評価	1-1
2. 各論	1-5
2. 1 事業の位置付け・必要性について	
2. 2 研究開発マネジメントについて	
2. 3 研究開発成果について	
2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	
3. 評点結果	1-23
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録及び書面による質疑応答	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」の事後評価報告書であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条に基づき、研究評価委員会において設置された「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」（事後評価）分科会において評価報告書案を策定し、第64回研究評価委員会（2021年3月1日）に諮り、確定されたものである。

2021年3月
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

審議経過

● 分科会（2020年11月27日）

公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明
7. プロジェクトの補足説明
8. 全体を通しての質疑

公開セッション

9. まとめ・講評
10. 今後の予定、その他
11. 閉会

● 第64回研究評価委員会（2021年3月1日）

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

事後評価分科会委員名簿

(2020年11月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	ひらもと まさひろ 平本 昌宏	自然科学研究機構 分子科学研究所 物質分子科学研究領域 分子機能研究部門 教授
分科会長 代理	ひろせ ふみひこ 廣瀬 文彦	山形大学 大学院理工学研究科 教授
委員	おさか いたる 尾坂 格	広島大学 大学院先進理工系科学研究科 応用化学プログラム 教授
	かとう たけよし 加藤 丈佳	東海国立大学機構名古屋大学 未来材料・システム研究所 システム創生部門 教授
	たかしま ゆふこ 高島 由布子	株式会社三菱総合研究所 サステナビリティ本部 気候変動ソリューショングループリーダー 兼 海外事業本部
	のざき ようすけ 野崎 洋介	株式会社エネット 取締役
	のせ よしたろう 野瀬 嘉太郎	京都大学 大学院工学研究科 材料工学専攻 准教授

敬称略、五十音順

評価概要

1. 総合評価

我が国のエネルギー政策の重要な再生可能エネルギー主力電源化に資する本事業は、ほぼすべての項目において目標を達成するか、達成のための道筋を明らかにしており、十分に高い成果を得たと考える。中間評価の提言や研究分野の動向など状況に応じて体制見直し、計画変更、有望なテーマへの財源集中、加速予算配分など適切に行われ、最終的に優れた成果を生み出したと考える。

結晶シリコン、CIS、Ⅲ-V、ペロブスカイト太陽電池において実用面積セルやモジュールで理論最高効率、世界最高もしくはそれに近い効率を得られた。結晶シリコン、CISでは住宅用、ビル一体型、車載と、実物ができており、量産化が可能なレベルに達している。Ⅲ-V、ペロブスカイトでは将来の低コスト化につながる効率、耐久性、基盤技術が出揃ってきた。ヘテロ接合バックコンタクト技術に代表されるように、本事業を通じて我が国の特徴的な技術が多数生み出されたことは高く評価したい。

今後に向けて、新型太陽電池の参入シナリオの検討と提示、太陽電池を含む自然エネルギーの主力電源化に必要な要素の洗い出し、海外との熾烈な競争環境下にある我が国の立ち位置の確認や知的財産確保など、我が国の将来に資するよう、継続的に NEDO プロジェクトが策定されることを期待したい。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

再生可能エネルギーの主力電源化は我が国のエネルギー政策上の最重要課題の一つである。特に、太陽光発電の導入拡大のためには更なる高効率化、低コスト化が不可欠である。また、国産エネルギーである太陽電池を国策として導入を進めることはエネルギー安全保障観点からも理にかなっており、コスト低減に資する高性能、高信頼性を両立した太陽電池の開発は NEDO の事業として妥当と考える。

エネルギー政策は公共性が非常に高く、NEDO が引き続き牽引していくことは必要不可欠であると考ええる。

2. 2 研究開発マネジメントについて

2020 年までに 14 円/kWh、急激な市場価格低下に追随して 2025 年まで 5 年前倒しされた 7 円/kWh の目標は適切であり、中間評価の提言等を踏まえた有望なテーマへの財源集中や体制見直し等が最終的に優れた成果を生み出す原動力になったと考える。

また、各分野の製品化の核となる企業が選定され、基礎研究能力が必要なペロブスカイトとⅢ-Vにおいては大学、公共研究機関が適切に配置され、目標達成のための効率的な産官学の体制が構築されていた。更に動向調査を踏まえて車載やビル壁面等、新市場となり得る

領域に関する検討を押し進めた点は評価できる。

一方、低コスト化については、発電コストという明確な目標を設定した事は大きな意義があったが、モジュールのkW単価を目標値の設定に加えるなども有効と考える。

今後に向けては、世界的な情勢が激変、かつ、変化が加速しており、我が国の国際競争力を確保するためにも、今後を見通した新たな目標、ロードマップを再設定するなど、柔軟な姿勢で新しい方策を取り入れて行くことも必要と考える。

2. 3 研究開発成果について

いずれの太陽電池においても世界最高レベルの性能を実現しており、ほぼすべてのテーマで目標を達成している。将来への展開についても明確に方針を打ち出しており、研究開発成果は高く評価できる。特に、シリコン太陽電池のヘテロ接合バックコンタクト技術には、世界的にも競合技術に対する非常に高い優位性がある。CISなどは、搭載重量制約がある住宅・ビル壁面・車など新たな市場への軽量化モジュールの早期投入の見通しを示しており評価できる。また、ペロブスカイト太陽電池においては世界的にも高い信頼性を実現しており、劣化機構の解明が進んだ点も実用上重要であり評価できる。

今後に向けては、ヘテロ接合バックコンタクト技術等の漏れなき特許化、一般向けのイベントを利用した積極的な情報発信を期待する。

2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

セル、モジュールなど要素性能の研究開発にとどまらず、新分野を含めた実用条件に基づいた実用化・事業化戦略が展開されている。企業ヒアリングなどにもとづいて国内における新市場の導入規模が試算されており、実用化・事業化に向けた取り組みがなされている。

結晶シリコンとCISについては住宅用、ビル一体型、車載といった実物ができている事から実用化については十分に可能性が高く、報告された大面積セル、モジュール技術から、量産化直前に達しており、事業化戦略も明確である。経済効果のみならず、自律分散型エネルギーシステム実現への貢献が期待される。

ペロブスカイトとIII-Vといった次世代太陽電池については実用化に資する要素技術はできてきており、基礎科学的理解も大きく進んでいる。

共通基盤技術開発では太陽電池データベースは十分な精緻さに達しており、測定技術に関してはガイドライン化・国際規格への展開等効果的に進めている点なども評価できる。

今後に向けて、国内設置可能量増大策の検討、新型太陽電池の市場参入計画策定、事業化に関する国の関与のあり方の検討、7円/kWhの太陽電池実現による社会構造の大きな変革やそれに伴う雇用創出効果の積極的な評価などを期待する。

研究評価委員会委員名簿

(2021年3月現在)

	氏 名	所属、役職
委員長	こばやし なおと 小林 直人	早稲田大学 参与・名誉教授
委員	あさの ひろし 浅野 浩志	一般財団法人電力中央研究所 エネルギーイノベーション創発センター 研究アドバイザー
	あたか たつあき 安宅 龍明	先端素材高速開発技術研究組合 (ADMAT) 専務理事
	かわた たかお 河田 孝雄	株式会社日経 BP 日経バイオテック編集 シニアエディター
	ごないかわ ひろし 五内川 拡史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	さくま いちろう 佐久間 一郎	東京大学 大学院工学系研究科 教授
	たからだ たかゆき 宝田 恭之	群馬大学 大学院理工学府 環境創生部門 特任教授
	ひらお まきひこ 平尾 雅彦	東京大学 大学院工学系研究科 化学システム工学専攻 教授
	まつい としひろ 松井 俊浩	情報セキュリティ大学院大学 情報セキュリティ研究科 教授 国立研究開発法人産業技術総合研究所 名誉リサーチャー
	やまぐち しゅう 山口 周	独立行政法人大学改革支援・学位授与機構 研究開発部 特任教授
	よしかわ のりひこ 吉川 典彦	東海国立大学機構名古屋大学 名誉教授
よしもと ようこ 吉本 陽子	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部 経済政策部 主席研究員	

敬称略、五十音順

研究評価委員会コメント

第64回研究評価委員会（2021年3月1日開催）に諮り、以下のコメントを評価報告書へ附記することで確定した。

- 研究開発成果は顕著であり、7円/kWhという目標を前倒しにしたマネジメントも妥当であったと考えられる。一方、今後は国内設置可能量の増大や新たな市場参入計画の実施を含めて、日本が国際的に主導できる対策に向けて、新しいプロジェクトを進めることを期待したい。

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

1. 総合評価

我が国のエネルギー政策の重要な再生可能エネルギー主力電源化に資する本事業は、ほぼすべての項目において目標を達成するか、達成のための道筋を明らかにしており、十分に高い成果を得たと考える。中間評価の提言や研究分野の動向など状況に応じて体制見直し、計画変更、有望なテーマへの財源集中、加速予算配分など適切に行われ、最終的に優れた成果を生み出したと考える。

結晶シリコン、CIS、III-V、ペロブスカイト太陽電池において実用面積セルやモジュールで理論最高効率、世界最高もしくはそれに近い効率を得られた。結晶シリコン、CISでは住宅用、ビル一体型、車載と、実物ができており、量産化が可能なレベルに達している。III-V、ペロブスカイトでは将来の低コスト化につながる効率、耐久性、基盤技術が出揃ってきた。ヘテロ接合バックコンタクト技術に代表されるように、本事業を通じて我が国の特徴的な技術が多数生み出されたことは高く評価したい。

今後に向けて、新型太陽電池の参入シナリオの検討と提示、太陽電池を含む自然エネルギーの主力電源化に必要な要素の洗い出し、海外との熾烈な競争環境下にある我が国の立ち位置の確認や知的財産確保など、我が国の将来に資するよう、継続的にNEDOプロジェクトが策定されることを期待したい。

<肯定的意見>

- ・ 結晶シリコンにおいては、理論最高効率に達する26.6%が得られている。CISにおいても、世界最高効率23.4%を達成している。III-Vにおいても世界最高効率31.17%を達成している。ペロブスカイトにおいても、ほぼ世界最高効率に近い19.2%がえられている。実用面積セル、モジュールで、これらのワールドレコードを達成したことを高く評価する。
- ・ 結晶シリコン、CISにおいて、住宅用、ビル一体型、車載と、実物ができており、量産化が可能なレベルに達していることを高く評価する。
- ・ III-V、ペロブスカイトにおいて、将来の低コスト化につながる効率、耐久性、基盤技術が出揃ってきたことを高く評価する。
- ・ バックコンタクト技術に代表される、我が国に固有の技術が多数生み出されたことを、高く評価する。
- ・ ほぼすべてのプロジェクトにおいて目標を達成するか、達成のための道筋を明らかにしており、高い成果が得られたと考えられる。
- ・ いずれの研究開発項目においても目標に対して、研究開発が非常に進んでおり、高く評価できる。特にペロブスカイト太陽電池など新構造型太陽電池の進展は、2050年の目標に向けて重要である。今後も太陽光発電技術の開発研究に対して、国の支援を継続して行っていただきたい。
- ・ 個々の要素技術開発は着実に進んでおり、2025年において7円/kWhの発電コストの目標をクリアできる見込みが得られたことは大きな成果であったと言える。付加価値の高い太陽電池について国際市場をリードするためには重要なプロジェクトであり、更なる

発展を期待する。

- 本事業は我が国エネルギー政策の重要な再生可能エネルギー主力電源化に資する目的を持って行われ、項目ごとに差異はあれど十分に高い成果を得た。主に「太陽光発電導入用途のすそ野を広げる」ことへの貢献が期待される事業として高く評価する。
- 1980年のNEDO発足から継続的に当該分野の研究開発を展開していることが、わが国の大きな強みとなっていると考えます。太陽光発電は再エネの主力電源化を進める上でも不可欠な技術ですのでオールジャパンとしての今後の技術開発に大きく期待をしております。
- 本事業では各太陽電池で世界最高効率を達成し、日本の太陽電池開発における技術の高さを改めて国内外にアピールできたことは大変評価できる。ぜひ早期に事業化につながるよう、NEDOの支援をお願いしたい。
- 重量に制約のある分野を新市場として早期に位置づけ、開発を主導した点は評価できる。この成果を踏まえて今年度開始の事業において研究項目に含まれており、今後の展開が大いに期待できる。

<改善すべき点>

- III-V、ペロブスカイト、という、新型太陽電池が、どのように市場に参入して行くのかというシナリオをより精密に提示することが必要と考える。
- 国際競争力について、実際に、世界の舞台において通用するかの、実証、または、綿密なシナリオが示されていない。企業の投資戦略にも関係するため、経済専門家による考察を勧める。
- 国際的な競争、他の再エネを含めた電力需給における太陽光発電の位置づけ、これに伴う出力抑制への対応などを考えた場合、2025年に7円/kWhの目標が妥当であったのか、改めて検証する必要があるのではないかと。また、付加価値の高さを有効に活用するためには、太陽光発電の開発者の視点だけでなく、導入先のユーザー、事業者側の要望を技術開発に反映することが重要であり、軽さ、形状の柔軟性などの付加価値に対する目標値も示されるとよかったのではないかと。
- 研究体制がやや煩雑なので、採択の時点でもう少し研究テーマ（参画機関）を絞ってもよかったかと思う。ただ、今年度から開始された事業においてはこの点が改善され、選択と集中が適切に行われているように見えるので、今後の展開に期待したい。

<今後に対する提言>

- 基幹電力：基幹電力として太陽電池を位置付ける。太陽電池だけでなく、風力等を含めた自然エネルギー、自然エネルギーの本質である変動を克服するための蓄電池、蓄電池、電力系統制御を全体として考えるトータルシステムを、国家レベルで導入しないと、基幹電力になり得ない。その際、AI等を活用することも考えられるのではないかと。自然エネルギーは、変動が激しいことが本質的である。それを克服しないと基幹エネルギーになり得ない。政府の施政方針において、基幹電力にするとの言及があり、国家レベルで

その方向に進むとの意思が示されたので、基幹電力化に必要な要素を洗い出す必要がある。

- 国際競争力：国際競争力を向上させるシナリオを具体的に提案するべきである。プロジェクトにおいては、各企業が 2025 年に 7 円/kWh を達成できる基盤を構築できている。しかし、真の国際競争力に結びつけるためには、その後の、企業の経営戦略、投資戦略、等の、企業経営が関わってくる。この部分で、投資等を導くための、国家的イニシアチブが必要であり、現在は、施政方針演説における言及もあり、太陽電池導入の追い風が吹いているわけであるから、チャンスであると言える。軌道に乗るまで、国が関与し、軌道に乗った後で、民間払い下げする、明治政府の行ったようなドラスティックな方法も考えて良いのではないか。
- 真の価格競争力：太陽電池の自立とは、そのコストで、経済的に利潤があがることで、導入すれば儲かるという明白な経済的理由で、導入意思が民間に生じ、放っておいても導入が自律的に進んでいく状態である。また、電力料金への太陽電池導入による上乗せ（賦課金）が新規導入にはゼロ（不必要）になった状態であると言える。この状態に早急に持っていく、コスト削減、政策が早急に必要である。
- 新型太陽電池の参入シナリオ：Ⅲ-V、ペロブスカイトなどの、新型太陽電池が、シリコンで牛耳られている市場にどのように入って行くのかのシナリオを示すべきである。
- 安全保障との関連：太陽電池は導入されれば、国内の太陽光で発電するため、国産エネルギーである。これが、30-40%以上の割合で基幹電力となれば、石油を絶たれた場合（南シナ海、東シナ海、中東地域、等のシーレーンが他国によって脅かされている現状を見ると十分ありうる）の、安全保障に寄与する。
- 50%以上の本質的に高効率な太陽電池（熱力学的限界はあるが）を目指す研究を推進すべきである。
- 田畑に太陽電池が設置され、両方とも安全保障に不可欠な、食料と電力が食い合うような状況を改善する施策が必要である。
- 砂漠に設置すると 2 円/kWh である報告から考えて、太陽電池による電力によって水素を得て、石油に代わって、中東等から輸入する戦略も考えられる。この場合、二酸化炭素は排出されないエネルギーとなる。
- エネルギー問題は、トータルとして考えることが必須である。電気自動車を導入すれば、そのミクロな部分においては二酸化炭素も排出せず、クリーンに見えるが、その電力が石油等によって作られている場合は、全体（マクロ）としてはクリーンではない。その電力が太陽電池等の自然エネルギーで作られている場合のみに、全体（マクロ）としてクリーンになる。国全体のトータルシステムとして、安全保障のための脱石油、二酸化炭素削減を考えることが必要不可欠である。
- 宇宙空間に太陽電池を設置してマイクロ波送電することも、20-30 年程度の時間軸では、視野に入ってきているのではないか。宇宙設置では、設備稼働率 100%近くにできる。夜昼、天候に左右されず、太陽光は一定強度で存在する。
- 太陽電池の作製にもエネルギーが必要なことに留意しないとイケない。そのエネルギー

を石油で賄っていると、トータルとしては、自然エネルギーではない。

- 日本全国で 300GW の設置が可能という試算から、太陽電池で電力需要の何十パーセントが供給可能か、明確な数字を国民に示す。風力等を含めた自然エネルギー全体で、電力重要の 30-50%程度が賄えることを示す。さらに、太陽電池、自然エネルギーによる、充電、水素生成によって動かせる車の割合を明確に示す。最終的に、ベストミックスによって、エネルギー的に日本が自立できる道筋を国民に明確に示す。
- 蓄電池のコストを下げる。太陽電池とトータルでコストを下げるのが、基幹電力としては必要不可欠になる。蓄電池と合わせて太陽電池を設置した場合に、FIT をつけることも、一案として考えて良いのではないかと考える。
- (トータルで生み出せる電力) = (効率) X (時間) であるから、耐久性 (時間) は非常に重要で、さらに重視することが必要と考える。
- 太陽電池の設備稼働率を 10%から 2 倍の 20%に引き上げることのできる方法を開発することを勧める。設備が 2 倍になったのと同じ効果がある。
- 以上のような考察に基づいて、我が国の将来に資するように、次の NEDO プロジェクトが策定されることを望む。
- 開発成果について、目標を達成したかどうかだけでなく、海外の競合にたいしてどの位置にいるのか、自己評価をしていただきたい。
- 他国も同じように太陽光発電に関して急速に技術開発を進めていることから、他国の状況も比較しながら戦略を立て、NEDO が先導して研究開発を支援していく必要がある。
- 次のステップとして、具体的に新市場をどのように開拓していくのか、ユーザーに対するヒアリングを重ね、具体的なニーズの掘り起こしを進めていただきたい。
- また、大量導入という観点からは、日射が大きな時間帯においては、全体の電力需給バランスの観点から太陽光発電の出力が余剰となり出力抑制を強いられる場合が多くなる。その意味では、定格出力時の効率ではなく、日射が小さい場合の変換効率を向上させるような新しい観点からの取り組みがあってもよいのではないかと考える。
- さらに、実用化、事業化の観点からは、太陽電池セル本体の開発よりも、むしろ周辺技術の開発の方が重要になってきている可能性もあり、世界的に新市場を確実に獲得できるよう、NEDO として技術開発の方向性を適切に見定めていただきたい。
- 本分野は申し上げるまでもなく海外との熾烈な競争環境下で展開されておりますので、研究発表・講演と合わせて知的財産の確保も進め、引き続き我が国の技術の競争優位化をお願いいたします。
- 国際競争力についてどのように考えるのか難しいところがあるが、どのあたり (の市場) を狙うのか NEDO としての方向性を明確に示すことで、各企業の研究開発を継続して支援していただきたい。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

再生可能エネルギーの主力電源化は我が国のエネルギー政策上の最重要課題の一つである。特に、太陽光発電の導入拡大のためには更なる高効率化、低コスト化が不可欠である。また、国産エネルギーである太陽電池を国策として導入を進めることはエネルギー安全保障観点からも理にかなっており、コスト低減に資する高性能、高信頼性を両立した太陽電池の開発は NEDO の事業として妥当と考える。

エネルギー政策は公共性が非常に高く、NEDO が引き続き牽引していくことは必要不可欠であると考ええる。

<肯定的意見>

- 本プロジェクトでは、2020 年までに 14 円/kWh、2025 年までに 7 円/kWh の実現に資する高性能、高信頼性を両立した太陽電池の開発を目標としている。7 円/kWh はプロジェクト初期には 2030 年としていたが、その後の、太陽電池価格の急激な低下により 2025 年に前倒しした。この目標は、市場動向に素早く追随して設定されており、必要な時には目標の前倒しも柔軟に行なっており、適切と考える。
- NEDO の PV2030+は、かなり以前に作られたロードマップにも関わらず、ほぼ予想通りに価格低下が実現していることに、驚きを感じる。
- エネルギー安全保障の観点から、石油が無尽蔵にある米国と資源のない我が国とでは、太陽電池の位置付けは異なる。国産エネルギーとなる太陽電池は、国策として導入を進めることが必須と考える。最終的には、国産の自然エネルギー（太陽電池、風力、水力、等）で、50%以上供給することを目指すことを勧める。以上の観点からも、今回の NEDO 事業の目的は妥当と判断できる。
- 政策動向の観点から、新政権は、太陽電池を基幹エネルギーとして推進することとしている。今回の NEDO 事業は、このような判断の基礎となっていると考えられ、必ずしも優先順位が高くない時期にも屈することなく、継続的に粘り強く効率向上、耐久性向上、コスト低減の努力を積み重ねたことが、現在につながっていると考える。
- エネルギーは公共性が非常に高い性質を持つ。民間企業だけでは、コストの引き合わない太陽電池研究はできなかった。その間は、NEDO が太陽電池研究を牽引することは必要不可欠であると考ええる。他国では、軍事研究がその役割を担っている場合も多いが、我が国では今しばらく、それとは別の方法が必要と考える。
- 今回 5 年間で 211 億円が投じられているが、研究室レベルではなく、企業における太陽電池モジュール生産、設備レベルの大量生産を行う場合は、ある程度の資金は必要であり、結晶シリコンの理論限界効率達成等の成果は投資に見合っていると判断する。
- 示された事業目的および目標は、内外の技術動向、国際競争力の状況を鑑みて妥当と判断される。また市場動向に対する将来見通しも十分に検討されており、本事業の必要性についても十分に説明されている。
- NEDO が関与したことで、明確にコスト目標と重点分野が示され、またそのマネジメン

トが功を奏したため、各テーマで高い成果につながったものと判断される。

- 投資した研究費に対して十分に高い成果が得られており、それによる高い市場の獲得が期待される。
- 本事業によって進めている太陽光発電コスト低減に向けた開発研究は、温室効果ガス排出量ゼロに向けて重要な事業であり、事業の意義は高い。また、公共性の高い本事業を **NEDO** が主導して実施することは極めて妥当と考えられる。
- 主力電源として期待される再エネ発電のうち、風力発電は陸上の適地が限られ、洋上は長期的な視点で今後の開発に期待せざるを得ない。そこで、太陽光発電の導入拡大は極めて重要であり、更なる高効率化、低コスト化が不可欠である。既存のシリコン系の太陽光発電の低コスト化によって今後も順調に導入が進展することが期待されるものの、温室効果ガス排出削減の非常に高い目標を実現するためには、住宅屋根やビル壁面への導入拡大が必要である。地震などの自然災害が多い日本においては、太陽光発電の軽量化は非常に重要であり、その意味では CIS、III-V 族、ペロブスカイトなど、軽量で形状の柔軟性が高い太陽電池の更なる低コスト化、高効率化、高信頼化は重要である。しかも、世界的な太陽光発電の導入拡大加速、温室効果ガス排出削減に向けた取り組みの加速を考えると、新しい太陽光発電の低コスト化は急務であることから、本事業は **NEDO** の関与が必要であったと言える。
- 再生可能エネルギーの主力電源化は我が国エネルギー政策上の最重要課題であり、なかでも太陽光発電に対する期待は高い。限られた国土、多様なエネルギー需要を鑑みると、本研究で太陽光発電設置場所を飛躍的に拡大する可能性を示せたことは国家プロジェクトとして十分意義深いと認識。
- また、本分野は各国が大規模な研究開発投資をしながら鎬を削っている領域であり、個社のみで国際競争力ある圧倒的高品質・低価格を実現することは困難であろう。加えてエネルギー技術の応用に当たっては多様なキープレイヤーの連携が求められるため、関連プレイヤーの **HUB** 的機能としての **NEDO** 事業は有益と理解。
- 一般にエネルギー技術の社会実装には時間を要するため現時点での投入対効果検証は困難であるが、「太陽光発電市場のすそ野を広げる」効果は段階的に得られるものと期待。
- 5年ごとのロードマップの見直しや大きなインパクトとしての 2012 年の FIT の開始を見据えた上で、「2030 年までの公的支援に頼らない自立」など開発成果の事業へのフィードバックを見据えた計画であり、その位置づけ・必要性は大きいと考えます。
- 太陽光発電事業に関しては近年、海外企業の勢力が大きく、日本企業自身の努力だけで今後の事業発展は困難な状況であることから、**NEDO** が新市場開拓も含めた事業化に対する研究開発を主導したことは適切であったと考えられる。またこの観点から、海外との差別化を図る上でも「高性能化および高い信頼性を通じたコスト低減」は本事業の目的としての的確であったと考えられる。

<改善すべき点>

- 2025 年までに 7 円/kWh が実現することで、それ以降に FIT は不必要となり、新たな賦

課金（電力料金に上乗せされる国民負担）が生じないことを、明瞭に示した方が良いのではないか。その際に、太陽電池が公的支援に頼らず、自立して普及する「普通のエネルギー」になった事実を、国民に対してアナウンスしたほうが良いと考える。

- 現在、2兆円にもものぼる賦課金は、これまでの高かった太陽電池発電電力の買取価格が20年間有効であることによる。これが、今後どのように変化して、何年にゼロになるか明確に国民に示したほうがよい。
- 太陽電池の価格は、我が国が決められているのではなく、一部の海外企業による結晶シリコン太陽電池の大量生産による価格低下によって事実上決定されている。それに追随せざるを得ないのは、我が国の太陽電池は、国際競争力が劣っていると言わざるを得ないのではないか。いかにして国際競争力を確保するのか、その方策を示すことが必要ではないか。例えば、「安かろう悪かろう」ではなく、信頼性（30年稼働保証）による競争力確保、蓄電池と組み合わせたトータルシステムとしての信頼性、10%の設備稼働率を向上させる本質的方法の導入（変動太陽光に対する発電量最大化の技術（AI等による予想？）、等、アイデアは多く考えられるのではないか。変動する太陽光をいかに使いこなすかを示すことが、今後の国際競争力のキーになるのではないか。
- NEDOプロジェクトにおいて、コスト低減が可能と証明されても、その後は、各企業の経営判断、投資戦略が、本格的普及、国際競争力を決めてしまう。それは、資本主義の原理に沿ったことであるが、その山をどのように越えるかの方策が示されていないため、国際競争力の獲得という最終目標に達していない。一部の海外企業は、資本主義の原理に基づかない巨大な国家投資によって国際競争力を得ている。しかし、私は、それにもかかわらず、我が国の企業が国際競争力を獲得する方策はあると考える。私は、経済学は専門外ではあるが、米国で宇宙開発が民間に払い下げられて大きな成果をあげている例から、民間のダイナミズムを解放することは、すなわち、本当に儲かるという非常に強い動機を民間にもたらすことは、国家がイニシアチブを取る方法よりも本質的に優れていると考える。明治政府はそれを行っていたのではないか。例えば、国家で立ち上げ、それを民間に払い下げるようなドラスティックな方法も考えて良いと思う。
- 国内の国産太陽電池シェアが低下していることを懸念する声があった。国内の価格競争力の低下の原因は何か見極め、直視して対応する必要がある。安い海外製パネルの流入等の、国際競争力の不足が原因であるならば、どのようにすれば克服できるのか本質に立ち戻って対応することを勧める。考えられる解決策を列挙する。コストペイバックタイムを本質的に下げ、太陽電池を設置することで消費者が本当に儲かるようになれば、自動的に普及するはずだから、それを国産で実現する。特に、蓄電池との併用でのコストペイバックタイムを低下させる。災害時、電力が確保できる住宅の供給を強力に行う。意匠性の不足で設置されない新築が多く、屋根一体型で太陽電池が設置されていないように見えるデザインを開発する。
- 新市場への展開は極めて重要であるものの、海外製も含めて既存のシリコン系太陽電池との競争を考えると、大量導入という観点からは、期待される規模の市場を開拓できるか否かについては議論を要する。その意味では、研究開発費の妥当性を適切に判断する

ことは難しい。

- 非常に多くの企業、研究機関、大学が参加しており、低コスト化、高効率化の実現に向け、それぞれの成果がどのように貢献しているのか、全体としてのまとまった成果が見えにくい。
- 高性能化（変換効率向上）によるコスト低減は直接的にわかりやすいが、高信頼性を実現した結果、コスト低減にどのように反映されるかをもう少し具体的に示していただけるとよかった。

2. 2 研究開発マネジメントについて

2020年までに14円/kWh、急激な市場価格低下に追随して2025年まで5年前倒しされた7円/kWhの目標は適切であり、中間評価の提言等を踏まえた有望なテーマへの財源集中や体制見直し等が最終的に優れた成果を生み出す原動力になったと考える。

また、各分野の製品化の核となる企業が選定され、基礎研究能力が必要なペロブスカイトとⅢ-Vにおいては大学、公共研究機関が適切に配置され、目標達成のための効率的な産官学の体制が構築されていた。更に動向調査を踏まえて車載やビル壁面等、新市場となり得る領域に関する検討を推し進めた点は評価できる。

一方、低コスト化については、発電コストという明確な目標を設定した事は大きな意義があったが、モジュールのkW単価を目標値の設定に加えるなども有効と考える。

今後に向けては、世界的な情勢が激変、かつ、変化が加速しており、我が国の国際競争力を確保するためにも、今後を見通した新たな目標、ロードマップを再設定するなど、柔軟な姿勢で新しい方策を取り入れて行くことも必要と考える。

<肯定的意見>

- ・ 目標の妥当性：2020年までに14円/kWh、2025年までに7円/kWhの目標は、市場動向に素早く追随して設定されており、適切であったと判断する。
- ・ 計画の妥当性：開発スケジュールは開発状況によって前倒しされるなど、適切に運用されている。また、中間評価の提言を踏まえて、資源を集中する要素技術が明確になり、そこに研究開発費が集中投資されており、これが最終的に優れた成果を生み出す原動力になったと考える。
- ・ 実施体制の妥当性：我が国の各分野の製品化の核となる企業が選定され、基礎研究を遂行する大学等が適切に配置されており、目標達成のための効率的な体制が構築されていた。特に、企業側の事業化能力は卓越したものと感じた。ペロブスカイト、Ⅲ-Vのような、まだ技術的に不明な部分が多く、基礎研究が必要な項目においては、大学、公共研究期間の基礎研究能力が生かされていると感じた。
- ・ 進捗管理の妥当性：特に、中間評価を踏まえて、体制の組み直し、目標の再設定が行われており、比較的上手に進捗管理が行われていたと判断する。7円/kWhの2025年への前倒しも適切であった。
- ・ 研究開発目標として、コスト目標を明示したことで、達成度が明確に判断できるようになり、また各プロジェクトもそれに応えるべく努力されて高い成果を得るに至っている。管理計画、実施体制、進捗管理も十分に機能したと考えられる。
- ・ 開発目標となる発電コストは、根拠が必ずしも合理的ではないかもしれないが、ハードルの高い具体的な数値があることで、プロジェクトに技術的な一貫性を与えるとともに、技術の進歩を促している。開発目標や計画は適切であったと言える。
- ・ 実施体制については、産官学の実施者がそれぞれの技術力を活かせる項目を担当し、目標達成に向けて連携して研究開発を実施できる体制となっており、妥当と考えられる。
- ・ 研究開発の進捗について、中間評価等による外部からの指摘や研究分野の動向など状況

に応じて、計画変更や加速予算の配分など適切に対応されている。

- ・ 知的財産については、各実施者において多くの特許が出願されているが、明確な戦略があるとは言えない。(実施項目、実施者も多いので、プロジェクト全体で一貫性のある戦略を立てるのは困難であるため、ネガティブに捉える必要はないと思われる。)
- ・ 国内市場を見据えた場合、2019年度 14 円/kWh、2025年度 7 円/kWh を目標としたことについては概ね妥当であったと考える。高効率化も重要であるが、海外製品の低コスト化のスピード、2050年の温室効果ガス排出削減目標を考慮すると、低コスト化について明確な目標を設定したことは大きな意義があった。その際、各種の太陽電池について同じ目標を設定したことで、それぞれの特長や課題が明確になり、今後の開発目標の設定において有用な情報が得られたのではないかと考える。また、中間評価において、開発内容が適宜見直されており、概ね適切に進捗の管理がなされている。
- ・ 事業化前提のシリコン/CIS系から、次世代向けのIII-V系/ペロブスカイト、共通的な測定や評価技術の開発等、いま求められる太陽光発電に関する研究が全て投入された内容となった。
- ・ 非常に多くの事業者・研究機関が参加しているが、全般的に技術開発に注力し、事業化に向けて努力されている様子を伺える。また、共通基盤技術として学術機関が開発した測定手法が、各パネル開発プロジェクトにフィードバックされるなど項目間連携も有効に機能したと推察。加えて、NEDO事務局がアプリケーション企業マッチングを支援した事例も見られ、研究のみならず事業化に向けたHUBとしても機能したものと考える。
- ・ 本事業は中間段階で、研究開発内容の確認と調整が行われたと認識。その段階で社会情勢の変化を織り込んだ投資調整が行われた。
- ・ 研究開発目標(7 円/kWh)は、太陽光発電事業に直結したわかりやすい設定であるとともに、研究開発計画はFITの実施による普及拡大と量産化効果によるコスト削減にもマッチした適切性が高く妥当な目標と考えます。
- ・ 将来的な基幹電源を目指す観点から7 円/kWhという研究開発目標は妥当である。途中段階で研究テーマを絞り込み、有望なテーマに財源を集中させたことは評価できる。特筆すべきは、動向調査を踏まえて、車載やビル壁面等、新しい市場となり得る領域に関する検討を推し進めた点である。特にまた我が国は自動車産業に強みを持っていることから、車載領域において世界を先導していくことが期待される。

<改善すべき点>

- ・ 目標の妥当性：目標が市場動向に追随して設定されているということは、市場の現実の方が、目標を追い越して早く動いたとも言える。結果的には、市場よりも早く、市場を牽引するような目標設定ができれば、より適切だったのではないかと。
- ・ 実施体制の妥当性：多くの大学を抱える開発の場合、研究を取りまとめる強力なリーダーシップが不可欠である。
- ・ 知的財産等に関する戦略の妥当性：知財取得が戦略的に行われているかどうかの、企業からの説明がなかったため、明確な説明をすべきである。

- ・ 海外市場を見据えた場合、発電コストの目標値の設定が妥当であったか否かについては疑問が残る。今回の設定において、国際的な市場をリードできるだけの高い目標になっているのか明確ではない。その意味では、様々な要因を考慮すべき発電コストを目標値として設定するのではなく、モジュールの kW 単価を目標値として設定すべきではなかったのか。kW 単価の目標値も併記されているものの、システム単価として記載されているため、発電コストの目標達成の要因に関して、本事業の寄与、すなわちモジュールの高性能化、高信頼化の寄与がどの程度であるのかが見えにくい。
- ・ また、様々な種類の太陽電池について同じ開発目標を設定したことは有意義であったものの、一方で現状の開発状況を踏まえると、Ⅲ-V族、ペロブスカイトについては、その特徴をより活かすための目標を設定してもよかったのではないかと。それぞれの太陽電池は、用途、普及の時期などで棲み分けできるものの、重複する部分も多々あり、市場導入が後発となるペロブスカイトなどについては、更なる低コスト化の目標を設定するなど、全体としての目標設定にメリハリがあってもよかったと思われる。一般的なシリコン系太陽電池が低コスト化、高効率化する中で、国内のように設置場所が限られるとは言え、200 GW 程度の導入量であれば現状の延長線上で実現できる可能性もある。そのような中で、軽量化などの付加価値がどの程度活かされるのか、市場の可能性についてもう少し具体的なイメージを示してもよかったのではないかと。
- ・ 本目標は技術によらない要素の影響も受けるものであり、進捗及び達成状況の客観的な把握にやや困難性があると考えます。目標の設定条件をさらに詳細に設定することが有効と考えます。
- ・ 研究開発項目と研究内容（各種太陽電池）が少し煩雑なので、俯瞰した図面などを利用して整理していただきたい。

<今後に対する提言>

- ・ 各企業の経営、投資戦略にまで踏み込んだ提言ができる体制に持つて行くことが望ましい。さらに進んで、国全体の投資戦略まで提言ができることが望ましい。
- ・ 太陽電池を取り巻く世界的な情勢が激変、かつ、変化が加速しており、今後を見通した新たな目標、ロードマップを早急に再設定することを勧める。その際、これまでの思い込みにとらわれることなく、柔軟な姿勢で、新しい方策を取り入れて行くことが、我が国の特色、国際競争力を確保するために必要である。例えば、自然エネルギー利用のトータルシステム、砂漠の安い太陽電池電力を利用した水の電気分解による水素確保とその輸入・使用方法の開発、太陽電池の宇宙設置をまず国が行い、それを最終的に民間に払い下げるなど。
- ・ 太陽電池だけでなく、風力、蓄電池、等の、自然エネルギー利用をトータルシステムで確保するようにできる、新たな目標、ロードマップを作成することを勧める。
- ・ 知財は、特許戦略を明確に持っていない大学が行うのではなく、経済情勢に直接さらされる企業が行い、将来の国際競争力が確保できる綿密な特許戦略に基づいて実行されるべきである。国内特許のみならず、国際特許においても実行し、国際競争力の増進に務め

るべきである。

- 太陽電池の低コスト化・高性能化は国際的な競争が激しい分野であり、内外の市場動向、研究開発状況については事業中も常にモニターして、見通しをアップデートしていくべきものとする。今回の最終報告でも、2014年の開始から終了の時点まで、当初の見通しについてもどう変化してきたのか分析があるとよかったと思う。
- 次世代太陽電池技術として、有機薄膜太陽電池も最近、再び効率が向上しており、NEDO事業の開発項目としても復活させるべきではないか。ペロブスカイトのように有害な重金属を使わないという点は、有機薄膜太陽電池の重要な点である。
- 国内において100GWを超える導入容量が実現するような状況では、全国の各電力エリアにおいて出力抑制が常態化すること予想される。そのような状況において、本事業で新市場として期待するような小規模な設備は出力抑制の対象外とすると、相対的に大規模な設備の出力抑制の頻度が増加する可能性があり、公平性の点で課題が生じる。一方で、小規模設備も出力抑制の対象となるのであれば、発電コストはさらに低い値を目標値とすべきである。今後の事業展開を考える上では、将来の電力需給を適切に想定し、太陽光発電の供給割合、必要な出力抑制量を評価し、新市場における太陽光発電の役割を適切に設定した上で、開発目標を設定する必要があるのではないかと考える。また、海外市場においても同様であり、電力需給における太陽光発電の位置づけを想定した上で開発目標を定める必要があろうと考える。
- 事業目標が2020年14円/kWh、2030年7円/kWhという発電コストとして設定されているが、コストは技術の達成度合いのみならず量産効果等シミュレーションの前提条件次第で大きく振れてしまう。一方で変換効率を追い求めても社会実装不適になる可能性もある。太陽光発電応用先のすそ野を広げるにあたり、応用先に応じて求められる品質もコストも異なることを考慮すると、目標設定も一律でなく想定応用先ごとに個別設定する必要があるのではないか。
- シリコン/CIS系に加えて、Ⅲ-V族系/ペロブスカイトと本事業では全方位的に開発を実施したが、特に次世代系については今後、各々得意・不得意が見えてきた時点で重みづけを調整する必要もあるのではないか。
- 目標が設定された2014年以降、日本のエネルギー政策には様々な変動があった。太陽光発電量の拡大が重視された当時に比べ、昨今は分散型エネルギー供給実現に資する太陽光発電ニーズが高まっているようにも思われる。5カ年のプロジェクトにおいて、中間段階で一度目標の再確認が行われたようだが、国内外の状況が大きく動いている本事業領域においては、適宜の目標確認と柔軟な取捨選択が求められるのではないか。
- 本目標は技術によらない要素の影響も受けるものであり、進捗及び達成状況の客観的な把握にやや困難性があると考えます。目標の設定条件をさらに詳細に設定することが有効と考えます。次期プロジェクトでは以上を踏まえたマネジメントをお願いいたします。
- 事業期間途中で新しい市場への導入可能性の検討を始めたため、研究期間の後半は、いずれの太陽電池もその領域を目指した開発が行われていた。今後はそれぞれの特徴に応じて、NEDOが主導して目標と計画を交通整理していただきたい。また、開発項目間に

おける積極的な情報・技術共有や項目横断的な研究開発も期待したい。

2. 3 研究開発成果について

いずれの太陽電池においても世界最高レベルの性能を実現しており、ほぼすべてのテーマで目標を達成している。将来への展開についても明確に方針を打ち出しており、研究開発成果は高く評価できる。特に、シリコン太陽電池のヘテロ接合バックコンタクト技術には、世界的にも競合技術に対する非常に高い優位性がある。CISなどは、搭載重量制約がある住宅・ビル壁面・車など新たな市場への軽量化モジュールの早期投入の見通しを示しており評価できる。また、ペロブスカイト太陽電池においては世界的にも高い信頼性を実現しており、劣化機構の解明が進んだ点も実用上重要であり評価できる。

今後には、ヘテロ接合バックコンタクト技術等の漏れなき特許化、一般向けのイベントを利用した積極的な情報発信を期待する。

<肯定的意見>

- ・ 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：市場のほとんどを占める結晶シリコンに関して、実用面積セル、モジュールで世界最高効率(26.6%)、理論最高効率を達成できたことは、非常に高く評価できる。バックコンタクトセルの技術は、専門家が見ても非常に美しく、世界的にも競合技術に対する非常に高い優位性がある。コストも目標をほぼ達成している。
- ・ 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：CISの効率も世界最高効率(23.4%)を達成しており、これは理論的に達成可能な効率からわずか3%低いだけである。コスト目標もほぼ達成している。世界的な競争力がある。
- ・ 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：III-Vにおいても世界最高効率 31.17%を達成したことは、高く評価できる。結晶シリコンよりも本質的な理論変換効率は高いのであるから、今後十分期待できる。
- ・ 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：III-Vは、本質的にタンデムに向いている。メカニカルスタック技術は非常に興味深く、理論的には50%を越える効率を目指しても良いと考える。また、GaAs ウェハ再利用率技術は、コスト低減の鍵となる可能性を感じさせる。
- ・ 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：ペロブスカイトは、19.2%という世界記録(19.7%：1cm²)に迫る効率を実現している。また、封止を完全に行うことによる、1年間の安定動作の実証によって、本質的には耐久性に問題がないことを示している。これらは、重要な成果として評価できる。共通基盤技術において、黒体輻射を光源に採用するのは、原理的に非常に理にかなっており、感銘を受けた。
- ・ 成果の普及：論文、学会発表、等で、学術的には成果発信が十分に行われている。
- ・ ほぼすべてのプロジェクトで目標を達成しており、また将来への展開についても明確に方針を打ち出しており、研究開発成果は高く評価できる。
- ・ 研究開発目標について、途中で計画変更となった項目はあるが、ほとんどの項目において目標を概ね達成できており、極めて高く評価できる。特に研究開発項目②では重要な技術成果が得られており、今後の太陽光発電技術開発において本成果の意義は高い。論

文、学会発表などは極めて多く、重要な技術に関する特許も適切に出願されていると判断できる。

- シリコン、CIS系薄膜の各太陽電池においてそれぞれ14円/kWhを達成し、さらにIII-V化合物、ペロブスカイトも含めて7円/kWh達成の見通しを得ており、大きな成果が得られたと言える。また、共通基盤技術についても、導入された太陽電池を有効活用するための様々な技術が開発されており、有意義な成果が得られている。論文当の対外的な発表も多数行われており、成果の普及に関しても適切に行われている。
- シリコン（ヘテロ接合バックコンタクト）については、10MW/年の量産レベルにて7円/kWhを実現する技術を検証できており、大きな成果が得られている。
- CIS系薄膜については、7円/kWh達成に向けた見通しが立っている状況とのことで、更なる技術開発を要するものの、当初の目標は概ね達成できたと言えるのではないかと。
- III-V化合物については、モジュール効率として30%以上の高効率化を達成し、システムコストで120円/Wを実現できる見通しを得たこと、車載の可能性を確認できたことなど、次のステップにつながる様々な知見、成果が得られた。
- ペロブスカイトについては、耐久性の向上、新しい製造プロセスの開発など、さらに実用化に近づく取り組みがなされた。
- 個別のテーマで差があるとは思いますが、総じて世界的に見ても高い水準での研究開発が行われ、一部テーマでは非常に高い変換効率を達成・実用化への道筋をつけるに至っている。当然、部分的には目標未達のテーマもあるが、開発自体は精力的に進められており、今後の更なる開発に向けた課題抽出に至っている。
- 建築物の屋根や壁用、車載用途等、新規市場開拓に資する成果を得たことは積極的に評価してよいのではないかと。
- 論文数861、新聞等への掲載766と対外的な発表は多数。また、比較的外国特許も積極的に取得しているように見受けられ、国際競争領域の成果としては有用と認識。
- 2020年における14円/kWhの達成やIII-V系、ペロブスカイトの量産化の見通しなど着実に成果を上げている。さらにFIT以降の新分野（建物壁面、重量制限のある屋根等）への展開可能性が見えたことも大きな成果と考えます。
- いずれの太陽電池においても世界最高の性能を実現しており、大部分の項目において最終目標を達成している点は大変評価できる。特筆すべき点は、シリコンヘテロジャンクションバックコンタクト型太陽電池セルで、当初の計画を前倒しして開発が進められ、製造技術の実証を追加項目として遂行したこと、重量の制約が高い新しい市場への軽量化モジュールの早期投入の見通しを示していること、ペロブスカイト太陽電池において世界の中でもかなり高い信頼性を実現していることがあげられる。
- また、性能向上だけでなく、劣化機構の解明が進んだ点も評価できる。劣化機構は様々な現象が複雑に関連しており、かつ効率という目に見える数字で成果が表れないが、実用上は重要な項目である。
- III-V太陽電池の研究開発において確立された、HVPE法による高速製膜、エピタキシャルリフトオフなどの技術は太陽電池のみならず、他の分野にも応用できる点は評価でき

る。

<改善すべき点>

- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：結晶シリコンのバックコンタクト技術に関して、他国にすぐ真似をされるような危険を回避できるような、特許等の手段を講じてあるのかどうかは、判断できないが、注意してほしい。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：CIS は、再結合を完全に抑止できるところまであと少しである。企業—大学が協力して、理論変換効率 28%に早く達してほしい。本太陽電池は、回収が必要である。回収コストの算出をより具体的に行うことが必要である。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：III-Vは、材料の価格が高い。今後、コスト低減する具体的シナリオの作成が必要と考える。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：ペロブスカイトは、イオン添加効果、劣化の原因、鉛フリーが可能か、といった、基礎科学レベルの課題を多く抱えている。まず、何が起きているか、原理から理解し、一つ一つ解決していく地道な努力が、まだ必要である。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：共通基盤技術は、これまでに何ができなくて、今回のプロジェクトで何ができたのか、国民に分かりやすく、明確に発信した方が良い。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：2025年の7円/kWhの達成の多くの前提として、20年の耐久性を30年に伸ばすことが行われているが、本当に30年の長きに渡って、一つの太陽電池が使われ続けるかどうかは、議論の余地がある。新しい技術の進展、家屋の建て直し、等によって、30年という設定が無意味になることも十分考えられると思う。必ずしも、消費者が購入する時点での価格に結びつかないこともありうるのではないか。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：コスト計算は、各要素の積み上げによって行われている。しかし、現実の市場では、コストは、需要と供給によって決まる。そのような、経済学的な観点に立ったコスト計算が不十分に思う。経済学専門家による分析、予想を綿密に行うことを勧める。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：新聞発表はある程度行われているが、一般国民に向けての成果発信は十分ではないと考える。
- 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義：知財取得をより増やし、企業が戦略的に行うことが必要である。
- 成果公開として、ハイランクな論文への投稿数なども明示してもらいたい。
- シリコン（ヘテロ接合バックコンタクト）については、建材一体型として、屋根材量削減分を含めての14円/kWhの達成であり、やや残念な印象である。
- CIS系薄膜については、7円/kWhの実現に向け、システムコストの削減（調達、製造、部材）による部分が大きく、これがどの程度の確度で実現できるのか不明。引き続き研

究開発を要する部分であり、今後に期待する。

- ・ III-V化合物、ペロブスカイトについては、新市場が CIS 系薄膜と重なる部分が多く、後発組としてどの程度の優位性があるのか、更なる検討が必要に感じられる。
- ・ 共通基盤技術のうち、特に屋外性能高度評価技術については、ユーザーを増やしていくことが重要と考える。その意味では、今回得られた成果を活用すると、導入された太陽光発電の保守管理がどのように効率化され、太陽光発電事業性の向上につながるのかについて、少し具体的な例を示すことができればよかったのではと考える。
- ・ 研究発表・講演の件数に比較して特許出願が少ないテーマがあることが気になります。知的財産化すべき技術が漏れなく特許化されるよう引き続きご検討をお願いいたします。

<今後に対する提言>

- ・ 結晶シリコンに関しては、技術的なハードルはほぼクリアできているのであるから、意匠等の工夫で、消費者に受け入れられやすい製品開発が、今後大事になってくると考える。企業の発想力が試されると思う。スマホが、半導体等の基幹部品、製品の統合（トータルシステム）、アプリ（ソフト）の層構造になっていることから考えて、太陽電池（基幹部品）も、トータルシステム、アプリ（ソフト）による制御、といった、層構造をよく考察し、全てを制覇することが必要と考える。
- ・ CIS は、結晶シリコンに比べて、市場占有度が低い。この原因が何か分析し、直視する必要がある。結晶シリコンだけでなく、競合材料があることは、競争によって市場価格をさらに下げる事につながると考える。実用太陽電池は、シリコンだけでないことを、国民に見えるように実際に示し、太陽電池の多様性の一步としてほしい。
- ・ III-Vは、市場参入のために、最初は、自動車積載、等を考えているが、本質的には新しくない。全く新しい発想による、市場開拓も考えた方が良いのではないか。例えば、研究項目にも記載されていたが、太陽光追尾集光型は、特殊用途でなく、マイクロレンズなどの現在の新しい技術と組み合わせることで、低価格で市場開拓できる可能性はないか。
- ・ 共通基盤技術は、国際スタンダードをどの国が握るかによって、その後の市場占有率を左右する意味合いも持つと思う。欧米とも共通化して、日本も含んだ国際スタンダードになるよう、努力を惜しんではならないと思う。また、変動する太陽光強度に追随する精緻な方法の開発につなげることで、太陽電池の設備稼働率を本質的に向上させ、この面から国際競争力を強化するアプローチも可能と考える。
- ・ 有機太陽電池は変換効率 17.4%に達しており、ペロブスカイトと遜色のないレベルに達しつつあり、20%はほぼ確実に突破できる目処がついている。非常にコストが安くなるのは自明であるので、再度チャレンジしても良い時期にきていると考える。
- ・ III-V、ペロブスカイト、という、新型太陽電池が、どのように市場に参入して行くのかというシナリオの検討が不完全であると思う。これまでの発想だけでなく、全く新しい自由なアイデアに基づく構想力を用いて、より真剣に検討することが必要と考える。
- ・ 成果の普及に関しては、国民に分かりやすい表現で、我が国の太陽電池の開発に大きな

進展があったことを、積極的に伝えることが大事と考える。例えば、「シリコン太陽電池において理論効率に到達」は、適切なキャッチコピーをつけ、記者会見等を開いて、印象的なマイルストーンとして伝えたほうが良いと思う。国民に対して、我が国の将来に希望が持てるようにできる、ポジティブな発信を常に繰り返し、行うことが必要である。国民全体の心が悲観的であれば、発展は望めない。その観点から、将来を悲観するようなネガティブな報道が蔓延している中、ポジティブな姿勢で、科学技術の成果と明るい希望を発信することが国の発展には必要不可欠と考える。

- 報告されているデータや数値は十分に競争力があるものと考えられるが、国際的な視野で他者の最新の成果を明示して、自己の達成度をベンチマークして示してほしい。
- それぞれ当初目標を概ね達成できているものの、引き続き研究開発が必要な部分も多い印象である。それぞれの特徴を踏まえて棲み分けを明確にし、全体としての市場拡大に寄与するような開発が継続されることを期待する。
- 本領域は欧米中でも研究開発を鋭意進める競争領域である、今後の世界市場で本技術開発成果の社会実装を目指す際には、世界市場に対する我が国の積極的な開発姿勢を PR することも重要と考える。そのためには、NEDO プレスリリースの英文版即時リリースや、国際会議・展示会での PR 積極支援等も視野に入れてはいかかがか。
- 新分野（建物壁面、重量制限のある屋根等）の検討につきましても、産官学横通しの体制により、事業状況をタイムリーにフィードバックしながら成果を上げるようお願いいたします。
- 劣化機構に関しては複雑な現象であるためユーザーに分かりにくい部分もあるが、得られた知見を専門家だけではなく、広く周知するための方策をぜひ考えていただきたい。
- 一般に向けた情報発信については、現状、個別のプレスリリース、特定のイベントにおける展示に留まっており、専門家以外に広く周知されているとは言い難い。今後は、2025年大阪万博など一般向けのイベントを利用した積極的な情報発信をお願いしたい。

2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

セル、モジュールなど要素性能の研究開発にとどまらず、新分野を含めた実用条件に基づいた実用化・事業化戦略が展開されている。企業ヒアリングなどにもとづいて国内における新市場の導入規模が試算されており、実用化・事業化に向けた取り組みがなされている。

結晶シリコンと CIS については住宅用、ビル一体型、車載といった実物ができていることから実用化については十分に可能性が高く、報告された大面積セル、モジュール技術から、量産化直前に達しており、事業化戦略も明確である。経済効果のみならず、自律分散型エネルギーシステム実現への貢献が期待される。

ペロブスカイトと III-V といった次世代太陽電池については実用化に資する要素技術はできてきており、基礎科学的理解も大きく進んでいる。

共通基盤技術開発では太陽電池データベースは十分な精緻さに達しており、測定技術に関してはガイドライン化・国際規格への展開等効果的に進めている点なども評価できる。

今後に向けて、国内設置可能量増大策の検討、新型太陽電池の市場参入計画策定、事業化に関する国の関与のあり方の検討、7 円/kWh の太陽電池実現による社会構造の大きな変革やそれに伴う雇用創出効果の積極的な評価などを期待する。

<肯定的意見>

- ・ 【研究開発項目①、③】 実用化は、住宅用、ビル一体型、車載と、実物ができており、事業化戦略は明確であると判断する。
- ・ 【研究開発項目①、③】 国内市場規模として、太陽電池設置可能量 300GW から考えて、十分市場価値がある。設置可能量を増やすアイデアも必要ではないか。例えば、メガフロートなど。ペイバックタイムを非常に短くし、消費者が賦課金なしで儲かるようになれば、一気に普及することが予想できる。
- ・ 【研究開発項目①、③】 報告された大面積セル、モジュール技術から、量産化直前に達していると判断する。
- ・ 【研究開発項目②】 実用化に資する要素技術はできてきていると思う。また、基礎科学的理解も大きく進んでいると思う。
- ・ 【研究開発項目④】 太陽電池データベースは、十分な精緻さに達していると判断する。
- ・ 成果の実用化については十分に可能性が高いと判断される。特に結晶シリコンの成果が著しい。
- ・ 各項目においてその研究フェーズに応じた計画が立てられており、成果の実用化・事業化に向けた戦略は妥当であると考えられる。また、成果の実用化・事業化に向けた具体的取組については、計画が明確に示されているとともに、それを実現するためのマイルストーンも明示されている。成果の実用化・事業化の見通しについて、研究開発項目①③では、屋根一体型のパネルなど、ユーザーに魅力的な製品が提示されている点は非常に評価できる。研究開発項目②において、特にペロブスカイト太陽電池の開発は着々と進んでおり、事業化への見通しは明るい。

- ・ 車載用太陽電池の実装、新しい分野への導入に関する企業ヒアリングの実施などにもとづき、国内における新市場の導入規模が試算されており、実用化・事業化に向けた取り組みがなされている。
- ・ 研究開発項目ごとの特性を踏まえた事業化戦略が設定されている。特に①・③については、経済効果のみならず、自律分散型エネルギーシステム実現への貢献が期待される。
- ・ 実用化・事業化に向けた実施者や計画は、①～③のパネル開発テーマについては各事業者が明確に設定。学術機関が主導する④については、発表後の成果の浸透は社会に委ねる面は否めないが、ガイドライン化・国際規格への展開等効果的な成果の出し方を検討している。
- ・ ①・③は事業化の見通しが立っており、事業実施主体の得意な領域での着実な社会実装拡大が期待される。②については実用に向けて更なる開発が必要で、現時点での想定アプリケーションは仮説の段階で、競合比較と比較した強みは不透明な状況と推察するが、実用化に向けた課題の絞り込みは本事業を通じて高度化したものとする。
- ・ セル、モジュールなど要素性能の研究にとどまらず、新分野を含めた実用条件に基づいた事業化、実用化戦略が展開されている。研究開発フェーズと実用化フェーズには数年のタイムラグが生じますが、常に次代の研究開発を継続することが有効と考えますので、継続的に開発を進めていただけますようお願いいたします。
- ・ 研究開発項目①、③については、シリコン、CIS いずれの研究項目においても、開発された技術が、随時量産プロセスに投入されるよう計画されている。特に、重量制約のある分野への事業化は早期に実現する見通しが示されており、大変評価できる。
- ・ 研究開発項目②のペロブスカイト太陽電池については、コスト低減のネックがどこにあるかが明確になっており、また、それを改善する見通しが示されている点は大変評価できる。
- ・ 研究開発項目④については、測定手順のガイドラインを纏めて発行するなど実用化に向けた取り組みが適切になされている。纏められた手順は国内外で有効である点、IEC規格への標準化について進めている点なども大変評価できる。

<改善すべき点>

【研究開発項目①、③】

- ・ メガソーラーへの応用に対する言及があまりなかった。
- ・ 事業化に取り組むものが、各企業なのか、コンソーシアムなのか、また、計画のマイルストーンはどうなのかに関して、経営判断、投資判断が関係するため、必ずしも明確に述べられていない。

【研究開発項目②】

- ・ 今後、今回開発した、どの要素技術が、本当に市場参入に結びつくのか、精密な考察が必要ではないか。
- ・ 効率、耐久性の保証ができるところまで突き詰め、コストをさらに下げる努力が必要である。

- ・ 【研究開発項目④】ユーザーが提供を求めてくるのを待つ、受身の姿勢ではなく、積極的に売り込むことが必要ではないか。
- ・ 【研究開発項目④】単なるデータ提供でなく、それをどのように使ったら太陽電池コストを下げられるか提案を行うフェーズになっているのではないか。
- ・ 研究開発マネジメントに関するコメントの繰り返しになるが、本事業で開発された太陽電池における軽量化などの付加価値がどの程度活かされるのか、市場の可能性についてもう少し具体的なイメージとして、例えば、現状のカーポートの何パーセントに対応する市場を見込んでGW分に相当するか等を示してもよかったのではないか。
- ・ 研究開発項目①、③については、「企業活動への貢献」をどのように評価するか、もう少し明確にしていればよかった。

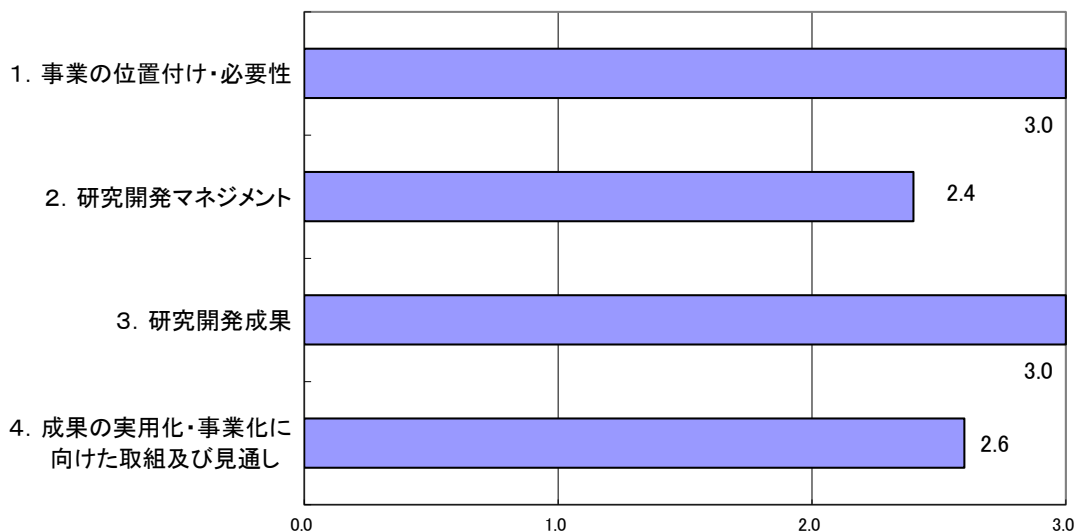
<今後に対する提言>

- ・ メガソーラーに関して、国際競争力が現在ないのかもしれないが、それを突破する提言があっても良いと思う。例えば、国内で本当に立地が難しいのか。環境問題があるのであれば、海上はどうなのか。山間部分散配置はできないのか。海外であれば、砂漠地域で2円/kWhであれば、水素変換も含めたパッケージとして提案できないのか。安全保障的に問題が多い中東ではなく、豪州等に提案できないのか。
- ・ 国内設置可能量を、アイデアを駆使して増大できるのではないか。
- ・ 7円/kWhが寿命の長期化で計算がされているため、30年間という長い時間で起こる、太陽電池の現在の技術の陳腐化等の、未来が予測できない。より深い考察が必要ではないか。
- ・ 事業化に関して、国が率先して国策として行うことも考えて良いのではないか。軌道に乗った段階で、民間に払い下げることを行っても良いのではないか。
- ・ コスト計算だけで、消費者が買ってくれるわけではない。大量生産によって、重要と供給の経済原理が働き始めれば、価格は下がる。それまでの立ち上げは、国策で強制的に行うことを勧める。
- ・ 市場ニーズに合わせるだけでなく、市場ニーズを生み出すような、アイデアが必要なのではないか。例えば、鉄道は周辺の住宅開発によって需要が増大した。例えば、太陽電池によって無料で電力を供給できる街を作って、需要創出するなど。
- ・ 【研究開発項目①、③】新型の太陽電池が、どのように市場参入できるのか、明確な計画を策定することが必要である。その際、車載のような、現在ある発想のみでは不十分ではないかと推定する。ただ、シリコン、CISに加えて、III-V、ペロブスカイトが参入し、市場で切磋琢磨すれば、価格はさらに下がることが予想できる。よって、特に、ペロブスカイトは、シリコン、CISに比べても、10分の1程度の格段に低い価格が要求されるのではないか。
- ・ 【研究開発項目①、③】これまでに得られた太陽電池の評価や日射量データベースは静的データであるが、これからは、動的データ活用ができるようにすることを勧める。すなわち、日射量(天候)、気温、その他の要因によって変動する太陽電池発電量を、任意

の地点で、時間単位、日、週スパンで予測し、設備稼働率を現在の10%から20%程度に向上させる取り組みはできないか。設備稼働率が低いのが、太陽電池の弱点であるので、それを2倍にできれば、太陽電池設備が2倍になったのと同じ効果が出ることになる。深く考えれば、アイデアはあるのでないか。

- コスト7円/kWhの太陽電池が実現した時点で社会構造の大きな変革も期待される。それに伴う雇用創出効果についても、各プロジェクトで積極的に評価をしてほしい。
- ペロブスカイト太陽電池において、鉛系材料を使用することについては、規制の面などクリアすべき点が多いと思われる。研究開発と同時に、この点についてももしっかり取り組むべきである。
- 太陽電池本体だけでなく、周辺機器、出力調整等の追加機能、流通・導入コストの削減の必要性も高い中、例えば軽量化、形状のフレキシビリティの高さなど、本事業で開発した太陽電池が、特に流通・導入コストの削減に対してどのように寄与するのかを調査し、システム全体としての市場性、事業性を詳細に検討していただきたい。
- 既に検討が開始されておりますが、蓄電池と組み合わせたシステム化や電力系統も含めた需給の安定化など、太陽光発電のさらなる普及に必要な広範な技術の検討も併せて実施できればさらに有効かと考えます。
- 研究開発項目②のⅢ-V太陽電池については、本事業において開発した技術を生かした、他と差別化できる特徴的な事業化を期待する。
- 研究開発項目④についてはアプリケーションの開発など、よりユーザーフレンドリーなツールとなるような研究開発を期待する。

3. 評点結果



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	A	A	A	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性について	3.0	A	A	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.4	A	A	A	B	B	B	B	B
3. 研究開発成果について	3.0	A	A	A	A	A	A	A	A
4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	2.6	A	A	A	B	B	A	B	B

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算し算出。

〈判定基準〉

- | | |
|--------------------|------------------------------|
| 1. 事業の位置付け・必要性について | 3. 研究開発成果について |
| ・非常に重要 →A | ・非常によい →A |
| ・重要 →B | ・よい →B |
| ・概ね妥当 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・妥当性がない、又は失われた →D | ・妥当とはいえない →D |
| 2. 研究開発マネジメントについて | 4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて |
| ・非常によい →A | ・明確 →A |
| ・よい →B | ・妥当 →B |
| ・概ね適切 →C | ・概ね妥当 →C |
| ・適切とはいえない →D | ・見通しが不明 →D |

第2章 評価対象事業に係る資料

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「高性能・高信頼性太陽光発電の
発電コスト低減技術開発」

事業原簿
【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	--------------------------------------

—目次—

概要	v
プロジェクト用語集	x iii
I. 事業の位置付け・必要性について	
1. 事業の背景・目的・位置づけ	I-1[1]
1.1 事業実施の背景と事業の目的	
1.2 国内外の研究開発の動向	
1.3 技術戦略上の位置づけ	
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-2[1]
2.1 NEDO が関与することの意義	
2.2 実施の効果(費用対効果)	
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	II-1[1]
2. 事業の計画内容	II-2[1]
2.1 研究開発の内容	
2.2 研究開発の実施体制	
2.3 研究開発の運営管理	
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	
3. 情勢変化への対応	II-3[1]
4. 中間評価結果への対応	II-4[1]
5. 評価に関する事項	II-5[1]
III. 委託テーマの成果詳細と実用化・事業化見通し	
1. 事業全体の成果	III-1[1]
2. 研究開発項目毎の成果と実用化・事業化見通し	
(イ) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発III-2-(イ) -[1]
A 結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発 (株式会社カネカ)III-2-(イ)-A[1]
B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発 (シャープ株式会社)III-2-(イ) -B[1]
C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発 (京セラ株式会社)III-2-(イ) -C[1]
D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発 (ナミックス株式会社)III-2-(イ) -D[1]
E 赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発 (株式会社クリスタルシステム)III-2-(イ) -E[1]
F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築 (コマツ NTC 株式会社)III-2-(イ) -F[1]

- G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御（株式会社トクヤマ）
Ⅲ-2-(イ) -G[1]
- H CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発（ソーラーフロンティア株式会社）
Ⅲ-2-(イ) -H[1]
- I 低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-Junction (SSHJ)
 太陽電池の開発（パナソニック株式会社）
Ⅲ-2-(イ) -I[1]
- (ロ) 革新的新構造太陽電池の研究開発／
 超高効率・低コストⅢ-V化合物太陽電池モジュールの研究開発
Ⅲ-2-(ロ) -[1]
- A 低コストセル技術開発（東京大学、シャープ株式会社、産業技術総合研究所、
 大阪市立大学（再））
Ⅲ-2-(ロ) -A[1]
- B 低コスト化プロセス技術開発（産業技術総合研究所、東京農工大学、東京大学、タカノ（再）、
 シャープ株式会社、豊田工業大学、大陽日酸株式会社）
Ⅲ-2-(ロ) -B[1]
- C 低コストモジュール開発（シャープ株式会社、パナソニック株式会社、宮崎大学、
 豊田工業大学）
Ⅲ-2-(ロ) -C[1]
- D 超高効率セル開発（東京大学、埼玉大学（再）、シャープ株式会社、宮崎大学、産業技術総合研
 究所、電気通信大学、神戸大学）
Ⅲ-2-(ロ) -D[1]
- (ハ) 革新的新構造太陽電池の研究開発／
 ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発
Ⅲ-2-(ハ) -[1]
- A 塗布製造技術の開発（パナソニック株式会社）
Ⅲ-2-(ハ) -A[1]
- B 超軽量太陽電池モジュール技術の開発（株式会社東芝）
Ⅲ-2-(ハ) -B[1]
- C 低コスト R2R 太陽電池製造技術の開発（積水化学株式会社）
Ⅲ-2-(ハ) -C[1]
- D 高性能・高信頼性確保製造技術の開発（アイシン精機株式会社）
Ⅲ-2-(ハ) -D[1]
- E 高性能材料合成技術の開発（富士フイルム株式会社）
Ⅲ-2-(ハ) -E[1]
- F 基盤材料技術と性能評価技術の開発（早稲田大学、物質・材料研究開発機構（再）、
 神奈川県立産業技術総合研究所（再））
Ⅲ-2-(ハ) -F[1]
- G 新素材と新構造による高性能化技術の開発（東京大学、産業技術総合研究所（再）、
 九州工業大学（再）、東京工業大学（再）、京都大学（再）、兵庫県立大学（再）、
 熊本大学（再））
Ⅲ-2-(ハ) -G[1]

- (二) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発
Ⅲ-2-(ニ) -[1]
- A 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発
 (豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学)
Ⅲ-2-(ニ) -A[1]
- B 薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発 (産業技術総合研究所)
Ⅲ-2-(ニ) -B[1]
- C Cat-CVD など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発
 (北陸先端科学技術大学院大学)
Ⅲ-2-(ニ) -C[1]
- D CIS 太陽電池高性能化技術の研究開発 (産業技術総合研究所、東京工業大学、
 学校法人立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学)
Ⅲ-2-(ニ) -D[1]
- E 高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発 (産業技術総合研究所)
Ⅲ-2-(ニ) -E[1]
- (ホ) 共通基盤技術の開発 (太陽光発電システムの信頼性評価技術等)
Ⅲ-2-(ホ) -[1]
- A 太陽電池性能高度評価技術の開発 (産業技術総合研究所、電気安全環境研究所、
 岐阜大学、宮崎大学、東京理科大学、学校法人立命館)
Ⅲ-2-(ホ) -A[1]
- B 太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発 (産業技術総合研究所、
 デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社、東レ株式会社、石川県工業試験場、
 岐阜大学、東京農工大学、北陸先端科学技術大学院大学、電力中央研究所)
Ⅲ-2-(ホ) -B[1]
- C 太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発 (産業技術総合研究所、
 日本気象協会、東京理科大学、佐賀大学)
Ⅲ-2-(ホ) -C[1]
- D ZEB 適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発 (株式会社カネカ)
Ⅲ-2-(ホ) -D[1]
- E レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発
 (日清紡メカトロニクス株式会社、奈良先端科学技術大学院大学)
Ⅲ-2-(ホ) -E[1]
- (へ) 動向調査等
Ⅲ-2-(へ) -[1]
- A 太陽光発電開発戦略に関する動向調査 (みずほ情報総研株式会社)
Ⅲ-2-(へ) -A[1]
- B 発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査 (株式会社資源総合システム)
Ⅲ-2-(へ) -B[1]
- C IEA PVPS 国際協力事業 (株式会社資源総合システム)
Ⅲ-2-(へ) -C[1]

(ト) 高性能太陽電池製造技術実証

.....Ⅲ-2-(ト) -[1]

A 低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証 (株式会社カネカ)

.....Ⅲ-2-(ト) -A[1]

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価関連資料 (事前評価書)

概要

		最終更新日	2020年11月27日
プロジェクト名	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	プロジェクト番号	P15003
担当推進部	PM 新エネルギー部 山田 宏之 (2015年4月～2019年3月) PM 新エネルギー部 山崎 光浩 (2019年4月～) SPM 新エネルギー部 佐藤 剛彦 (2015年4月～2020年3月) PT 新エネルギー部 三宅 良英 (2016年7月～2018年6月) PT 新エネルギー部 加藤 研一 (2017年4月～2018年3月) PT 新エネルギー部 保田 淑晴 (2017年7月～) PT 新エネルギー部 竿本 仁志 (2015年4月～2017年3月) PT 新エネルギー部 小田 和彦 (2015年4月～2016年6月) PT 新エネルギー部 豊田 富美穂 (2015年4月～2017年3月) PT 新エネルギー部 佐々木 崇水 (2015年4月～2017年6月) PT 新エネルギー部 玉井 仁 (2018年7月～2020年6月) PT 新エネルギー部 國川 智輝 (2018年4月～2020年6月) PT 新エネルギー部 葛西 正 (2018年6月～2020年9月) PT 新エネルギー部 福嶋 清 (2019年10月～) PT 新エネルギー部 岩田 雅史 (2020年10月時点) PT 新エネルギー部 中西 直明 (2020年10月時点) PT 新エネルギー部 井川 博之 (2020年10月時点) PT 新エネルギー部 宮川 康陽 (2020年10月時点)		
0. 事業の概要	<p>本プロジェクトでは、太陽光発電開発戦略(以下「開発戦略」と言う)で掲げる発電コスト低減目標達成(結晶シリコン太陽電池、CIS太陽電池は2025年までに、他の太陽電池は2030年までに7円/kWhの実現)に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を行う。具体的には結晶シリコン太陽電池、CIS太陽電池、III-V化合物太陽電池、ペロブスカイト太陽電池などの開発に加え、高性能結晶シリコン太陽電池製造技術実証、太陽電池の共通基盤技術、開発動向及び市場動向調査、高性能太陽電池製造技術実証を行った。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>我が国のエネルギー安定供給の確保や、低炭素社会実現の観点から、再生可能エネルギーの導入拡大を進めることは非常に重要である。その一翼を担う太陽光発電に関しては、その特性を十分に理解し、また、その特長を活かした導入形態を模索していくことで、太陽光発電システムの適正な導入を実現し、エネルギー供給量を着実に拡大していく事が求められる。そのためには引き続き発電コストの低減を進め、太陽光発電産業の発展につなげることが必要である。一方で、発電コストが高い等の課題も指摘され、更なる技術革新が必要とされている。また、固定価格買取制度の効果で国内市場は急拡大しているが、今後、太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの普及がさらに進めば、賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれるとの指摘もある。将来の国民負担を軽減するためには、発電コストの低減は重要な課題である。こうした状況を踏まえ、NEDOは2014年9月に「太陽光発電開発戦略」を策定し、発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh(グリッドパリティ)、2030年に従来型火力発電の発電コスト並み、あるいはそれ以下に相当する7円/kWh(ジェネレーションパリティ)を掲げた。また、開発戦略では、その目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。NEDOは開発戦略の柱となる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに発電コスト7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指し、2015年から5年間のプロジェクトとして本プロジェクトをスタートさせた。</p>		

II. 研究開発マネジメントについて

<p>事業の目標</p>	<p>本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。ただし、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、国内外での競争力確保の観点から太陽電池のコスト低減と効率向上を急ぎ、日本国内における発電コスト7円/kWhの達成目標年を2025年に前倒しする。具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを十分に下回る太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとともに、2025年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。</p> <p>上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術を開発する。</p> <p>また、上記開発の進捗により、中間目標年までに多くの成果が生まれ、とくにヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等の高効率太陽電池の技術は確立しつつある。こうした高効率太陽電池は内外から高く評価されているものの、低コストでの製造プロセスにはまだ課題が残り、2025年の発電コスト目標達成には、技術的ブレークスルーが必要な状況である。そこで、高効率太陽電池の発電コスト目標達成をより強固なものとするべく、「高効率太陽電池製造技術実証」を行う。</p>						
<p>事業の計画内容</p>	<p>研究開発項目</p>	<p>2015fy</p>	<p>2016fy</p>	<p>2017fy</p>	<p>2018fy</p>	<p>2019fy</p>	
	<p>①、③結晶シリコン、CIS</p>	←				→	
	<p>② 革新的高効率(Ⅲ-V)</p>	←				→	
	<p>② 革新的低コスト(ペロブスカイト)</p>	←				→	
	<p>④ 共通基盤技術</p>	←				→	
	<p>⑤ 調査</p>	←				→	
	<p>⑥ 実証</p>				←	→	
<p>開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位: 百万円)</p> <p>契約種類: 委託(100%)、共同研究(2/3)、助成(1/2)</p>	<p>会計・勘定</p>	<p>2015fy</p>	<p>2016fy</p>	<p>2017fy</p>	<p>2018fy</p>	<p>2019fy</p>	<p>総額</p>
	<p>一般会計</p>	-	-	-	-	-	-
	<p>特別会計(需給勘定)</p>	4,568	4,852	4,345	4,431	2,906	21,102
	<p>増額予算</p>	-	-	-	-	-	-
	<p>総予算額</p>	4,568	4,852	4,345	4,431	2,906	21,102
	<p>(委託)</p>	3,575	3,664	3,245	3,172	2,436	16,091
	<p>(共同研究)</p>	993	1,189	1,100	1,069	375	4,725
	<p>(助成)</p>	-	-	-	190	96	286
<p>開発体制</p>	<p>経産省担当原課</p>	<p>資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課</p>					
	<p>プロジェクトリーダー</p>	<p>プロジェクトリーダーは設置せず、技術検討委員会におけるコメントをもとにNEDOがマネジメントを行った。</p>					
	<p>プロジェクトマネージャー</p>	<p>新エネルギー部 山崎 光浩</p>					

	委託先・共同研究先	(株)カネカ、シャープ(株)、ナミックス(株)、(株)クリスタルシステム、コマツ NTC(株)、(株)トクヤマ、京セラ(株)、ソーラーフロンティア(株)、東京大学、パナソニック(株)、(国研)産業技術総合研究所、豊田工業大学、大陽日酸(株)、電気通信大学、神戸大学、名古屋大学、名城大学、宮崎大学、東京農工大学、(株)東芝、積水化学工業(株)、アイシン精機(株)、富士フイルム(株)、早稲田大学、北陸先端科学技術大学院大学、明治大学、九州大学、東京工業大学、兵庫県立大学、立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学、(一財)電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、(一財)電力中央研究所、(一財)日本気象協会、佐賀大学、日清紡メカトロニクス(株)、奈良先端科学技術大学院大学、デュボン・スペシャルティ・プロダクツ(株)、東レ(株)、石川県工業試験場、東京農工大学、みずほ情報総研(株)、(株)資源総合システム
情勢変化への対応	発電コスト 14 円/kWh、7 円/kWh は調達価格等算定委員会でも価格目標として設定され、太陽光発電の固定価格買取制度からの自立が明確に求められるようになった。この状況を受けて、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池や CIS 太陽電池では、発電コスト 7 円/kWh の達成時期を 2025 年と従来よりも 5 年前倒しとする目標を設定した。目標達成を強固なものとするために、開発体制を強化する目的で対応する研究開発項目で追加公募を行い 2 件採択した。また、量産製造プロセスの課題の抽出および対策を目的とした実証事業を新設し 1 件採択した。また、これまで開発してきた高効率セルの小規模設備製造実証や、実用化を加速するための新たな市場の創出に向けて、BIPV(ZEB)、重量制限のある屋根、車載などのフィージビリティスタディを実施した。特に、車載に関しては、プロジェクト化へ向け太陽光発電システム搭載自動車検討委員会を創立して詳細な調査を実施するとともに、IEA PVPS Task17: PV and Transport の立ち上げ及び運営支援を行った。	
評価に関する事項	事前評価	事前評価 2014 年度 担当部 新エネルギー部
	中間評価	中間評価 2017 年度 担当部 新エネルギー部
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>研究開発項目①先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の開発</p> <p>1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発</p> <p>「高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶 Si 太陽電池の開発」においては、ヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池セルの低コストパターン形成技術開発、セル間配線技術などの実用化技術を開発し、結晶シリコン太陽電池セルとして世界最高のセル変換効率 26.7%を実用サイズ(セル面積 180cm²)で達成した。また、モジュールにおいても、結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高の変換効率 24.5%を達成した。発電コストに関しては、住宅用建材一体型モジュール前提で、2020 年度 14 円/kWh 実現の見通しを得た。また、2025 年に発電コスト 7 円/kWh 達成が可能であるとの見込みを得た。</p> <p>「高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発」においては、更なる低コスト化技術開発として、新規パターンニングプロセス及び新規界面清浄化技術を開発することで、セル変換効率 25.1% (156mm 角)、モジュール変換効率 22.1%を達成した。発電コストに関しては、2020 年度発電コスト 14 円/kWh 実現のためのプロセス開発を完了した。また、2025 年発電コスト 7 円/kWh 達成の定量的なシナリオを提示することができた。</p> <p>「低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発」においては、これまでに得られた成果をベースに、シードキャスト基板結晶成長中の温度制御最適化を実施した両面受光低コスト PERC 量産プロセスにおいて、受光面パッシベーション及びアニールの最適化により、セル効率 22.01% (産総研にて測定)を確認した。また、モジュール効率 20.1%で寿命 35 年以上の DH/TC 複合ストレス耐性を有することを確認した。発電コストに関しては、低コストセル技術の導入により 2020 年 14 円/kWh の実現が可能であることを確認した。また、2025 年 7 円/kWh 達成に向けて低コスト高効率モジュールの製造技術導入を進めるシナリオを提示した。</p> <p>「基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発」においては、n+層に対する接触抵抗 1.8mΩ cm²、p+層に対する接触抵抗 3.8mΩ cm²、電極形成による再結合 470fA cm⁻²を達成した。</p> <p>「赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発」においては、インゴット製造経費 850 円/kg 以下、ライフタイム 7397 μ sec で結晶欠陥および転位フリー、抵抗面内分布 10.9%以下、酸素成分濃度 6.9×10¹³atoms/cm³、炭素成分濃度 1.2×10¹⁵atoms/cm³のシリコン単結晶を開発した。</p>	

「高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築」においては、スライス時の欠陥評価手法と対処条件を構築した。高面品位スライス技術によりダメージエッチングを5 μ m削減可能であることを確認した。カーフロス60 μ mの加工技術開発を行い、市場量産と同等以上の生産性を確保する加工技術を構築した。さらに、カーフロス50 μ mの加工を先行評価し、加工可能であることを確認したほか、カーフロス40 μ mが可能となる固定砥粒ワイヤの製造を確認した。

「太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御」においては、太陽電池製造の熱プロセスで成長する酸素析出物の形態と数密度が、炭素不純物濃度と結晶成長条件により変化し、ライフタイムや変換効率に悪影響を及ぼすことを解明した。酸素析出物の形態と数密度を制御して高ライフタイムの単結晶インゴットを得るCZ法結晶成長技術を開発した。開発した結晶成長技術と炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用して得られた実用サイズのインゴットのライフタイムは、全長にわたって2000 μ sec以上を達成した。開発したインゴットは熱プロセス後のライフタイム低下が抑えられ、ライフタイム下限値を300 μ secとすると、インゴットの直胴良品歩留りが11.5%向上した。

「低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-junction (SSHJ) 太陽電池の開発」においては、Super Bifacial-SHJ (SBF-SHJ) でモジュール効率20.9%を実現し、2020年発電コスト14円/kWhを達成するとともに、2025年発電コスト7円/kWhを達成する見込みを得た。Super Back Contact-SHJ (SBC-SHJ) でモジュール効率22.0%超を実現し、2020年発電コスト14円/kWhを達成するとともに、2025年発電コスト7円/kWhを達成する見込みを得た。

2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

「CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発」において、世界最高変換効率22.9%を達成したCdSバッファCIS小面積セルの技術をもとに、光吸収層の品質改善技術及び光吸収層表面パッシベーション強化技術をさらに改良することに加えて、Cdフリーバッファ層の精密な最適化を行うことにより、変換効率23.4%を達成した。また、本変換効率を達成したCdフリーセル技術を適用したサブモジュール(70mm角)で変換効率20%の見込みを得た。発電コストに関しては、2020年度14円/kWh達成の見込みを得た。また、2025年に発電コスト7円/kWh達成に向けた定量的なシナリオを提示することができた。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1) 革新的高効率太陽電池の研究開発 (III-V化合物)

「低コストセル技術開発」では、コロイドリソグラフィ+ドライエッチングによる裏面テクスチャ形成を、薄膜2接合セル(InGaP 300nm/GaAs 600nm)に適用し、裏面ミラーの場合に比べて主にGaAsの光吸収を増大することによりJsc 40%増加を確認した。光閉じ込めにおいて、エピタキシャル最下層への裏面反射構造の導入、サブセルベース厚さの適正化によるエピタキシャル層の薄層化、バッファ層の薄型化を組み合わせるIII-V薄膜3接合セルで総膜厚1/2(従来比)で従来と同等の電気特性を確認した。シリコン上III-Vセルでは、化合物2接合(InGaP/GaAs)とSiセル(バックコンタクト型)とを透明樹脂層を介して接合した4端子セルで変換効率33.0%を達成した。スマートスタック技術(Cu接合)を適用したGaAs/Si系で素子寿命30年以上および実用的な耐久性を実証した。

「低コスト化プロセス技術開発」では、開発した自動装置で4インチウェハを20mm/hで安定的にクラックレス剥離ができることを確認した。また、10回基板利用で電気特性の維持率95%以上、歩留り81%を達成した。全面観察装置を開発し、1時間以内の4インチウェハ非接触スキャン、さらに検出された異常点の分類判定の正答率98.5%を達成した。MOCVDによりGaAs製膜速度120 μ m/hを達成、InGaP製膜速度30 μ m/hを達成した。単セルの変換効率は、それぞれ、24.5%(p on nセル)、15.3%と目標を達成した。また、これらの成果を組み合わせた2接合セルで効率22.3%(反射防止膜で効率約28%見込み)を達成した。HVPEによりGaAs製膜速度170 μ m/h、InGaP製膜速度24 μ m/hを達成。単セルの変換効率は、それぞれ、22.4%、13%を達成した。これらの成果を組み合わせたInGaP/GaAsタンデムセルの開放電圧2.32V、変換効率21.8%を実現した。

「低コストモジュール開発」では、実用セルサイズの非集光・逆積み3接合型モジュールで世界最高となる31.2%の変換効率を達成した。また、モジュール面積当たりの月積発電量で対Si 151%となることを実証した。集光型では、低コスト構造の1m角プラスチックレンズ一体型パネルで変換効率32.2%を達成し、IEC62108準拠の信頼性試験をクリアしたことを確認した。また、2030年時点で、システムコスト119円/W(100MW/年生産)と発電コスト7円/kWhの実現見通しを得た。無追尾低倍集光モジュールで変換効率32.8%を確認した。低コスト化に向けた基盤技術として反射防止コート的设计最適化により効率2.52%向上を達成した。また、非集光III-V族多接合型太陽電池モジュールを含む他接合型太陽電池の屋外での発電動作が、気象条件、特に太陽光スペクトルの影響を強く受けることを、実証データをもとに世界で初めて明らかにした。さらに、各種太陽電池の実動作データをもとに、発電量シミュレー

ションモデルを構築し、全国837箇所における各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量予測が可能となった。

「超高効率セル開発」では、電流整合を満たすGaInNAs:Sbセルを開発し、非集光逆積み型GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb格子整合系3接合セルで変換効率30.3%(1 Sun)を達成した。GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セルの開発に国内で初めて成功(ウエハ接合)した。また今後の課題を明らかにし、50%達成に向けた見通しを得た。量子ドット中間バンドセルでラチェット構造により中間バンド内電子の長寿命化(100 nsec)を実現、室温でサブバンドギャップ光励起強度によって80%のキャリア引出効率を達成した。開発した集光型低電流・高電圧型量子ドットセルにおいて効率32.1%(225 Sun)を達成した。

2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発 (ペロブスカイト)

「塗布法によるペロブスカイト太陽電池の開発」では、大面積均一インクジェット塗布を用いて30cm角サイズのモジュールで世界最高効率17.93%(AIST測定)を達成した。太陽電池セルのペロブスカイト膜の組成制御と界面修飾で高温高湿試験、光照射安定化試験の品質規格の要求事項を達成した。モジュール高効率化、プロセスタクトの短縮、設備コストの低減の可能性を確認し、モジュール製造コスト15円/Wの指針を得た。

「超軽量太陽電池モジュール技術の開発」では、従来困難であった大面積化と高効率化の両立を実現し、面積703cm²のPENフィルム基板モジュールで変換効率14.1%を実現した。ガラス基板(27×29cm)では変換効率16.1%を確認しており、PENフィルム基板モジュールへの展開を進めている。耐久性に関しては、Mixペロブスカイトを採用した5cm角フィルムモジュールで光照射500時間に対し、400時間まで相対効率低下10%を確認した。また、耐熱試験1000時間に対し、550時間まで相対効率低下10%を確認した。

「低コストR2R太陽電池製造技術の開発」では、3cmフィルム基板セルで変換効率13%を達成し、JIS規格C8381準拠の耐久性試験5項目で相対低下率10%以下を達成した。また、オールR2Rプロセスで作成した30cm角フィルム基板モジュールで変換効率11.4%を達成した。量産時5円/W以下が達成可能な内製バリアフィルムにより耐湿熱試験(85℃85%)1000hで相対変換効率低下率10%未満を達成した。

「高性能・高信頼性確保製造技術の開発」では、小面積セルでの変換効率18%の構成において、100mm角で17.04%、240mm角で16.12%の変換効率を有するモジュールを実現した。従来の金電極に対して低コストのカーボン系塗布材料で組成と工法を改良し、金電極でセル変換効率16.51%の構成において、カーボン電極で16.22%を達成した。従来の材料(Spiro-OMeTAD)に対して低コストな有機系新ホール輸送材を開発し、Spiro-OMeTADでセル変換効率18.7%の構成において、有機系新ホール輸送材でセル変換効率18.2%を達成した。耐久性に関しては、カチオンサイト、Brレス・ペロブスカイト層、ホール輸送材の最適化により、光作動耐久性向上(400hrで初期性能の77%を維持)を確認した。

「高性能材料合成技術の開発」では、耐湿性低下の原因となるドーパントを必要としない正孔輸送材料骨格を見出し、新規正孔輸送材料を用いたセルでSpiro-MeOTADを用いたセルと同等以上の変換効率に到達した。吸収長波長端750nm以上を満たしつつ、変換効率の低下なくペロブスカイト膜の耐湿性が向上するペロブスカイト表面処理技術を見出した。上記の新規材料を用いて最大変換効率14.6%を確認した(同条件におけるSpiro-MeOTAD:ドーパント有りの変換効率14.2%)。

「高機能材料・セル製造技術開発」では、低コストかつ長寿命HTMで、材料コスト80円/m²(層厚み50nm)、酸化剤ドーパントフリーのHTM組成を確立した。また、上記HTMとペロブスカイト界面制御の組み合わせにより変換効率22%超を実現するとともに、25%に向けた手順を提示した。製造工程簡易化によるコスト低減を目的とした一段塗布用インキの簡便なバーコート法で変換効率17%。スピコートで変換効率17%を確認した。逆型構造セルを開発し連続光照射1,000時間超の耐久性、85℃耐熱性500時間を達成した。性能評価法の確立に関しては、MPPT法、Dynamic I-V法、Reduced Span I-V法と3種類の測定法を提案し、測定条件の最適化によりヒステリシスの影響を解消できることを実証した。

「新素材と新構造による高性能化技術の開発」では、ペロブスカイト層へのカリウム添加によるI-Vヒステリシス低減効果が様々な組成に有効であることを見出した。また、1cm²セルで変換効率21.65%、3直列モジュール(2.76cm²)で20.7%を達成した。ペロブスカイト単結晶試料の構造と物性を検討し、励起子の特殊性を明らかにした。複数の結晶相が混在し、自発的に超格子を形成していることを見出した。劣化要因となるMAを含まないペロブスカイトでカリウムとセシウムを適切に添加し不純物を制御することにより、セル変換効率21.9%を達成した。高電流化を狙った錫/鉛混合ペロブスカイトでJ_{sc} 33.1mA/cm²、V_{oc} 0.8V、セル変換効率20.4%を達成した。100円/m²以下無機系ホール輸送材NiO_xを用いた逆構造型セルで効率19.6%を確認した。混合カチオン型(Cs_xMA_yFA_zPbI_aBr_b)用の前駆体材料FAPbI₃(dmf)₂を開発し、これを用いてV_{oc} 1.21V(電圧ロス0.38V)のセル、変換効率22.2%(J_{sc} 25.2 mA/cm²、V_{oc} 1.11 V、FF 0.793)のセルを得た。電圧ロスが小さい理由として、Agingにより正孔輸送層で

の酸化が進行し、伝導度が向上するとともに、HOMO準位がより深くなることを明らかにした。カリウム添加ペロブスカイト太陽電池のBr比制御によるEgグレーディングの最適化を行い、表面側Egが1.61eV(Br比=0.15)、裏面側Egが1.48eV(Br比=0.00)の時に効率が最も高くなる(25.2%)ことを明示した。PbSn系ペロブスカイト太陽電池のSn/(Pb+Sn)比制御によるEgグレーディングの最適化を行い、表面側Egが1.47eV(Sn比=0.07)、裏面側Egが1.33eV(Sn比=0.38)の時に効率が最も高くなる(25.5%)ことを明示した。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」においては、p型単結晶PERCセル効率20.0%、n型単結晶Bifacial PERTセル効率21.0%を達成した。開発したPERTセルプロセスはp型n型両方に適用可能であることを確認し、高効率拡散系セルプロセスを確立した。SHJセル効率23.2%、pseudo Eff. 24.3%を達成して高効率ヘテロ系セルプロセスを確立するとともに25%達成の目途を得た。複数の企業や大学、研究機関等と連携してモジュールを試作・評価できる体制を構築。PIDやLeTIDといった新しいモジュール劣化現象の原因とメカニズムの解明に貢献した。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」においては、株式会社トクヤマと共同で、 $10\text{--}20\ \Omega\cdot\text{cm}$ で18 msec、 $1\text{--}2\ \Omega\cdot\text{cm}$ では全長の95%以上の領域で2 msecを超える高ライフタイム結晶の成長に成功した。発光活性化PLにより従来困難であった 10^{14}cm^{-3} 以下の低濃度測定法を開発した。また、 10^{12}cm^{-3} の定量の可能性を見出した。ダイヤモンドワイヤーでスライスした基板の目視できない欠陥のPLイメージングによる可視化し、セル特性への影響を明らかにした。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」においては、p型基板では5msec、n型基板では10msecのバルクライフタイムを実現した。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」においては、アモルファスシリコンを用いたヘテロ接合型太陽電池において、開放電圧0.740 V以上、変換効率23.2%に貢献した。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」においては、ライフタイムの温度依存測定による界面のバンドオフセット評価手法を確立した。FTS法によるi-a-Si:H層(5 nm)により、 $J_0=4.6\text{ fA/cm}^2$ を達成した。堆積速度は約15 nm/minである。このi-a-Si:Hを用いたシリコンヘテロ接合太陽電池(p、n層はプラズマCVD製膜)を作製し、変換効率17.4%($V_{oc}=0.679\text{ V}$, $J_{sc}=35.0\text{ mA/cm}^2$, $FF=0.732$)を得た。電子選択コンタクトとしてSiドープnc-GaNの形成を試み、結晶性が高く電気的特性の良好な膜の形成に成功した。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」においては、裏面パッシベーション膜により $J_{0\text{rear}}$ を 260 fA/cm^2 削減可能なプロセスを開発に成功し、かつエミッタプロファイルの数値シミュレーションより、 $J_{0\text{front}}$ を 50 fA/cm^2 削減しうるプロセスを明らかにした。6大学コンソーシアムにおいてシリコン単結晶の高品質化が行われ、 $J_{0\text{bulk}}$ の大幅な削減(100 fA/cm^2 以上)に成功しており、全ての技術を組み合わせることにより、最終目標を超える J_0 の削減が可能となった。

「薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発」においては、板厚50 μm 級の極薄ウエハを用いたSHJセルを開発し、世界トップレベルの変換効率22.0%(4cm^2)を達成した。スクリーン印刷などの低コストプロセスを用いて、両面受光-裏面電極(BC)型セルの効率向上を図り、変換効率22.3%を達成した。任意の波長で内部量子効率のマッピングが可能な内部量子効率マッピング法を新規に開発し、BCセルの電気的遮蔽損失領域の同定に成功した。高信頼性化技術については、PCTによる湿熱劣化の信頼性試験により、インターコネクタに沿った劣化モードを見出し、その劣化メカニズムを初めて提案した。

「Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発」においては、裏面電極型Siヘテロ接合太陽電池の光入射側表面にCat-CVD窒化Si膜を堆積し、開放電圧730mV以上、変換効率24%以上に貢献した。非質量分離型プラズマイオン注入によりp型a-Siをn型に反転する技術を確立した。また、イオン注入により一旦低下するパッシベーション性能を、事後のアニールで回復できることを見出し、その機構が、Pとともに注入されたHによる欠陥終端であることも明らかにした。この方法で形成したn型a-Siを用いた太陽電池の動作も確認した。

「高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発」においては、シリコンヘテロ接合太陽電池において、ナノ結晶シリコン薄膜をパッシベーションコンタクト材料に適用したものにすることにより、ナノ結晶を用いないベンチマークセルに比べ短絡電流密度の2.1%向上、変換効率23.5%を達成した。また、 TiO_x が結晶シリコン太陽電池の電子コンタクトとしてのみならず、正孔コンタクトとしても機能することを実セルで初めて実証した。従来のアモルファスシリコン p-i層を TiO_x に置換することで J_{sc} を4.1%改善し、解放電圧0.700Vを確認した。

2) 高性能CIS太陽電池の開発

「光吸収層の高品質化によるCIS太陽電池の高効率化」においては、三段階蒸着製膜CIS光吸収層における銀 (Ag) やアルカリ金属添加、およびバンドギャップグレーディング制御、熱照射処理により変換効率向上を実現した。これにより、世界最高水準の変換効率22.2%を確認した。

「界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化」においては、CIS太陽電池のpnヘテロ接合界面に価電子帯オフセット ΔE_v を設けることにより界面再結合電流の抑制が可能であることを指摘した。 ΔE_v を形成する層としてCu欠損層を用いることにより、開発開始時の開放端電圧Vocを+30mV増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 26.3 \text{ mW/cm}^2$ を実現、最終目標を達成した。さらに、3段階法におけるCu欠損層の成長モデルを構築した。

「バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発」においては、CdフリーかつオールドライプロセスのMOCVD-(Zn, Mg)O:B/sp-(Zn, Mg)O/CIS(Cs処理)構造で、従来構造よりも30mV高いVoc、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値は29.0mW/cm²を達成した。また、従来のウェットプロセスを用いないオールドライプロセスで、世界で初めて変換効率22%を超えるCIS太陽電池を実現することに成功した。

「エピタキシャル成長を利用したCIS太陽電池の高効率化指針の解明」においては、エピタキシャル製膜の下地となるMo薄膜について、低温バッファ層を導入した新規スパッタ法を開発し、Mo薄膜のエピタキシャル成長に成功した。新たに開発した高温3段階法でMo/サファイア基板上にエピタキシャルCIS薄膜を作製し、キャリアライフタイム τ_2 100ns以上(300K)を達成した。

「結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援」においては、アルカリ処理CIS試料の深い欠陥準位の相関を示し、バルク改質 (アンチサイト欠陥の密度低減) の効果があることを確認した。また、バルク再結合成分が減少し、開放起電圧が改善することを、再結合解析より定量的に明らかにした。放射再結合定数の再計算とシミュレーションを組み合わせ、25%の達成に必要な開放起電圧 (欠陥準位) について明らかにした。非輻射再結合損失に加え、 J_{sc} 損失の低減が不可欠であることを示した。

「積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発」においては、電子構造の深さ方向プロファイルを評価するための技術として窓層/バッファ、バッファ/CIS層界面形成、CIS/Mo界面露出、「その場」アルカリ処理技術を開発した。それらと電子分光法による評価の結果、バッファ/CIS界面のバンド接続がほぼ理想的であること、この界面の拡散電位がアルカリ処理により増大し、処理による開放電圧の増大に対応すること、三段階法、SAS法共に高性能電池のCIS層内、Mo側にバンドギャップ二重傾斜、Back Surface Fieldが存在することを明らかにした。一方、窓層/バッファ、CIS/Mo界面の電子接続には効率向上に向けて改善の余地が残されていることを示した。

「理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究」においては、 $\text{Cu(In, Ga)(S, Se)}_2[\text{CIGSSe}]$ 系化合物半導体の禁制帯幅やバンド構造 (価電子帯上端[VBM]と伝導帯下端[CBM]の準位)のGa/(In+Ga)比とS/(S+Se)比をパラメーターとした3次元マップを作成し、 CuInSe_2 のGaやSの固溶効果を明らかにするとともに、高効率太陽電池の光吸収層の深さ方向の組成分布や粒界構造モデルを提案した。深さ分解XAFS法を用いて、高効率太陽電池に用いられているCs処理は、表面だけではなく薄膜内部に与える効果で変換効率の向上に寄与していることを示した。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発 (太陽光発電システムの信頼性評価技術等)」

「新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発」ではペロブスカイト、新型CIGS時定数、新型結晶Siを含む各種新型太陽電池で高精度性能測定技術の開発・実施・実証を行った。また、屋外測定再現性±1%以内の目処を得た。各種モジュールで連続検証中。ストリング評価への応用検討を開始した。「新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発」では結晶シリコン太陽電池の経年劣化を、屋外データと室内データを用いて検証した。劣化の主要因は、ヘテロ接合系では開放電圧の減少、バックコンタクト系では高電位のモジュールにおける電圧誘起劣化であることを見出した。「太陽電池モジュールの劣化現象の解明、加速試験法の開発」では長期屋外曝露モジュールでの酢酸による劣化機構が、加速試験同様、電極腐食にともなう電極直下のギャップ形成と、電極直下に残留した銀ピラーの整流性への特性変化の二段階で進行することを見出した。

「ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発」では新規に開発した温度サイクルに関する加速負荷試験 (ATC試験) によって半田接続部の剥がれやタブ配線断線といった長期信頼性上リスクのある劣化モードも加速され、試験時間として8分の1以下に短縮可能である事を見出した。

	<p><u>研究開発項目⑤「動向調査等」</u></p> <p>「太陽光発電開発戦略に関する動向調査」では、第5次基本計画に掲げられた再生可能エネルギーの「主力電源化」に向けて太陽光発電開発戦略の改訂が緊急の課題であるとの認識から、有識者による「太陽光発電技術戦略委員会」を立ち上げ、太陽光発電の価値・付加価値、太陽光発電の市場創出の可能性等の情報収集・分析を行うと共に、「太陽光発電開発戦略」の方向性を検討した。検討を踏まえた「太陽光発電開発戦略」を推進するべく、市場動向、システム価格や発電コストに関連する各種情報を収集し、最新の発電コストの試算および感度分析を行った。また、制度動向、技術動向、経済性評価（グリッドパリティ等）の情報を調査し、太陽光発電の2050年に向けた導入量を定量的に分析した。今後市場の発展が見込めるアプリケーションとして検討を開始した「太陽光発電システム搭載自動車」の意義、市場動向を調査し、時間帯別の日射量・走行パターンを想定した太陽光発電システム搭載自動車によるCO2排出削減効果の試算を行った。また、太陽光発電搭載自動車に関する国際的な展開として、IEA PVPSにおけるタスク17：PV and Transportの立ち上げ及び運営支援を行った。</p> <p>「発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査」では、太陽光発電システム設置価格とその内訳について調査・分析を行うとともに、世界における太陽電池モジュール技術および産業の現状を調査し、代表的な太陽電池製造企業の事業内容の整理および比較を行った。また、太陽電池モジュールの長期信頼性に関する研究開発動向や国際標準化について調査した。更に、「太陽光発電開発戦略」の改訂に対応するべく、太陽電池モジュールの利用動向と今後の市場と産業の可能性に関して調査した。海外主要国における太陽電池の研究開発動向を調査し、各国の太陽電池技術開発戦略を体系的かつ明確に比較・分析できるよう、その枠組み、予算配分、目標等の比較を行った。特に、新たな太陽電池技術として、量産製品における技術トレンド、ペロブスカイト太陽電池等の研究開発動向と実用化に向けた各機関の取り組みや開発ロードマップ等を調査した。</p> <p>「IEA PVPS国際協力事業」では国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた諸外国の技術開発動向や政策動向、市場動向等に関する調査・分析を実施した。具体的には、タスク1専門家会議、ワークショップ等への参画を通じて、各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。また、各種ワークショップにおいて日本の動向について講演を行い、加盟国間の情報交換に貢献した。また、日本のタスク1に関わる調査を実施し、報告書をIEA PVPSに提出するとともに、IEA PVPS Trends Reportを始めとする各種報告書を作成するとともに、主要国の国内調査報告書等の日本語版を作成した。特別情報活動では、第7回世界太陽光発電国際会議(WCPEC-7)でタスク10Aの運営責任者を務め、日本およびEUの専門家が中心となり会議に参加したステークホルダーに対し、太陽光発電の市場、価格、産業界の総括的な概要報告と将来のビジネス展望に関するワークショップを開催した。また、第35回欧州太陽光発電国際会議(EUPVSEC-35)において、新しい市場開拓、ビジネスモデルに関するワークショップを実施すると共にIEA PVPSタスク17「PV and Transport」に係る各種情報収集およびタスク17専門家発掘等の支援を実施した。</p> <p><u>研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」</u></p> <p>「低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証」において、製造プロセスの改善を進め、モジュール変換効率22%実現に必要なセル変換効率24%相当を再現性良く得られることを確認した。また、p/n、電極パターン形成に用いる部材のバリュウエンジニアリング、既存材料の利用効率の改善可能により、パターン形成の変動費5円/Wの実現見込みを得た。</p> <table border="1" data-bbox="443 1630 1463 1865"> <tr> <td>投稿論文</td> <td>861 件</td> </tr> <tr> <td>特許</td> <td>「出願済」440 件（うち海外出願 196 件）</td> </tr> <tr> <td>研究発表・講演</td> <td>3,737 件</td> </tr> </table>	投稿論文	861 件	特許	「出願済」440 件（うち海外出願 196 件）	研究発表・講演	3,737 件
投稿論文	861 件						
特許	「出願済」440 件（うち海外出願 196 件）						
研究発表・講演	3,737 件						
IV. 実用化の見通しについて	<p>本事業で確立した高性能・高信頼性太陽電池を具現化するための要素技術は、担当企業で実用化に向けた検討や実証が進んでいる。結晶シリコン太陽電池では、日本企業に強みがある住宅屋根に加え、新たな市場として建物の壁面や窓に向けた商品化が進められている。また、電気自動車に新たに採用された事例がある。CIS太陽電池では、実績がある住宅屋根に加え、重量制限のある屋根に向けた軽量モジュールの開発、電気自動車での実証試験が行われている。III-V化合物太陽電池では、従来の宇宙用途に加え、30%を超過する変換効率を</p>						

	活かした電気自動車での走行実証試験が開始されている。ペロブスカイト太陽電池では、本プロジェクトで確立した変換効率、耐久性を土台として、住宅向けを主とした実証実験が開始されている。	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	2015年3月制定
	変更履歴	<ul style="list-style-type: none"> ・2018年2月、アウトプット目標を追記し、研究開発項目⑥「高効率太陽電池製造技術実証」を追加。 ・2019年2月、研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」について、最終目標を修正。 ・2019年4月、プロジェクトマネージャーを山田主任研究員から山崎主査に変更。 ・2019年7月、プロジェクトマネージャーの役職を山崎主査から山崎主任研究員に変更。

プロジェクト用語集

用語（日本語）	用語（英語）	説明
1sun	1sun	AM1.5 の太陽光スペクトルにて入射光強度が 1000 W/m ² の条件を指す。
1σ	1σ (1 sigma)	測定値ばらつきの評価で標準偏差 σ を倍率 1 倍で用いる。
1 ダイオードモデル	1 diode model	太陽電池の等価回路モデルの一つであり、電流源、一つのダイオード、並列抵抗、直列抵抗を用いて太陽電池の電流-電圧特性をあらわすモデル。
2 次準器	secondary standard	各国にひとつ程度しかない 1 次準器によって校正された測定器。
3 段階法	Three-stage process	第 1 段階で In、Ga、Se、第 2 段階で Cu、Se、第 3 段階で In、Ga、Se を蒸着する Cu(In,Ga)Se ₂ 製膜法で、2 重傾斜禁制帯の形成が可能。
III-V 化合物太陽電池	III-V compound solar cells	III-V 族化合物半導体太陽電池。
III-V 族化合物半導体太陽電池	III-V compound semiconductor multi-junction solar cells	III-V 族化合物半導体の組成比を制御してバンドギャップの異なる複数の太陽電池層を重ねた多接合太陽電池。
Akima 法	Akima interpolation	Akima 氏によって考案された 3 次多項式補間法。
ALD（原子層堆積法）	Atomic layer deposition	原料ガスとパージ用ガスを交互に加熱基板面に照射し、薄膜を形成する方法。
Al 法	Al method	電圧誘起劣化現象の加速試験方法の一つ。太陽電池モジュールのカバーガラスに設置した Al 板を電極とし、セルの電極との間に電界を印加し劣化現象を引き起こす。
AlOx	Aluminum oxide	p 型 Si 基板に対するパッシベーション膜として高密度の負の酸化膜固定電荷を持つ。
APE	APE	Average Photon Energy の略で、一つの太陽光スペクトルに含まれるフォトンの平均エネルギーのこと。太陽光スペクトルの波長偏りを示す指標であり、AG1.5G の標準スペクトルを 350-1050nm の範囲で計算すると APE=1.88eV となる。すなわち屋外で測定した実スペクトルの APE がこの値よりも高ければ短波長成分が相対的に多いブルーリッチ、逆であればレッドリッチであるといえる。
a-Si 膜（アモルファスシリコン膜）	Amorphous silicon film	非晶質シリコン膜。シランガスなどをプラズマや Cat などの CVD 法で分解して形成される膜であり、X 線で評価される原子配列の規則性を持っていない。通常、数%の水素を含有し、この水素によって半導体の p 型 n 型の導線性制御が可能となる。a-Si:H 膜と表記される場合もある。

ATC 試験	Accelerated thermal cycle test	IEC61215 に記載の温度サイクル試験をより加速評価できるように開発した新規信頼性試験。
BIPV	Building-integrated photovoltaics	建材一体型の太陽電池モジュール。
Cat-CVD 法 (キャットシーブイデュー法、触媒化学気相堆積法)	Catalytic Chemical Vapor Deposition	目的とする原料ガス分子を真空装置内に導入し、特定の圧力下でこのガスを加熱した触媒体に接触させることで分解し、その分解したガスを基板に輸送して膜形成を行う方法。化学気相成長 (CVD) の一種。
Cat-doping 技術 (キャットドーピング技術)	Catalytic doping method	目的とする原料ガス分子を真空装置内に導入し、特定の圧力下でこのガスを加熱した触媒体に接触させることで分解し、この分解したガスを半導体基板に導き、取り込ませることで基板の導電性を制御する技術。
CCD	Charge Coupled Device	固体撮像素子であり、ビデオカメラなどイメージセンサに広く利用されている半導体素子。
CIGS	CIGS	CIGS (Cu, In, Ga, Se 等の化合物半導体) を発電層に用いた太陽電池。
CIGSSe	CIGSSe	半導体 $\text{Cu(In, Ga)(S, Se)}_2$ の構成元素の頭文字からとった略称。光吸収層として使われる。
CIS 系太陽電池	Copper Indium Selenium Solar Cell	銅、インジウム、セレン他による化合物を光吸収層とした太陽電池。
CZTS	CZTS	$\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ を組成とする化合物半導体。
CZ 法	Czochralski method	結晶の素材を石英製などのるつぼに入れ、抵抗加熱などによって材料を溶かして融点よりも少し高い温度に保っておき、それに単結晶の種子結晶をひたして十分になじませたのち、ゆっくり引き上げて種子結晶の方位配列をもった大きな円柱状の単結晶を成長する方法。
DFT 法	Discrete Fourier Transform	離散フーリエ変換。
DH 試験	Damp Heat Test	電気電子製品を対象にして高温高湿が特性劣化に与える影響を加速して評価する標準的な試験方法で、相対湿度 85%、温度 85°C において対象品に適した長期の時間が推奨されている。
DLTS	DLTS (deep level transient spectroscopy)	過渡容量分光法。半導体における深い準位 (捕獲中心や再結合中心) を測定する方法。電気容量の過渡応答を利用して、トラップのエネルギー、密度、捕獲断面積を推測することができる。
Dry UV 試験	Dry UV test	低湿環境 (実施例では 0~2%RH) で行う UV 照射試験。

EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy	エネルギー分散型 X 線分析法 電子線などを物体に照射した際に発生する特性 X 線のエネルギーを分光することにより、元素分析を行う。
Eg	Eg	バンドギャップエネルギー、禁制帯幅。
EL 検査	Electroluminescence	太陽電池に電界を印加すると、生成した電子と正孔が再結合して発光する(エレクトロルミネッセンス、EL)。これを撮影して、画像を分析することでセルの欠陥や割れを観察することができるため、モジュールの検査には必須の手法となっている。
ELO (エピタキシャルリフトオフ)	Epitaxial lift-off technique	III-V 族基板上に太陽電池を成膜した後、太陽電池のみを引き剥がすプロセス。太陽電池は低コスト基板に転写し、高価な基板は再利用することで低コスト化できるとともに、セルの裏面で反射した光が厚い基板によって吸収されることによるロス低減が可能となる。
EPMA	Electron Probe Micro Analysis	電子線マイクロアナライザ 対象物に電子線を照射すると元素固有の特性 X 線を発生する特性 X の波長と強度から構成元素を同定/定量できる。
EQE(外部量子効率)	External quantum efficiency	太陽電池は半導体材料で形成されており、太陽光などの光が入射すると発電する性質を利用している。1 個の光子が太陽電池に吸収されると、その光子は電子・正孔対をつくる。電子または正孔が外部に電流として取り出されると、その担体は収集されたという。そうでないとき、担体は再結合して電流に寄与しない。量子効率は、太陽電池を短絡条件で動作させたときに電流(すなわち収集された担体)に変換された光子の割合のことをいう。外部量子効率(EQE)は、光の伝搬や反射による損失の効果を含むのに対し、内部量子効率(IQE)は、反射や透過の影響を受けない光子についての効率を指す。
ESTI	ESTI	European Solar Test Installation 欧州共同体の研究所。太陽電池評価研究を実施。
ETFE	ETFE	エチレン-4 フッ化エチレン共重合体。
ETL	Electron transport layer	電子輸送層。
ETM	Electron transport material	電子輸送材料。
EVA	Ethylene-vinylacetate copolymer	太陽電池モジュールに用いられる代表的な封止材のひとつ。エチレン酢酸ビニル共重合体。
FF (フィルファクター)	FF (fill factor)	$=P_{max}/I_{sc}/V_{oc}$ 。太陽光発電素子の短絡電流密度×開放端電圧に対し、最大電力を生じる電流密度×電圧の動作点のこと。直列抵抗が大きく、並列抵抗が小さくなると FF が減少

		する。
FIT	Feed-in Tariff	固定価格買取制度 再生可能エネルギーの普及促進のために採られた代表的施策のひとつ。
FZ 法	Floating zone melting method	単結晶の材料となる多結晶棒を垂直に置いて、上下をクランプし、途中を高周波や電子ビームなどで部分的に加熱溶融し、その溶融ゾーンを下から上または上から下に移動させることによって単結晶を成長する方法。
GPIB ケーブル	GPIB cable	測定器や PC 間で測定信号や制御信号を通信するための接続ケーブル。
HAST 試験	Highly accelerated stress test	加圧により、100℃以上、かつ高密度な水蒸気雰囲気を再現した加速試験方法。
HAXPES	HAXPES	Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy の略。X 線源に高いエネルギーを持つ X 線源を使用することで、通常の XPS よりも数倍の検出深さを有する。非破壊・非接触で埋もれた界面の化学結合状態の評価が可能。
HBC	Hetero-junction Back Contact	アモルファス・シリコン (a-Si) と結晶シリコン (c-Si) のヘテロ接合裏面電極型太陽電池。
HTL	Hole transport layer	正孔輸送層。
HTM	Hole transport material	正孔輸送材料。
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital	基底状態において電子をみたされている軌道 (占有軌道) の内、エネルギーの最も高い電子軌道。
IEC	International Electrotechnical Commission	国際電気標準会議。電気工学、電子工学、および関連した技術を扱う国際的な標準化団体である。
IEC/TC82/WG2	IEC/TC (Technical Committee) 82/WG (Working Group) 2	IEC における太陽光発電システムに関する技術委員会 (TC82) 下に設置された非集光型モジュールに関するワーキンググループ (WG)。
IEC61730	IEC61730	太陽電池モジュールの安全性認証規格。
Implied Voc	Implied Voc	1sun での少数キャリア濃度を測定し、計算により算出された Voc のこと。
IPCE	Incident photons to current conversion efficiency	ある波長において、入射したうちの電子へ変換された光子数の割合を百分率 (%) で表したものの。外部量子効率。
ISO	International Organization for Standardization	国際標準化機構。国際的な標準である国際規格を策定するための非政府組織。
Isc (短絡電流)	Short Circuit Current	太陽電池が短絡状態にある時の出力電流。
ISE	ISE	ドイツフ라운ホーファ研究所の太陽エネルギー研究所 Institute of Solar Energy。
ITO	Indium tin oxide	インジウム・スズ合金の酸化物。透明で導電性を有する。

IV 特性	IV characteristic	太陽電池の電流電圧特性。
i-Voc	Implied open circuit voltage	光照射した際の電子と正孔の濃度分布の差から得られる電位差。セル化する前の理想的な開放電圧であり、パシベーション性能の指標。
J_0	Saturation current density	飽和電流密度。
JIS 規格 C8938 の環境試験、耐久性試験	Environmental and endurance test methods for amorphous solar cell modules	アモルファス太陽電池モジュールの環境、耐久性試験に関する JIS 規格。
k=2	k=2	包含係数 k を 2 とした不確かさの推定。通常は U95 に対応。
LAN ケーブル	LAN cable	建物内などの狭い範囲のネットワークケーブル。
LBIC	Light-beam induced current	レーザー等の光を半導体に照射し、局所的な光電流を発生させる。光の照射位置を走査することにより、光電流発生量の分布評価が可能。
L-BSF	Local-Back Surface field	PERC 構造における部分的な BSF(裏面電界層) のこと。
LCO	Local Contact Opening	L-BSF を形成するために、絶縁膜をレーザーやマスクエッチングなどにより形成する方法のこと。
LIA 援用反応性スパッタ	Reactive Sputtering Assisted with low-inductance antenna	低インダクタンスアンテナ (LIA) プラズマを用いた反応性スパッタ法。
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital	基底状態において電子をみたまされていない軌道 (非占有軌道) の内、エネルギーの最も低い電子軌道。
Mo	Module	太陽電池モジュールの略
MOCVD 法	Metal Organic Chemical Vapor Deposition	有機金属を原料とした化学的気相製膜法である。主に窓層製膜に用いるが、プラズマを用いないため pn 接合界面にダメージを与えることなく製膜できるものである。
N 型 Si 太陽電池	N-type Silicon solar cell	基板に n 型 Si ウエハを利用した太陽電池 p 型 Si 太陽電池より高効率な太陽電池が作製できる。
n 型結晶シリコン太陽電池	N-type solar cells	n 型半導体を基板とし、その上に薄い p 型半導体層を形成した単結晶シリコン太陽電池セル。
n-PERT	Passivated Emitter and Rear Totally diffused	裏面の n+層側を全面不動態化して再結合を抑えた太陽電池構造。
NAS	Network Attached Storage	ネットワーク接続された通常大容量の記憶装置。
NREL	NREL	National Renewable Energy Laboratory 米国の再生可能エネルギー研究所。

Pasivated Contact	Passivated Contact	セル表面上に不活性化層を残したまま電極との接続をとること。
PCBM	PCBM	フラーレン誘導体の1種類で、フェニル酪酸メチルエステル体のことである。フラーレンの炭素数により、PC60BM、PC70BMと表記する。
PCT	Pressure Cooker Test	試験槽内に高温・高密度な水蒸気環境をつくり、モジュール内への水分の侵入を促進させることで劣化を加速するための試験方法。
PEDOT	PEDOT (poly-3,4-ethylenedioxy thiophene)	PEDOTは、含硫黄複素環化合物の一種であるチオフェン誘導体のポリマーである。導電性をコントロールすることが可能であることから、正孔輸送層や透明導電層に用いられる。
PERC 型	Passivated Emitter and Rear Cell	P型Si太陽電池の一種。 裏面構造が現行太陽電池と違っており、より高効率が期待できる構造。
PERT	PERT	Passivated Emitter and Rear Totally diffusedの略。結晶シリコン太陽電池セルにおいて、シリコン基板の表裏両面ともに拡散層が全面に形成され、かつその表面にパッシベーション層が形成されていることを特徴とするセル構造。
PET/Al/PET	PET/Al/PET	アルミ箔をPETフィルムで挟んだ構成の裏面材。
pH感受性蛍光色素	pH Sensitive Fluorescent Dye	pHインジケータとも言われ、主に生物生体試料のpHを計測するための蛍光色素で、単一蛍光波長による場合と2波長蛍光強度の比からpHを求める場合がある。
PID	Potential Induced Degradation	太陽電池とアースの電位差を原因として生じる劣化。 pn接合のリークが原因、PIDが生じやすい太陽電池は比較的初期に特性が急激に低下することが知られている。
PL	Photoluminescence	フォトルミネッセンス 半導体デバイスに光を照射すると、半導体中に生成した過剰キャリアの再結合過程で光を発する 半導体中に欠陥があると発光量が弱まる。
PLD	Pulsed laser deposition	パルスレーザー堆積法。
Pmax	Pmax	太陽電池の動作曲線上において、電力が最も大きくなる点での電力。
PN 接合	PN junction	P型半導体とN型半導体を接合させたもの。
RPD 法	RPD method	薄膜堆積技術の一種。反応性プラズマ堆積法 (reactive plasma deposition) と呼ばれる。TCO薄膜の成膜に利用される。
PTB	PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt ドイツの計量研究所。
PV モジュール日射センサ	PVMS: PV Module Irradiance Sensor	太陽電池モジュールと同等の部材、構造を用いた日射センサ。

PVF/PET/PVF	PVF/PET/PVF	PET フィルムを PVF(ポリフッ化ビニル) フィルムで挟んだ構成の裏面材。
PVMS	Photovoltaic Module Sensor	結晶シリコンの PV セルを全天日射強度測定に用いたセンサ。PV セルを用いることにより高速に日射強度の時間変動を捉えることができる。
RPD	RPD	薄膜堆積技術の一種。反応性プラズマ堆積法 (reactive plasma deposition) と呼ばれる。TCO 薄膜の成膜に利用される。
SBC-SHJ(スーパーバックコンタクト-シリコンヘテロ接合)	Super Back Contact-SHJ	従来の背面コンタクト (Back Contact) 型の SHJ 太陽電池に対して、優れた SHJ 制御技術やセル構造等を用いて変換効率や発電コストを低減させた SHJ 太陽電池。
SBF-SHJ(スーパーバイフェーシャル-シリコンヘテロ接合)	Super Bifacial-SHJ	従来の両面受光 (Bi Face) 型の SHJ 太陽電池に対して、優れた SHJ 制御技術やセル構造等を用いて変換効率向上や発電コストを低減させる SHJ 太陽電池。
SDGs	Sustainable Development Goals	持続可能な開発を目指した目標。
SEM	Scanning Electron Microscope	走査電子顕微鏡。
SHJ(シリコンヘテロ接合)	Silicon hetero-junction	結晶シリコン上に非晶質シリコンや酸化物等を形成することで電氣的接合を形成すること、また形成した状態。
Si ヘテロ接合太陽電池	Silicon heterojunction (SHJ) solar cell	非晶質シリコンと結晶シリコンのヘテロ接合からなる太陽電池。
SIMS	Secondary Ion Mass Spectroscopy	二次イオン質量分析法。イオンビームを照射し、固体表面で発生する二次イオンを質量分析計検出する。
SiNx	Silicon nitride	プラズマ CVD 法などにより堆積されたシリコン窒化膜で、シリコン太陽電池の反射防止やパッシベーションとして用いられる。
SiOx BS	SiOx Back Sheet	シリカ蒸着を行った PET フィルムを用いた裏面材。
SLG	Soda lime glass	青板ガラス、ソーダ石灰ガラス
SSHJ (スーパーシリコンヘテロ接合)	Super SHJ	SBF, SBC-SHJ の総称。
STEM	Scanning Transmission Electron Microscope	走査型透過電子顕微鏡 原子・分子像を直接観察可能なレベルの高倍率・高分解能で観察が可能。
SV 法 (Level 5)	SV method level 5	太陽光発電システムの発電特性の定量的評価手法であり、システム出力係数と各種損失係数を用いた評価、および損失・利得の定量化を特徴とする。Level 5 は 1 分値を用いて解析を行うことにより 11 種類の要因の影響を評価可能である。

SWCT	Smart Wire Connection Technology	Meyer Burger 社が提唱するセル間をワイヤで接続する技術。
TAS 法	Transient Absorption Spectroscopy	過渡吸収分光法。 極微小時間に光励起された電子・正孔対（キャリア）の消失過程を検出する手法。
TC	Thermal cycle	温度サイクル。
TCO（透明導電膜）	Transparent Conductive Oxide	酸化錫や酸化インジウム錫、酸化亜鉛などが良く用いられる。太陽電池の光入射側に用いて光を透過させながら電流を外部に取り出すのに必要な材料である。
TEM	Transmission electron microscope	透過電子顕微鏡。薄膜状の試料に電子線を照射し、試料を透過した電子線を結合レンズ系で拡大する電子顕微鏡。薄膜試料内部の結晶構造、組成、電子状態などの情報が得られる。
U95	U95	測定値の不確かさを信頼区間 95%で見積もったもの。標準偏差の 2 倍に対応。
UV、UV 光	Ultraviolet light	紫外線光（太陽光では波長 300～400nm 程度の範囲）。 太陽電池部材を劣化させる 封止材中の添加剤配合によっては酢酸を生成する原因となる。
UV 照射試験	UV irradiation test	高温環境（典型的には 85° C）で PV モジュールに紫外線を照射する信頼性加速試験の一種。
UV+DH 複合試験	UV+DH Combined test	UV 照射試験後に、引き続き DH 試験を行う複合加速試験。
UV 光照射	Ultra violet light soak	紫外線を照射すること。
Voc	Open circuit voltage	太陽電池が開放状態にある時の出力電圧。
Wet UV 試験	Wet UV test	高湿環境（実施例では 30%RH）で行う UV 照射試験。
WPVS	World Photovoltaic Scale	World Photovoltaic Scale 一次基準太陽電池セルの国際根幹比較。
WRR	WRR	World Radiometric Reference 日射照度の国際標準。
X 線 CT	X-ray computed tomography	X 線を利用して物体を走査しコンピュータを用いて処理することで、物体の内部画像を構成する技術。
X 線光電子分光法 (XPS)	X-ray photoelectron spectroscopy	原子組成分析手法の一つ。試料表面から数 nm 程度の深さ領域における組成分析が可能。
ZEB	Zero energy building	各種省エネ技術や創エネ技術を適用して、エネルギー消費量が正味ゼロになる建築物のこと。

μ PCD 法	Microwave Photocundctance Decay	マイクロ波光導電率減衰法 半導体に光を照射すること変化する光導電率をマイクロ波の反射率として検出し、その減衰から半導体内キャリアの寿命を測定する手法。
π	π	π 共役部位。
アニール	Anneal	シリコン基板を電気炉等で加熱すること。
アパーチャー (エリア)	Aperture (Area)	太陽電池モジュールにおいて発電部外周を囲った領域を示す。
アモルファスシリコン	Amorphous silicon	シリコンを主成分とし、原子配列に結晶性を持たない固体半導体。真空蒸着法などにより非常に薄い半導体膜を形成可能。半導体膜形成時の条件を変えることで pn 接合を作製することができる。
アメダス	AMeDAS	気象庁の自動気象観測システム。全国約 1,300 か所で降水量を観測している。そのうち、約 840 か所では降水量に加え、気温、風向・風速、日照時間も観測している。
アルカリ金属	alkali metal	第 1 族元素のうち、水素を除いた元素群の総称。リチウム・ナトリウム・カリウム・ルビジウム・セシウム・フランシウムがこれに該当する。
アルベド	albedo	外部からの入射光に対する、反射光の比である。反射能とも言う。
アルミ裏面電界型太陽電池	Al back surface field solar cell	裏面のアルミニウム電極焼成時に形成される裏面電界 (BSF) 層により、裏面電極近傍でのキャリアの再結合を抑止する構造の太陽電池。
アレイ実効最大出力係数	Effective array peak power	SV 法 Level 5 における損失係数の一つであり、温度や日陰、入射角など、屋内での標準試験条件下での測定に対して屋外条件下で生じる様々な発電特性に影響を与える要因を定量的に分離した後で得られる、システムの実環境下での発電性能を示しており、1.0 であれば銘板値通りの性能を示していることを意味する。
アレイ	array	ひとつの架台に取り付けられた太陽電池モジュールの集まり。
イオンクロマトグラフィー法	Ion Chromatography	イオンや極性分子のような電荷を持つ分子を分離して物質を分離精製する方法。
イオン注入	Ion implantation	シリコン基板上に拡散層のパターンを形成するために貫通孔を形成したシリコンやカーボンの基板のこと。イオン注入用のマスクの場合、ステンシルマスクの貫通孔の部分のみをリンやホウ素のイオンが通過できるので、貫通孔のパターン通りの拡散層が形成できる。

インゴット	Ingot	シリコンを凝固させて一塊りとしたもの。
インターコネクタ	Interconnector	太陽電池のセルとセルを繋ぐ配線。
ウェーブレット法	Wavelet method	1周期の波とその平行移動、およびその2の累乗倍の高調波の和として信号を表す方法。
エアマス	Air mass (AM)	地球大気に入射した太陽光直達光が通過した路程の長さ。標準状態の大気圧(標準気圧:1013hPa)に垂直に入射した太陽直達光が通過した路程の長さを AM1.0 として、それに対する倍率で表す。
エッチピット	Etch pit	結晶中の転位がある部分を選択的にエッチングする溶液を使って現れる凹み(ピット)。
エネルギー分散型 X線分光法	Energy dispersive X-ray spectroscopy	電子顕微鏡に付属し、電子線照射により発生する試料からの特性 X線の強度を測定することにより、原子組成分析を行うことができる。
エピタキシャル成長	Epitaxial growth	基板の結晶構造を反映した結晶膜をその上に堆積すること。
エミッタ層	Emitter layer	電子を放出する層。 P型Si太陽電池においては、表面のN+層に該当する。
エレクトロルミネセンス	Electroluminescence (EL)	太陽電池の分野では、太陽電池セルに電流を注入したときの発光を指し、セルの正常部に比べて劣化部では一般に発光強度が低い、あるいは発光しないことから、劣化解析の手法として用いられる。
オーミック	Ohmic	印可電圧に対して線形に電流が流れる状態、もしくは、単調に流れる電流が増加する状態。
カーフ	Kerf	一般的には切り口、あるいは切り口の幅、として使われているが、ここでは、シリコンのインゴットを板状(ウエハ状)にスライスする際に発生する切削屑(シリコンの微粉末)を指す。
カバーガラス	Cover glass	太陽電池モジュールの受光面側に用いる厚さ数mm程度のガラス。
ガラスフリット	Glass frit	電極ペースト中に添加するガラス粉末で、電極の焼成温度で軟化・流動させ、絶縁膜との反応や、シリコン表面との密着機能を果たす。
ガルバニック腐食	Galvanic corrosion	異種金属接触腐食のこと。電位の違う二つの金属が電解質中で接触すると、卑な金属はイオン化が助長(腐食)され、貴な金属はイオン化が抑制される。
キャスト	Cast	溶解したシリコンを鋳型内で凝固させてシリコン塊を作製する方法
キャリア選択性パッシベーションコン	Carrier selective passivating contact	結晶シリコンなどの半導体表面の欠陥を不活性化する機能と、半導体から電子または正孔

タクト		を選択的に取り出す機能を併せ持った材料。
クラスタ	Cluster	セルの直列接続で、それにバイパスダイオードが並列接続されたものであって、太陽電池モジュールは数クラスタで構成される。
クランプセンサ	Clump sensor	ドーナツ状またはU字状の形体のセンサで、ケーブルを中央に通すことでケーブルに入り込むことなしに電流を計測できるもの。
グリッド・パリテイ	Grid Parity	太陽光発電システムの発電コストが、既存の電力系統の電気料金と同等になること。
コンタクト抵抗	Contact resistance	接触抵抗。二つの導体を接触させたとき、その面に生じる電気抵抗。
サブモジュール	Submodule	集積構造を備えているがカバーガラス等による封止がされていない太陽電池。
シーケンシャル複合ストレス試験	Sequential combined stress test	複数種の単体ストレス試験を連続して実施する試験。
シード	Seed	結晶の情報を成長結晶に伝えるもとなる結晶。
シードキャスト	Seed cast	結晶シリコン太陽電池用高品質インゴットの製造方法の一つ。通常は多結晶インゴットの製造に用いられるキャスト法において、るつぼ底辺に種結晶（シード）を敷き、そこから単結晶成長させることによって、多結晶並みの低コストで単結晶並みの高品質インゴットを製造する方法。
シードキャスト法	Seed cast method	太陽電池用高品質シリコンインゴットの製造技術として研究開発を進めている手法。底面に単結晶シードを配置し、一方向凝固させることで単結晶を育成させる技術。
シード再利用	Seed Recycle	シードキャスト法で種結晶として使用したシードを複数回使用すること。
シート抵抗	Sheet resistance	面抵抗率。薄膜やフィルム状物質の抵抗値で、単位は Ω であるが、シートで有ることを示すために慣用的に Ω/\square と記述する。
シーメンス法	Siemens process	高純度ポリシリコンを生産する製法の一つで、現在主流の生産方法である。半導体に用いるポリシリコンの生産も可能な製法。
システム出力係数	Performance Ratio	等価システム運転時間を等価太陽日照時間で除した値。太陽光発電システムの性能を示す指標として用いられる。
シャドーブレード	Shadow blade	上空カメラの前面に設置する、帯状の板。太陽の日周運動に追従し、直達日射が上空カメラのレンズに入射しないようにする。
シャント抵抗	Shunt resistance	ダイオードの整流性を示すために必要な漏れ抵抗のことであり、大きいほど太陽電池特性は良好となる。
シリカ	Silica	二酸化珪素または主として二酸化珪素によつ

		て構成される天然鉱石、珪石、珪砂の総称。
シリコン型日射計	Silicon photo sensor	シリコン半導体をセンサとして用いた日射計。
スーパーストレート型太陽電池	Superstrate type solar cell	ガラス基板などの透光性基板上に、透明導電膜、シリコン層、裏面電極の順に製膜され、光は透光性基板と透明導電膜層を通して、光活性であるシリコン層に入射させるタイプの太陽電池。
スクリーン印刷	Screen printing	スクリーン版（印刷製版）にコーティングされた乳剤の必要な部分に孔をあけて、その孔を通過してインクを被印刷物に転写する印刷方式のこと。
スタンダードキュア方式	Standard Cure	EVA の架橋反応を架橋炉を用いて行う生産方式。
ステンシルマスク	Stencil mask	シリコン基板上に拡散層のパターンを形成するために貫通孔を形成したシリコンやカーボンの基板のこと。イオン注入用のマスクの場合、ステンシルマスクの貫通孔の部分のみをリンやホウ素のイオンが通過できるので、貫通孔のパターンどおりの拡散層が形成できる。
ストリークカメラ	Streak camera	一瞬の光強度変化とその経過時間を測定するカメラ。
ストリング	String	複数の太陽電池モジュールを直列に接続したもの。
スピコート	Spin coating	塗布プロセスの1種類であり、平滑な基材を高速回転させる事により遠心力で薄膜を製膜する方式を言う。用いる装置は、スピコーターと呼ぶ。
スペクトルミスマッチ	Spectral mismatch	基準太陽電池と被測定太陽電池との分光感度特性のずれが原因で生じる測定誤差。
スペクトルミスマッチ補正	Spectral mismatch correction	太陽電池の特性を測定する際の、被測定太陽電池と基準太陽電池の分光感度スペクトルの差及び基準太陽光スペクトルと入射光の分光放射照度スペクトルの差による測定誤差を補正すること。
スペクトルミスマッチ補正係数	Spectrum mismatch correction factor	スペクトルミスマッチを補正するための係数。
セル	Cell	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
セル効率	Cell efficiency	セルの受光面に入った太陽光と発電された電力の割合。
セル評価	Test production of PV cell for wafer evaluation	太陽電池セルを試作してウエハの評価を行うこと。
セレン化法	Selenization method	プリカーサーをセレン（Se）含有雰囲気中で熱処理することにより CIS 系光吸収層を作製する方法。

セレン化硫化法	Selenization / Sulfurization	セレン化法の後に硫黄 (S) 含有雰囲気中で熱処理することにより表面を硫化して CIS 系光吸収層を作製する方法、本研究では SAS 法 (Sulfurization after Selenization) と呼んでいる。
ソーラシミュレータ法	Solar simulator method	ソーラシミュレータを用いて一次基準太陽電池を校正する手法。
タブ配線	Tab line	太陽電池セルと太陽電池セルとを電氣的に接続する細長い配線。
ダブルガラスモジュール	Double-glass module	受光面側のみならず、裏面材にもバックシートではなくガラスを用いた太陽電池モジュール。
タンデムセル	Tandem cell	短波長を吸収するセルを光の入射側、その後ろに長波長側を吸収するセルを直列になるように構成されたセル。
テクスチャ/テクスチャャー	Texturing	凹凸のこと。光を凹凸によって散乱させることで光の吸収長を長くとり、光をより効果的に半導体で吸収させるのに用いられる。結晶 Si 太陽電池では表面に形成されたピラミッド状表面のこと。
テクスチャ形成技術	Texturing	結晶シリコンでは、晶方位(100)面基板に対してアルカリエッチング剤を用いて異方性エッチングを行い、その表面に四角錐を形成する。この四角錐を通過する際の光の反射・屈折を利用することで、通常の平坦な表面のシリコンと比較して多くの太陽光をシリコン内に導き、多くの発電電流を得ている。この四角錐のように、光散乱を意図的に起こす構造物を作製する技術。
テクニカルデューデリジェンス	Technical Due Diligence	太陽光発電の場合、発電所設置計画または運用段階で行う様々なリスク評価のうち、技術的な領域のもの。
デバイスシミュレーション	Device simulation	半導体素子の断面構造を入力し、そのデバイスの動作を確認するシミュレーション。
テルル化カドミウムモジュール	CdTe module	カドミウムとテルルから成る II-VI 族化合物半導体を材料とする薄膜系太陽電池モジュール。低コストで製造できる点に特徴を有する。
ドーピング	Doping method	半導体材料にその導電性を制御する異種原子を取り込ませ、電氣的に活性化して導電性を制御する技術。
トレーサビリティ	Traceability	測定値がその上位標準に結び付けられていること（正式には、「不確かさがすべて評価された切れ目のない比較の連鎖によって、決められた基準に結び付けられ得ること」）。
トンネル接合	Tunnel junction	非常に薄い絶縁体を二つの導体（或いは半導体）で挟み込むことによって形成する接合。キャリアは絶縁体の障壁を、トンネルを抜けたかのように通過する。

ナノ Si 結晶(ナノシリコン結晶)	Nano-crystalline silicon	結晶シリコンは X 線で評価される原子配列の規則性を持っているが、非晶質シリコンはこの規則性を持っていない。ナノ Si 結晶は、規則性を持つ結晶シリコンのサイズがナノ (10-9m) 程度の粒状の構造体であり、粒の密度が緻密な物から非晶質シリコン中にまばらに観察されるものまで広い範囲の状態を持つが、これらを総称してナノ Si 結晶(または微結晶 Si)と表現している。
ナノ粒子	Nanoparticle	ここでは a-Si 成膜に用いるシラン CVD プラズマ中で発生する直径が 10nm 程度以下のナノ粒子。膜に取り込まれ光安定性を悪くする。100nm 以上のいわゆるダストと区別するためにクラスタと呼ばれることもある。
ネックング	Necking	種子結晶に存在していた転位が伝播しないように、結晶を細く長く成長させ、転位を結晶表面に逃がすこと、成長方向に伝播する転位を必然的に切断することにより無転位化する方法。
バスバー電極	Busbar electrode	太陽電池セル面に配設された集電極で太線状のもの。通常、銅箔が半田溶着される。
バックコンタクト型結晶 Si 太陽電池	Back Contact Crystalline Si solar cell	結晶 Si 太陽電池の 1 種で受光面に金属電極が無く、裏面に正負の両方の電極を有する。
パッシベーション層	Passivation layer	太陽電池用の保護層として、①シリコン基板を保護する、②シリコン基板表面の欠陥を終端化する、③膜が持つ固定電荷によるバンドベンディングによる電界効果を持つ、働きがある。
バッファ層	Buffer layer	CIS 太陽電池において、p 型 CIS 系化合物光吸収層と pn 接合を成す n 型半導体層。Cd 系、Zn 系、In 系化合物などの様々な材料が開発されており、複数の層から構成されることもある。
バイパスダイオード	Bypass diode	発電電流を迂回させるためのダイオード。
バックシート	Back sheet	太陽電池モジュールの裏面側に用いる高分子系シート。ポリエチレンテレフタレート (PET) をベースフィルムとするものが多く、PET フィルムをフッ素系の樹脂ではさんだものや、アルミニウム箔を PET フィルムではさんだものなどが用いられる。
バックコンタクト型太陽電池	Interdigitated back contact solar cells	裏面に n+拡散層と p+拡散層を形成し、その直上に電極を形成した構造をしている。この構造では電極を裏面に集約し受光面の電極を無くすることができるため、そのぶん受光面を広くし多くの光を取り込むことで変換効率を高めることが可能となる。
パッシベーション	Passivation	不活性化。 欠陥など再結合の起因を不活性化し、再結合を抑制するもの。

バッファ層	Buffer layer	下の層と上の層を緩衝するための層。エピタキシャル成長においては、成長する薄膜と基板の格子定数が異なる場合に、薄膜に転位が生じないように薄膜と基板の間に挿入する。
バッフルユニット	Baffle unit	本研究では、不要な光の経路を遮って有効な光を取り出すための遮光装置。
バルク欠陥	Bulk defect	ウエハ中に存在する異物や結晶構造が局所的に壊れたもの。
パワーデバイスアナライザ	Power device analyzer	パワーデバイス用の測定器で、電子負荷装置、プログラマブル電源、電流計、電圧計、データロガーなどの機能をあわせ持つ機器。
バンカビリティ	Bankability	金融機関がその事業に融資する可能性を意味する。
バンドオフセット	Band offset	異種間半導体材料の接界面で形成されるポテンシャル障壁（エネルギー差）の総称。
バンドギャップ	Band gap	固体中の電子が定常状態でとり得るエネルギー値の差。電子がエネルギーを受けて低エネルギー状態から高エネルギー状態へ遷移する際、バンドギャップ以下のエネルギーでは遷移できない。
ヒステリシス	Hysteresis	太陽電池の特性が過去の印加電圧等の履歴に依存して変化する現象。
ひまわり 8 号	Meteorological satellite Himawari-8	日本が運用している静止気象衛星で、東経 140 度の赤道上約 36,000km からアジア・太平洋域の気象を常時観測している。2014 年 10 月 7 日に打ち上げられ、2015 年 7 月 7 日から正式運用を開始した。
ファストキュア方式	Fast Cure	EVA の架橋反応を真空ラミネータ内で行う生産方式。
ファイヤスルー	Fire-through	Si 太陽電池表面の楕型銀電極を形成する際の熱処理手法。
フィルタ手法	Filter method	太陽電池屋外計測時、日射強度時間変動や日射強度空間不均一性が規定値を超えた場合を検出し棄却する手法。
フィルタ時間	Filtering period	フィルタ手法を行う際に、日射強度時間変動をモニタリングする時間。
フィンガー電極	Finger electrode	セルで発電した電気を集電するために太陽電池セル表面に形成される細い電極。
フーリエ変換法	Fourier transform method	ある区間で定義された関数を、その区間を周期とする基本正弦波と、その整数倍の周波数をもつ高調正弦波の和に分解する方法。
フラーレン	Fullerene	最小の構造が多数の炭素原子で構成されるクラスタの総称。
プラズマ CVD 法(プラズマシームイディエーション法)	Plasma-enhanced chemical vapor deposition	目的とする原料ガス分子を真空装置内に導入し、特定の圧力下でこのガスに高周波等を印加することで電離(プラズマ)・分解し、その分解したガスを基板に輸送して膜形成を行う方法。化学気相成長(CVD)の一種。

フレーム	Frame	太陽電池 Mo の外枠 アルミ製フレームが一般的。
プログラマブル DC 電源	Programmable DC source	指定したように電圧を変化させることができる直流の電圧源。
フロントエミッタ型太陽電池	Front-emitter solar cell	エミッタ層が光入射側に設置されている太陽電池。
ベアセル	Bare cell	モジュール化する前の結晶シリコン太陽電池セル。
ペースト（電極ペースト）	Paste	電極材料。銀などの導電性微粒子とガラス微粒子、有機樹脂および有機溶媒などを混合した高粘度の液状物で、これをスクリーン印刷によりシリコン基板上に印刷し、焼成することによって電極を形成する。
ヘテロジャンクション	Hetero junction	結晶シリコンとアモルファスシリコンで形成した pn 接合。
ヘテロ接合型太陽電池	Heterojunction photovoltaic module	結晶シリコンとアモルファスシリコンで PN 接合を形成した結晶シリコン系太陽電池。高い電圧が得られて高性能が実現する。
ペロブスカイト	Perovskite	Perovskite を発電層に用いた太陽電池。
ホットスポット試験	Hot spot endurance test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。部分影などにより太陽電池が局所的に遮蔽された場合に局所的に温度が上昇した場合に不具合が発生しないか確認する試験。
ホモジナイザー	Homogenizer	入射光の面内むらを均一化する光学素子または装置。
ポリシリコン	Polysilicon	半導体用、太陽電池用に用いられる高純度シリコン。主としてシーメンズ法で生産される。
ボルツマン定数	Boltzmann constant	状態数とエントロピーを関連付ける物理定数。
マルチワイヤソー	Multi-Wire Saw	角柱あるいは円柱状のインゴットから薄板上のウエハ（またはウェーハ、ウエハーともいう）を切り出す装置。結晶シリコン太陽電池用ウエハ製造において一般に広く用いられている。
マンソーラ	MONSOLA	NEDO 日射量データベースを構成する月平均の日射量データ。MONSOLA は MONTHly mean SOLAR radiation data throughout Japan の呼称である。
ミニバンド	Mini-band	量子ドット超格子のドット間隔が数ナノメートル程度になると、ドット中電子の波動関数が重なりを生じ、電子が取り得るエネルギーが幅を持つようになる。それにより形成される新しいエネルギーバンドのこと。
メカニカルスタック	Mechanical stack	一般的には、半導体素子等を機械的接合を介して直列に積層する技術のこと。太陽電池への応用としては、複数セルを直列接続し、多接合太陽電池構造を形成する技術として期待

		されている。
メタルハライドランプ	Metal halide lamp	水銀とハロゲン化金属（メタルハライド）の混合蒸気中のアーク放電による発光を利用した高輝度ランプのこと。略称としてメタハラなどと呼ばれる場合もある。
メットピー-ヴィ	METPV	NEDO 日射量データベースを構成する毎時の気象データ。METPVはMEteorological Test data for PhotoVoltaic system の呼称である。
メンブレンフィルター	Membrane Filter	精度の高い分溜・分離・抽出・ろ過に使われる多孔性の膜で、主な用途として粒子の除去・ろ過滅菌・液体モニタリング・微生物分析・粒子分析やガス用フィルターなどがある。
モジュール	Module	光入射側はカバーガラス等を用いて封止された太陽電池。
モジュール（全面積）効率	Module (total area) efficiency	フレーム等を含む太陽電池モジュール構造全体の面積に入射した太陽光と発電された電力の割合。
モジュールパフォーマンスレシオ	Module performance ratio	IEC 61853 シリーズで定義される。使用される環境条件（気温、日射スペクトル、角度特性）を考慮した際に、標準試験条件におけるモジュール出力に対して、年平均でどの程度の環境要因の影響を受けるかを数値化した（無次元）指標。日本を含めた6ヶ所の環境条件で計算される。
モノリシック型（モジュール）	Monolithic module	1枚の基板上に太陽電池構成材料を層状に積層して作製したモジュール。
ライフタイム	Lifetime	半導体内に生成した過剰少数キャリア（電子または正孔）が再結合して消滅するまでの寿命。太陽電池セルにおいてはライフタイムが高いほど、少数キャリアを電流として取り出しやすくなるため変換効率が向上する。
ラマン蛍光強度比	Raman ratio of fluorescence intensity	ラマン光を当てた際にSP構造を有する結合をもったものは蛍光を発生する。これの強度の比較。
ラマン分光法	Raman Spectroscopy	物質に単色光を照射してラマン効果により発生したラマン線の波長や散乱光強度を測定して物質のエネルギー準位を求めたり、物質の同定や定量を行う分光法。
リアエミッタ型太陽電池	Rear-emitter solar cell	エミッタ層（p型基板であればn型層、n型基板であればp型層）が光入射面とは反対側に設置されている太陽電池。
リテストガイドライン	Retest guideline	太陽電池の部材を変更した場合に認証取得に必要な信頼性試験項目を示したガイドライン

ロールツーロールプロセス (ロール to ロール、ロールトゥロール、R2R)	Roll to Roll Process	材料フィルムをロールからロールへと連続的に供給し、印刷やラミネートを行うプロセス。
ワイドギャップ半導体	Wide-gap semiconductors	ワイドギャップ半導体は、Si や GaAs などと比較して光吸収端が短波長領域に位置し、可視光領域での透過率が比較的高い半導体である。
合わせガラス	Laminated glass	複数の板ガラスの間に樹脂などの中間膜を挟み、接着したガラスのこと。
暗示開放電圧	Implied Voc (iVoc)	結晶シリコンの実効ライフタイムのキャリア注入依存性から見積もられ、太陽電池で期待される最大の Voc。結晶シリコンの品質や表面の欠陥終端 (パッシベーション) の度合いを反映する。
安全率	Safety Factor	出力保証の場合は、安全率=寿命年数/出力保証年数、で定義する。
暗電流	Dark current	光電効果により光電流を生じる素子において、光を照射しない時にも流れている微弱な電流 熱的要因、絶縁不良、結晶欠陥等のために生じる。
鋳型	Mold	シリコンを凝固させる為の型の役割をするもの。
一方向凝固	Directional solidification	熱の抜熱方向を一方向に限定して、結晶を一方向に成長させ凝固させる方法。
移動度 (易動度)	Mobility	個体物質中において、キャリア (電子・正孔) の移動のしやすさを表す量。電界強度とキャリアの平均速度の比で表される。
応力	Stress	温度サイクルストレスや荷重ストレスで Mo 内部で発生する 力学的な破壊劣化 (電極の断線や剥離やクラック) をもたらず。
温度サイクル試験	Thermal cycle test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。85°Cと-40°Cの温度変化を一定周期で一定回数与える試験。
開口部面積効率	Aperture area efficiency	太陽電池セル・モジュールの全面積のうち、セル・バスバー・フィンガー (グリッド) 電極・インターコネクタなどの基幹的な要素をすべて含む面積を用いて算出した変換効率。
回折結合型プラズモン	Diffraction-coupled Plasmon	物質内の電子振動と光波との共鳴現象であるプラズモンを励起する方法の一つで、回折格子ピッチより大きな波数を入射させて回折光が格子面上を伝搬させることで金属プラズモンを励起する方法。
開放電圧 (Voc)	Open circuit voltage	太陽電池セル・モジュールの出力端子を開放した時の両端子間の電圧。
化学パッシベーション	Chemical passivation	半導体材料において表面欠陥等に起因する少数キャリアの表面再結合を抑制する目的でな

		される表面終端化（安定化）技術の一つで、主に化学薬品への浸漬処理でなされる。一般的な酸化やプラズマ処理、その他薄膜材料形成（堆積）によるパッシベーションと対比される。
拡散長	Diffusion length	励起子または光キャリアがその寿命の間に広がることのできる距離。
荷重試験	Load test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。太陽電池モジュールに対して、一定荷重を一定時間負荷する試験。
加水分解	Hydrolysis	反応物に水が反応し、分解生成物が得られる反応。エチレン-酢酸ビニル共重合樹脂では、水との反応により酢酸が発生する。
加速負荷試験	Accelerated test	太陽電池モジュールの信頼性を加速して評価する試験。
活性化エネルギー	Activation energy	反応の基底状態から遷移状態に励起するのに必要なエネルギー。
規格値	Normalized value	一定のルールに基づき変形した値で、本文では初期値を1とした値に変換した。
基準太陽電池	Reference PV device	定められた照度での出力電流が校正された太陽電池。太陽電池測定の際の照度測定、調整にもちいる。
基準太陽光スペクトル	Reference solar spectrum	太陽電池を測定するために定められた太陽光の分光放射照度スペクトル。
機能性粒界 (SMART)	Seed Manipulation for ARtificially controlled defect Technique	歪み緩和、不純物トラップ、多結晶化抑制、転位の閉じ込めなどの機能を持つ意図的に導入した粒界（名古屋大学技術）。
凝固	Solidification	物質が液体から固体に変わる現象
逆バイアスパルス電圧	Reverse bias pulse voltage	本プロジェクトで開発したPID回復手法。PIDが発生したモジュールにパルス状の電圧をセルに対して逆バイアスになるように印加することにより、発電特性を回復させる。
逆流防止ダイオード	Blocking diode	太陽電池ストリングに直列に取り付けられて、ストリングに電流が逆流することを防止するダイオード。
金リファレンス	Au reference	カバーガラス上に金を蒸着したもの。錫薄膜センサとともに太陽電池モジュールに封入する。化学変化しないので反射率の基準になる。
空乏層	Depletion layer	PN接合を形成した際にできる電気二重層によりキャリアが排他された層（領域）。
屈曲劣化	Wear-out degradation	製品寿命を迎えたときに顕在化する急激な特性の劣化。
傾斜面日射量	Tilted surface irradiance	水平面ではなく傾斜した面に全方位から入射する太陽光の単位面積当りのエネルギー。
結晶シリコンライトスルー太陽電池モ	Silicon light thorough photovoltaic module	半導体材料として結晶シリコンをもちいた透光性の太陽電池である。

ジュール		
結晶欠陥	Crystal defect	シリコン単結晶中の構造的不完全性。
原子層堆積法	Atomic layer deposition	原料ガスとパージ用ガスを交互に加熱基板面に照射し、薄膜を形成する方法。
高温高湿試験/湿熱試験/DH 試験	damp heat (DH) test	太陽電池モジュールの信頼性試験の一つ。一般的な条件は温度 85℃、湿度 85%である。認証試験では、1000 時間の試験後の性能低下が初期値の 5%以内であることを要件としている。
格子不整合	Lattice mismatch	格子定数が基板結晶と成長層の間で整合しない材料系。太陽電池材料のバンドギャップエネルギーを自由に制御できるため、熱損失の少ない高効率の太陽電池構造を設計できる。一方、結晶には歪がかかるため、転位などの格子欠陥が発生する。対義語は格子整合系 (lattice match) である。
固液界面	Interface between solid and melt	融液から結晶を成長するときの液相と固相の境界面。
固化率	Solodification ratio	融液から結晶を成長したとき、最初の融液の重量と結晶になった質量の比。
国際電気標準会議 (IEC)	International Electrotechnical Commission (IEC)	電気工学、電子工学、および関連した技術を扱う国際的な標準化団体。
固定砥粒方式	Fixed diamond abrasive method	Ni メッキにより鋼線に固定されたダイヤモンド砥粒によるスライス方式。
再結合	Recombination	表面や欠陥によって電子・正孔が消失する現象。
再結合電流	Recombination current	空乏層内の再結合準位 (不純物や欠陥) を通して p 型層のホールと n 型層の電子との再結合の結果として生じる電流。
最大出力 (Pmax)	Pmax	太陽電池の動作曲線上において、電力が最も大きくなる点での電力。
酢酸	Acetic acid	CH ₃ COOH EVA の加水分解反応で生じる。太陽電池構成材料の化学的 (腐食) 劣化をもたらす。
三段階法	Three stage evaporation method	多元蒸着法の一つ。CIS 系太陽電池の薄膜形成で幅広く使われている。
集光倍率	Condensing magnification	太陽光強度を 1 (SUN) とした時に集光装置で太陽電池に集められた太陽光強度 (SUN)。
酢酸蒸気曝露試験	Exposure test to acetic acid vapor	一定の温湿度条件にて太陽電池を酢酸蒸気に曝露し、セル電極の信頼性を評価する試験。セルをモジュール化せずとも、セル電極の信頼性を評価可能な試験法であり、モジュールの高温高湿試験に代替可能な試験法として SEMI 標準化が決定した。

酸素析出物	Oxygen precipitate	シリコン単結晶中に固溶した酸素が、熱処理等でSiO ₂ として析出した結晶欠陥であり、半導体では内部ゲッタリングサイトとして有効に働くが、太陽電池ではキャリアライフタイム劣化の原因となる。
時間分解フォトルミネッセンス測定	Time resolved photoluminescence measurement	物質にパルス状の光を照射して励起された電子が基底状態に戻る際に発生する光の減衰特性から少数キャリアの寿命を測定する方法。
色素増感太陽電池	Dye-sensitized solar cell	色素で光感度を増大した酸化チタン等を用いる太陽電池。
四酢酸錫	Tin tetraacetate	錫と酢酸との化学反応により生成する塩。水溶液は可視光に対し透明。
四探針法	Four point probe method	一直線に並べられた4本の梁の外側2本から電流を流し、内部2本の針間に生ずる電位差を測定する方法。
実効的キャリア寿命	Effective carrier lifetime	半導体中のキャリア寿命を測定する時、バルクのキャリア寿命は表面や裏面の影響を受けるため、実際のバルクのキャリア寿命は測定されず、実効的なキャリア寿命が測定される。
湿熱試験	Hygrothermal test	湿度ストレスと温度ストレスを同時に印加する試験。
指定面積効率	Designated area efficiency	太陽電池セル・モジュール上に設けられたマスクの開口部により限定された領域の面積を用いて算出した変換効率。
集光型太陽光発電	Concentrating photovoltaics	集光レンズ、集光鏡等を用いて太陽光を集光し、その光で発電する方法。
種子結晶	Seed crystal	ある結晶方位を有する単結晶を成長させるときに種子として用いる単結晶。
寿命	Life (of product)	製品の出力寿命。
出力係数	Performance ratio	出力係数 = 屋外測定出力 (W) / 室内測定出力 (W) × 1000 (W/m ²) / 屋外測定日射強度 (W/m ²) で計算される。出力係数では太陽電池出力に最も大きな影響を与える日射量を一定の条件に換算している。
上空カメラ	Sky camera	上空に向けて設置されたカメラ。天候や雲の様子を撮影する。
焼成	Sintering	固体粉末の集合体が、融点よりも低い温度で加熱することにより、密度の高い結合体になる現象のこと。
晶癖	Crystal habit	同一の結晶で、同一指数面の発達程度が異なることによって生ずる外形の変化。
小面積セル	Small-area cell	1cm ² 程度の面積を持ち、単一の太陽電池セルと電極によって構成される太陽電池。
水蒸気透過率/水蒸気透過度	Water vapor transmission rate (WVTR)	単位面積・単位時間あたりフィルムから水蒸気が透過する量。一般的な単位としては、g/m ² day が用いられる。

錫薄膜センサ	Tin film sensor	カバーガラス上に数十～百数十 nm の膜厚で錫を成膜したセンサ。封止材の加水分解により発生する酢酸の検出に用いる。
積雲	Cumulus	水平方向だけでなく鉛直上方にも伸びた雲。より上方に成長した雲は積乱雲と呼ばれる。
赤外線サーモグラフィ	Infrared thermography	赤外線を測定して対象の温度分布を画像表示する装置。
赤外分光	Infrared spectroscopy	分子構造を赤外域の吸収スペクトルから観測する方法。
積層欠陥	Stacking fault	結晶中に存在する欠陥の一種 ナトリウムなどの金属原子が集積するとリークパスとなる。
積分球	Integrating sphere	散乱光の照度を計測する際等に用いる。
絶縁体	Insulator	電気を通し難い材料。
接合界面	Interface of junction	同種あるいは異種材料の境界面。
接触抵抗	Contact resistance	電極と基板間の接続に関する抵抗。
接続箱	Junction box	太陽電池モジュールの接続ケーブルをまとめるための箱。
絶対分光放射計	Absolute spectroradiometer	分光放射照度の絶対値を測定する分光放射計。
絶対放射計	Absolute radiometer	光の放射照度絶対値を測定する装置。
設置角	Tilt angle	地面と太陽電池モジュールがなす角度。
全天日射計	Pyranometer	半球面上の全方位から入射する太陽光の単位面積当りのエネルギーを計測する測定器。
掃引方向	Sweep direction	太陽電池特性を測定する際の、印加電圧の変化方向（増加方向または現象方向）。
層雲系（層状の雲）	Stratus	水平方向に広がり、鉛直方向の厚さが薄い雲。雲の高度により、層雲、高層雲、巻層雲に分類される。
走査型電子顕微鏡	Scanning electron microscope	電子顕微鏡の一種で、電子を試料表面に照射し、試料表面近傍から放出される二次電子の数を検出することにより、表面の形状を評価することができる。
双晶	Twins	同一の材料に2つ以上の単結晶のドメインが存在し、それぞれのドメインの結晶方位に、幾何学的な特定の規則性があるものを示す。
相対反射率	Relative reflectance	ある試験時刻において、錫薄膜センサの反射率を金リファレンスの反射率で除したもの。
大規模量子分子動力学膜反応計算技術	Large-scale quantum molecular dynamics (MD) simulation method for thin-film deposition process	従来よりも桁違いに多い 1000 原子以上の大規模分子に対して、量子反応計算を高速で行う技術を膜形成反応に応用した技術。これまで困難であった多数原子による堆積過程の可視化、元素密度や電子状態の随時計算を行うことが可能な技術。
対光応答非直線性	Nonlinearity versus irradiance	太陽電池の出力電流と入射光照度の比例関係からのずれ。

対向ターゲットスパッタ	Facing target sputtering	スパッタで薄膜を形成する際に、2枚の対向して設置されたターゲットを用いて製膜を行う技術。プラズマをターゲット間に閉じ込めることができるため、基板に対するダメージの抑制が可能となる。
体積抵抗率	Volume resistivity	材料内部の電気抵抗。
太陽電池セル	Photovoltaic cell (Solar cell)	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
太陽電池モジュール	Photovoltaic module	配線材を用いて複数の太陽電池セルを直列に接続し、ガラスや高分子部材を用いて封止したもの。太陽電池パネルともいう。
太陽電池屋外計測	Outdoor PV panel performance test	屋外にて、実際の太陽光を用いて行う太陽光パネルのIV計測。
太陽電池セル	photovoltaic cell (solar cell)	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
耐用年数	Durability	太陽電池モジュールが使用できる期間として法的に定められた年数。
多項式補間法	Polynomial interpolation method	関数値が既知の部分においてその関数に最も合うように多項式関数を構成することによって補間する方法。
多接合太陽電池	Multi-junction solar cell	光の利用波長領域が異なる太陽電池を複数積層した太陽電池。
多結晶	Multicrystal	ある塊が様々な方位をもつ多数の単結晶の集合で出来ている固体。
種子結晶（種結晶）	Seed crystal	ある結晶方位を有する単結晶を成長させるときに種子として用いる単結晶。
単セルPVモジュール	Single cell photovoltaic module	モジュール内に一つのセルのみを封止した、研究用太陽電池モジュール。
単結晶	Monocrystal	1個の結晶内のどの部分においても原子配列の向きが全く同一である固体。
単結晶シリコン太陽電池セル	Monocrystalline silicon	精製された高純度シリコン結晶をスライスした、一つの結晶から製造される太陽電池セル。
単体ストレス試験	Single stress test	主には、湿熱試験、温度サイクル試験、PID試験、DML試験
短波放射	Shortwave radiation	気象学の用語で、太陽から光、すなわち日射を示す。波長帯は可視光（約380 nm～800 nm）を含む100 nm～5,000 nmである。
短絡電流（Jsc）	Short circuit current	太陽電池セル・モジュールの出力端子を短絡した時の両端子間に流れる電流。
中間バンド	Intermediate-band	量子ドットのミニバンドが、周りの半導体のバンドギャップの中間付近に形成された場合のこと。それらが形成する3つのバンドで太陽光を吸収するのが中間バンド太陽電池である。

長期信頼性	Long term reliability	太陽電池モジュールが30年以上の運転環境下で安定して期待された役割を果たすことができる能力のこと。
超高温定点黒体炉	Ultra high temperature black body furnace	約3000Kの超高温で定点を実現できる黒体炉。
超格子	Superlattice	複数の種類の結晶格子の重ね合わせにより、その周期構造が基本単位格子より長くなった結晶格子。
直列抵抗	Series resistance	太陽電池に対して直列的に作用する抵抗。直列抵抗が大きくなった場合、発電性能は低下する。
低倍集光/低倍率集光	Low concentration	数倍から50倍程度までの範囲で集光すること。
電圧変成器	Voltage transducer	所定範囲の電圧を所望の範囲の電圧に変換する機器。
電圧誘起劣化	Potential-induced degradation (PID)	モジュールのフレームとセル間にかかる電圧により誘起される劣化の総称。大規模太陽光発電所の普及によるシステムの高電圧化にともない顕在化した。セルやモジュールの部材や構造により劣化現象は大きく異なり、そのメカニズムも十分に解明されていない。
転位	dislocation	線状欠陥/結晶の塑性変形を担う
転位クラスタ	Dislocation cluster	多数の転位が高密度に集積し、転位群や亜粒界(sub grain boundary)が形成されたもの。
転位クラスタ占有比率	Dislocation cluster ratio	基板1枚中の転位クラスタの面積比率。単位は%で示す。
転位密度	dislocation density	結晶中の線状の結晶欠陥の面密度。
添加剤	Additives	封止材中には材料の安定性を高めるために、複数の分子が添加剤として配合されている一部は太陽電池 Mo の信頼性に大きく影響する。
電子負荷装置	Electronic load device	電子回路を内蔵していて負荷の大きさを可変にできる負荷装置。
伝導帯オフセット	Conduction band offset	異種半導体を接合した時の伝導帯底のエネルギー差。
電流分布	Current distribution	ある面内などにおいて電流密度の高い部分や低い部分を示す。
電流密度	Current density	単位面積当たりに単位時間に流れる電流量。
等価システム運転時間	Photovoltaic system yield	アレイから供給されるシステム出力電力量を、標準太陽電池アレイ出力で除した値。
等価太陽日照時間	Reference yield	基準アレイ面日射強度で積算アレイ面日射量を供給するのに必要な時間数。
導電体	Conductor	金属など電気を通し易い材料。
透明導電膜	Transparent conductive layer	透光性(透過率:%T)と導電性(シート抵抗: Ω/\square)とを兼ね備えた膜。

二乗平均平方根誤差	Root mean square error	真値との差の二乗の平均をとり、その平方根の値で表した誤差。
日射空間ムラ	Non-uniformity	2つのセンサーで計測される計測時間内の、日射強度の瞬間差の最大値を日射強度で正規化した指標。
日射時間変動	Temporal instability	日射強度計測時間内の、日射強度の最大値と最小値の差を日射強度で正規化した指標。
日射スペクトル	Solar spectrum	波長別の日射強度。太陽から降り注ぐ日射エネルギーは波長毎に強さが異なる。
野立て	Open rack	太陽電池モジュールと架台を地面に設置する方法。
薄膜系太陽電池	Thin-film solar cell	数 μm の光吸収層を用いた太陽電池であり、省資源・低コスト化が期待される。シリコンを用いたものと銅-インジウム-ガリウム-セレン化合物を用いたものが実用化されている。結晶系に比べて水蒸気浸入に弱いとされている。
薄膜シリコンシーブルー太陽電池モジュール	Thin-film Si seethrough photovoltaic module	半導体材料として薄膜シリコンをもちいた透光性の太陽電池であって、太陽電池の向こう側が透けて見える。
反応性スパッタ	Reactive sputtering	スパッタで薄膜を形成する際に、酸素や窒素などの反応性のガスを導入してターゲット材料の成分とガスの反応物質を製膜する技術。
反射防止膜	Anti-reflection coating	太陽電池セル表面での光の反射を減少させるために表面につけた透明な薄膜のこと。
光起電流	Photo-carrier current	光が照射されることで流れる電流。
光照射効果	Light induced effect	太陽電池の特性が光照射によって変化する効果。
光劣化	Light-induced degradation (LID)	セルが光照射されることにより、性能が低下する現象。結晶シリコン、アモルファスシリコン等の材料を用いたセルで観測されるが、その両方で原因は異なる。
光閉じ込め	Optical confinement	太陽電池において透明電極や裏面電極で光を乱反射させ、発電層に光を閉じ込めること。
被測定モジュール	MUT: Module under Test	被測定モジュール。
比抵抗	Specific resistance	電極固有の電気抵抗。
標準試験条件	Standard test condition (STC)	太陽電池の測定条件。温度 25°C 、光強度 1 kW/m^2 、エアマス1.5を指す。
表面プラズモン共鳴	Surface Plasmon Resonance	入射光によって励起される物質内での電子の集団振動を表し、光の振動数が表面電子のプラズマ周波数と一致したとき共鳴的な応答が得られる。
封止	Lamination	太陽電池セルならびに配線をモジュール構成材料（ガラス、フィルム、中間膜など）で封じ込めること。
封止材	Encapsulant	太陽電池モジュールにおいてセルを封止し保護する役割を持つ樹脂材料。

複合サイクル試験	Combined cycle test	複数種の単体ストレスを、循環的に、繰り返し印加する試験。
複合ストレス試験	Combined stress test	複数種の単体ストレスを、連続的に、あるいは同時に印加する試験。
不純物	Impurity	結晶中に混入している微量元素。
部分影	Partial shadow	太陽電池モジュールの一部にかかる影のこと。
分光感度	Spectral response	太陽電池出力の入射光波長依存性を表した特性で、短絡電流の入射単色光入力に対する比。
分光放射照度	Spectral irradiance	放射照度農地の特定の波長成分だけを分離して示す波長幅当たりの放射照度。
分光放射照度標準電球	Spectral irradiance standard lamp	分光放射照度の基準となる標準電球。
分子線エピタキシー (MBE)	Molecular beam epitaxy (MBE)	超高真空の成長室内に結晶の構成元素をそれぞれ納めた容器を設置し、複数の金属蒸発源から発生させた分子線により、構成元素を加熱、気化させて基板に体積させる方法。
分子量分布	Molecular weight distribution	合成高分子は同一組成だが、分子量は異なる分子の混合物である。分子量の広がりをも分子量分布と呼ぶ。
変換効率	Conversion efficiency	最大電力を太陽電池セル・モジュール面積と放射照度との積で除した値。面積の定義によって開口部面積効率、指定面積効率、モジュール（全面積）効率などがある。
補外	Extrapolation	ある区間で定義された関数に対して、その区間の外側の隣接した区間における関数値を推定すること
補間	Interpolation	ある区間で定義された関数が、その区間内部の部分区間において関数値が不明の場合に、関数値が既知の部分から不明の関数値を推定すること
窓層	Window layer	太陽電池の受光面側に形成される層状の構造体。太陽光のスペクトルを広域で太陽電池内に取り込むため、各スペクトルでの屈折率や透過率など光学特性が重要な指標となる。
銘板値	Nameplate value	太陽電池モジュールに貼付けられた銘板に記載されている定格出力。
床材	Flooring material	地表面を覆う材料。
遊離砥粒方式	SiC loose abrasive method	SiC 遊離砥粒によるスライス方式。
四探針法	Four point probe method	一直線に並べられた4本の梁の外側2本から電流を流し、内部2本の針間に生ずる電位差を測定する方法。

陽電子消滅寿命測定	Positron annihilation lifetime spectroscopy	ポリマー中に入射された陽電子の一部は、ポジトロニウムを形成して自由体積空隙中へ局在化した後、電子と対消滅する。空隙のサイズが大きいほど陽電子の寿命が長い。陽電子が消滅するまでの寿命を測定することにより、空隙サイズを測定することができる。
離散フーリエ変換法	Discrete Fourier transform method	離散（デジタル）信号のフーリエ変換。
裏面パッシベーションセル	Passivated emitter rear cell (PERC)	従来のセルは裏面にアルミニウム電極を直接印刷していたが、裏面に絶縁膜を形成することで再結合を低減し、効率向上を図ったセル。従来のセルと比べて大幅な工程増とならずに製造できる利点がある。
裏面材	Back material	太陽電池モジュールの裏面に用いる部材。一般的にはバックシートを用いる。
裏面電極セル	Interdigitated back contact (IBC)	セルの n 型電極、p 型電極ともに裏面に櫛型に配置したセル。セル表面に電極が存在しないため、光損失が少なく高効率を達成している。
裏面電極型太陽電池	Back-contact solar cell	すべての電極が光入射面とは反対側に設置されている太陽電池。
粒界	Grain boundary	面欠陥／多結晶における結晶粒同士の境界面。
量子効率	Quantum efficiency	特定の波長の入射光のフォトン数に対してセル内部で発生するキャリア数の割合（内部量子効率）または、セルの外部に取り出されたキャリア数の割合（外部量子効率）のこと。セルの評価には不可欠の手法である。
量子ドット	Quantum dot	主に半導体において、大きさ数～20 ナノメートル程度の粒状の構造を作り、周りをバンドギャップの大きな半導体で覆うと、電子はその領域に閉じこめられ状態密度が離散化する。3 次元全ての方向から電子を閉じ込めたものを量子ドットと称する。
両面受光太陽電池	Bifacial solar cell	表面、裏面両方からの光で発電する太陽電池。

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ

1.1 事業実施の背景と事業の目的

近年、太陽光発電市場太陽電池モジュール価格の大幅下落や、価格競争力を有する中国等の新興国の太陽電池メーカーのシェア拡大等、市場の状況は大きくかつ急速に変化した。国内の導入量も、技術開発の進展や生産規模拡大による太陽光発電システムの価格低下、導入補助金の効果により、国内の住宅用システム設置が累計100万件を突破する（太陽光発電協会プレスリリース 2012年5月17日）等、着実に進展してきたが、2012年7月の固定価格買取（FIT）制度が開始によって、太陽光発電の導入はさらに加速（制度前の2012年6月末国内導入量は5.6GWであったが、2013年度末には14.3GWまで拡大（資源エネルギー庁HP）した。固定価格買取制度の効果で大量導入社会の実現は目前となり、従来の「普及させるための戦略」から、「普及後の社会を支える戦略」の検討が必要となってきた。

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。太陽光発電は、「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である」と期待されている。

我が国のエネルギー安定供給の確保や、低炭素社会実現の観点から、再生可能エネルギーの導入拡大を進めることは非常に重要である。その一翼を担う太陽光発電に関しては、その特性を十分に理解し、また、その特長を活かした導入形態を模索していくことで、太陽光発電システムの適正な導入を実現し、エネルギー供給量を着実に拡大していく事が求められる。しかしながら、太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの普及がさらに進めば、FIT賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれる。

こうした状況を踏まえ、NEDOは太陽光発電の大量導入社会における、1）太陽光発電の安定的拡大、2）産業基盤の強化、3）新たな価値創造の実現の3つの視点から、現状分析、課題抽出を包括的に行い、その課題解決の方策を検討した。そして今後の技術開発の指針を得ることを目的として、2014年9月に「太陽光発電開発戦略（以下、「開発戦略」という。）」を策定した。開発戦略では以下の5つの課題について整理し、解決に向けた取組方針、開発事項等について論じた。

【課題1】国民負担の増大

【課題2】長期・安定な発電能力維持の必要性

【課題3】立地制約の顕在化

【課題4】廃棄物大量発生への対応

【課題5】グローバル競争の激化

この中で【課題1】国民負担の増大に対する最大の解決策は発電コストの低減であるが、開発戦略では発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh（グリッドパリティ）、2030年に従来型火力発電の発電コスト並みあるいはそれ以下に相当する7円/kWh（ジェネレーションパリティ）を掲げた。また、それらの目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。

NEDOは開発戦略の柱となる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWh（シリコン、CIS系については2025年での実現を目指し、前倒しを行った）の実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指し、2015年から5年間のプロジェクトとして本プロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」を開始した。

1.2 国内外の研究開発の動向

太陽電池の分野では国内においては1974年のサンシャイン計画開始以降、NEDOが主導して技術開発を推進してきた。2014年度までNEDOが「革新的太陽光発電技術研究開発」と「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」で進めてきた発電コスト低減に資する技術の開発は、多くの成果をあげた。例えば、結晶シリコン太陽電池ではヘテロ接合バックコンタクト太陽電池で25%を超える要素技術を

開発し、CIS系薄膜太陽電池でも30cm角サブモジュールで変換効率17.8%（世界最高）を達成する等の成果をあげてきた。また、Ⅲ-V族化合物の薄膜多接合型太陽電池で世界最高効率のセル変換効率を達成、量子ドット等の新概念の太陽電池で世界最高水準の技術を開発、ペロブスカイト太陽電池等の革新的な技術を開発する等、新分野の開拓でも大きな成果をあげた。

一方、世界各国の主要地域における開発状況をみると、国を挙げた研究開発が行われている。プロジェクト開始の2015年時点においては、欧州では、戦略的研究計画（Strategic Research Agenda：SRA）を策定し、発電コスト低減に取り組んでいた。欧州フレームワーク計画FP7（2007～2013）では、製造装置プロセス、集光型太陽電池、次世代太陽電池、薄膜系太陽電池、結晶シリコン太陽電池等、国家横断的な技術開発を行っており、その後はFP7の後継プログラムHorizon 2020（2014～2020）を策定し、更なる研究開発に取り組んでいる。

また、米国では、2011年2月に新たな技術開発戦略として「Sunshot イニシアティブ」を策定し、太陽光発電技術に係るコスト削減、太陽光発電の系統連系に係るコスト削減、太陽光発電の設置・運用に係るコスト削減等の開発を行っている。

一方、中国では、第12次5ヵ年計画（2011～2015年）で、変換効率単結晶シリコン太陽電池で21%、多結晶シリコン太陽電池19%、太陽電池のモジュール製造コスト2020年7元/W（約105円）等の目標を設定し、研究開発を推進していた。2013年時点で、中国メーカーが太陽電池の販売量として出力ベースで6割のシェアを占めるに至ったが、研究開発推進の結果、中国製モジュールの効率、品質とも大きく改善し、さらなるシェアの拡大を実現している。

1.3 技術戦略上の位置づけ

図 I-1 に近年の太陽光発電の研究開発プロジェクトを示す。本プロジェクトは太陽電池の開発を主としていた「革新的太陽光発電技術研究開発」と「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果を踏まえ、開発戦略で掲げた発電コスト低減目標を達成するべく、開発する太陽電池種についても絞り込みを行った。具体的には現在市場に出ている結晶シリコン太陽電池、CIS太陽電池、Ⅲ-V化合物太陽電池、ペロブスカイト太陽電池の4種の太陽電池に絞った。市場の主力製品である結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWh達成の技術的見通しを得たことから、2020年に14円/kWhを達成するべく、当該技術を着実に実用化するための技術を継続して開発することとした。また、2030年までに発電コスト7円/kWh実現に資する要素技術開発も合わせて進めることとした。加えて、実用化まで時間を要するものの、これまでの開発成果から発電コスト低減に有効な太陽電池の実現に有望と考えられるⅢ-V化合物太陽電池とペロブスカイト太陽電池については、2030年発電コスト7円/kWh達成に資する高性能太陽電池を開発することとした。さらに、上記開発に必要な測定、評価、分析技術等の開発等を共通基盤技術として開発することとした。

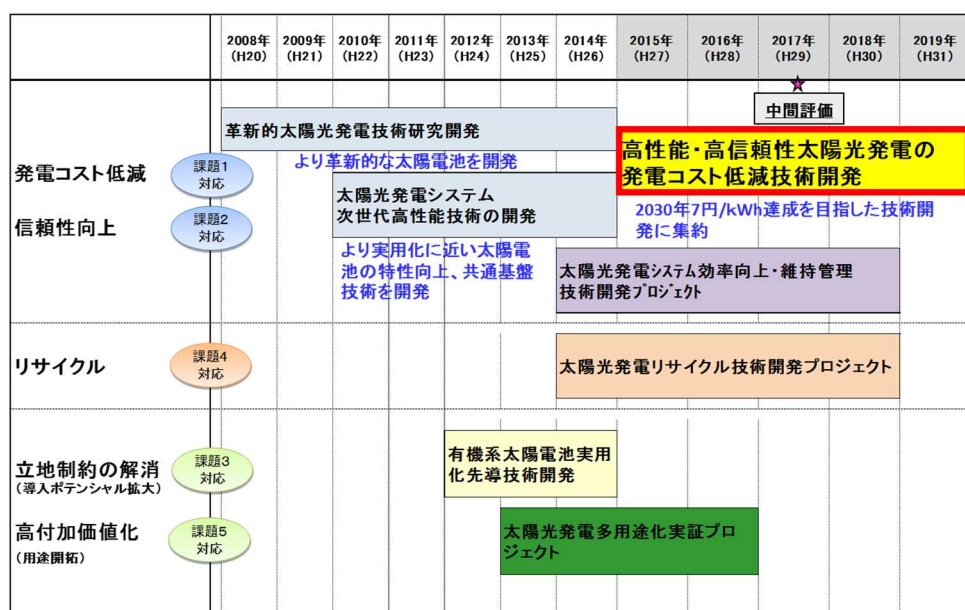


図 I-1. NEDO における太陽光発電研究開発プロジェクト

2. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDOが関与することの意義

1974年に開始したサンシャイン計画以降、NEDOは太陽光発電分野の研究開発を牽引してきた。30年以上にわたるコーディネートの経験があることは研究開発マネジメントにおける大きな強みである。

NEDOは企画、立案段階においては産学官を取りまとめてロードマップを策定するとともに、事業環境の変化に即して改訂を行い、国策を盛り込んだ企画を行う。また、業界全体のニーズを把握するために産学官のヒアリング等を実施し、開発戦略を踏まえた目標を設定することができる。

研究開発体制構築の段階では産学官を組み合わせた柔軟な研究開発体制を構築することができ、企業、大学、公的研究機関でコンソーシアムを形成するとともに、複数の競合企業をコンソーシアムにまとめ上げ、共通の技術目標に向けて研究開発を推進することができる。

事業推進の際には公的機関としての中立性を確保できること、国立研究開発法人制度を最大限に生かして柔軟に推進が可能である。大学及び公的研究機関の基礎研究成果を企業の事業化に活かせるように調整し、必要に応じて加速資金の投入や事業環境の変化に即して追加公募を実施する。長期間にわたる太陽電池の技術開発を牽引してきたNEDOが本研究開発分野に関与するのは最大限の研究開発成果を得るために適切であると考えている。

2.2 実施の効果(費用対効果)

本プロジェクトでは本研究開発は2020年14円/kWhの達成も目標としており、さらに開発した太陽電池モジュールが実用化、販売され、当該モジュールが採用されると想定される2025年には発電コスト7円/kWhを目指す。また、他方、FIT制度の賦課金の負担額は毎年2兆円を超えており、今後の賦課金総額を抑制・減少させていくためには、早期の太陽電池の価格引き下げが必要であり、コスト低減は将来の賦課金含めて大きな波及効果を持つ。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

(1) 研究開発の目的

本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。ただし、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、国内外での競争力確保の観点から太陽電池のコスト低減と効率向上を急ぎ、日本国内における発電コスト7円/kWhの達成目標年を2025年に前倒しする。

具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを十分に下回る太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとともに、2025年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術を開発する。

また、上記開発の進捗により、中間目標年までに多くの成果が生まれ、とくにヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等の高効率太陽電池の技術は確立しつつある。こうした高効率太陽電池は内外から高く評価されているものの、低コストでの製造プロセスにはまだ課題が残り、2025年の発電コスト目標達成には、技術的ブレークスルーが必要な状況である。そこで、高効率太陽電池の発電コスト目標達成をより強固なものとするべく、「高効率太陽電池製造技術実証」を行う。

(2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

2014年度までに実施した「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果から、結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWh達成の技術的見通しを得たことから、当該技術を着実に実用化するための技術を開発することとする。

また、結晶シリコンとCIS太陽電池については2025年までに発電コスト7円/kWh実現に資する要素技術開発を進める。加えて、実用化まで時間を要するものの、これまでの開発成果から発電コスト低減に有効な太陽電池の実現に有望と考えられる技術を対象に、2030年発電コスト7円/kWh達成に資する高性能太陽電池を開発する。なお、これまでは主として高性能化に取り組んできたが、実用化を加速するべく、低コスト化や信頼性も重視する。

さらに、上記開発に必要な測定、評価、分析技術等の開発等を共通基盤技術として開発する。

「高効率太陽電池製造技術実証」では、ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、裏面の接合形成プロセス、パターンニングプロセスなど、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行う。

【最終目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト(円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト14円/kWhを満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25年で20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境（条件）によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2025年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 30%
- ・モジュール製造コスト : 想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するコスト

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 20%
- ・モジュール製造コスト : 15円/Wを実現するコスト

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。
材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

b) 高性能 CIS 太陽電池の開発

- ① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率2/3%以上
- ② 欠陥密度の低減化技術の開発
- ③ CIS太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

a) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ （ 1σ ）以内を目指す。
- ・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ （ 1σ ）以内を目指す。

b) 発電量評価技術

- ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

c) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ・低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。
- ・太陽電池モジュールの性能30年を予測できる加速試験方法を開発する。

5) 動向調査等

a) 動向調査

- ・発電コスト 7 円/kWh 実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

b) IEA 国際協力事業

PVPS の動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

6) 高性能太陽電池製造技術実証

高効率太陽電池を低製造コストで実用化が可能なプロセスの開発を行い、2025年に発電コスト7円/kWhを達成可能な製造技術を試作レベルで実証する。

【中間目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト 17 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト (円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 17 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%
- ・モジュールの出力劣化 20 年で 20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境 (条件) によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2020 年までの実用化計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率 30%以上、且つ、結晶シリコン並の製造コストを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率 20%の達成。

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p 型、n 型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の 2 倍以上にする。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術 (成膜、電極、パッシベーション等) がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

b) 高性能 CIS 太陽電池の開発

① 小面積セル (1cm 角程度) で変換効率 22%以上

② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化

③ CIS 太陽電池の電子構造の明確化

4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

a) 出力測定技術の開発

- ・ 新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。
- ・ 市販されている結晶 Si 系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

b) 発電量評価技術

- ・ 気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

c) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ・ PID 現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。
- ・ 太陽電池モジュールの性能 25 年を予測できる加速試験方法を開発する。

5) 動向調査等

a) 動向調査

- ① 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
- ② 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

b) IEA 国際協力事業

NEDO が参画する PVPS の活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018 年度以降の PVPS への新たな活動計画案を作成する。

② アウトカム目標

本プロジェクトで開発した太陽電池モジュールが実用化、販売され、当該モジュールが採用される太陽光発電システムについて、2020 年には発電コスト 14 円/kWh を十分に下回り、2025 年には発電コスト 7 円/kWh を実現する。これにより、固定価格買取制度の早期卒業が実現すれば、年間数千億円の費用負担削減効果が見込まれる。また、「高効率太陽電池製造技術実証」においては、既に研究レベルで高効率を実証している高効率太陽電池の早期市場投入により、国内住宅屋根設置市場（需要地近接型市場）をはじめ、国内外の設置面積制約の大きい太陽電池市場の獲得に貢献する。

③ アウトカム目標達成に向けての取組

NEDO は、2020 年の発電コスト 14 円/kWh 実現に向け、参画企業の事業戦略を確認する仕組みを構築する。

また、先端複合技術型シリコン太陽電池及び高性能 CIS 太陽電池については 2025 年、革新的新構造太陽電池については 2030 年の発電コスト 7 円/kWh、実現に向け、開発技術の実用化を進めるための産学連携体制を構築する。

さらに、開発技術の信頼性評価技術を開発、公表し、発電コスト低減技術の普及拡大に努める。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 研究開発分野及び事業形態

本プロジェクトでは、以下の研究開発を実施する。

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

1. 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。

2. 高性能 CIS 太陽電池の開発

CIS 太陽電池では、実用化規模の大面积モジュールの高効率化及び低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

・事業形態：研究開発 課題設定型事業

・契約等種別：共同研究（NEDO 負担率：2/3）

本研究開発項目は、大学等の関与が必要となる基盤的な研究要素を含むが、すでに実用化が進んでいる太陽電池を対象として主として企業が実施する開発項目であり、共同研究（NEDO 負担率：2/3）で実施する。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1. 革新的高効率太陽電池の研究開発

一般には普及していないⅢ-V族太陽電池等の超高効率太陽電池において、将来の普及を目指し、現在普及している太陽電池並みのコストで製造するための低コスト化の要素技術開発並びに、太陽電池の効率向上により発電コスト低減を実現する要素技術開発を合わせて行うことで、2030年に7円/kWhを達成する手段を明らかにする。具体的には、変換効率30%以上の薄膜化合物の超高効率太陽電池で発電コスト7円/kWhを達成するために、Ⅲ-V族の太陽電池の製造装置、製造プロセス、多接合化の為に剥離・接合などの製造コスト低減のための要素技術開発や、モジュール化の要素技術開発を行い、その実現性を見極める。

2. 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

太陽電池に新材料、新構造を用いることで製造コストを革新的に低減させ2030年に発電コスト7円/kWhを目指す。モジュール変換効率は20%程度ながら、新材料、新構造を用いることでモジュール製造コストを15円/Wまで革新的に低減することができる技術を実現する。具体的には、新構造のペロブスカイト系太陽電池等の研究開発を行う。

・事業形態：研究開発 課題設定型事業

・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（NEDO 負担率：2/3））

本研究開発項目は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業（NEDO 負担率：100%）として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO 負担率：2/3）として実施する。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1. 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

太陽電池セル・モジュールの各製造プロセスにおいて、評価解析を行い、得られた知見をもとに、原料、結晶、装置、セル、モジュールメーカーの高効率化、低コスト化、高信頼性化に貢献する。

2. 高性能 CIS 太陽電池の開発

発電コスト7円/kWh達成のために、CIS 太陽電池モジュールの高効率化および発電コスト低減を可能とする界面制御技術、再結合パッシベーション、バンドプロファイル評価技術等、要素技術の研究開発を行う。また、実デバイスでの評価検証を行う。

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（NEDO 負担率：2/3））
本研究開発項目は、大学等が研究開発項目①に取り組む企業と産学官で連携して取り組む基盤的技術の開発に係る事業であり、原則委託事業（NEDO 負担率：100%）として実施する。ただし、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO 負担率：2/3）として実施する。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

1. 出力等測定技術の開発
本プロジェクトで開発する太陽電池等、標準化や規格化が進んでいない太陽電池の出力等を正しく評価するための測定技術を開発する。
2. 発電量評価技術
NEDO 日射量データベースについて、データの更新、高精度化等、拡充を進め、ユーザーの利便性向上を図る。
3. 信頼性・寿命評価技術の開発
実際の太陽光発電システムから発電データを取得、分析評価し、発電システムの劣化要因の抽出、劣化メカニズムの解明、および劣化予防対策技術を開発する。太陽電池モジュールが設置される環境を考慮した、長期信頼性を評価するための試験方法を開発する。

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（NEDO 負担率：2/3））
本研究開発項目は、試験・評価方法の提案等、国民経済的には大きな便益がありながらも、民間企業の研究開発投資に見合うものが見込めない「公共財の研究開発」事業であり、原則委託事業（NEDO 負担率：100%）として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO 負担率：2/3）として実施する。

研究開発項目⑤「動向調査等」

1. 動向調査
開発戦略の発電コスト低減目標の達成に向け、必要な情報を収集、整理、分析する。
2. IEA 国際協力事業
諸外国の技術開発動向や政策動向等について、国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた調査・分析を実施すると共に、諸外国の技術開発、政策及び市場動向を把握する。併せてこの活動を通じて日本の太陽光発電の国際競争力向上等を図る。

- ・事業形態：調査委託
- ・契約等種別：委託
諸外国の技術開発動向や政策動向等を把握し、技術開発の方向性や分析・評価手法等の判断に活用するため、各種動向調査や IEA 国際協力事業等を実施するもので、委託事業（NEDO 負担率：100%）として実施する。

研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、裏面の接合形成プロセス等、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行う

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：助成・補助（NEDO 負担率：1/2 以内）
高効率太陽電池の開発実績を有する民間企業が、その技術の事業化を加速し、国際的に競争力を有するために行う開発・実証事業であり、助成事業（助成率：1/2）で実施する。

2.1.2 研究開発テーマ

各研究開発分野で実施する研究開発テーマは、公募により選定した。採択にあたっては、公募時に策定、公表した審査項目・基準に基づいて候補を決定し、外部専門家による採択審査委員会、NEDO 内の契約・助成審査委員会を経て最終決定した。

(1) 2015 年度「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術の研究開発」に関する公募

公募の結果、30 件の提案があったが、各研究開発項目より目標とする発電コスト（2020 年に 14 円/kWh、或いは 2030 年 7 円/kWh）を達成するに資する取り組みとなる 22 件を採択した。

- ・公募期間：2015 年 3 月 10 日～2015 年 4 月 8 日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
 - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。(不必要な部分はないか)
 - II) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
 - III) 共同提案者や連携先と相互補完的、効率的かつ効果的な体制での提案となっているか。
 - IV) 提案内容・研究計画は実現可能か。(技術的可能性、計画、中間目標の妥当性等)
 - V) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか。(関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等)
 - VI) 研究開発予算は、開発する技術や期待する成果に対して過大となっていないか。
 - VII) 目標とする発電コスト計算の内訳や、その根拠等が具体的に示されているか。
(研究開発項目①～③)
目標とする開発成果(評価技術、試験方法等)が具体的に示されているか。
(研究開発項目④)
 - VIII) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか。
(企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか。)
- ・審査委員会委員(敬称略)：
小長井 誠(東京都市大学教授)、田中 良(NIT ファシリティーズ)、片桐 裕則(長岡工業高等専門学校教授)、工藤 一浩(千葉大学教授)、高倉 秀行(立命館大学教授)

(2) 2018 年度「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術の研究開発」に関する公募

発電コスト目標の達成年を 5 年前倒ししたことを踏まえ、既存の研究開発(研究開発項目①③)の体制強化(追加公募)と量産プロセスの構築を狙って新たに追加した実証事業の体制構築(新規公募)を行った。

公募の結果、4 件の提案があった。既存の研究開発(研究開発項目①③)の体制強化(追加公募)に資する取り組みとなる 2 件、量産プロセスの構築を目的とする実証事業(研究開発項目⑥)で 1 件を採択した。

- ・公募期間：2018 年 2 月 26 日～2018 年 4 月 19 日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
 - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか(不必要な部分はないか)。
 - II) 提案内容・研究計画は実現可能か(技術的可能性、計画の妥当性等)。
 - III) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
 - IV) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか(関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等)。また、共同提案者や連携先と相互補完的、効率的かつ効果的な体制での提案となっているか。
 - V) 研究開発予算は、開発する技術や期待する成果に対して過大となっていないか。
 - VI) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか。
(企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自ら

が実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか。)

・審査委員会委員（敬称略）：

小長井 誠（東京都市大学教授）、一木 修（株式会社資源総合システム）、高倉 秀行（立命館大学教授）、庭野 道夫（東北福祉大学教授）、森本 弘（太陽光発電技術研究組合）

2.1.3 研究開発予算の推移

年度ごとの研究開発予算（実績）の推移を表1に示す。

表1. 研究開発予算（実績）の推移（単位：億円）

分野 \ 年度	2015	2016	2017	2018	2019	総額
研究開発項目①（結晶 Si）	7.5	8.7	7.4	7.1	2/3	33.1
〃（CIS）	2.0	2.4	3.0	3.1	1.1	11.2
研究開発項目②（高効率）	9.7	11.4	10.6	11.7	9.2	52.5
〃（低製造コスト）	9.0	8.4	9.9	7.9	7.2	42/3
研究開発項目③（結晶 Si）	8.9	8.7	5.3	6.9	4.3	34.1
〃（CIS）	3.3	2.4	1.8	1.8	1.0	10.3
研究開発項目④	4.8	6.1	4.8	3.2	2.4	21.3
研究開発項目⑤	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	2.9
研究開発項目⑥	—	—	—	1.9	1.0	2.9
計 特別会計（需給勘定）	45.7	48.5	43.5	44.3	29.1	211.1

2.1.4 研究開発内容（分野毎）

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」

1. 研究開発の必要性

現在普及している結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池は、技術開発の進展、市場拡大による量産効果によって性能向上と価格低減が進んでいる。NEDOの「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」プロジェクトでも、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合とバックコンタクトの統合技術によってセル効率25.1%を達成。CIS太陽電池でも高品質光吸収層とCdフリーバッファ層を開発し、小面積セルで変換効率20.9%（2014年4月）、30cm角サブモジュールで変換効率17.8%（世界最高）を達成する等、大きな成果をあげた。しかしながら、2030年までにこれらの成果を実用化し、発電コスト7円/kWhを実現するためには、性能を維持しつつ、大面積化や低製造コストプロセスの開発等を進めるため、更なる技術革新が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

（1）先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。

（2）高性能CIS太陽電池の開発

CIS太陽電池では、実用化規模の大面積モジュールの高効率化及び低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

3. 達成目標

【中間目標】

①試作モジュールで、発電コスト 17 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 17 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%
- ・モジュールの出力劣化 20 年で 20%相当

(加速評価試験の方法については、試験条件 (例えば JISC8917 の温湿度サイクル試験の試験時間等) を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)

なお、発電コスト目標を達成する使用環境 (条件) によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

②2020 年までの実用化計画を提示すること。

【最終目標】

①試作モジュールで、発電コスト 14 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 14 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25 年で 20%相当

(加速評価試験の方法については、試験条件 (例えば JISC8917 の温湿度サイクル試験の試験時間等) を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)

なお、発電コスト目標を達成する使用環境 (条件) によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

②2025年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示すること。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1. 研究開発の必要性

従来の延長線上にはないⅢ-V族等の革新的高効率太陽電池や、コスト構造を革新する太陽電池は、2020年の実用化は困難であるが、変換効率の高さや製造コストの低さから、2030年に7円/kWhの達成が見込める有力な太陽電池である。しかしながら、革新的高効率太陽電池は、現在は一般に普及する価格での製造はきわめて困難であり、事業目標達成のためには太陽電池の製造装置及び製造プロセスの開発や、多接合化のための太陽電池層の剥離、接合技術の開発が必要である。

また、近年短期間で発電効率を大幅に伸ばしている、ペロブスカイト太陽電池など、コスト構造を革新する太陽電池の実現が期待される技術も見いだされているが、実用化には原理検証や、信頼性の確認、新しいコンセプトの製造装置の実現が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

一般には普及していないⅢ-V族太陽電池等の超高効率太陽電池において、将来の普及を目指し、現在普及している太陽電池並みのコストで製造するための低コスト化の要素技術開発並びに、太陽電池の効率向上により発電コスト低減を実現する要素技術開発を合わせて行うことで、2030年に7円/kWhを達成する手段を明らかにする。

具体的には、変換効率30%以上の薄膜化合物の超高効率太陽電池で発電コスト7円/kWhを達成

するために、Ⅲ-V族の太陽電池の製造装置、製造プロセス、多接合化の為の剥離・接合などの製造コスト低減のための要素技術開発や、モジュール化の要素技術開発を行い、その実現性を見極める。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

太陽電池に新材料、新構造を用いることで製造コストを革新的に低減させ2030年に発電コスト7円/kWhを目指す。モジュール変換効率は20%程度ながら、新材料、新構造を用いることでモジュール製造コストを15円/Wまで革新的に低減することができる技術を実現する。具体的には、新構造のペロブスカイト系太陽電池等の研究開発を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率20%の達成。

【最終目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現する要素技術を確立する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術の開発。

実験室レベルの小型太陽電池モジュールでの変換効率20%の達成。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1. 研究開発の必要性

発電コスト7円/kWh、14円/kWhを実現するためには、従来の太陽電池モジュールを超える性能を、低コストで実現しなければならない。そのためには、材料や構造の設計において、基礎的、科学的知見を踏まえた検討を行う必要がある。

本研究開発項目は、研究開発項目①の実施者と産学官連携で進める。

2. 研究開発の具体的内容

以下の研究開発項目を実施する。

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

太陽電池セル・モジュールの各製造プロセスにおいて、評価解析を行い、得られた知見をもとに、原料、結晶、装置、セル、モジュールメーカーの高効率化、低コスト化、高信頼性化に貢献する。

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

転位密度が低くライフタイムの長い高品質で低コストな材料の開発を行う。また、ウエハスライス技術については、低コスト化、低ダメージ化のための知見を得るための研究開発を行う。さらに、材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響の研究を行う。

- ② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発
受光面構造、受光面成膜、裏面成膜、裏面パターン形成、裏面電極構造、高品質透明導電膜、高品質パッシベーション膜、高性能エミッタ、細線低抵抗電極、銀代替電極、ヘテロ接合等の研究開発を行い、技術開発指針を確立する。

(2) 高性能CIS太陽電池の開発

発電コスト7円/kWh達成のために、CIS太陽電池モジュールの高効率化および発電コスト低減を可能とする界面制御技術、再結合パッシベーション、バンドプロファイル評価技術等、要素技術の研究開発を行う。また、実デバイスでの評価検証を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

- ①高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の2倍以上にする。

- ②高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

(2) 高性能CIS太陽電池の開発

- ① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率22%以上
② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化
③ CIS太陽電池の電子構造の明確化

【最終目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

- ①高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。

材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

- ②高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

(2) 高性能CIS太陽電池の開発

- ① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率2/3% 以上
② 欠陥密度低減化の技術開発指針の構築
③CIS太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

1. 研究開発の必要性

太陽光発電の発電コスト低減を実現するためには、長期に亘り安定した発電量を得られることが必要であることから、太陽電池モジュールに対しても、長期信頼性の確保が求められている。

これまでNEDOでは、太陽光発電システム次世代高性能技術の開発において、太陽電池モジュールの評価技術の開発に取り組んできており、出力測定精度の向上や劣化要因について知見が得られつつあるものの、その寿命（耐久性等）を効率的に評価出来る試験技術の確立には至っていない。

発電システムとして信頼性を向上するためには、太陽電池モジュールの耐久性向上に資する技術開発と同時に、実際に設置する環境下での出力測定や寿命を予測できる試験方法といった評価技術の開

発と、PID等の太陽電池モジュールの劣化原因の解明が必要である。
更に、これら評価技術の向上や技術開発と併せて、ガイドライン等の作成、認証機関への技術移転や、標準化・国際規格化を進めるための取り組みも実施することで、信頼性の高い太陽電池が適正に評価される環境を作り、日本の太陽光発電産業の国際競争力の向上に貢献する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 出力等測定技術の開発

本プロジェクトで開発する太陽電池等、標準化や規格化が進んでいない太陽電池の出力等を正しく評価するための測定技術を開発する。

(2) 発電量評価技術

NEDO日射量データベースについて、データの更新、高精度化等、拡充を進め、ユーザーの利便性向上を図る。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

①実際の太陽光発電システムから発電データを取得、分析評価し、発電システムの劣化要因の抽出、劣化メカニズムの解明、および劣化予防対策技術を開発する。

②太陽電池モジュールが設置される環境を考慮した、長期信頼性を評価するための試験方法を開発する。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 出力測定技術の開発

・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

・市販されている結晶Si系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

①PID現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。

②太陽電池モジュールの性能25年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数100倍以上等）を開発する。

【最終目標】

(1) 出力測定技術の開発

・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ (1σ) 以内を目指す。

・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

①低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。

②太陽電池モジュールの性能30年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数100倍以上等）を開発する。

研究開発項目⑤「動向調査等」

1. 調査等の必要性

太陽光発電は、産業、市場、技術等、どの視点においても、国内外で急激に変化している。発電コスト低減を着実に進めるとともに、我が国産業の国際競争力を確保するためには、国内外の動向を把握し、プロジェクトマネジメントに反映していく必要がある。

2. 調査等の具体的内容

(1) 動向調査

開発戦略の発電コスト低減目標の達成に向け、必要な情報を収集、整理、分析する。

(2) IEA国際協力事業

諸外国の技術開発動向や政策動向等について、国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた調査・分析を実施すると共に、諸外国の技術開発、政策及び市場動向を把握する。併せてこの活動を通じて日本の太陽光発電の国際競争力向上等を図る。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 動向調査

- ①年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
- ②発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

(2) IEA国際協力事業

NEDOが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。

【最終目標】

(1) 動向調査

発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

(2) IEA国際協力事業

PVPSの動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

1. 研究開発の必要性

ヘテロ接合バックコンタクト型シリコン太陽電池等の高効率太陽電池は我が国の太陽電池メーカーが世界最高効率を達成する等、技術開発レベルで世界をリードしている。しかしながら、製造工程が複雑なため、量産化と低コスト化には、まだ多くの課題がある。事業化段階においても競争力を有するためには、これらの技術開発と並行して早期に量産プロセスの課題を抽出、解決することが必要である。

2. 研究開発の具体的内容

ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、裏面の接合形成プロセス、パターニングプロセスなど、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行う。

3. 達成目標

【最終目標】

高効率太陽電池を低製造コストで実用化が可能なプロセスの開発を行い、2025 年に発電コスト 7 円 /kWh を達成するための製造技術を試作レベルで実証する。

2.1.5 研究開発内容（実施機関毎）

研究開発テーマ、開発目標、研究内容は以下のとおり。

表. 2 研究開発項目①

「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

No.	開発期間	テーマ名	共同研究先	テーマ概要	目標	その他
1	2015 ～ 2019	結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発	株式会社 カネカ	①集電極をセル裏面側に集約し光入射面側の遮光損を低減させること等で高出力化した高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶 Si 太陽電池の開発を開発する。 ②結晶 Si 太陽電池と非結晶 Si 太陽電池を組み合わせた複合型太陽電池を開発する。	【中間目標】 ①セル変換効率：26%、モジュール変換効率：2/3%、 発電コスト：17 円/kWh ②結晶 Si 太陽電池単セルより変換効率が向上することを確認する。 【最終目標】 ①モジュール変換効率：24%、発電コスト：14 円/kWh ②セル変換効率：30%、モジュール変換効率：27%	
2	2015 ～ 2019	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	シャープ 株式会社	「太陽光発電開発戦略」で掲げる発電コスト低減目標達成のため、高性能と高信頼性を両立したヘテロ接合型バックコンタクト太陽電池の開発をする。ヘテロ接合型バックコンタクト太陽電池の持つ高いセル変換効率を確保のうえ、上記コスト目標を達成可能となる製造技術を構築する。	【中間目標】 ・モジュール変換効率 21%とし、試作モジュールで確認する。 ・「太陽光発電開発戦略」2030 年発電コスト目標 7 円/kWh への定量的なシナリオを提示する。 【最終目標】 ・モジュール変換効率 22%とし、試作モジュールで確認する。	
3	2015 ～ 2018	基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発	株式会社 ナミック ス	モノジャンクションセル用の電極開発において SiNx を取り除かず電流経路を形成できる複合酸化物の探索を行い、電極と Si 基板界面で Passivated Contact 構造を作り出す。これにより再結合電流を小さく抑え開放電圧増加による高効率化が可能な電極を開発する。	【中間目標】 ・低表面濃度の n ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (1×10 ²⁰ cm ⁻³) ・p ⁺ 層に対する接触抵抗 5 mΩ cm ² 以下 ・電極形成による再結合 (j _{0-met}) 500 fA cm ⁻² 以下 ※2018 年度で事業終了。終了時点で以下の最終目標を達成。 【最終目標】 ・低表面濃度の n ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (6×10 ¹⁹ cm ⁻³) ・p ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (6×10 ¹⁹ cm ⁻³) ・電極形成による再結合 (j _{0-met}) 400 fA cm ⁻² 以下	
4	2015 ～ 2017	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	株式会社 クリスタルシステム	低い発電コスト実現のため、高い発電効率を有し且つ長期間の効率劣化を抑制可能な高品質単結晶を安価に製造する方法が必要となり、具体的には下記を赤外線 FZ 法で実現することを目指す。 (a) 高い発電効率を達成するため最適キャリア濃度（リン濃度）で均質組成の単結晶育成 (b) 性能劣化を誘発する酸化励起積層欠陥、COP、転位など	【最終目標】 ・インゴット製造経費 ¥1,700/kg ・直径 220mm ・長さ 300mm 以上 ・リンを均質添加した N 型単結晶であること ・ライフタイム 5msec 以上 ・結晶欠陥 大きさ 100nm 以上が 0.1 個/cm ³ 以下 ・転位がないこと（無転位） ・結晶抵抗面内分布 12% 以下	

				の欠陥の無い高品質単結晶の育成 (c) 安価な製造コストの実現	(100Ωcm, N型結晶において) ・酸素成分および炭素成分濃度 2×10^{16} atoms/cm ³ 以下	
5	2015 ～ 2019	高発電効 率・低コスト 太陽電池 スライスプ ロセスの加 工技術構築	コマツ NTC株式 会社	1. 結晶系太陽電池の発電効率向上 スライスプロセスでの結晶欠陥 や不純物汚染等の、影響明確化 及び改善加工技術を構築する。 2. 結晶系太陽電池の製造コスト 低減 -1. ウエハ薄板化 -2. カーフロスの削減 による、製造コスト低減加工技 術を構築する。	【中間目標】 1. 試作セル発電効率 2/3%以上達成 2-1. ウエハ厚さ 75μm 加工技術確立 2-2. カーフロス 75μm 加工技術確立 【最終目標】 1. 試作セル発電効率 25%以上達成 2-1. ウエハ厚さ 50μm 加工技術確立 2-2. カーフロス 60μm 加工技術確立	
6	2015 ～ 2016	太陽電池用 原料品質の 最適化及び 結晶欠陥の 評価技術の 開発・制御	株式会 社トクヤマ	・原料ポリシリコン等に含まれる 金属不純物のライフタイム及び 変換効率に及ぼす影響を把握 する。 ・原料ポリシリコン等から結晶 インゴットに取り込まれる炭素 等の影響などにより生成するキ ラー欠陥の実体を解明し、キ ラー欠陥の分布や状態を把握可 能な最適な測定手法の開発を行 う。さらに、キラー欠陥の制御 方法を開発する。	【中間目標】 ・不純物および欠陥の影響把握お よび制御化を行う。 ・ライフタイム目標値は 1000μ sec とし、ライフタイム下限値は 300μsec 以上とする。 ※2016 年度で事業終了のため、最 終目標を削除。なお、2016 年時点 で中間目標を達成。	
7	2015 ～ 2019	低コスト高 効率セル及 び高信頼性 モジュール の実用化技 術開発	京セラ株 式会社	①低コスト量産プロセスでの高 効率シリコン太陽電池の開発 (セル効率 22%、モジュール 効率 20%) 生産性が高く工程数の少ないシ ンプルな構造で高効率結晶シリ コン太陽電池の量産化を実現す る。 ②高質量産プロセスでの高信 頼性シリコン太陽電池の開発 (寿命 35 年) 各種加速試験の破壊モードと実 フィールドの破壊モードを紐付 けすることで劣化メカニズムを 把握し、劣化要因に対応したセ ル構造・材料、モジュール構 造・材料にすることで高信頼性 化を実現する。	【中間目標】 結晶 Si 太陽電池セルでセル変換 効率 21%を達成する結晶成長技 術、高効率セル化技術の開発およ び高信頼性モジュールの信頼性評 価技術を確立する。 【最終目標】 結晶 Si 太陽電池セルでセル変換 効率 22%、モジュール効率 20%を 達成する結晶成長技術、高効率セ ル化技術の開発および寿命 35 年以 上の結晶シリコン太陽電池セル、 モジュール化技術を確立する。	
8	2018 ～ 2019	低コスト・ 高信頼性・ 高効率 SuperSi Hetero- junction(SS HJ)太陽電池 の開発	株式会 社パナソ ニック	SHJ 太陽電池の高効率化、低コ スト化の要素技術として、①大 面積ウエハ対応技術、②高機能 テクスチャー技術、③高機能ヘ テロ接合技術、④高機能電極形 成技術の開発を実施する。①か ら④の各要素技術の組合せ最適 化により SBF(Super Bifacial)- SHJ と SBC(Super Back Contact)-SHJ の太陽電池セル で高出力を実証する。	【最終目標】 ・試作モジュールで、発電コスト 7 円/kWh 相当の性能を確認する。 ・発電コスト 7 円/kWh@2024 年を 実現するための開発計画を提示す る。 ※2019 年 9 月で事業終了のため、 最終目標は参考情報とする。	

(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	2015 ～ 2019	CIS 太陽電池 モジュール 高性能化技術の研究開発	ソーラー フロン ティア株 式会社	CIS 太陽電池のモジュール変換効率向上のために、光吸収層の高性能化、界面の高性能化、モジュール構造の高性能化を実施するとともに、モジュールコスト削減技術の開発を実施することで発電コスト目標を達成する。	【中間目標】 発電コスト：17 円/kWh 30cm 角サブモジュール変換効率：19% 【最終目標】 発電コスト：14 円/kWh 30cm 角サブモジュール変換効率：20%	

表. 3 研究開発項目②

「革新的新構造太陽電池の研究開発」
 (1) 革新的高効率太陽電池の研究開発
 超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発

No.	開発期間	項目名	委託先	テーマ概要	目標	その他
I. 低コストセル技術開発						
1	2015～2019	①-a 高効率III-V薄膜セル開発（光閉じ込め）	国立大学法人東京大学（岡田G）	1. III-V薄膜セル（非集光～高倍集光）におけるルミネッセンスカップリング（LC）効果を考慮した動作解析モデルの構築とセル最適設計手法を開発する。薄膜多接合セルの高効率化実証はシャープと連携して行う。 2. 薄膜化による光閉じ込め機構を、量子ドットの吸収増大に適用し、Epitaxial Lift-off（ELO）による薄膜量子ドットセルの開発と高効率化を実証する。	【中間目標】 薄膜多接合セルにおいて、内部発光や多重干渉効果などによるLC効率の増幅効果を実証し、多接合セルに対して有効な光閉じ込め構造を決定する。薄膜多接合セルや薄膜量子ドットセルの構造最適化により、変換効率30%（非集光）の実現可能性を示す。 【最終目標】 III-V薄膜セルにおいて、ELO等低コスト化が可能なプロセスで作製する技術を開発し、LC効果、また光閉じ込め効果を最大活用して、変換効率33%（非集光）を達成する。	
2	2015～2019	①-a 高効率III-V薄膜セル開発（光閉じ込め）	国立大学法人東京大学（中野・杉山G）	シャープと協力して、量子井戸を含むIII-V薄膜3接合セル、及びIII-V薄膜2接合+シリコンセルに適用可能な光閉じ込めメカニズムを検討する。具体的には、裏面光散乱体、表面光散乱構造およびエピタキシャル量子構造によるセル内光散乱体を検討する。シミュレーションおよびテストセルを用いた実験により各構造の光吸収増大効果を定量化し、薄膜多接合構造の最適設計を提案する。	【中間目標】 多接合セルに対して有効な光閉じ込め構造を開発し、量子井戸を含むIII-V薄膜3接合セルおよびIII-V薄膜2接合+シリコンセルの最適層構造を提案する。これにより、変換効率30%（非集光）の実現可能性を示す。 【最終目標】 シャープと連携して量子井戸を含むIII-V薄膜3接合セルおよびIII-V薄膜2接合+シリコンセルに光閉じ込め構造を実装し、光閉じ込め効果を有効に用いることで変換効率33%の達成に資する。	
3	2015～2019	①-a 高効率III-V薄膜セル開発（光閉じ込め）	シャープ株式会社	化合物太陽電池層の薄層化によって材料費および生産性向上による装置減価償却費を低減し、低コスト化を実現することを目的として実施する。具体的には、①逆積み3接合構造、および、②化合物2接合セルとSiセルとのスタックによる3接合構造において、裏面反射の活用、セル表面での散乱制御、ルミネッセンスカップリング（LC）の活用に関する光制御技術開発を行う。その上で、3接合構造における電流整合を考慮した最適化設計を実施する。	【中間目標】 化合物太陽電池層の膜厚を従来の1/4に低減した構造で、変換効率30%を達成する。 【最終目標】 化合物太陽電池層の膜厚を従来の1/4に低減した構造で、変換効率33%を達成する。	

4	2015 ～ 2018	①-b シリコン上Ⅲ-V多接合セル	シャープ株式会社	InGaP/GaAs 2接合セルなどの薄膜化合物2接合セルとSiセルとのスタックによる3接合構造の実現を目指す。化合物太陽電池層のSiセル表面への化合物セルの機械的接合技術の開発およびMOCVDを用いた、Si基板上へのⅢ-V層ヘテロ成長によるセル形成技術の開発の複数のアプローチを行う。	【中間目標】 Ⅲ-V族2接合セルとSiセルとの接合を行ったセルで、変換効率28%を達成する。 ※テーマ整理により2018年度で終了。最終目標を削除。
5	2015 ～ 2019	①-b シリコン上Ⅲ-Vスマートスタックセル	国立研究開発法人産業技術総合研究所	スマートスタック技術により、SiまたはCIGS等の低コストボトムセル上にⅢ-V族トップセルを接合するハイブリッド接合技術の研究を行う。現状接合条件の最適化等、スマートスタック技術を高度化し、最終的に30%以上の変換効率を目標に、研究開発を行う。大面積セルを接合するための実装技術を開発するとともに、発電寿命30年以上を有するスマートスタック高信頼性技術の確立を行う。	【中間目標】 ・GaAs/Si系, GaAs/CIGS系多接合で変換効率28%。 ・システム価格220円/Wを見込むスタック技術の達成手段の明確化。 ・現状1cm 角程度のセル面積を4インチ相当程度に大面積化するための実装技術の明確化。 ・素子寿命30年を目指した高信頼性化技術指針の明確化 【最終目標】 ・GaAs/Si系, GaAs/CIGS系多接合で変換効率30%。 ・システム価格125円/W実現のためのスタック技術確立の指針獲得。 ・大面積化セルの実装技術の確立。 ・素子寿命30年以上の高信頼性化技術指針の確立
6	2018 ～ 2019	①-b シリコン上Ⅲ-Vウエハ接合セル	大阪市立大学(再委託)	表面活性化接合法によりⅢ-Vセル構造とSiボトムセル構造からなるⅢ-V/Si多接合セルを作製し、高効率セル特性を実証する。	【最終目標】 ウエハ接合によるシリコン上Ⅲ-V多接合セルにおいて、非集光下でセル効率>33%を実現する。低倍集光PVモジュール動作を実現する。

II. 低コスト化プロセス技術開発					
1	2015 ～ 2019	②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載	国立大学法人東京大学(岡田G)	<p>(1) ELOによる薄膜セル剥離技術、及び化学エッチングと再成長前の基板の表面クリーニング技術を組み合わせ、10回以上再利用が可能な基板再生技術を開発する。ELO薄膜裏面、また剥離後の基板表面の検査装置、及びELOプロセスの最適化と装置開発は、シャープ、タカノ（再委託）と連携して行う。また項目①-a 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発（光閉じ込め）、さらに産総研が行うスマートスタック多接合セルの開発に本技術を適用する。</p> <p>(2) 基板再利用における再成長表面の清浄化過程として、原子状水素クリーニング法を開発する。表面・ヘテロ界面の制御と高品質化に向けて、本グループが独自に開発を行ってきた原子状水素援用分子線エピタキシー(水素MBE)技術を再成長基板表面の清浄化に適用する。</p>	<p>【中間目標】 4インチ基板サイズのエピ薄膜を再現性よく剥離するためのELOプロセスの最適化を行う。剥離速度20 mm/hを達成する高速化基礎技術を開発、基板再利用に向けたELO時の基板表面保護層、ELO後の基板表面清浄化手法の最適化を行い、薄膜セル作製に適用して作製歩留まり70%を達成する。また、発電コスト7円/kWhを達成しうる量産装置の仕様作成を行う。</p> <p>【最終目標】 ELOプロセスの最適化を進め、剥離速度20 mm/h 以上で4インチウエハサイズのELOを可能とする表面清浄化技術の最適化を行い、基板再生コストを1/2以下に低減する。10回以上の再利用基板上へのⅢ-V化合物セル作製を歩留まり90%以上で達成する。</p>
2	2015 ～ 2019	②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載	タカノ株式会社(再委託)	<p>(1) エッチング槽でエピ薄膜を巻き取りながらELOを効率良く行える自動機を開発する。基板の再利用を可能にする表面状態の情報獲得、ELO時間の短縮等の最適化を実現する自動装置の開発を行う。</p> <p>(2) 基板表面の全面観察装置の開発を行う。基板の再利用を可能にするために、表面状態と再利用後の結晶状態との因果関係性を把握するため、全面観察装置の開発を行う。</p>	<p>【中間目標】 ・4インチ基板サイズのエピ薄膜を再現性よく剥離するためのELOプロセスの開発と装置化に向けた検討を行う。 ・基板再利用の為のELO後ウエハ表面の全面観察の基礎技術の開発と装置化に向けた検討を行う。</p> <p>【最終目標】 ・4インチウエハサイズのELO自動化装置の開発 ・4インチウエハ表面の高速観察(1時間以内)可能な装置の開発</p>
3	2015 ～ 2019	②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用・非真空プロセス	シャープ株式会社	<p>(1) 基板コスト低減のために、エピタキシャルリフトオフ(ELO)プロセスにより化合物太陽電池層をGaAs基板から分離し、基板再生プロセスを経て、GaAs基板上に再度太陽電池層を成長させる一連のプロセスを確立する。</p> <p>(2) ELOプロセス以外の基板剥離技術の開発にも取り組み、基板コストの低減を目指す。</p> <p>(3) 基板コスト以外のセル製造コストを低減させるプロセス技術開発にも取り組み、成果を組み合わせることで、発電コスト低減の目標達成を目指す。</p>	<p>【中間目標】 ELOプロセスを経た2接合太陽電池層をセル化し、変換効率25%以上を達成すると同時に、分離した基板を少なくとも1回再成長に利用できるプロセスを開発する。</p> <p>【最終目標】 基板の再利用可能回数を10回まで向上させる。また、新規プロセスを経たセルの試作・評価を行い、発電コスト目標7円/kWhの達成に寄与し得るかの見極めを行う。</p>

4	2018 ～ 2019	②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	GaAs基板上に層状化合物をバッファ層で挿入してⅢ-Vセルをエピ成長し、層状化合物の劈開性を利用してⅢ-Vセル層を基板から高速リフトオフし、安価な支持基板に移載する技術を研究開発する。本手法はHF等の化学エッチング不要で、高速なリフトオフが可能であり、GaAs基板は繰り返し再利用できるため、従来のリフトオフ法と比較して大幅な低コスト化が期待できる。	【最終目標】 非HFプロセスでの3インチウエハサイズの高速リフトオフを可能とし、非研磨プロセスで10回以上の再利用基板上へのⅢ-V化合物セル作製を達成する。
5	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：MOCVD	大陽日酸株式会社	多接合Ⅲ-V族化合物半導体セルに用いるInGaP、GaAs等のMOCVDプロセスにおいて、原料利用効率とスループットを向上させる装置技術開発を行い、成長条件最適化指針を獲得する。 本プロジェクトで開発するHVPEの進捗も踏まえて、MOCVDとHVPEのハイブリッド装置により、低コストⅢ-V化合物半導体太陽電池を形成する新規プロセスを構築することも検討する。	【中間目標】 ・成長速度40 μ m/h (GaAs)、10 μ m/h (InGaP)を得る。また、III族利用効率30%以上を達成する。 ・in situクリーニングや搬送時間の削減による高スループット化の検証と問題点抽出を行う。 【最終目標】 ・MOCVD、HVPEにより成長速度100 μ m/h、効率20% (GaAs)、成長速度20 μ m/h、効率12% (InGaP)を得る。 ・III族利用効率40%以上を達成する。 ・in situクリーニングや昇降温・搬送時間の削減による高スループット化手法を構築する。 ・MOCVDとHVPEの長所を融合したハイブリッド装置やその大口径化の有効性を検証する。
6	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：MOCVD	国立大学法人東京大学(中野・杉山G)	大陽日酸が開発する高速MOCVD装置および成長条件を用いて、GaAsおよびInGaP結晶層を成長し、キャリア移動度・寿命などの特性と成長条件との相関を明確化、高速成長条件最適化にフィードバックする。さらに、得られた条件をもとにGaAsおよびInGaP単セルを作製しつつ装置形状や製膜条件を改良し、多接合セルの低コスト・高効率化に十分な高速MOCVD条件を構築する	【中間目標】 大陽日酸と共同で、高速製膜条件を用いて単セル効率20%(GaAs 40 μ m/h)、12%(InGaP 10 μ m/h)を得る。 【最終目標】 大陽日酸と共同で、高速製膜(GaAs 100 μ m/h、InP 20 μ m/h)を用いて単セル効率20%(GaAs 40 μ m/h)、12%(InGaP 20 μ m/h)を得る。
7	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE	大陽日酸株式会社	超高速・低コストエピタキシャル結晶成長法であるハイドライド気相成長法(HVPE法)により、Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池作成技術の研究開発を行う。具体的には、GaAsセルの成膜速度を現状の6倍以上、製膜コストを1/10以下に削減する革新的製膜技術の開発を目指す。 装置の設計は東京農工大と連携して行う。開発装置の運用、評価は産総研で行う。	【中間目標】 成長速度40 μ m/h (GaAs)、10 μ m/h (InGaP)を得るとともに、AlAs製膜における問題点を抽出する。 【最終目標】 成長速度100 μ m/h (GaAs)、20 μ m/h (InGaP)を得るとともに、ELOによる基板リサイクル可能なAlAsを製膜する。MOCVDとHVPEの長所を融合したハイブリッド装置やその大口径化の有効性を検証する。

8	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE	国立研究開発法人産業技術総合研究所	超高速・低コストエピタキシャル結晶成長法であるハイドライド気相成長法(HVPE法)により、Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池作製技術の研究開発を行う。GaAsセルの製膜速度を現状の6倍以上、成膜コストを1/10以下に削減する革新的成膜技術の開発を目指す。	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超高速 GaAs、InGaP 成膜技術を開発し、単セル効率15%(GaAs)、8%(InGaP)を達成する。 ・ELO等に用いるAlAsをHVPEにより得るための問題点を抽出する。トンネル接合形成によるInGaP/GaAs タンデム太陽電池を試作・評価し、課題を抽出する。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超高速 GaAs、InGaP 成膜技術を開発し、単セル効率24%(GaAs), 12%(InGaP)を達成する。 ・AlAs 層の成長により、ELOを実証する。 ・InGaP/GaAs タンデム太陽電池2.4V以上の開放電圧を達成する。
9	2015 ～ 2019	②-b 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE	国立大学法人東京農工大学	産総研、大陽日酸と連携し、HVPEの設計に肝要な熱力学計算及び流体計算を担当する。具体的には以下を行う <ul style="list-style-type: none"> ・GaAsおよびInGaP三元混晶HVPE成長の装置設計支援 ・GaAsおよびInGaP三元混晶HVPE成長の成長支援 ・AlAs HVPE成長支援 	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・GaAsおよびInGaPのHVPE成長の原料生成メカニズムおよびH-VPE成長のメカニズムを明らかにする。 ・熱力学解析および流体解析により、GaAs：30 μm/h以上、InGaP：10 μm/h以上の超高速成長技術の成長条件を確立する。 ・AlAs HVPE実現のための原料生成および結晶成長メカニズムを明らかにするとともに、熱力学解析により、原料部および析出部の反応メカニズムを明らかにする。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・量産装置により、GaAs：30 μm/h以上、InGaP：10 μm/h以上の超高速成長技術の成長条件を確立する。 ・AlAs HVPEの量産装置で実現する。
Ⅲ. 低コストモジュール開発					
1	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：非集光モジュール	シャープ株式会社	<p>I. 低コストセル技術開発及び</p> <p>II. 低コスト化プロセス技術開発</p> <p>で開発する低コスト化合物太陽電池セル技術を用い、将来の発電コスト目標(7円/kWh @2030年)達成に寄与し得るモジュール技術の開発を目的とする。具体的には、1.5～3倍程度の低い倍率の集光を行うことで化合物太陽電池の使用量を一定量削減し、モジュールの低コスト化を図る。</p>	<p>【中間目標】</p> <p>集光倍率1.5～3倍程度の低倍集光モジュールにおいて、許容入射角(光学効率が、垂直入射時比90%となる入射角)15°以上を達成する。</p> <p>【最終目標】</p> <p>前記開発テーマ「I. 低コストセル技術開発」および「II. 低コスト化プロセス技術開発」の成果を利用して作製したセルを用い、モジュール変換効率30%以上を達成する。</p>

2	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：無追尾モジュール	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	高価な化合物太陽電池の使用量を少しでも削減することでモジュールの低コスト化を図ることができる。しかしながら、高精度の追尾架台を前提としたモジュールでは総合的なコストダウンを図ることができない。宮崎大学と連携して追尾無し、あるいは低精度追尾でも安定した動作が可能なモジュールの開発を行う。具体的には、追尾無しでも動作可能なモジュールと、低精度および10分ごとの間欠追尾でも安定な発電を行うことが可能なモジュールの開発を行う。	【中間目標】 非集光下で効率30%のセルを用い、モジュール効率27%を達成する。 【最終目標】 非集光下での効率33%セルを使用し、モジュール効率30%を達成する。
3	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：集光モジュール	パナソニック株式会社	目標とする太陽電池特性と信頼性を有するモジュールを製作するための基本技術を確立する。このために、モジュールの基本構造の設計、発電素子の実装と配線への電気接続プロセスの開発、プラスチック基板上への配線形成プロセスの開発、50～300～700倍集光を可能にする低コストレンズ設計・基本作製工法の実現を行う。 また、上記基本技術を元に、目標のコストでモジュールを製造するための技術を確立する。	【中間目標】 以下の性能を有するモジュールを開発する。 ・大きさ：33cm□ ・変換効率：>30% ・集光倍率：～500倍 ・システムコスト125円/Wを実現する構造と達成手段を明確化 【最終目標】 以下の性能を有するパネルを開発する。 ・大きさ：99cm□ ・変換効率：38% (33cm□モジュール) ・システムコスト：≤190円/W ・PICモジュール製造コスト：≤80円/W ・発電コスト：≤14円/kWh
4	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：集光モジュール	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	高価な化合物太陽電池の使用量を少しでも削減することでモジュールの低コスト化を図ることができる。しかしながら、高精度の追尾架台を前提としたモジュールでは総合的なコストダウンを図ることができない。低精度および10分ごとの間欠追尾でも安定な発電を行うことが可能なモジュールの開発を行う。	【中間目標】 非集光下で効率30%のセルを用い、モジュール効率27%を達成する。 【最終目標】 非集光下で効率33%のセルを用い、モジュール効率30%を達成する。

5	2015 ～ 2019	③-a 低コストモジュール開発：モジュール実装技術	国立大学 法人宮崎 大学	低コストでモジュール効率を向上させる手法について開発する。太陽電池モジュールの出力は汚れの影響により低下する。これまでの基礎研究により、簡便な超親水性シリカベースコートにより、ガラス表面の汚れが劇的に抑制できることがわかった。また、コートに反射防止膜の機能を持たせることも可能となる。汚れがセルへの入射光スペクトルに与える影響等も詳細に調査し、多接合セルを用いたモジュールに本技術を応用することにより、長期にわたり高出力を維持するモジュールの開発に取り組む。	【中間目標】 モジュール表面コート技術の開発により、1.5～3倍程度の集光が可能な低倍集光モジュールの開発において、許容角15°で90%以上の出力を達成することに寄与する。 【最終目標】 モジュール表面コート技術の開発により、非集光下での効率33%セルを使用して、モジュール効率30%を達成する。	
6	2015 ～ 2019	③-b 低コストモジュール発電量試算、屋外評価	シャープ 株式会社	前項③-a で開発したモジュールの屋外評価を、宮崎大学と連携して実施する。宮崎大学の評価技術およびテスト環境を活用し、当事業者が開発したモジュールを、宮崎大学が評価を実施し、評価データ、解析結果を共有する形で進められる。	【中間目標】 スペクトルや太陽光入射角度がモジュール出力におよぼす影響について実測・解析する。また発電コスト試算に向け、実測データを元に設備稼働率の算出を行う。加えて、化合物太陽電池セルの試作を実施し、その特性および歩留等の結果に基づいて、量産性の検証およびコスト低減効果の検討を行う。 【最終目標】 低コストモジュールのフィールドテストを実施し、発電量や設備稼働率の実測結果から、発電コスト7円/kWhの達成に向けた見通しを得る。	
7	2015 ～ 2019	③-b 低コストモジュール発電量試算、屋外評価	国立大学 法人宮崎 大学	低倍集光モジュールを効果的に動作させ、かつ飛躍的な低コスト化を実現するためには、安価な追尾機構が必要となる。モジュール出力の太陽光入射角度依存性を測定し、どこまでラフな追尾でも出力を維持することができるかを明らかにする。上記の知見を活かし、低コストモジュールの発電量や設備利用率の試算を実施するとともに、高効率モジュールの開発に寄与する。	【中間目標】 スペクトルや太陽光入射角度がモジュール出力におよぼす影響について実測・解析する。国内の実環境における環境要因において年間を通じて最も効率よく出力できるセルやモジュールの設計を行う。 【最終目標】 低コストモジュールの発電量や設備利用率の試算を実施し、7円/kWhの検証に必要なデータを取得する。	

8	2018 ～ 2019	③-b 低コストモジュール発電量試算、屋外評価	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	(1)気象条件や大気条件から発電量を予測する手法を開発し、宮崎大学の屋外計測データから検証を行う。 (2)超高効率モジュールでの夏期での発電量低下の原因を解明し、年間発電量の向上を図る。 (3)車載面、自動車車体側面（移動、かつ、周辺構築物の日陰の影響を受ける）向けの発電モデルを開発し、宮崎大学屋外計測データから検証を行う。	【最終目標】 全国各地での年間発電量を算出することにより、発電コストを求める。	
IV. 超高効率セル開発						
1	2015 ～ 2019	④-a 多接合：希釈窒化物-MBE	国立大学法人東京大学（岡田G）	(1)水素MBE成長により、Geボトムセル上への高品質GaInNAs:Sbセルの再成長条件の最適化を行う。 (2)エピタキシャル成長、ウエハ接合、メカニカルスタック技術により InGaP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セルを開発する。 (3)窒素 δ ドープ超格子構造を利用した1eV帯GaInNAs混晶の開発は埼玉大と協力して行う。 (4)高倍集光時のルミネッセンスカップリングの影響を考慮した素子設計はシャープと連携して行う。 (5)4接合セル化は、東大グループ、産総研、シャープと連携して進める。	【中間目標】 水素MBE法によるGeボトムセル上へのGaInNAs:Sbセルの再成長条件の最適化、及び2接合セルの作製評価を行う。革新的太陽光発電技術研究開発プロジェクトで開発したGaInNAs:Sb材料を適用して、上部サブセルのフィルタ下で短絡電流密度12mA/cm ² 以上を達成する。 【最終目標】 GaInNAs:Sb/Ge 2接合セル上へのInGaP/GaAsトップ2接合セルのエピタキシャル積層技術、及びメカニカルスタック技術を確立し、4接合セルにより変換効率50%を実現する。	
2	2015 ～ 2019	④-a 多接合：希釈窒化物-MBE	国立大学法人埼玉大学（再委託）	エピタキシャル成長中の原料供給シーケンス制御による、希釈窒化物半導体の高品質成長技術を東大と連携して開発する。GaAs中への窒素 δ ドープ超格子の形成およびInとの混晶化により、多接合セルのサブセル材料として適用可能な高品質1 eV帯混晶膜を作製する。	【中間目標】 N面密度と超格子周期、InおよびGa組成によるバンドギャップエネルギーの制御手法を確立し、Geに格子整合可能な1eV帯混晶薄膜を作製する。上記の条件の下、1～2 ns以上の少数キャリア寿命と400 cm ² /Vs以上の電子移動度を有する混晶薄膜の作製を目指す。 【最終目標】 GaAs基板上GaInNAsヘテロ接合セルの構造設計及び試作を行い、GaAsフィルタ下で短絡電流密度14 mA/cm ² を得る。	

3	2015 ～ 2019	④ -a 多接 合 : InGaP トップセル	シャープ 株式会社	変換効率50%超(集光時)の実現に貢献するために、前プロジェクトで開発した逆積み3接合型太陽電池の変換効率を37.9%(非集光)から更に向上させることを目的としている。具体的には、ルミネッセンスカップリングを活用した逆積み3接合セルを開発する。また別のアプローチとして、InGaPトップセルの特性改善に取り組む。具体的には、セル開放電圧の向上を目指した裏面ヘテロ接合(RHJ)構造の検討を行う。	【中間目標】 逆積み3接合型太陽電池において、ルミネッセンスカップリングの活用もしくはInGaPトップセルにおける裏面ヘテロ接合構造の採用によって高効率化を進め、サブセルの変換効率を前プロジェクトで達成した37.9%セルとの比較での向上を目指す。 【最終目標】 他機関と共同で4接合もしくは5接合型太陽電池を開発し、50%(集光時)の変換効率を目指す。
4	2015 ～ 2016	④ -a 多接 合 : 希釈窒化 物-CBE	学校法人 トヨタ学 園豊田工 業大学	ケミカル・ビーム・エピタキシー(CBE)法を用いた高品質なGaInNAs材料を開発することにより、GaInNAs材料をサブセルに用いた3接合、4接合セルの研究開発を行う。	テーマ整理により2016年度で終了
5	2015 ～ 2016	④ -a 多接 合 : 希釈窒化 物-CBE	国立大学 法人九州 大学(再委 託)	ケミカル・ビーム・エピタキシー(CBE)法を用いた高品質なGaInNAs材料を開発することにより、GaInNAs材料をサブセルに用いた3接合、4接合セルの研究開発を行う。	テーマ整理により2016年度で終了。
6	2015 ～ 2019	④ -a 多接 合 : 量子構造	国立大学 法人東京 大学(中 野・杉山 G)	(1) 第3セルに有効バンドギャップ1.15 eVの超格子を挿入し、電流整合のとれたエピタキシャル4接合を作製することで、集光下効率50%の実現を目指す。 (2) 超格子挿入によるサブセルにおける発光再結合効率向上効果を定量化し、複数のサブセルにおいて超格子を活用したルミネッセンスカップリングにより、太陽光のスペクトル変動に影響されにくい3接合・4接合セルの設計手法を構築する。	【中間目標】 (1) 4接合セルの第3セルに用いて集光下効率50%超を達成するための1.15 eVバンドギャップサブセルに関して、波状構造超格子の構造制御手法を確立する。それを用いた単セルにおいて、電流整合4接合セルの要求値(1.49 eVのフィルタ下で短絡電流9.5 mA/cm ² /sun、開放電圧0.75 eV、曲線因子77%)を達成する。 (2) 量子井戸セルを挿入した多接合セルにおけるルミネッセンスカップリングの効果を定量化し、4接合セルの最適設計に資する。さらに、超格子挿入4接合セルの実装に必要な低抵抗トンネル接合などの要素技術を確立する。 【最終目標】 超格子を挿入した4接合セルにより、集光下効率50%を達成する。
7	2015 ～ 2019	④ -a 多接 合 : ウエハ接 合	東京大学 (中野・ 杉山G)	GaAs基板上に成長した2接合セルと、InP基板上に成長した2接合セルをウエハ接合技術によって接合させることで効率50%の4接合太陽電池セル実現を目指す。このために、まずInP上のInGaAsP/GaAsP 2接合セル作製技術を確立する一方、GaAsとInPの接合技術(主に表面活性化接合)を開発する。4接合セルの作製・実証はシャープと連携して行う。	【中間目標】 GaAs系2接合とウエハ接合による4接合セルを形成するためのInP系2接合セルを作製し、GaAsフィルタ下でGaAs系2接合と電流整合条件を確認する。また、GaAs系2接合とInP系2接合の接合条件を確立する。 【最終目標】 GaAs系接合とInP系2接合から成る4接合セルにより、非集光時変換効率42%、集光下変換効率50%を目指す。

8	2015 ～ 2019	④ -a 多接合：多接合動作解析	国立大学 法人宮崎 大学	多重量子井戸 (MQW) を光吸収層に挿入した太陽電池構造に外部電場を印加し、バンド傾斜が各種キャリア緩和過程に与える影響を明らかにすることでの最適構造に関する知見を得る。また、集光動作時の高温測定を行い、各種キャリア緩和過程に与えるセル温度の影響を明確にすることで、高いキャリア回収効率をもつ多接合セル構造 (バンドラインナップ) の提案を行う。	【中間目標】 太陽電池光吸収層に多重量子井戸や超格子あるいは量子ドット構造を挿入したエピタキシャル多接合セルにおけるキャリア回収過程について、内部電界およびセル温度の影響を明確にする。 【最終目標】 最適なキャリア回収効率を示す各接合バンドラインナップの設計により、集光下効率50%以上の多接合セル実現に寄与する。
9	2015 ～ 2017	④-a多接合：窒化物	国立大学 法人名古屋 大学	窒化物半導体を用いて、半極性面および極性面における各In組成におけるPVセル効率のシミュレーションと(1-101)面Ga ₂ Nの決勝成長を行った。半極性面において、十分な性能のPVセルの作成が可能であることを示したが、実際の結晶成長においては、ヒロックからの電流リークが多く、エピ法の改善が必要である。2016年度も引き続き(1-101)面での結晶成長の最適化を図る。	【中間目標】 InGa ₂ N吸収層を利用したPVのPCシミュレーションに基づき、c面、-c面、(1-101)面に成長する厚膜InGa ₂ Nを用いたセルの最適構造設計を行う。 1) InGa ₂ N結晶成長を行い、各成長面におけるIn組成40%のInGa ₂ N膜成長を実現する。 2) シミュレーションにおいて30%以上の変換効率を達成し、結晶成長およびデバイス構造の最適化との比較を行う。 ※テーマ整理により2017年度で終了。最終目標を削除。
10	2015 ～ 2017	④-a多接合：窒化物	学校法人 名城大学	窒化物半導体材料とGaAs系材料の接合技術を検討した。ITOを中間層として用いる方法および直接接合法の比較を行い、プロセスの容易さなどから直接接合法によりInGa ₂ N/GaInP/GaAs/Ge 4接合太陽電池を試作し、開放電圧の上昇などを確認した。2016年度は同手法の最適化を進めInGa ₂ Nトップセルの有用性を示すことを目的に実験を進める予定である。	【中間目標】 窒化物半導体太陽電池と3接合太陽電池の接合技術を確立し、4接合セルを作製する技術を確立することし、窒化物半導体材料がトップセル材料として有用であることを実証する。 ※テーマ整理により2017年度で終了。最終目標を削除。
11	2015 ～ 2017	④-a多接合：窒化物	国立大学 法人東京 大学 (藤岡 G)	InGa ₂ N トップセルと GaAs ベース3接合セルを4接合セル化するための取り組みを行う。本項目では、低温PSD法を用いて無歪・低欠陥のInGa ₂ N結晶成長を行い、高品位InGa ₂ N基板を供給するための技術を開発する。	【中間目標】 低温PSD法によってIn 組成40%、膜厚数ミクロン以上のInGa ₂ N厚膜を実現する。 ※テーマ整理により2017年度で終了。最終目標を削除。

12	2015 ～ 2019	④ -b 量子 ドット・マル チバンド	国立大学 法人東京 大学(岡田 G)	タイプII型量子ドット及び量子ドット超格子における中間バンド長寿命化による2段階光吸収の増大と、バリア構造による熱脱出の抑制とキャリア収集効率改善を目指した構造の検討を行い、中間バンド型動作による室温高効率化の達成に向けた指針を解明する。	【中間目標】 (1)面内密度 10^{12}cm^{-2} 前後の超高密度InAs量子ドットのサイズ微小化と高均一化(2)InAs/GaAsSbタイプII超格子を用いた中間バンドの長寿命化(3)2段階吸収による電流増大を改善するためのAlGaAs及びInGaPなどの高エネルギーギャップ材料を用いた量子ドット埋め込み構造、を統合的に実装した量子ドットセル、及び低電流・高電圧型低倍集光量子ドットセルで効率30%を達成する。 【最終目標】 低倍集光量子ドットセルで効率45%を達成する。
13	2015 ～ 2019	④ -b 量子 ドット・マル チバンド	国立大学 法人東京 大学(久保・立間 G)	(1)量子ドットボトムセルの高効率化およびナノ粒子内蔵セル作製 (2)ナノ粒子の設計・合成・評価および増強効果の評価 (3)量子ドット多接合セル開発およびナノ粒子内蔵セル作製	【中間目標】 (1)PbS/ZnO-NWセルの近赤外領域(800nm以上)で、PCE=4%と $J_{sc}=14\text{mA}/\text{cm}^2$ を達成。 (2)PbS-QDの吸収領域を0.65 eVに拡張し、第一励起子吸収に対応するEQEで20%を達成。 (3)金属ナノ粒子のプラズモン電場共鳴を1400nmで達成し、PbS/ZnO-NWセルに組込、特性を評価。 【最終目標】 プラズモン金属ナノ粒子層を組込んだPbS/ZnO-NW太陽電池の近赤外領域(900nm以上)において、PCE=4%以上を達成すると共に、接合層を実装したタンデムセルを実現
14	2015 ～ 2019	④ -b 量子 ドット・マル チバンド	国立研究 開発法人 産業技術 総合研究 所	ワイドギャップホストを用いたバンド構造の最適化、タイプII量子ドット構造によるマルチバンドの長寿命化を両立したセルを作製し、マルチバンドセルの超高効率化を実現する。	【中間目標】 量子ドット構造による低倍集光セルでの変換効率30%を達成する。 【最終目標】 量子ドット構造による低倍集光セルでの変換効率45%を達成する。

15	2015 ～ 2019	④ -b 量子ドット・マルチバンド	国立大学法人電気通信大学	面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の量子ドット成長技術の確立および熱処理による結晶性改善効果の確認。Type-II型面内超高密度量子ドット層における励起子状態、ドット間の電子輸送、光吸収・再結合遷移過程の解明。GaAsスペーサ層の導入による長寿命化の達成。	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ GaAs (001) 基板上への InAs (Sb) 量子ドットの自己形成において、InAs量子ドットの面内密度 $1 \sim 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ を達成する。 ・ 5～10層の多重積層化による総密度 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の超高密度化を達成する。 ・ 面内高密度 InAs 量子ドットの GaAsSb層による埋め込み成長を行い、type-II型のバンド構造を導入することで、キャリアの長寿命化（蛍光寿命10 ns以上）を目指す。 ・ 上記の研究開発の成果を取り込んだ量子ドット太陽電池の試作を行い、低集光（数10倍程度）下におけるセルの基本特性を調べ、変換効率の向上の指針を得る。 <p>【最終目標】</p> <p>面内高密度 InAs (Sb) 量子ドットの積層成長による超高密度化および type-II バンド構造によるキャリアの長寿命化を達成し、集光時の変換効率45%を目指す。</p>	
16	2015 ～ 2019	④ -b 量子ドット・マルチバンド	国立大学法人神戸大学	キャリアの長寿命化と高いキャリア引出効率を実現するため、中間バンドを介したキャリアダイナミクスを超精密に評価する技術を開発し、キャリア寿命制御技術を構築する。これによって、中間バンドを介した2段階光励起プロセスを最大化し、量子ドット・マルチバンドセルの効率向上につなげる。	<p>【中間目標】</p> <p>高効率2段階光吸収を明らかにするとともに、量子ドットによるキャリアの再捕獲・脱出過程のダイナミクスを明らかにすることによって、太陽電池動作下でのキャリア取出し効率を詳細に調べ上げ、室温におけるキャリア寿命として10nsを超える長寿命化を実現し、キャリア取出し効率は50%以上まで引き上げる。</p> <p>【最終目標】</p> <p>中間準位キャリアの長寿命化の集光倍率依存性を解明するとともに、ワイドホストヘテロ構造の最適化によるキャリア分離の最適化の検討をより一層進めることによって、室温におけるキャリア寿命として100nsを超える長寿命化を実現し、キャリア取出し効率は80%以上まで引き上げる。以上により、量子ドット・マルチバンドセルの効率45%に貢献する。</p>	

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
塗布製造技術の開発						
1	2015 ～ 2019	塗布製造技術の開発	パナソニック株式会社	高効率化技術の研究開発として新規材料の探索、物性評価を進め、高効率化及びその支配因子の特定を図り、変換効率 20%の実証を図る。また、高耐久化技術の研究開発として薄膜太陽電池や有機 EL 封止技術等を活用	<p>【中間目標】</p> <p>0.5 cm² 程度の小面積太陽電池において変換効率 20%を実現する。また、同じく 0.5 cm² 程度の封止した小面積太陽電池において耐久性 (85℃, 85%, 1000hr での相対効率維持率 95%以上) を実証する。さら</p>	

				し、効率的材料探索により変換効率 20%の材料系での劣化要因抽出、耐久性向上方策を見出し、低製造コスト実現の要素技術開発を行う。また、モジュール化技術の研究開発として、直列構造化による効率低下抑制と直列化工法による効率低下抑制のための要素技術開発を行う。	に、5 直列接続の集積モジュールで開放電圧 5V (セル単位で 1V) 以上を達成する。 【最終目標】 実験室レベル (100 cm ² 程度) でのモジュール効率 20%を実現する集積化モジュール構造を確定するとともに、製造コスト 15 円/W 達成の指針を示す。
超軽量太陽電池モジュール技術の開発					
1	2015 ～ 2019	超軽量太陽電池用塗布印刷/モジュール化技術の開発	株式会社 東芝	2030年での7円/kWhを目指し、ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発を行う。印刷技術を用いて、高効率化技術の開発を行う。超軽量モジュールはロールトゥロールプロセスによる製造コスト低減が可能で、その軽量性から設置コストの削減も見込める。	【中間目標】 ・5cm角程度の超軽量モジュールの変換効率10%を達成する。 【最終目標】 30cm角程度の超軽量モジュールで変換効率15%、あるいは15cm角程度の超軽量モジュールで変換効率17%を達成する。
2	2015 ～ 2019	超軽量太陽電池の耐久性向上技術の開発	株式会社 東芝	2030年での7円/kWhを目指し、超軽量ペロブスカイト太陽電池の耐久性向上の開発を行う。	【中間目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験の耐熱試験、光照射試験で、変換効率12%の1cm角程度の超軽量セルの相対低下率10%以下を達成する。 【最終目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験の耐熱試験、光照射試験で、変換効率17%の5cm角程度の超軽量モジュールの相対低下率10%以下を達成する。
低コストR2R太陽電池製造技術の開発					
1	2015 ～ 2019	超軽量太陽電池の耐久性の向上	積水化学工業株式会社	当社が構築してきた封止・バリア技術をベースに、ダイレクトバリア技術をペロブスカイト太陽電池へ適用し、屋外耐久10年以上を目指す。	【中間目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目について、変換効率10%の1cm角程度の超軽量セルの相対低下率10%以下を達成する。 【最終目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目について、変換効率17%の5cm角程度の超軽量モジュールの相対低下率10%以下を達成する。
2	2015 ～ 2019	R2Rプロセス・材料技術の開発	積水化学工業株式会社	低コスト製造工程の実現に向け、R2Rプロセス技術を構築し、超軽量太陽電池の革新的低製造コスト化を実現する。ペロブスカイト太陽電池の低コスト製造に必要な材料特性を明確化し、コンソ内にフィードバックすることにより発電コスト7円/kWhに向けた、量産時の製造コスト15円/W、モジュール効率15%の技術を開発する。	【中間目標】 ・10cm角程度の超軽量セルにて変換効率ばらつき $3\sigma < 1\%$ を達成する。 ・太陽電池セル材料・構造に関する要素技術を開発し、量産時に超軽量モジュール製造コスト15円/Wに必要な条件を明確化する。 【最終目標】 ・超軽量基板小面積セルで変換効率18.8%(2mm角)を達成する。 ・30cm角程度の超軽量モジュールで15%、あるいは15cm角程度の超軽量モジュールで17%を達成する。 ・量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現し得る、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術を開発する。

高性能・高信頼性確保製造技術の開発					
1	2015 ～ 2019	太陽電池セル構成材料の基礎検討（太陽電池の低コスト材料・製造技術の開発） セル・小モジュール（100mm角）作製プロセスの革新	アイシン精機株式会社	【低コスト化の要素技術】 ① 高性能高信頼性を確保する要素（材料・製造）技術開発 ② 低コスト化に向けた、革新的モジュール製造技術の開発	【中間目標】 ・金代替対極の開発 ・非焼成材料で焼成材料「(TiO ₂)と同等の出力確保 ・低コスト塗工技術開発：スプレー塗工法の開発 ・100mm角モジュールで小型セル変換効率の8割を達成する製造技術の確立 【最終目標】 ・300mm角モジュールで小型セル変換効率の8割を達成する製造技術の確立
2	2015 ～ 2019	太陽電池セル構成材料の基礎検討（太陽電池の低コスト材料技術の開発）	株式会社アイシン・コスモス研究所	【低コスト化の要素技術】 ①高性能高信頼性を確保するセル製造技術の確立 ② 低コスト化に向けた、新規 HTM（ホール輸送剤）材料技術の開発	【中間目標】 新規 HTM（ホール輸送剤）材料の探索と絞込み 【最終目標】 ・ペロブスカイト層のモルフォロジー制御方法の確立 ・従来の材料 spiro-OMeTAD に対し、コスト 1/10 を実現しうる新規 HTM（ホール輸送剤）材料の開発
高性能材料合成技術の開発					
1	2015 ～ 2017	(1) 正孔輸送材料合成技術開発	株式会社富士フィルム	耐湿性低下を引き起こす親水性ドーパントを用いずに Spiro-MeOTAD 同等の変換効率を有す正孔輸送材料を開発する。	【中間目標】 HOMO レベル-5.3eV 以下と Spiro-MeOTA 以上の電流値または Spiro-MeOTAD に対し同等以上の Jsc×Voc 及び耐湿性を可能とする正孔輸送材料設計を抽出する。 ※2017 年度で事業終了のため最終目標を削除。
2	2015 ～ 2017	(2) ペロブスカイト材料技術開発	株式会社富士フィルム	ペロブスカイトの構成成分の変更、表面処理等の耐湿性向上技術を開発する。	【中間目標】 長波長端 750nm 以上且つ、CH ₃ NH ₃ PbI ₃ 同等以上の Jsc×Voc と耐湿性を可能とするペロブスカイト材料設計を抽出する。 ※2017 年度で事業終了のため最終目標を削除。
3	2015 ～ 2017	(1)、(2) 共通項目	株式会社富士フィルム		【中間目標】 セル効率 20%以上 ※2017 年度で事業終了のため最終目標を削除。
基板材料技術と性能評価技術の開発					
1	2015 ～ 2019	高性能基盤材料技術の研究開発	学校法人早稲田大学	①モジュール用ホール輸送材料 (HTM) コスト低減 (低コスト化技術・耐久性向上) ②製造工程簡易化によるコスト低減 (高速製造技術の開発) ③準位・界面制御によるセル効率向上 (出力向上)	【中間目標】 ・耐久性・歩留り高い最適な HTM を選定し、効率 20%を達成可能な HTM 材料でコスト 250 円/m ² を実現する。 ・低コスト製造要素技術を検討し、効率 20%を達成可能な材料系でホール輸送層 (HTL) 製造コスト 500 円/m ² を試験する。 ・以上、セル効率 20%を実現する要素技術を確立する。

					<p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・安価な材料から合成の工程最適化、HTM材料コスト100円/m²・製造工程を簡易化、150円/m² ・高性能なHTM材料での効率増大、小面積セル25%
2	2015 ～ 2019	基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発	国立研究開発法人物質材料研究機構	セル構造の改良、認証データ取得	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・連続光照射200時間超でも安定動作可能なセル構造を明確化する。 ・<i>J-V</i>測定ヒステリシスを効率で3%以内にするセル構造を提示する。 <p>【最終目標】 光照射1000時間超、ヒステリシス1%以内のセル要素技術</p>
3	2015 ～ 2019	信頼性の高い性能評価手法の確立	神奈川県立産業技術総合研究所	性能評価法の確立、耐久性評価と劣化因子の特定	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・環境制御下、単セルで発電性能の決定因子を解明し、信頼性高い評価法 (例えば P_{max}) を提示する(変換効率不確かさ10%以内)。 <p>【最終目標】 ヒステリシスを解消できる測定条件、連続光照射試験の実施と劣化因子の特定</p>
新素材と新構造による高性能化技術の開発					
1	2015 ～ 2019	<p>新素材と新構造の開発</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 高性能化に向けたペロブスカイト材料の開発 2) 耐久性確保に向けた材料開発 3) 低コスト対極材料の開発 4) セル出力の高電圧化と電圧損失メカニズムの解析 5) ペロブスカイト太陽電池のセル構造の改良 	国立大学法人東京大学	<p>ペロブスカイト太陽電池の性能向上に向けて、各層(透明導電電極、電子輸送層[正孔ブロック層]、ペロブスカイト層、正孔輸送層[電子ブロック層]、対極)を構成する材料の開発、各層のナノスケール構造の改良、そして各層が接する界面の制御を進める。このため、塗布製造の他、蒸着プロセスやドライプロセスの利用等も積極的に検討する。また、対極構造についても新規構造を検討し、バックコンタクト等も検討する。材料開発においては、まず主役であるペロブスカイト材料の高純度化、広帯域化、ドーピングの検討を行う。実験的研究だけでは分からないことも多いため、理論計算による材料探索も行う。正孔輸送層材料では、耐久性が期待できる金属化合物正孔輸送材料について検討する。また、簡便に対極を構築するための導電材料も開発する。ナノスケール構造の改良と界面制御は表裏の関係にあり、材料開発とも密接に関係する。特にペロブスカイト太陽電池の電子輸送層のナノ構造は、太陽電池効率やヒステリシス等に大きくかかわるものと考えられており、電子輸送の役割を担う酸化物半導体の構造制御について検討する。ペロブスカイト層と正孔輸送層の界面制御も重要であり、正孔輸送材料を改良することでこの界面を制御する検討も行う。</p>	<p>【中間目標】 ガラス基板小面積セル(有効面積約0.03 cm²)で変換効率20%を達成する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 蒸着により10 mm角でラフネスが±30 nm以内となる高品位ペロブスカイト薄膜を作成する。 2) ホール輸送材フリー構造セルを作製する。 3) カーボン対極を用いたセルを作製する。 4a) ヨウ臭化ペロブスカイトを用いたセルでVoc 1.4 Vを実現する。 4b) 電圧損失を決めるペロブスカイト結晶の質と電荷輸送材料の物性を明らかにする。 5) バックコンタクト構造セルを作製する。 <p>【最終目標】 ガラス基板小面積セル(有効面積約0.03 cm²)で変換効率25%を達成する。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 蒸着により20 mm角でラフネスが±30 nm以内となる高品位ペロブスカイト薄膜を作成する。 2) ホール輸送材フリー構造モジュールを作製する。 3) カーボン対極を用いたモジュールを作製する。 4a) ヨウ臭化ペロブスカイトを用いたVoc 1.4 V以上のセルを、低温製膜による低コスト工程で作製する。 4b) 電圧損失を最小とするモデルをもとに大面積モジュールの作製に使える製膜法を開発する。 5) バックコンタクト構造モジュールを作製する。

2	2015 ～ 2019	界面制御技術	国立大学 法人東京 大学、産 業技術総 合研究所 (再委託)	ペロブスカイト太陽電池の積層材料界面に、界面修飾材料を導入し、材料界面における電荷再結合および直列抵抗成分を制御しFFを向上させることによる高効率化を目指す。	【中間目標】界面制御により、 J_{sc} 2/3 mA/cm ² 以上、 V_{oc} 1.2 V以上の条件でFF 75%以上を実現する。 【最終目標】界面制御によりモジュールでFF 75%以上にするための指針を確立し、変換効率 20%達成に貢献する。
3	2015 ～ 2019	高電流材料技術	国立大学 法人東京 大学、九 州工業大 学(再委 託)	ペロブスカイト太陽電池の光電変換領域を広帯域化することにより、短絡電流密度を上げ高効率化を狙う。同時に、Pb 減量化ペロブスカイト太陽電池の可能性と開発指針を提案する。	【中間目標】Sn 系ペロブスカイト層の膜質を高めることにより J_{sc} 26 mA/cm ² を達成する。 【最終目標】Sn 系ペロブスカイト太陽電池(赤外光電変換)で J_{sc} 34 mA/cm ² を達成する。
4	2015 ～ 2019	基板構造制御技術	東京大 学、東京 工業大 学(再委 託)	ペロブスカイト結晶と酸化物の界面構造と電子移動物性相関の学理を追及することによって、効率向上と動作安定化、長寿命化技術へと達する道筋を明確化する。また、電場ベクトル制御マイクロ波による界面選択加熱現象を用いて結晶化プロセス制御を行い、最終的には、粒界欠陥の極めて少ない単結晶様ペロブスカイト結晶をメソ細孔中で合成するプロセスを創製する。	【中間目標】基板構造制御により、4 mm 角セルで、変換効率面内ばらつき±0.5%以内に収める。 【最終目標】低欠陥ペロブスカイト結晶を形成することで最高デバイス効率を1%押し上げ、デバイスばらつきを±0.5%以内に収める。
5	2015 ～ 2019	電極材料技術	国立大学 法人東京 大学、兵 庫県立大 学(再委 託)	有機ホール輸送材に替えて無機系ホール輸送材を使用することで、「高信頼性化」、「低コスト」および「モジュール出力劣化抑制」の実現を目指す。	【中間目標】a)コスト 250 円/m ² 無機系ホール輸送材で効率 20% (150 円/m ² の場合は16%)を実現する。 b)無機系ホール輸送材を用いた貼り合わせ製造プロセスを開発する。 【最終目標】a)コスト 250 円/m ² 無機系ホール輸送材で効率 25% (150 円/m ² の場合は20%)を実現する。 b)無機系ホール輸送材を用いた貼り合わせ製造プロセスで、HTL 製造コスト 150 円/m ² を実現する。
6	2015 ～ 2019	高純度材料技術	国立大学 法人東京 大学、国 立大学法 人京都大 学(再委 託)	ペロブスカイト太陽電池を構成する材料の高純度化法の確立に取り組み、その効果を詳細に検討する。また、溶液法によるペロブスカイト/バッファ層界面の制御による高性能化についても検討する。	【中間目標】材料高純度化により、塗布型セルでの光電変換効率20%の達成に貢献する。 【最終目標】材料の高純度化および界面制御により、 V_{oc} 1.2 V、および、0.83を超えるFFの実現を目指し、セル変換効率 25%の実現に貢献する。
7	2015 ～ 2019	第一原理計算	国立大学 法人東京 大学、国 立大学法 人熊本大 学(再委 託)	第一原理分子動力学計算と太陽電池デバイス・シミュレーターおよびマテリアルズ・インフォマティクス(「物質に関する情報技術」)を用いて、エネルギー変換効率や安全性の面で優れたペロブスカイト太陽電池用材料の設計指針を確立し、具体的な材料を計算シミュレーションに基づいて提案する。	【中間目標】第一原理計算シミュレーションと太陽電池デバイス・シミュレーターに関する要素技術を確立するとともに、モジュール変換効率 17%以上を達成できる物質を予測する。 【最終目標】第一原理計算シミュレーションと太陽電池デバイス・シミュレーターを駆使した物質探索によって有望物質を理論的に予測し、実デバイスでのモジュール変換効率 20%以上を達成するまで in-silico 材料最適化を行う。

表. 4 研究開発項目③
「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」
(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	2015～2019	Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発	国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学	下地基板表面に損傷を与えず、優れた界面が形成できる低温薄膜堆積法、①Cat-CVD法、および、100℃以下の低温でリン(P)やボロン(B)を結晶シリコン(c-Si)に導入できる新不純物ドーピング技術、②Cat-doping技術、および、新規電極形成技術などを駆使、厚み100・m以下の薄板c-Si基板にも対応できる、低価格で高効率な裏面電極型アモルファスシリコン(a-Si)/c-Siヘテロ接合太陽電池を作製する基盤技術の開発を行う	<p>【中間目標】 Cat-CVD法を用い、効率25%以上の高効率c-Si太陽電池の実現を可能とする基盤的要素技術を開発する。</p> <p>【最終目標】 Cat-CVD法、Cat-doping法、新規裏面電極形成法を用い、効率26%の高効率c-Si太陽電池の低価格作製を可能とする基盤的要素技術を開発する。</p>	
2	2015～2019	薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	企業との連携によりそれぞれの企業の研究開発目標の達成を支援するとともに、産総研は独自に共通基盤技術として、イオン注入技術を基にしたバックコンタクト型セルなどの開発や、これらのセルを用いた高効率・高信頼性モジュールの開発を行う。	<p>【中間目標】 (連携) 極薄ウエハ(厚み75μm)のセル評価プロセスを確立する。高効率(セル効率22%)のためのセル化技術開発課題を明らかにする。長寿命(35年)のための高信頼性モジュール化技術開発課題を明らかにする。 (共通基盤) 高効率セルの低コストのための簡易プロセス要素技術課題を明らかにする。高信頼性の高効率モジュール(モジュール効率22%)の技術開発課題を明らかにする。</p> <p>【最終目標】 (連携) 極薄ウエハ(厚み50μm)の品質指針及び高効率セルプロセス技術開発課題を明らかにする。高効率(セル効率22%)のためのセル化技術開発指針を得る。長寿命(35年)のための高信頼性モジュール化技術開発指針を得る。 (共通基盤) 高効率セルの低コストのための簡易プロセス要素技術指針を得る。薄型セルを用いた高信頼性の高効率モジュール(モジュール効率22%)の技術開発指針を得る。</p>	
3	2018～2019	高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	従来型ヘテロ接合太陽電池は、金属電極がc-Siと接しないパッシベーションコンタクト構造を特徴とし高V _{oc} が得られる一方、光吸収損失が大きい課題がある。本研究では、この課題を克服するため、パナソニック(株)等と連携し、透明性に優れたシリコン系ナノ結晶材料や金属酸化物からなるキャリア選択性パッシベーションコンタクトを開発する。	<p>【最終目標】 ①(連携) 本研究開発により得られたシリコン系ナノ結晶材料を水素化アモルファスシリコン/結晶シリコンヘテロ接合型太陽電池に適用し、標準的なa-Si:Hのみで構成されるベンチマーク構造(発電効率>22%)に比べ、V_{oc}やFFを維持しつつ、JSCの2%以上の向上を達成する。これにより、連携先の目標達成に貢献する。 ②(共通基盤) 金属酸化物系パッシベーションコンタクトとして</p>	

					用いたヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池において、a-Si:Hのみでヘテロ接合を形成するヘテロ接合型太陽電池に比べ、 J_{sc} を3%以上改善する。さらに、ライフタイム評価による開放電圧 (iV_{oc}) で700mV以上を達成する。以上により、シリコン系ヘテロ接合太陽電池の性能を超え得るポテンシャルを実証する。	
先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発 (コンソーシアム)						
1	2015 ～ 2019	先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発	学校法人トヨタ学園豊田工業大学	<ul style="list-style-type: none"> ①新規高効率標準試作ラインの構築 本テーマを推進するために必要な高効率太陽電池試作ラインを構築する。 ②高品質結晶シリコン材料・結晶評価 目標のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶に関する課題を明らかにする。 ③セルプロセス評価 各プロセス技術の量産適用時の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにする。 ④ヘテロ技術評価 従来型ヘテロ接合セル作製技術を確立し、新規ヘテロ接合セル製造プロセスを実現する。 ⑤モジュール評価 太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。 ⑥委員会等の開催 	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ①2/3%のセル変換効率を得られる太陽電池セル試作ラインを構築する。 ②シリコン結晶の評価を進め、2/3%のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶の課題を明らかにする。 ③各プロセス技術を2/3%太陽電池量産に適用する際の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにして参画企業の開発を支援する。 ④高効率ヘテロ接合セルを作製する技術を確立する。新規ヘテロ接合太陽電池の技術的目途付けを行う。 ⑤2/3%太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ①変換効率25%の試作ラインを構築する。 ②25%のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶に関する課題を明らかにする。 ③各プロセス技術を25%太陽電池セルの量産に適用する際の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにし参画企業の開発を支援する。 ④新規ヘテロ接合セルに関して、量産展開可能なプロセスを検討し、セル製造プロセスを実現する。 ⑤25%太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。 	
2	2015 ～ 2019	材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発	学校法人明治大学	<ul style="list-style-type: none"> ・シリコン原料のデバイスへの影響の評価 ・極低濃度炭素の定量手法の開発 ・新規製造プロセスの評価 ・次世代型太陽電池の評価技術の開発 ・低コスト単結晶の評価 	<p>【中間目標】</p> <p>現在の変換効率20%プロセスを改良し変換効率2/3%を実現するのに必要な基盤技術を確立する。特に、物理化学評価の側面から開発を支援し、豊田工業大学と協働して次々世代 (2/3%) セル量産化のための新規材料・プロセスの評価・解析技術を確立する。それらを用いて、各大学や参画企業が開発している個々のプロセスや材料に関する課題を明らかにする。そこで得られた知見を各研究機関に対して横断的にフィードバックすることにより、本開発に関与している機関全体と協力して最終目標の達成に貢献する。</p>	

					<p>以上の結果を各研究機関ならびに参画企業にフィードバックし、さらには参画企業の目標達成に貢献する。</p> <p>【最終目標】 物理化学評価を通じた支援を継続するとともに、変換効率25%の試作ラインの構築に貢献する。特に、25%高効率太陽電池量産化のための新規材料・プロセスの評価・解析技術を確立する。それにより得られた知見、技術開発指針をもとにプロジェクト連携・協力企業の技術開発を支援し、最終目標の達成に貢献する。</p> <p>さらに、変換効率25%を実現するために必要な基盤技術をもとに、そのための新規材料ならびにセルプロセス技術を提案し、各研究機関ならびに各企業との協力の上、参画企業の目標達成に貢献する。</p>
3	2015～2019	高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究	国立大学法人九州大学	<p>① X線カメラによるシリコン単結晶と多結晶の評価 3次元X線トポグラフィ法を用いて、シリコンウエハ内の変換効率低下に関係する欠陥の同定を行う。</p> <p>② CZシリコン結晶化速度、低不純物濃度を達成できる結晶育成方法の提案 高速、低不純物濃度のシリコンCZ結晶の育成方法を提案し、結晶育成を実施する。</p> <p>③ セル作成評価 育成した結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成し、今回育成した結晶の有利性を示す。</p>	<p>【中間目標】 ① X線カメラによるシリコン単結晶と多結晶の評価 X線セクショントポラフマルチスライス法を用いて、シリコンウエハ表面近傍の研磨傷や析出物の3次元観察法を確立する。</p> <p>② CZシリコン結晶化速度の向上と低不純物化法の提案 CZシリコン結晶化速度の向上と低不純物化法の提案を提案し、育成実験を実施する。これにより高ライフタイムの結晶育成条件を提示する。</p> <p>③ セル作成評価 育成した3インチn型結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成する。</p> <p>【最終目標】 ① 3次元X線セクショントポラフ法を用いて、シリコンウエハ中のライフタイム低下欠陥を明らかにする。</p> <p>② CZシリコン結晶化速度、低不純物濃度を達成できる結晶育成方法の提案し、結晶成長を行う。高速、低不純物濃度のシリコンCZ結晶を用いて、セル政策を行う。</p> <p>③ 育成した3インチn型結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成し、本提案の結晶育成方法に優位性を実証する。</p>
4	2015～2019	新規ヘテロ接合用材料に関する研究	国立大学法人名古屋大学	<p>・高品質かつ低吸収なパッシベーション膜の開発のためにクラスター型高性能ヘテロ接合研究開発システムの垂直立上げを行う。そして、上記システムを用いて、パッシベーション膜へ</p>	<p>【中間目標】 ヘテロ接合材料の吸収係数$1 \times 10^3 \text{cm}^{-1} (@600\text{nm})$、導電率：$1 \times 10^{-7} \text{S/cm}$を達成する。この結果を本プロジェクト内の各研究機関ならびに関係企業にフィードバックす</p>

				の0やCなどの添加や新規材料開発を進める。 ・バンドエンジニアリングを駆使し、キャリア選択層に利用できる新規材料の探索を行う。 ・高品質セルに適用可能なシリコン基板の物性解明を行う。	る。 【最終目標】 バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合材料開発を行い、ヘテロ接合材料の吸収係数 $1 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ (@600nm)、導電率： $1 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ の達成を目指す。 また、本研究で得られた知見や基盤技術を各研究機関ならびに関係企業の技術と組み合わせる。	
5	2015～2019	アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研	国立大学 法人東京工業大学	①ライフタイムおよび電流電圧特性の温度依存性測定を用いて、アモルファスシリコン系材料/結晶シリコン界面の精密な評価を行う技術を開発する。 ②低ダメージで金属酸化エミッタを形成する技術を開発する。	【中間目標】 アモルファス膜と結晶シリコンとの界面構造や界面における再結合速度などを評価・解析して、得られた知見、技術開発指針をもとに、ヘテロ系デバイスにおける表面再結合電流 J_{ofront} を75 fA/cm ² 、裏面再結合電流 J_{orear} を40 fA/cm ² に低減する方法を提案する。 【最終目標】 表面再結合電流 J_{ofront} を10 fA/cm ² 、裏面再結合電流 J_{orear} を10 fA/cm ² に低減する方法を提案し、セルメーカーのヘテロ接合デバイスの高効率化を支援する。	
6	2015～2019	低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究	公立大学 法人兵庫県立大学	① 高性能パッシベーション膜材料開発： パッシベーション能力の高い膜を低コストな製膜法により開発し、表裏面再結合電流を低減する。 ② 界面近傍の特性評価技術の構築： 基板/パッシベーション膜界面近傍の電気的特性を高精度に評価する技術を構築し、材料探索ヘフィードバックをかける。 ③ pn接合形成基盤技術の開発： pn接合（エミッタ）の設計指針および形成技術をシミュレーション・実験により開発する。	【中間目標】 表面再結合電流 J_{ofront} 、裏面再結合電流 J_{orear} 、およびバルク再結合電流 J_{obulk} の総和 $J_0 (=J_{\text{ofront}} + J_{\text{orear}} + J_{\text{obulk}})$ を500 fA/cm ² まで低減する。 【最終目標】 表面再結合電流 J_{ofront} 、裏面再結合電流 J_{orear} 、およびバルク再結合電流 J_{obulk} の総和 $J_0 (=J_{\text{ofront}} + J_{\text{orear}} + J_{\text{obulk}})$ を400 fA/cm ² まで低減する。	

(2) 高性能 CIS 太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	2015～2019	光吸収層の高品質化によるCIS太陽電池の高効率化	国立研究開発法人産業技術総合研究所	①アルカリ金属元素制御技術の開発、バッファ層成膜技術の開発により、CdS/CIS 界面の高品質化技術を開発する。 ②高温製膜技術の開発、Cu/Ⅲ族元素組成比制御技術の開発により、CIS 結晶の高品質化技術を開発する。 ③新規透明導電膜材料の探索及び CIS/Mo 界面制御技術の開発を行う。	【中間目標】 CdS/CIS 界面の高品質化および CIS 結晶の高品質化を推進し、CIS 小面積セルで変換効率 22%を達成する。 【最終目標】 CdS/CIS 界面の高品質化および CIS 結晶の高品質化に加えて、新規な透明導電膜材料の探索および CIS/Mo 界面の不活性化を推進し、CIS 小面積セルで変換効率 2/3%を達成する。	
2	2015～2019	界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電	国立研究開発法人東京工業大学	Ag 系カルコパイライト等を表面・界面に導入した CIGS 太陽電池の評価、あるいはこれまで開発してきたチオ尿素等の処理	【中間目標】 表面、粒界および裏面における再結合成分を減少させる技術を開発し、開始時の短絡光電流と開放端	

		池の高効率化		効果を駆使することにより、理論的に予想される高い変換効率が実現されることを実証する。また、裏面再結合速度を低減し、変換効率を飛躍的に向上させるために Ag 計カルコパイライト等を用いたバンドギャップ制御、あるいは酸化物層導入などを CIGS 系太陽電池に適用し、表面・裏面における界面制御技術の可能性を実証するとともに、薄膜化による低コスト化の可能性を検証する。	電圧との積 $25(\text{mA}/\text{cm}^2 \times V)$ から開放端電圧 V_{oc} を $+20\text{mV}$ 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 25.8(\text{mA}/\text{cm}^2 \times V)$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 表面、粒界および裏面における再結合成分を減少させる技術を開発し、開始時の短絡光電流と開放端電圧との積 $25(\text{mA}/\text{cm}^2 \times V)$ から開放端電圧 V_{oc} を $+30\text{mV}$ 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 26.2(\text{mA}/\text{cm}^2 \times V)$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 2/3%の達成に貢献する。
3	2015 ～ 2019	バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発	学校法人立命館	伝導帯位置を制御できる材料として $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O}:\text{B}$ や $\text{Zn}(\text{O}, \text{S}):\text{B}$ などの Zn 系 3 元混晶薄膜を用いて、CBO 制御可能な透明電極を開発する。また、デバイス内の総合的なバンドラインナップの最適化を実現するために、同材料系を用いた高抵抗バッファ層の開発を行う。CIS 表面へのスパッタダメージによる再結合センターの形成を回避するために、本テーマではソフトな成膜法である有機金属気相成長 (MOCVD) 法を用いる。	【中間目標】 従来よりも大きいバンドギャップ (3.5eV 以上) を有し伝導帯位置を制御可能な Zn 系 3 元混晶透明電極を開発し、研究開始時の従来の透明電極を用いたセルに対して 20mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値においては $26\text{mW}/\text{cm}^2$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 Zn 系 3 元混晶透明電極の高品質化 (バンド位置制御性、低抵抗、高透過率) に加え、伝導帯位置を制御できる Zn 系 3 元混晶バッファを開発し、デバイス内の総合的なバンドラインナップを最適化することで、研究開始時の従来構造のセルに対して 30mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値においては $27\text{mW}/\text{cm}^2$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 2/3%の達成に貢献する。
4	2015 ～ 2017	エピタキシャル成長を利用した CIS 太陽電池の高効率化指針の解明	学校法人東京理科大学	結晶粒界が無く、欠陥低減が予想される CIGS 単結晶薄膜をエピタキシャル成長法により製膜して太陽電池を作製し、格子欠陥、結晶粒界および表面ラフネスがデバイス特性へ及ぼす影響を詳細に評価し、欠陥低減技術の開発指針、ひいては CIGS 太陽電池の高性能化指針の解明を目指す。	【中間目標】 エピタキシャル CIGS 単結晶薄膜で、少数キャリア寿命 τ_2 の値で 80ns 以上 (300K) を達成する。また、本技術と他機関が開発する技術を総合して、変換効率 22%の達成に貢献する。 ※2017 年度で事業終了のため最終目標を削除。
5	2015 ～ 2019	結晶欠陥の検出と同等、欠陥密度低減化技術開発支援	国立大学法人筑波大学	①価電子帯から 0.8eV にレベルを持つ欠陥の構造解明、濃度等の定量化を行うとともに、その構造と形成原因を明らかにする。また、価電子帯 0.3eV～0.8eV の未探索領域の欠陥準位の検出と同等を行う。 ②不純物相である Cu_2Se の存在形態 (クラスターサイズや分布) とその定量化、 Cu_2Se によるデバイス特性劣化のメカニ	【中間目標】 格子欠陥、異相欠陥の検出と同定に関する知見と他機関が開発する技術を総合して、変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 格子欠陥、異相欠陥の定量的評価と性質の理解を通して、また他機関が開発する技術を総合して変換効率 2/3%の達成に貢献する。

				<p>ム解明、点欠陥の表面、界面を含めた欠陥分布を明らかにする。</p> <p>③Cu₂Se の形成原因が Ga の拡散不足、反応不足であることを明らかにし、熱や電子等によりエネルギーを与えることで拡散や化学反応を促進する実用的技術開発をする。</p>		
6	2015 ～ 2019	積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発	国立大学 法人鹿児島大学	<p>(a) CIS 層～窓層に至る積層構造のビルトインポテンシャルの定量評価・増大技術の開発</p> <p>(b) CIS 層堆積後処理による電子構造改質機構の解明及びその活用による接合改質技術の開発</p> <p>(c) デバイス縦貫断面のバンド・電位プロファイルの可視化技術の開発</p>	<p>【中間目標】</p> <p>①CIGSSe 表面状態解明</p> <p>②アルカリハライド処理効果の解明</p> <p>③CIGSSe～窓層までのバンドプロファイル評価技術の開発・改善指針の導出</p> <p>④裏面電極～CIGSSe～バッファ～窓層縦貫断面バンドプロファイルの可視化技術の開発</p> <p>【最終目標】</p> <p>①光吸収層側界面におけるバンド湾曲の増大手法の導出</p> <p>②拡散電位 VD 向上指針の導出</p> <p>③裏面電極近傍電界、光吸収層内バンド傾斜の最適化指針の導出</p>	
7	2015 ～ 2019	理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究	学校法人 龍谷大学	<p>第一原理計算とモデル実験を組み合わせて、Cu(In, Ga)(S, Se)₂ 系化合物について Cu/(In+Ga) 比や S/(S+Se) 比が電子構造や欠陥の生成に与える影響について研究し、光吸収層の結晶粒界やバッファ層/光吸収層界面、光吸収層/Mo 電極層界面の太陽電池特性に与える影響を明らかにする。硫黄を含む CIS 光吸収層について得られた総合的な知見を、CIS 光吸収層の材料設計に生かし、ソーラーフロンティア社の CIS 系モジュールの高性能化に貢献する。</p>	<p>【中間目標】</p> <p>光吸収層として CuInSe₂、CuGaSe₂、CuInS₂ を中心とした 3 元系から、Cu(In, Ga)Se₂、CuIn(S, Se)₂、CuGa(S, Se)₂ 等を想定した 4 元系に検討する材料系を拡張して、CIS 太陽電池の電子構造の明確化を図る。</p> <p>【最終目標】</p> <p>光吸収層として 4 元系からさらに Cu(In, Ga)(S, Se)₂ を想定した 5 元系に材料系を拡張して、光吸収層、バッファ層、裏面電極等の構成要素やそれらの界面を含めた CIS 太陽電池の理想的な材料設計技術を提案する。</p>	

表. 5 研究開発項目④
「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
太陽電池性能高度評価技術の開発						
1	2015 ～ 2019	新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	<p>I) 新型太陽電池高精度性能評価技術</p> <p>①各種新型太陽電池性能評価技術の開発</p> <p>②一次基準太陽電池校正技術の高度化</p> <p>II) 屋外性能高度評価技術の開発</p>	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新型太陽電池の性能評価再現性 ±0.5% (1σ) 以内を達成する ・WRRスケールに対するトレーサビリティを確実に維持する。AIST, NREL, PTB, ESTI の間で実施する WPVS 国際根幹比較校正をホスト機関として実施する。また、その結果を基に、統計的解析値 (En数) を算定し、根幹ラボ間の定量的な一緻度を明らかにする。 ・高精度屋外測定に使用する P V 	

					<p>モジュール日射センサのセル数等の構造、設置方法およびサイズが測定精度に及ぼす影響を明らかにし、高精度化のために必要な条件を定量化する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上記開発及び共同機関の開発成果、屋内高精度測定との比較検証等により、市販タイプ結晶 Si 太陽電池モジュールの屋外測定再現性 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を得るために必要な測定装置、条件、手順を明らかにして実証する。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新たに開発される新型太陽電池の性能評価再現性 $\pm 0.5\%$ (1σ) 以内を達成する。 ・WRRスケールに対するトレーサビリティを確実に維持する。欧米圏に存在するWPVS根幹ラボ以外の多数の校正機関との間で実施する国際比較校正の結果から統計的解析値 (<i>En</i>数、<i>Z</i>スコア) を算定し、定量的な一致度を明らかにして国際的な不整合を解決する。 ・屋内高精度測定との比較検証により、薄膜系を含む市販太陽電池モジュールの屋外測定再現性 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を実証する。
2	2015 ～ 2019	屋外実性能 高能率測定 技術の開発	一般財団 法人電気 安全環境 研究所	太陽電池屋外測定技術高能率 化のための基本技術開発と検証	<p>【中間目標】</p> <p>共同機関との連携による開発成果を基に、結晶 Si 系市販太陽電池モジュールのオンサイトにおける測定再現性精度 $\pm 2\%$ (1σ) 以内が達成可能な装置仕様及び手順を明確にする。また、オンサイトでの性能評価を利用して長期間稼働中の太陽電池モジュールの信頼性を判断する手法を検討する。</p> <p>【最終目標】</p> <p>オンサイトにおいて薄膜系モジュールを含め1日複数台の測定と測定再現性精度 $\pm 2\%$ (1σ) 以内を実証するための装置仕様、手順を明らかにする。これらの成果を基に高精度低コスト屋外測定手法のガイドラインをAISTと共同で策定する。</p>
3	2015 ～ 2019	日射変動解 析技術の開 発	国立大学 法人岐阜 大学	日射変動解析技術の開発 (i) PVモジュール日射センサー アレイによる日射変動空間分布 の計測 (ii) 上空撮影カメラによる日 射変動空間分布の計測 (iii) 太陽電池評価に影響与 える要素に関して気象予報モデル による上空大気状態の解析 (iv) 雲のエッジ部による日射	<p>【中間目標】</p> <p>2017年度までの成果から、岐阜大での観測結果や物理気象モデルによる解析結果のほかAIST, JET, 立命大等共同機関での日射スペクトル測定から、雲のエッジ部による日射増大(雲エッジ効果)時および曇天時の雲不均一性に伴う日射強度とその変動時間と、上空大気特性(おもに、雲の高度・分布や</p>

				<p>変動特性の物理解析、太陽電池評価への影響検討 (v) 雲の不均一性に伴う日射変動特性の物理解析、太陽電池評価への影響検討 (vi) 屋外高精度太陽電池性能評価のための気象条件の定量化 (vii) 屋外高精度太陽電池性能評価のための気象条件の定量化の検証・更新 (viii) 大気放射モデルによる日射スペクトルの解析 (viii) 大気放射モデルの改良による日射スペクトルの解析の高精度化 (ix) 日射変化時のスペクトル変化の評価</p>	<p>移動、可降水量等の大気中水分量など)との物理的関係を明らかにする。そして屋外太陽光発電性能評価の高速 IV 計測の計測時間と同程度(ミリ秒オーダー)における日射強度変動特性とその上空気象状態との関連を整理し、屋外計測の高速 IV 計測で±1.0% (1σ) 以内の測定精度を保証する気象条件(雲種類や可降水量など)を定量化する。このため、これらの結果は屋外計測を実施する AIST や JET に提供し、高速 IV 計測に要求される計測時間中の日射強度安定度を物理的根拠を基に定量的に示す指標として、屋外性能評価精度向上の精度目標達成に貢献する。 また日射スペクトル強度推定モデルを構築することにより、日射強度の急変時の日射スペクトル強度変化を推定し屋外計測に活用できるように整理し、屋外計測を実施する AIST や JET に提供し、屋外性能評価精度向上の精度目標達成に役立てる。</p> <p>【最終目標】 2019 年度までの成果から、太陽光発電屋外性能評価高精度化に係わる気象状態、特に雲の高度や形態、移動速度などの気象三次元情報から、屋外性能評価実施者である AIST や JET がより入手・活用しやすい気象情報(例えば地上天気・温度・湿度・風向風速)で評価可能である新たな手法を確立する。岐阜大での観測・数値解析のほか、AIST, JET, 立命大等共同機関での日射スペクトル測定も活用して、入手しやすい新たな気象情報を基に、高速 IV 計測で±1.0% (1σ) 以内の測定精度を保証する気象条件を再検討し、AIST, JET を提供する。 また日射スペクトル強度推定モデルを高精度に修正することにより、日射強度の急変時の日射スペクトル強度変化を高精度に推定し、屋外計測を実施する AIST や JET が実施する屋外性能評価精度向上の精度目標達成に貢献する。</p>
4	2015 ～ 2019	太陽電池温度の高精度測定技術開発	国立大学 法人宮崎 大学	<p>(i) 太陽電池温度の高精度測定手法の開発 (a) 温度センサの種類や取り付け手法の確立 (b) 有風時にも高精度な温度計測技術の確立 (c) 温度解析シミュレーションによる温度解析</p>	<p>【中間目標】 温度センサの取り付け手法等を検討し有風時にも高精度な温度計測技術を確立する。風の影響によるモジュール内温度分布を考慮した太陽電池温度を定義する。得られた高精度温度計測技術を活用し屋外における太陽電池実性能の温度補正に用いることにより高精度評</p>

				<p>(ii) 風の影響によるモジュール内温度分布を考慮した太陽電池温度の明確化 (a) 大型風洞実験設備を用いた温度分布の実証 (b) 温度解析シミュレーションによる温度分布解析・再現</p> <p>(iii) 高精度に計測された温度補正による屋外性能評価技術高精度化 (a) 得られた高精度温度計測技術を活用し屋外における太陽電池実性能の高精度評価に寄与</p>	<p>価に寄与する。産総研において屋内計測され温度特性がわかっているシリコン太陽電池モジュールについて開放短電圧と測定温度の関係を検証し確立された手法の精度を検証する（前倒し事項）。これらの技術により太陽電池モジュールの実温度測定精度$\pm 2^{\circ}\text{C}$以内を達成する。</p> <p>【最終目標】 産総研において屋内計測され温度特性がわかっているシリコンおよびCIGS太陽電池モジュールについて開放短電圧と測定温度を整合させる。太陽電池モジュールの実温度測定精度$\pm 1^{\circ}\text{C}$以内を達成し、太陽電池モジュール出力特性の屋外測定において高精度温度測定結果を出力の温度補正に用いることにより$\pm 1.0\%$ (1σ) 以内の測定精度を達成することに寄与する。</p>
5	2015 ～ 2019	PV日射計測によるシステム性能測定手法開発	学校法人 東京理科大学	<p>PV日射計測によるシステム性能測定手法開発 (i) システム屋外性能高精度評価のための測定手法の開発 a) 屋外評価装置の構築と評価 b) PVモジュール日射センサを用いた測定 c) 高精度モジュール温度測定技術の適用</p> <p>(ii) PV日射センサを用いたPVシステム測定データ解析手法の開発 a) 電流-電圧特性の重ね合わせシミュレーション b) 照度ムラ、温度ムラを考慮した測定条件の評価</p>	<p>【中間目標】 PVアレイおよびシステムの評価に展開するために必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法に対する要求事項を明らかにする。本要求事項を満たした場合の屋外におけるアレイ発電性能の測定精度として、算出値と測定値との誤差 $\pm 3.0\%$ 以内を達成する。</p> <p>【最終目標】 小規模なPVアレイまたはシステムにおけるオンサイト屋外高精度測定を実施し、アレイ面内照度ムラ、アレイ面内温度分布把握、スペクトル補正等を行い、必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法および測定精度を検証することで、市販タイプ結晶Si太陽電池モジュールを用いた太陽電池アレイの屋外測定精度$\pm 1.0\%$ (1σ) を達成する。</p>
6	2015 ～ 2019	スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発	学校法人 立命館	<p>スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発 (i) APE 高速測定技術の開発 (ii) APE を用いたスペクトル補正による太陽電池屋外測定高精度化技術の開発</p>	<p>【中間目標】 APEセンサの設計・開発・屋外測定実証を行い、太陽光スペクトル指標APE（二波長帯APE）の高速測定技術を開発する。同サイトに設置したシリコン系・化合物薄膜太陽電池モジュールの短絡電流値と二波長帯APEの相関を明らかにし、高速測定した各種太陽電池モジュールのスペクトル補正による高精度化の基本技術を開発して、屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の2分の1に高精度化する技術を検証し、確立する。</p> <p>【最終目標】 4年以上の蓄積測定データを基</p>

					に、高速測定した二波長帯APEを用いた各種太陽電池モジュールのスペクトル補正技術を高精度化させ、屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の3分の1に高精度化する技術を検証し、確立する。化合物薄膜太陽電池モジュールを含めた屋外測定の±1.0% (1σ) 以内の測定精度の達成に貢献する。
太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発					
1	2015 ～ 2019	経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	各種太陽電池の経年劣化調査と発電量推定技術の開発	<p>【中間目標】 結晶シリコン系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、±5%の精度で発電量を推定する技術を開発する。</p> <p>【最終目標】 ヘテロ接合系等の新型結晶シリコン系太陽電池アレイならびに薄膜系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、±5%の精度で発電量を推定する技術を開発する。</p>
2	2015 ～ 2019	日射量データベースの高度化に関する研究	一般財団法人日本気象協会	<p>①5地点における日射スペクトル等の観測</p> <p>②日射量データベース整備の迅速化</p> <p>③日射量データベースの高密度化</p> <p>④日射量データベースの高精度化および日射量データベースの更新</p> <p>⑤日射スペクトルデータベースの更新と全国整備</p>	<p>【中間目標】 前事業の資産である5地点における日射量観測システムの維持・管理に努めるとともに、データの品質管理を行い、⑤で述べるデータベース用のデータとして整備する。観測データの欠測率は10%以下を目標とする。</p> <p>広く利用されているMONSOLA-11に準ずる月平均日射量データを迅速に整備する手法を開発し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。また、整備した日射量データを用いて、わが国における日射量の年変動について明らかにする。</p> <p>「ひまわり8号」から送信されるデータを蓄積するデータストレージを購入し、データ解析が可能な環境整備を実施する。また、「ひまわり8号」のデータを用いた日射量推定技術の開発を行い、1年分の日射量データベースとして整備する。現状のアメダス地点の日射量データを用いた場合との乖離度について解析し、高密度化の効果について定量的に明らかにする。</p> <p>前事業で設置した5地点の気象観測地点における日射量の観測データを用いて、NEDOの日射量データベースの作成に用いた各種日射量推定モデルの検証・改良を行う。また、MONSOLA-11のデータ整備で用いている日射気候区について、</p>

					<p>最新の気象庁の観測データを用いて解析を行い、必要に応じて見直しを行う。</p> <p>加えて、2013年以降の観測データを収録した日射スペクトルデータを整備する。また、実測データを基に日射スペクトル推定モデルの改良を行い、気象庁の日射観測地点における2017年までの日射スペクトルデータを整備する。</p> <p>【最終目標】 観測は2019年度の夏まで継続する。観測データは⑤で述べるデータベース用のデータとして整備する。2019年度末までに観測システムの撤去作業を完了する。観測データの欠測率は10%以下を目標とする。④で開発する日射量推定モデルを用いて、2019年までの月平均日射量データベースを整備する。</p> <p>中間目標で達成した成果について、地上における日射観測データを用いて検証を行い、日射量推定技術の改良を行う。改良を加えた日射量推定技術を用いて、1kmメッシュ、1年分の日射量データベースとして整備する。</p> <p>中間目標で達成した成果について、地上における日射観測データを用いて検証を行い、日射量推定モデルの改良を行う。改良を加えた日射量推定モデル等により、気象庁から提供される2018年までの最新データを用いた日射量データベースを構築する。</p> <p>2018年までの観測データを収録した日射スペクトルデータベースを構築する。また、実測データを基に日射スペクトル推定モデルの改良を行い、気象庁の日射観測地点における2018年までの日射スペクトルデータを整備する。</p>
3	2015～2019	発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価	学校法人東京理科大学	発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価	<p>【中間目標】 北杜サイトの第1期設置システムについて発電特性の分析を継続できる環境を整備・維持しデータ分析を行うとともに、システムの発電データ分析およびモジュールの屋内外測定により設置後10年を迎えるシステムの劣化状況を明らかにする。モジュールの屋内測定結果から算出した年劣化率に対し、屋外測定データを用いたモジュール年劣化率の算出精度として±10%以内(平均)を実現する。</p> <p>【最終目標】 北杜サイトの発電特性分析から得られた劣化率等、本研究において得られた信頼性・劣化に関する知</p>

					見を発電電力量の算出方法に取り込む。本算出方法を用いた北杜メガソーラーの設置後10年間の発電電力量の推定精度として±10%以内(平均)を実現する。
4	2015 ～ 2018	アクセシブルな太陽光発電データベース構築技術の開発	国立大学 法人佐賀 大学	①屋外曝露メガソーラーで利用可能な高速測定システムの開発 ②発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアの開発 ③発電量、日射量データの解析ソフトウェアの開発	【中間目標】 屋外曝露メガソーラーにおいて利用可能なリアルタイム発電量、日射量データの高速測定システムを試作し、様々な方式による性能比較を行い、最も性能の高い方式を提案すること、測定間隔1秒以内を中間目標とする。 高速測定システムの実用化の観点から、最適な測定時間間隔を決定する。 発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを試作し、様々な数理工学的手法による補完アルゴリズムの性能比較を行い、試験データに対する補完誤差が10%を中間目標とする。 発電量、日射量データの解析ソフトウェアを作成し、試験データ・推定データ間の誤差が20%を中間目標とする 【最終目標】 屋外曝露メガソーラーで利用できる発電量、日射量データの最高性能の高速測定システムを完成させること、測定間隔20ミリ秒以内を最終目標とする。 現実を再現できる発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを完成させ、試験データに対して補完誤差が10%以下になるようにする。 発電量、日射量データの解析ソフトウェアを完成させ、日射量等の気象データと発電量との関連を明らかにすることによって、試験データと推定データの誤差が10%以下になることを最終目標とする。
ZEB 適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発					
1	2015 ～ 2019	ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発	株式会社 カネカ	①ZEB 適用を想定した長期信頼性試験の開発 ②建材寿命を考慮した長期耐久性、長期発電性能評価技術の開発 ③低コスト高信頼性太陽電池モジュールの耐久性評価として、高信頼性技術を適用した ZEB 適用型太陽電池モジュールに対して、40年間の運転年数を想定した長期信頼性評価を行い、発電コストの見積もりを行う。 ④ZEB 適用型太陽電池モジュールの標準化への反映として、建材一体型太陽電池の建材としての適合性、太陽電池としての耐	【中間目標】 ・ ZEB 適用型太陽電池モジュールの30年間以上にわたる発電量を推定する評価方法を確立する。発電量データとの比較から1年目の年間平均出力値としての推定精度は±5%以内とし、30年間以上の運転期間にわたる発電性能の年率低下率(%/年)を推定する評価方法を開発する。評価に要する期間は100日以内とする。 ・ ZEB適用型太陽電池モジュールのZEB特有の負荷に対する耐久性を評価する試験方法と基準をBIPV国際標準化委員会にて提案する。

				<p>久性、発電性能、長期信頼性を適切に評価する基準に関する国際規格や ZEB の普及に際してのガイドライン等に反映させる活動を行う。</p>	<p>・ ZEB適用型太陽電池モジュールとして、発電コスト 7 円/kWhを達成するためのコスト目標と課題を明確化する。</p> <p>・ 信頼性・寿命評価技術の開発を行うほかの採択者と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。</p> <p>【最終目標】 ZEB 適用型太陽電池モジュールの建材としての利用期間（40 年間以上の運転期間）にわたる運転期間内総発電量（kWh/ 運転期間）を推定する評価方法を開発する。既設置の太陽光パネルに対しての長期信頼性評価に要する期間は 100 日以内とし、発電量実績データから算出される運転期間内総発電量を元に、太陽光パネルとしての継続利用機能耐用年数（継続利用可能期間）を推定する評価技術（推定精度 5 % 目標）を開発する。</p>
レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発					
1	2015 ～ 2017	ケーシング側から見た太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発	日清紡メカトロニクス株式会社	<p>（i）発電劣化メカニズムの解明</p> <p>（a）経年発電劣化メカニズムの解明</p> <p>（b）PID発生メカニズムの解明</p> <p>（c）再現性良好なPID試験条件の決定</p> <p>（ii）設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発</p> <p>（iii）30年発電性能の寿命予測技術の確立</p>	<p>【中間目標】</p> <p>i) 発電劣化メカニズムの解明</p> <p>（a）経年発電劣化メカニズムの解明</p> <p>p型シリコンセル・n型シリコンセル、ヘテロシリコンセル搭載太陽電池モジュールの経年劣化メカニズムを「ケーシング」と「発電素子」の両面からレーザー技術で解析し、経年劣化メカニズムを提案する。</p> <p>（b）PID発生メカニズムの解明</p> <p>p型シリコンセル・n型シリコンセル、ヘテロシリコンセル搭載太陽電池モジュールのPID発生メカニズムを「ケーシング」と「発電素子」の両面からレーザー技術で解析し、PIDメカニズムを提案する。</p> <p>（c）再現性良好なPID試験条件の決定</p> <p>実モジュールサイズの太陽電池モジュールで、PID試験結果がアレニウス則で整理可能な解析評価システムを開発する。同一太陽電池モジュール5枚のPID試験結果のばらつきが5%未満を達成する。</p> <p>（ii）設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発</p> <p>設置される環境を①湿度、②温度、③塩水、④アンモニア、⑤高電圧に分け、DH条件（①&②）に対して、③、④、⑤の因子の劣化加速係数を算出する。</p> <p>設置場所の環境に対し、①から⑤</p>

					<p>の条件を指定することで、10年、20年、30年に相当するDH試験条件を提示できる試験方法を開発する。</p> <p>(iii) 30年発電性能の寿命予測技術の確立</p> <p>発電劣化メカニズム解明の結果を踏まえ、「ケーシング」のラマン分光分析結果とレーザーによるセルキャリア速度分布評価結果の両面の考察により、レーザー技術による太陽電池モジュールの25年寿命を予測する技術を提案する。</p> <p>信頼性・寿命評価技術の開発を行う他の採択者と連携し、それぞれ開発する評価試験法の特徴(メリット、デメリット)をテーマ全体で、明らかにする。</p>
2	2015 ～ 2017	標準化を目指した寿命予測検査技術の開発	国立大学 法人奈良先端科学技術大学院大学	<p>①標準化を目指した寿命予測試験法の検討と劣化メカニズムのモデル化</p> <p>②寿命予測技術の標準化に向けた規格提案</p>	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電素子の寿命評価技術を確立する。 ・P型、N型、PERC型Si太陽電池におけるモジュール劣化メカニズムモデルを構築する。 ・寿命予測技術の標準化において、規格第一案を提示する ・信頼性・寿命評価技術の開発を行う他の採択者と連携し、それぞれ開発する評価試験法の特徴(メリット、デメリット)をテーマ全体で、明らかにする。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・劣化メカニズムの解明と、寿命30年間予測する加速試験における標準化規格案をJEMAに提示する。
太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発					
1	2015 ～ 2019	太陽電池モジュールの劣化現象の解明、加速試験法の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	<p>①モジュール劣化メカニズムの解明</p> <p>②各種加速試験法の開発</p> <p>③国際標準化とワークショップの創設</p>	<p>【中間目標】</p> <p>長期屋外曝露されたモジュール内酢酸量と発電量低下の関係を定量的に評価する。</p> <p>高温高湿試験と紫外線照射試験の組合せ試験を施したモジュールの発電量と試験条件の関係を定量的に評価する。</p> <p>PID現象に影響を及ぼす要因を体系的に整理し、その影響の程度を定量的に評価する。</p> <p>太陽電池モジュールの性能25年を予測できるとともに、屋外曝露に対して70倍以上の加速係数を有する試験方法を実現する。</p> <p>本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴(メリット、デメリット)を明らかにする。</p> <p>計2回のワークショップを開催する。日本電機工業会の委員会から2件以上の技術テーマについて国際標準化に向けて提案する。IEA PVPS タスク13の情報を収集し、結</p>

					<p>果をフィードバックする。また、成果物作成に貢献する。</p> <p>【最終目標】 長期屋外曝露されたモジュールの各種劣化要因と発電量低下の関係を定量的に評価する。 高温高湿試験、紫外線照射試験、温度サイクル試験、結露凍結試験等の組合せ試験を施したモジュールの発電量と試験条件の関係を定量的に評価する。 屋外でのPID試験での劣化要因を体系的に整理し、PIDの劣化現象を定量的に評価する。 各種環境に特有な劣化現象に応じた加速試験法を開発し、太陽電池モジュールの性能30年を予測できるとともに、屋外曝露に対して100倍以上の加速係数を実現する。 計4回のワークショップを開催する。日本電機工業会の委員会から5件以上の技術テーマについて国際標準化に向けて提案する。</p>
2	2015 ～ 2017	紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析と屋外曝露劣化との相関性検証	デュボン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社	①紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析 ②屋外曝露モジュールの劣化調査と複合劣化現象との相関性の検証 ③試験法開発	<p>【中間目標】 紫外線を含む複合加速試験による封止材の劣化の定性的・定量的な指標を見出す。同時に屋外曝露モジュールの発電量低下の原因調査を実施することで、長期屋外曝露における劣化を再現することが可能な紫外線を含む加速試験方法の方向性を明らかにし、共同提案全体の目標である屋外曝露に対して70倍以上の加速係数（PVモジュールの寿命25年予測）を有する試験法の開発に貢献する。</p> <p>【最終目標】 他の共同提案機関とも連携し、種々の複合加速試験条件における封止材の劣化と、様々な設置環境の屋外曝露モジュール等の劣化の情報を統合し、汎用性が高い長期信頼性を評価する加速試験条件を見出すことにより、共同提案全体の目標である屋外曝露に対して100倍以上の加速係数（PVモジュールの寿命30年予測）を有する試験法の開発に貢献する。また、得られた紫外線による劣化、及び試験条件から国際標準化への提案に貢献する。本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。</p>
3	2015 ～ 2017	屋外曝露モジュールの分析による加速試験法の開発	東レ株式会社	①屋外曝露モジュールの分析 ②曝露環境の検討 ③複合加速試験の開発 ④国際標準化への取り組み	<p>【中間目標】 本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。</p> <p>既保有長期曝露モジュール、短期</p>

					<p>曝露モジュールの解析結果から、裏面材の物性のうち環境ストレスにより劣化したパラメータを2種以上特定し、そのパラメータの劣化要因となったストレスの種類と量を推定する。複合加速試験について、既に提案されている試験および考案した試験の結果を検討し、屋外曝露モジュールとの関連について妥当性の検討を行い、加速試験の開発について目処をつける。目標値は、25年の耐久性を満足するかどうかを3ヶ月（0.25年）で判断できることとする（加速係数100倍）。</p> <p>【最終目標】 中期の曝露モジュールと短期の曝露モジュールの分析結果を比較し、電氣的安全性を担保する裏面材の物性が劣化する速度を見積もり、加速試験での挙動と比較する。</p> <p>曝露環境について、モジュール裏面材が受ける温度・湿度・紫外線ストレス量を正確に理解する。</p> <p>以上の検討結果を活用し、モジュールの環境要因による影響を明らかにすること、および、モジュールの安全性低下につながる可能性のある裏面材の劣化メカニズムを再現する加速試験の開発を達成する。目標値は、30年の耐久性を満足するかどうかを4ヶ月弱（0.30年）で判断できることとする（加速係数100倍）。</p> <p>得られた知見・成果を基礎として、国際標準化の議論の場にて意見・提案を行い、標準化に向けた取り組みを行う。</p>
4	2015 ～ 2019	屋外での電圧誘起劣化の実証研究	石川県工業試験場	<p>② 屋外でのPID実証試験</p> <p>③ 太陽電池の解析（太陽電池内部を理論的に解析することで、PIDの劣化メカニズムを解明する。）</p>	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高システム電圧で稼動する太陽電池のI-V特性の2年間分以上の測定データをまとめる。 ・PID誘発試験データから、PID発生時における特性の挙動を、1特性以上見出す。 ・シミュレーション解析を基にモジュール内においてPIDが誘発し易い箇所・部材を見出し、PID現象による劣化メカニズムの解明を目指す。 ・解析結果を基にPIDに有効な対策案を1つ以上見出す。 ・本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高システム電圧で稼動する太陽電池のI-V特性の4年間分以上の測

					定データをまとめて、劣化とPID発生との関係性を導出する。 ・従来の太陽電池と比較して、PIDに対する耐性を2倍以上にするための条件を導出する。
5	2015 ～ 2019	電圧誘起劣化が発生した箇所の特 定方法、微視的評価手 法の開発	国立大学 法人岐阜 大学	<p>①PIDのメカニズムの解明</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PID加速試験の制御物理量として、PID劣化時の周囲温度、印加電圧、湿度に注目しガラス中より析出するナトリウム化合物を分析する。 ・EVA樹脂中のナトリウム化合物の拡散過程を評価する。 <p>②LBICを用いたPID発生箇所の特 定方法に関する研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・LBICを応用しPID発生箇所を高速で特定する測定システムを構築する。 ・太陽電池セルの電気的パラメーター（電流源、抵抗、容量）をモデル化し、V-I特性の2次元マッピングとの相関を明らかにする。 <p>③PIDの回復技術と抑止技術の 開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・室温および高温下において、PID回復現象の電界依存性を評価する。 ・ガラスに析出したナトリウム化合物を定量する。 ・PID抑止効果の液体ガラス塗布膜厚、焼結温度依存性を評価する。 ・液体ガラスを塗布したカバーガラスにおけるナトリウム化合物の分析を行う。 	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。 ・樹脂中拡散過程、太陽電池へのナトリウム化合物の拡散と光起電力低下に関する総合的で微視的なPID現象発現機構を明らかにする。 ・PID発生箇所の特 定技術の開発 ・②で構築したPID発生箇所特 定技術を応用し、局所的レーザー加熱装置を開発する。 ・レーザー加熱による拡散過程を評価する。 ・室温環境下にてPID回復を加速するための、印加電圧とレーザー照射条件を検討する。 ・ガラスの両面に液体ガラス層を形成し、ナトリウム化合物拡散バリアとして使用する。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PID発生箇所の局所的特性測定装置とPIDの回復加速との双方の光学系を同軸に結合する。 ・液体ガラスを用いたPID抑止技術を施工済み太陽電池モジュールに 応用し、PID抑止効果を確認する。
6	2015 ～ 2019	太陽電池モ ジュールの 湿熱劣化の 実時間観測 手法の開発	国立大学 法人東京 農工大学	<ol style="list-style-type: none"> 1) 蛍光色素pHセンサの開発 2) 錫膜酢酸検出センサの開発 3) 金ナノコンポジット膜の局在表面プラズモン共鳴(LSPR)酢酸センサの開発 4) 3種の酢酸検出センサの高温高湿試験における性能比較 5) 試験方法の開発 	<p>【中間目標】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 蛍光色素酢酸センサ基板はpH5程度を検出できることを明らかにする。 2) 錫薄膜酢酸センサ基板は、2000ppmの酢酸濃度を検出できることを明らかにする。 3) 金ナノコンポジット局在表面プラズモン共鳴(LSPR)酢酸センサ基板は、100ppm程度の微量酢酸濃度を検出できることを明らかにする。 4) 開発した酢酸センサ基板を太陽電池モジュール内に実装して、高温高湿試験を実施し、酢酸検出感度および高温耐久性を比較する。 5) 3種の酢酸センサ基板のうち最適なセンサ基板を抽出する。 6) 要求される検出性能を満たさない場合には、複数のセンサ基板を組み合わせたハイブリッドセンサとすることで要求仕様が満たされることを示す。

					<p>【最終目標】</p> <p>1) 開発酢酸センサ基板を小型化し、太陽電池モジュール内に多数配置して水分浸入による酢酸発生経路を明らかにする。</p> <p>2) 各点で浸入した水分量を求めることで、水分および酢酸発生状態を明確化させ、太陽電池モジュールの劣化メカニズム解明の一助とする。</p> <p>3) 各測定点での酢酸検出分布を推定することでモジュール内部における水分とそれに伴う酢酸の微視的な動態を観測する。</p> <p>以上を遂行することで、本手法が太陽電池モジュールの長期劣化を抑制するための新たな評価技術であることを証明する。</p>
7	2015 ～ 2019	n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化	国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学	<p>①リアエミッタ型太陽電池モジュールに関するPIDの機構解明</p> <p>②ヘテロ接合型太陽電池モジュール</p> <p>③フロントエミッタ型太陽電池モジュール</p>	<p>【中間目標】</p> <p>PID特性の明確化と、その抑制のための指針を明らかにする。</p> <p>【最終目標】</p> <p>PIDによるモジュール変換効率の劣化率を30年で20%以下に抑える条件を明らかにする。</p>
8	2015 ～ 2019	経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発 / メガソーラーの発電量及び信頼性評価技術の開発	一般財団法人電力中央研究所	<p>①各種太陽電池の発電量評価技術の開発</p> <p>②メガソーラーの発電量診断手法の開発</p> <p>③IEC/TC82/WG2における発電量定格 (IEC 61853) の確立</p>	<p>【中間目標】</p> <p>各種太陽電池モジュールの発電性能の経年劣化率を1%程度の精度で算出することを可能にする長期信頼性評価技術を開発する。</p> <p>メガソーラーの発電性能の経年劣化を2%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。</p> <p>IEC/TC82/WG2にて、IEC 61853シリーズにて規格成立に向けて審議に参加する。IEC 61853-4に日本の気象データを提供し、日本を発電量定格の1つの気候区として採用されるに規格審議を行なう。</p> <p>【最終目標】</p> <p>5つの日射気候区における各種太陽電池の経年劣化を考慮した生涯発電量 (25年) を算出する。</p> <p>メガソーラーの発電性能の経年劣化を1%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。メガソーラーの発電量診断手法に関するガイドラインの作成を行なう。</p> <p>IEC 61853シリーズをJIS規格として成立させる。</p>

表. 6 研究開発項目⑤
「動向調査等」

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
太陽光発電開発戦略に関する動向調査						
1	2015 ～ 2019	「太陽光発電開発戦略」の推進に係る情報収集、太陽光発電コスト分析、太陽光発電産業・市場動向等に関するシナリオ分析	みずほ情報総研株式会社	① 「太陽光発電開発戦略」で提示されている情報の更新 ② 日本における太陽光発電システム発電コスト分析をするとともに、海外(欧米等)における発電コスト分析・評価事例の調査 ③ 国内外における太陽光発電市場の分野別規模や構成要素別の分析及び太陽光発電に係るバリューチェーンの主要企業の動向を調査	【中間目標】 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。 【最終目標】 発電コスト 7 円/kWh 実現に向け、開発戦略の見直しの可否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する	
2		「太陽光発電開発戦略」の方向性に関する検討	みずほ情報総研株式会社	上記調査分析に基づき、太陽光発電技術開発の方向性に関する検討	同上	
3		「太陽光発電システム搭載自動車」に関する調査	みずほ情報総研株式会社	「高効率太陽電池」の特長を生かした「面積制約」を受ける環境での活用例として「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出	同上	

発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査						
1	2015 ～ 2019	太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性および産業競争力に関する動向調査	株式会社資源総合システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 発電コスト調査 ② 太陽電池モジュールの現状技術および産業競争力に関する調査 ③ 太陽電池モジュールの長期信頼性調査 	<p>【中間目標】 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。</p> <p>【最終目標】 発電コスト7円/kWhの達成後の産業・市場の動向について、太陽電池モジュールの新たな利用方法の想定や、産業競争力向上による国内産業発展のためのシナリオ検討</p>	
2		太陽電池モジュール製造技術開発と製造コストに関する調査・分析	株式会社資源総合システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 現在市場で主に流通している結晶シリコンと化合物太陽電池に焦点を当て、太陽電池モジュール製造技術の開発及びプロセス改善等によるモジュール性能向上の可能性、コストの内訳とそ の変化について調査・分析 ② 欧米各国のや中国等の中核的研究機関や産業団体、大手太陽電池製造企業は発表する開発ロードマップ等の各種資料を調査・整理し、製造コストの内訳について把握 ③ モジュールの製造コスト及び長期信頼性に寄与する太陽電池モジュール用材料・部材、製造装置の開発等によるモジュール性能向上の可能性検討 	同上	
3		太陽電池モジュールの利用動向と今後の産業と市場の可能性に関する調査	株式会社資源総合システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 最近の市場動向から要請される太陽電池モジュール仕様の要件をまとめ、技術開発要素を整理する ② No. 1, No. 2, No. 4 の結果を総合して市場規模並びに導入地域が拡大したことにより新たに必要となる利用環境及び分散電源としての建物装置(BIPV, 軽量化)などへの応用可能性を検討するとともに、発電コスト低減目標達成後の太陽電池製造に係る産業および市場について、太陽電池技術と市場のニーズ、生産体制の構築や国外市場への展開などの国内産業の在り方も含めた検討を行う。 	同上	
4		各国の太陽電池研究開発政策動向及び新たな太陽電池技術に関する調査	株式会社資源総合システム	<ul style="list-style-type: none"> ① 主要国における研究開発政策動向に関する調査 ② 新たな太陽電池技術の開発動向に関する調査 	同上	

IEA PVPS 国際協力事業						
1	2015 ～ 2019	タスク1 専門家会議等の国際協力活動への参加及びタスク1に係る定期刊行物の作成及び重要刊行物の日本語版の作成	株式会社 資源総合システム	国際協力活動への参加を通じて、日本の太陽光発電の国際競争力向上に資する情報収集を行うために太陽光発電動向の戦略的分析及び情報の普及を実施しているタスク1に参加する。	【中間目標】 NEDOが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。 【最終目標】 PVPS の動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う	
2		特別情報活動（ワークショップ）	株式会社 資源総合システム	タスクIが実施する特別情報（国際会議におけるワークショップ・セミナー等）に関しては、日本の専門家に対して要求される各国との事前調整及び国内調整を実施すると共に必要に応じて会費の講演・運営準備等を実施する。	同上	
3		タスク1に係る定期刊行物の作成及び重要刊行物の日本語版の作成	株式会社 資源総合システム	日本の太陽光発電に関する定期刊行物（調査報告書）の作成及び重要性の高い IEA PVPS 定期刊行物の日本語版の作成。	同上	

表. 7 研究開発項目⑥

「高性能太陽電池製造技術実証」

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
太陽光発電開発戦略に関する動向調査						
1	2018 ～ 2019	低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証	株式会社 カネカ	① 低コスト p/n、電極パターン形成技術の量産実証 ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の実用化での最大の技術的課題である p/n、電極パターンを低コストで形成するための独自のパターン形成技術を少量生産レベルで実証する。 ② 高変換効率化技術の量産実証 高変換効率化を実現する上でのキー技術である非晶質シリコンによるシリコン基板の高品質パッシベーション技術（高品質ヘテロジャンクション形成技術）や直列抵抗損の低減技術等を小規模生産レベルレベルで実証する。	【最終目標】 ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池セルを用い 2025 年に発電コスト 7 円/kWh を達成するための製造技術を試作レベルで実証する。	

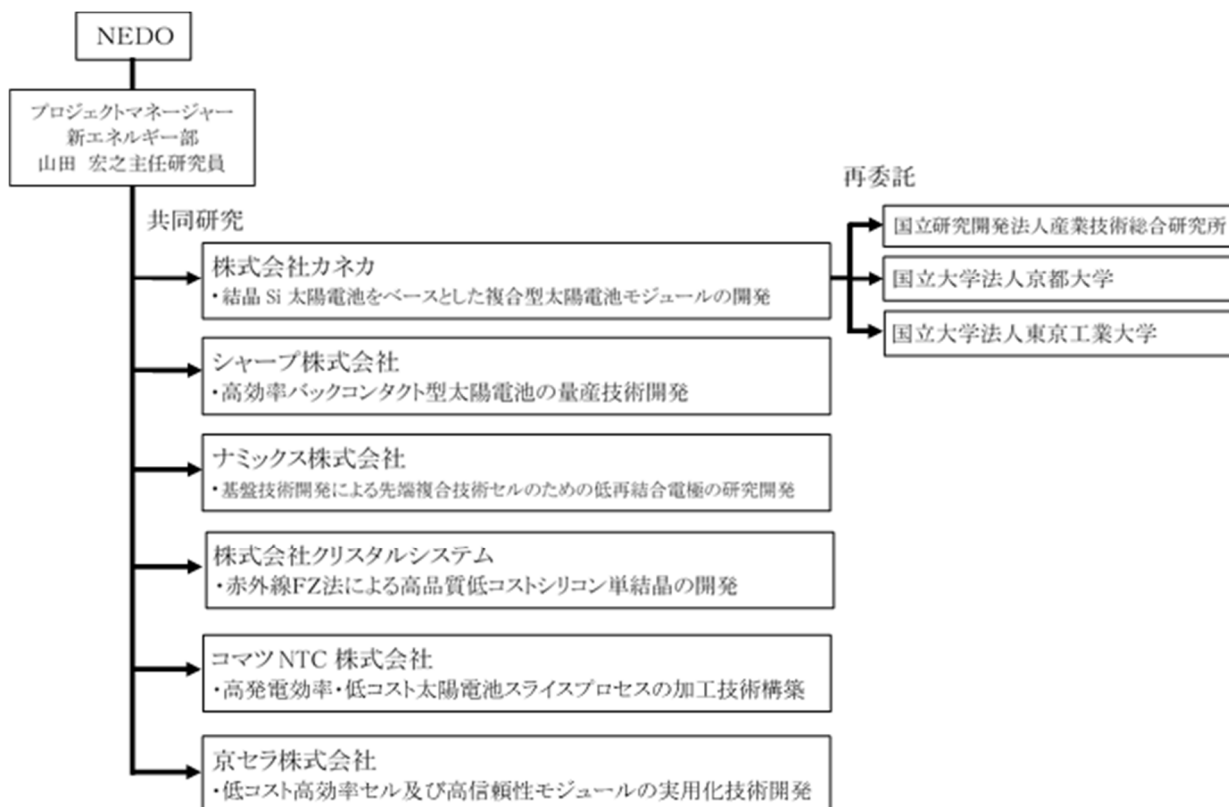
2.2 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO が選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは国立研究開発法人等（以下、「委託先」という。）が、NEDO と委託研究契約を締結し実施している。

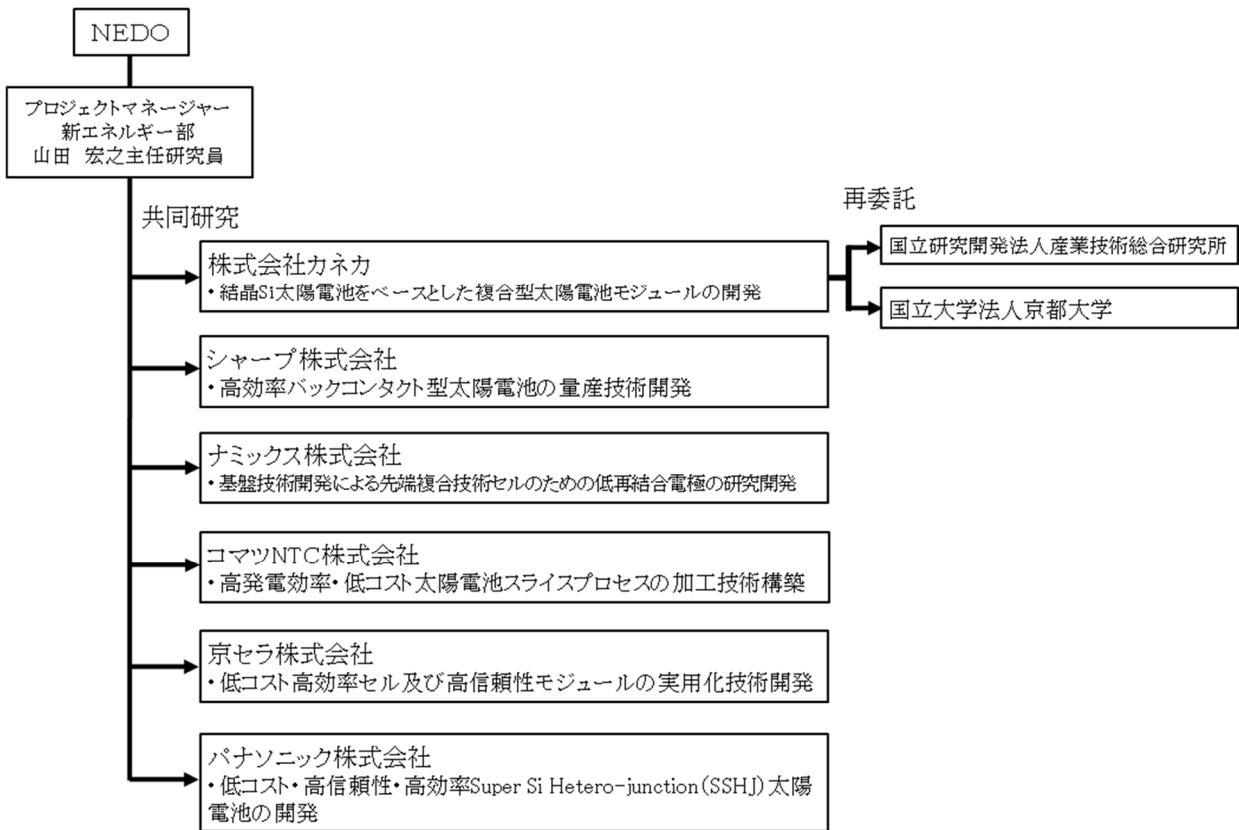
研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

（１） 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

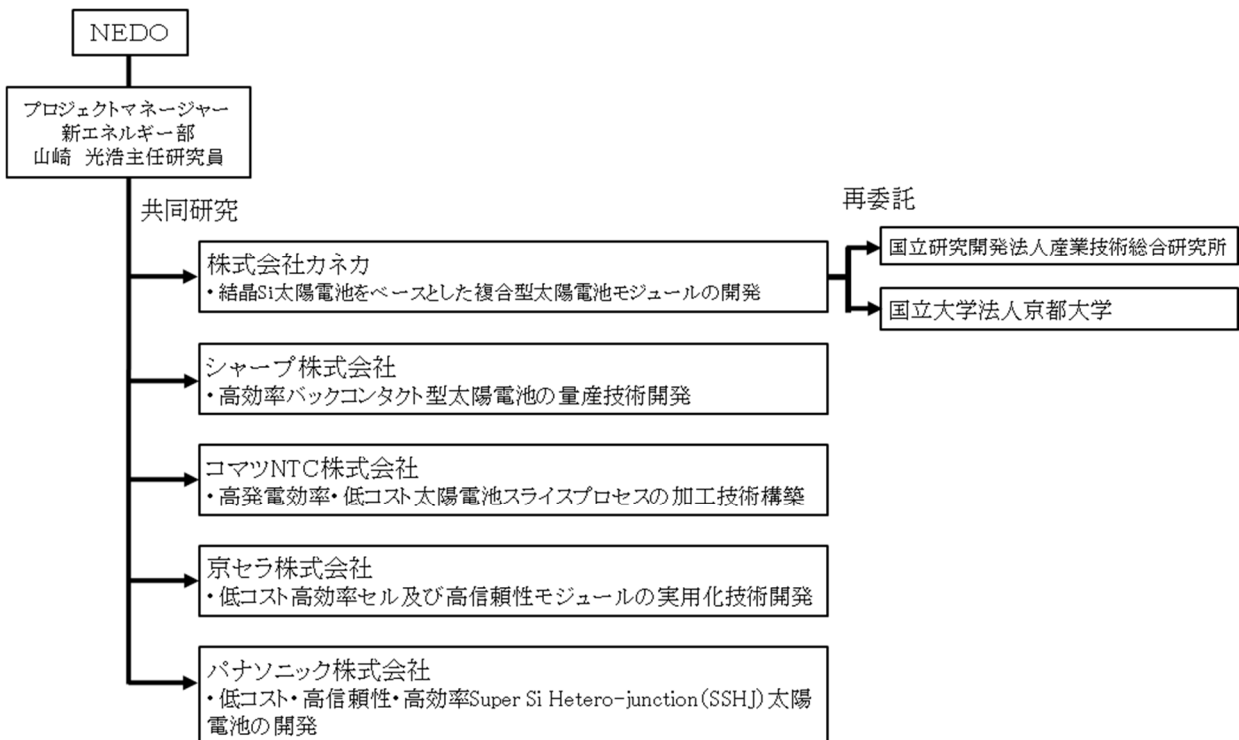
【2015 年度～2017 年度】



【2018年度】

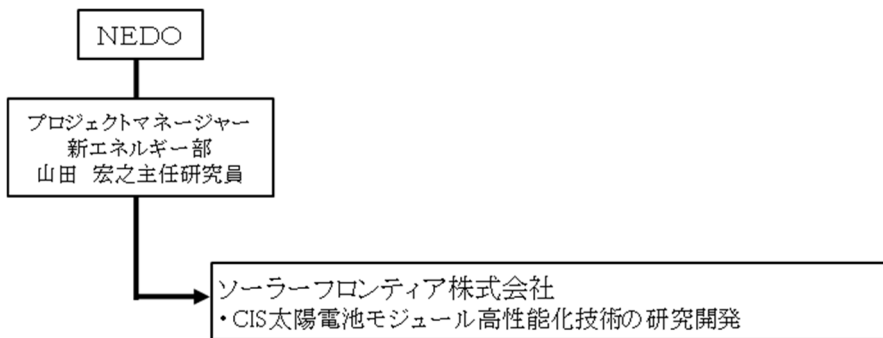


【2019年度】

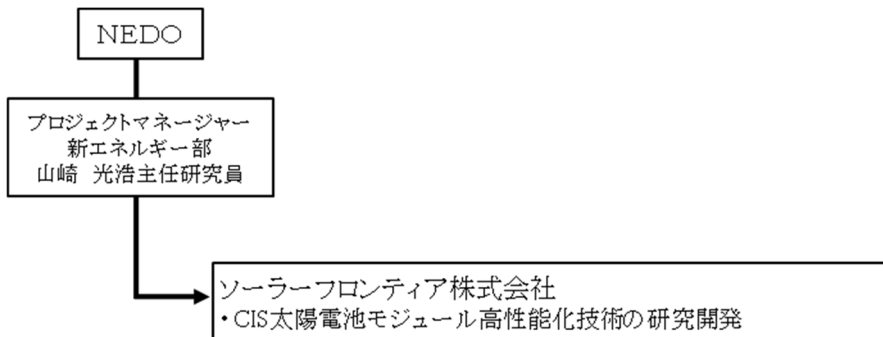


(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

【2015 年度～2018 年度】



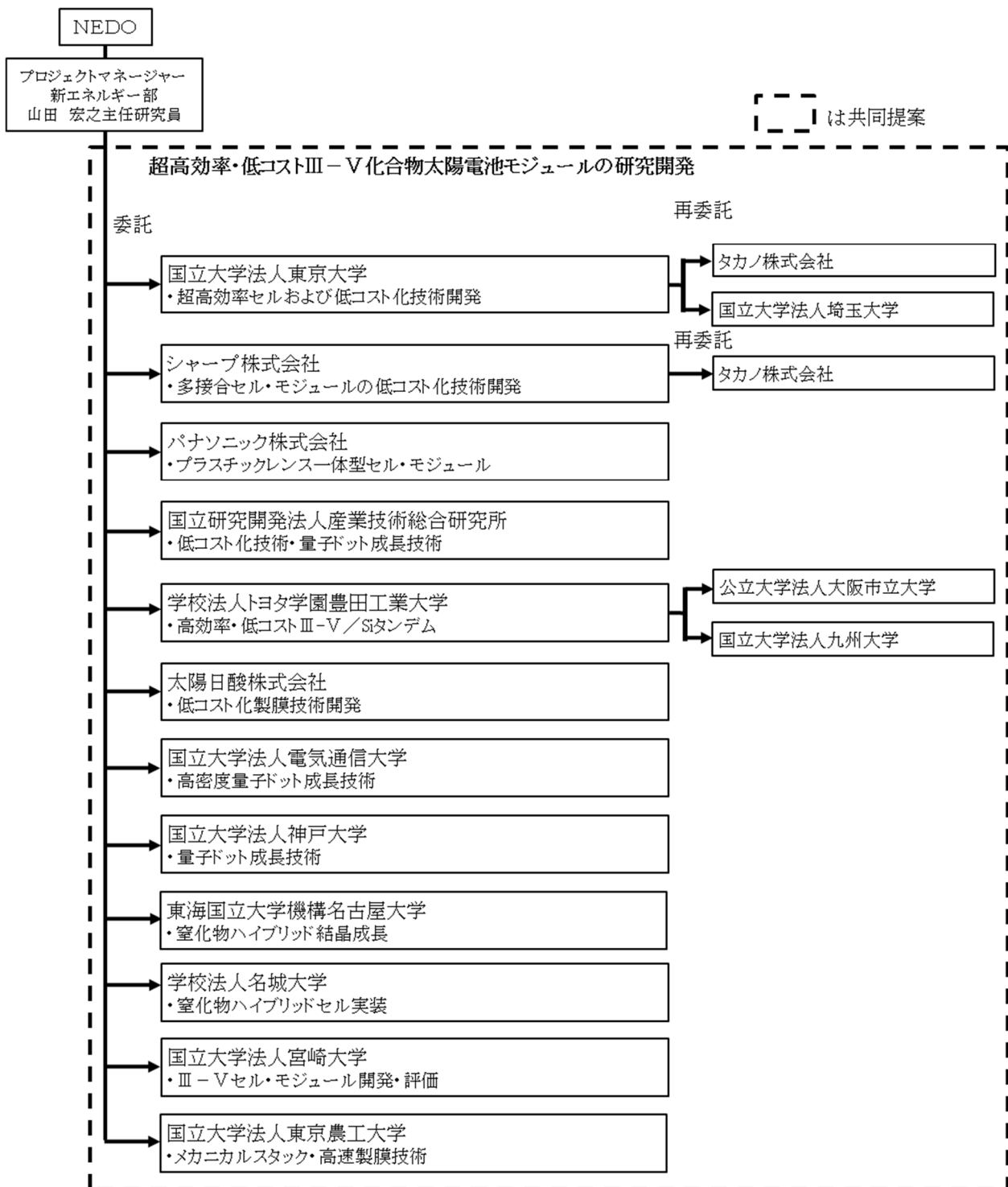
【2019 年度】



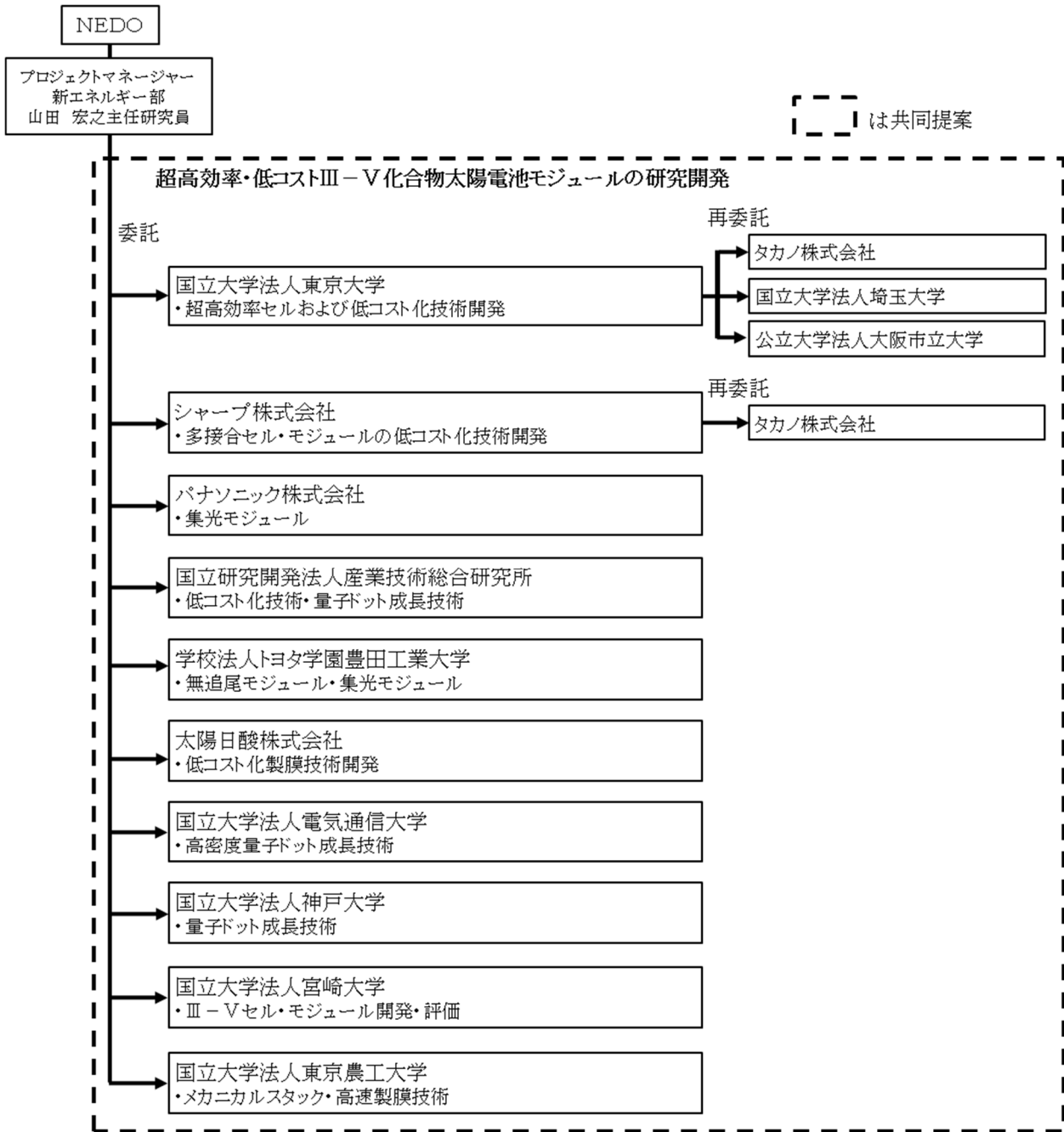
研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

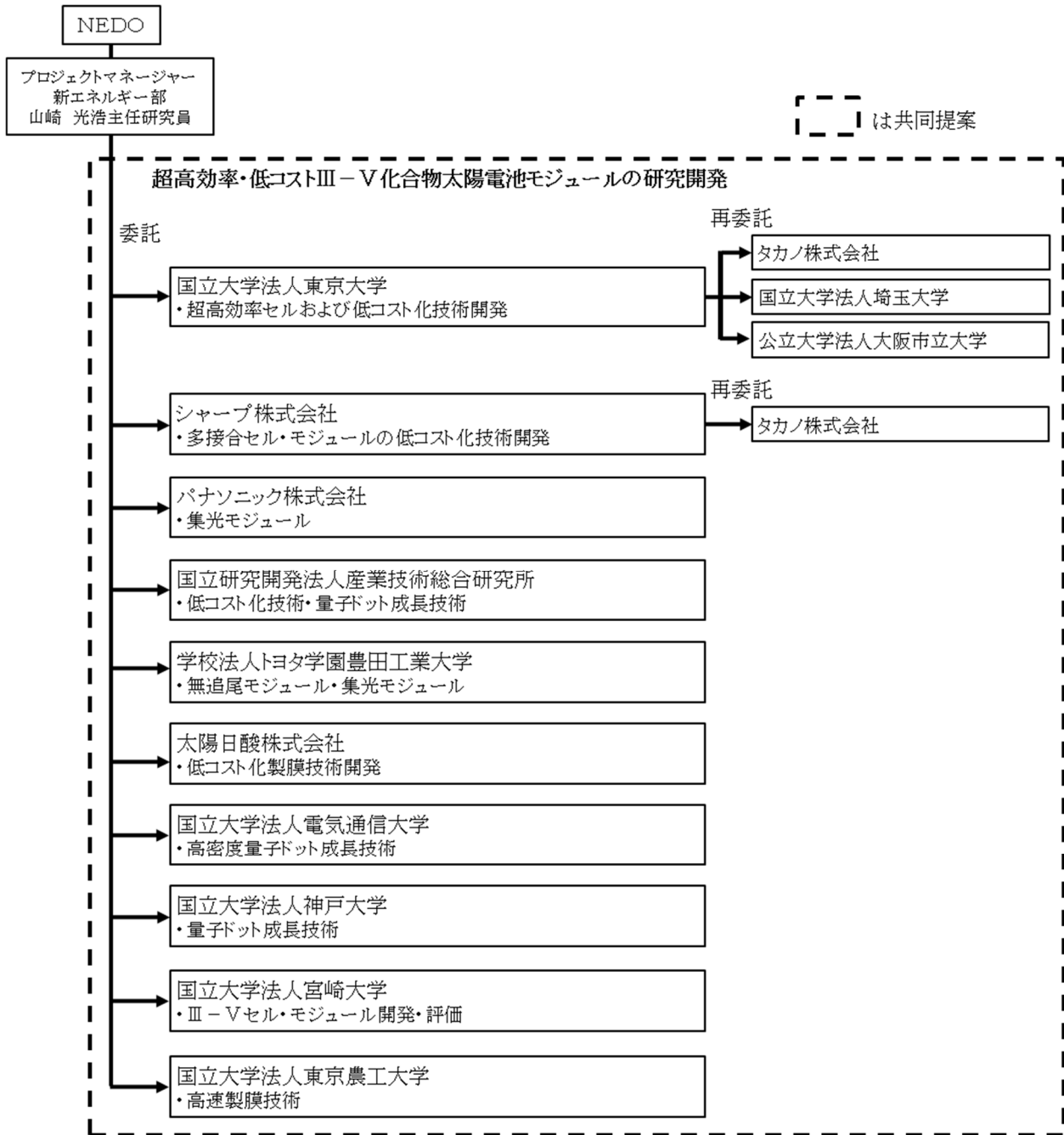
【2015年度～2017年度】



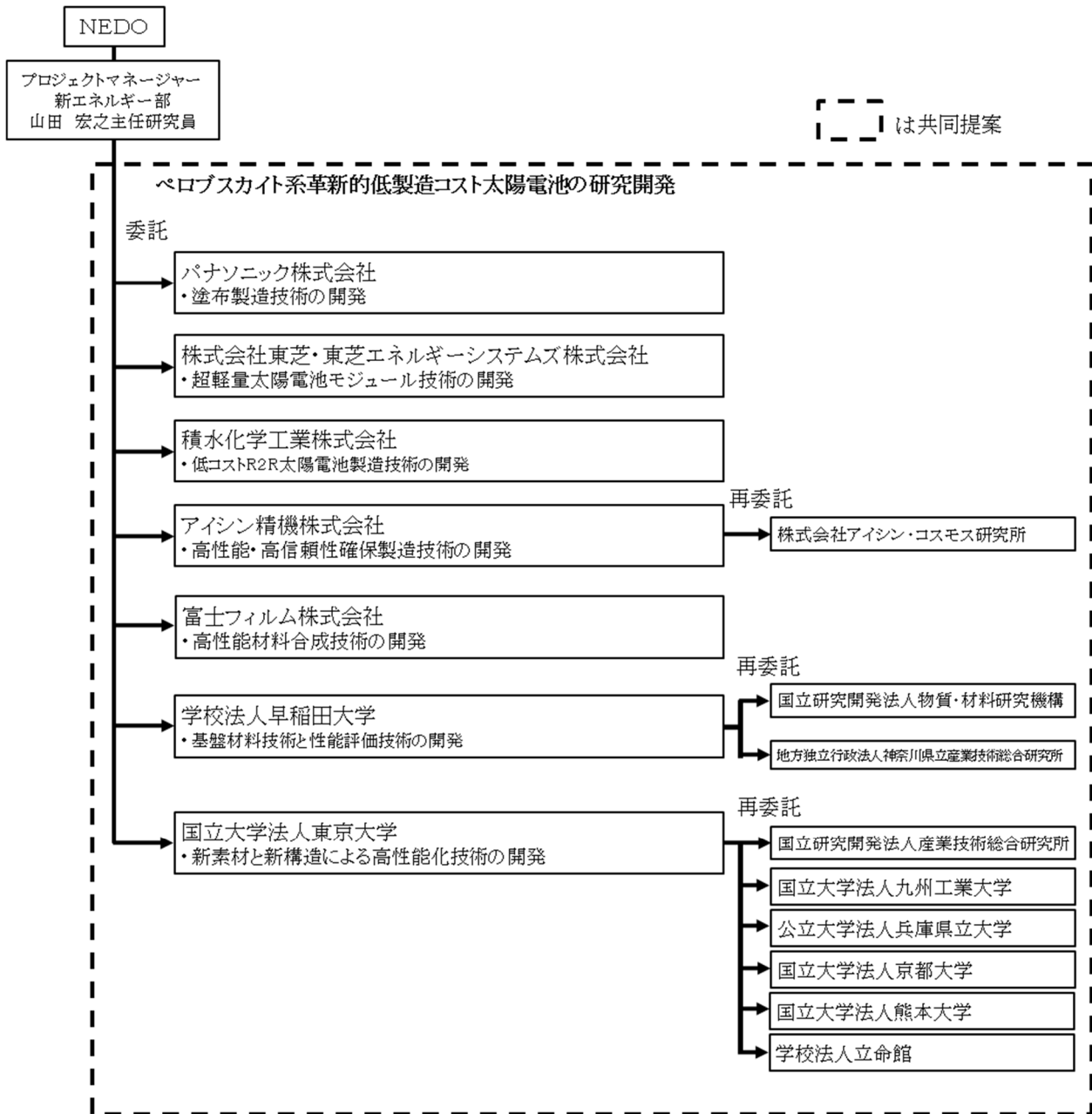
【2018年度】



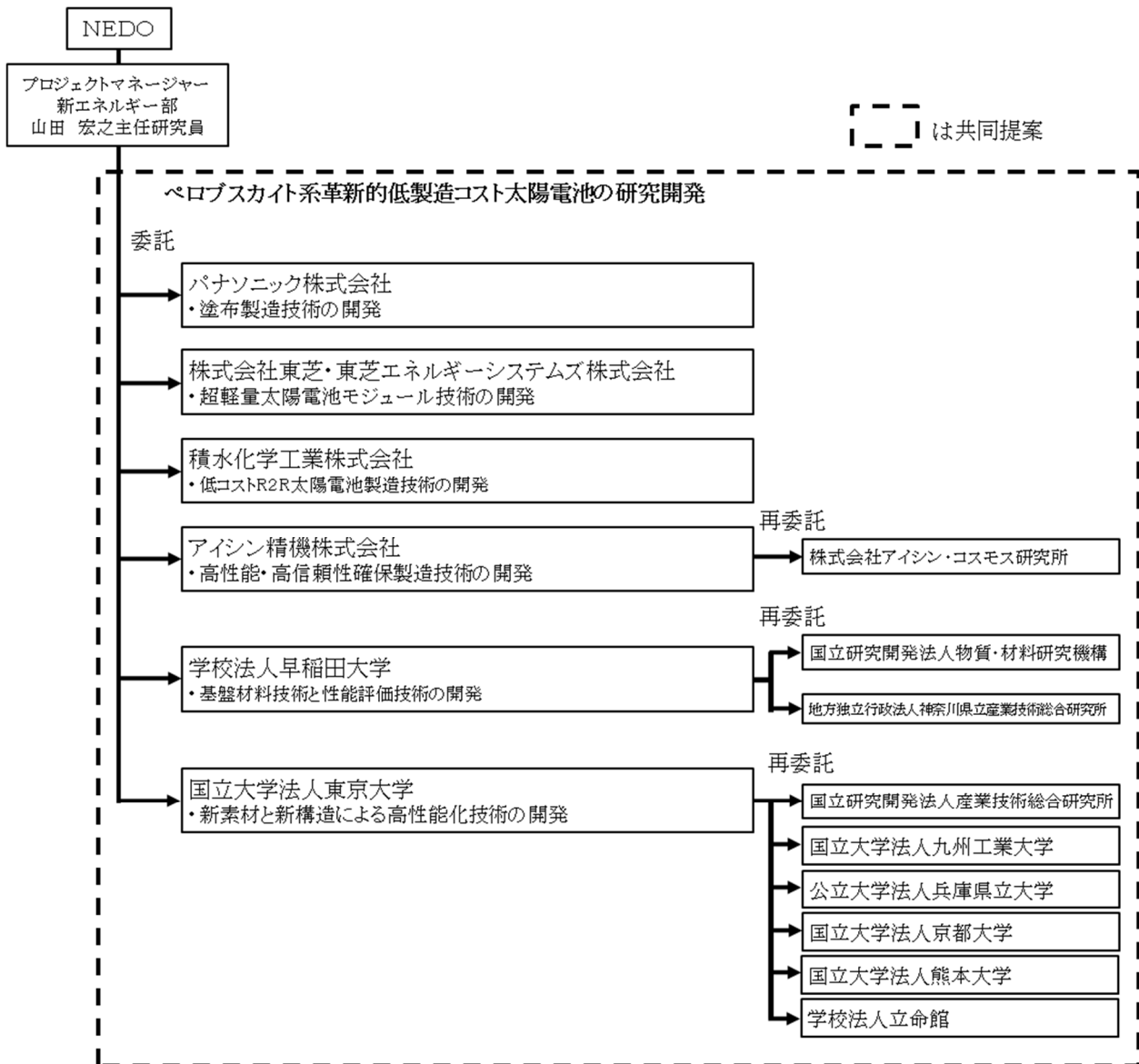
【2019 年度】



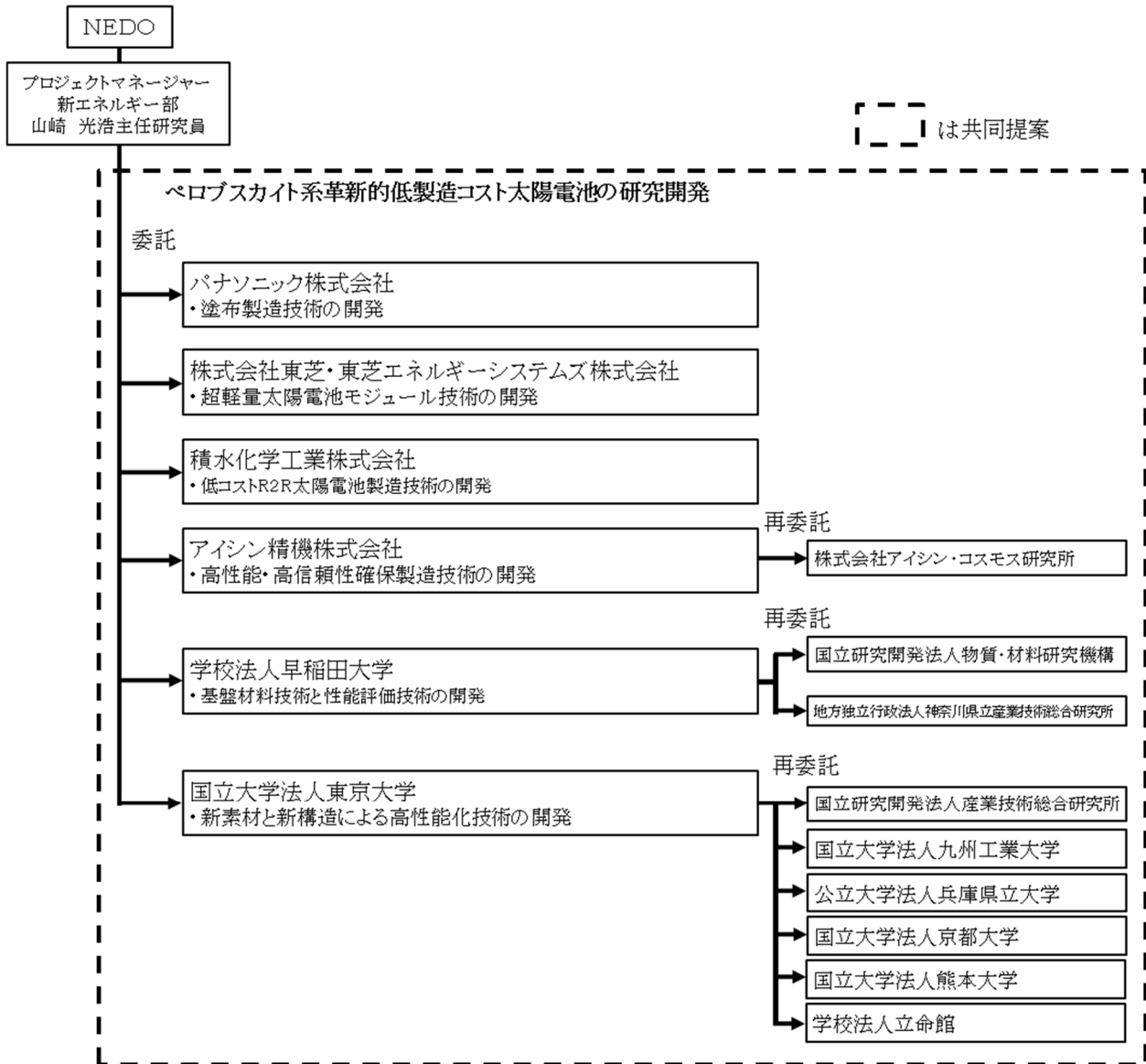
(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発
【2015年度～2017年度】



【2018 年度】



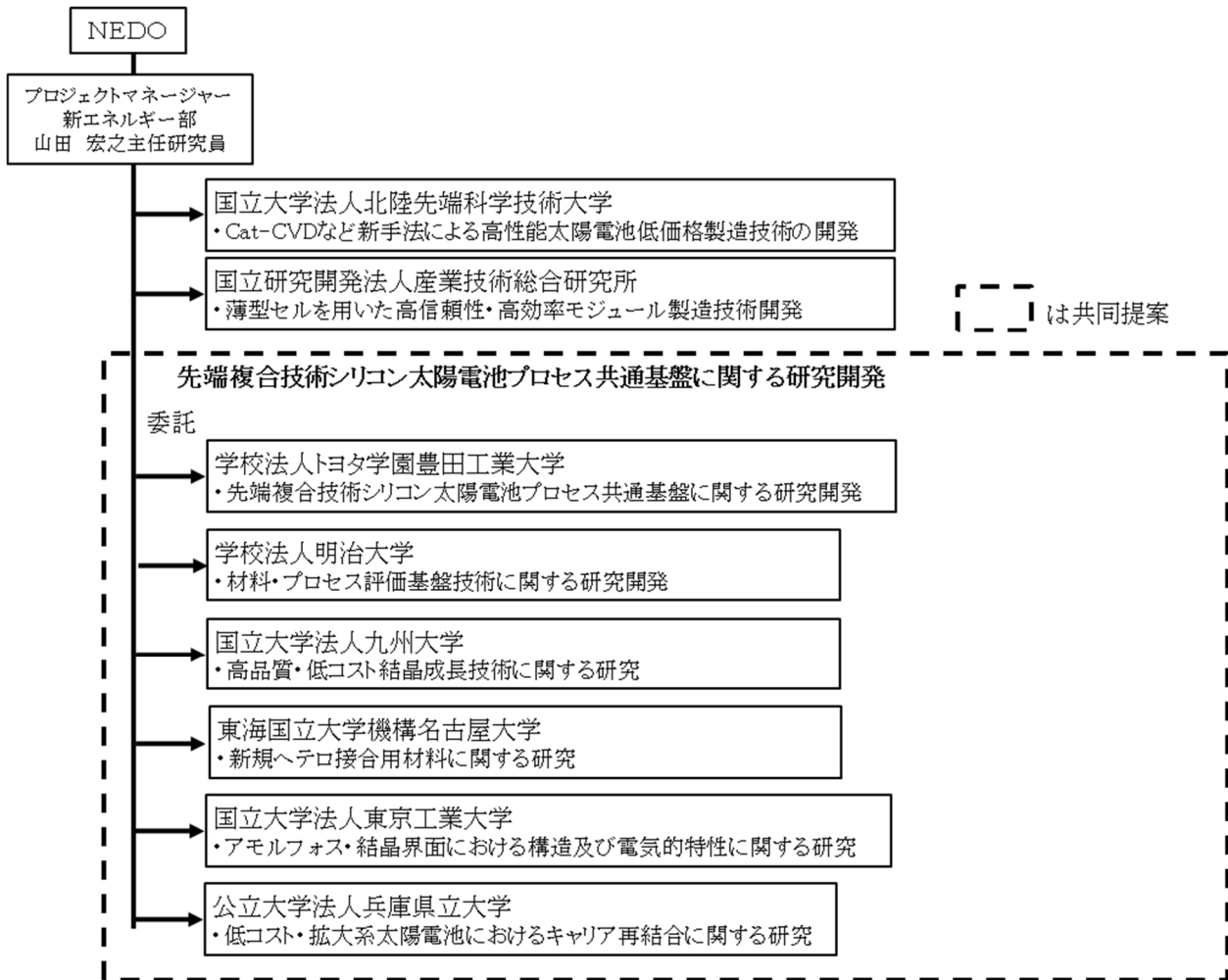
【2019 年度】



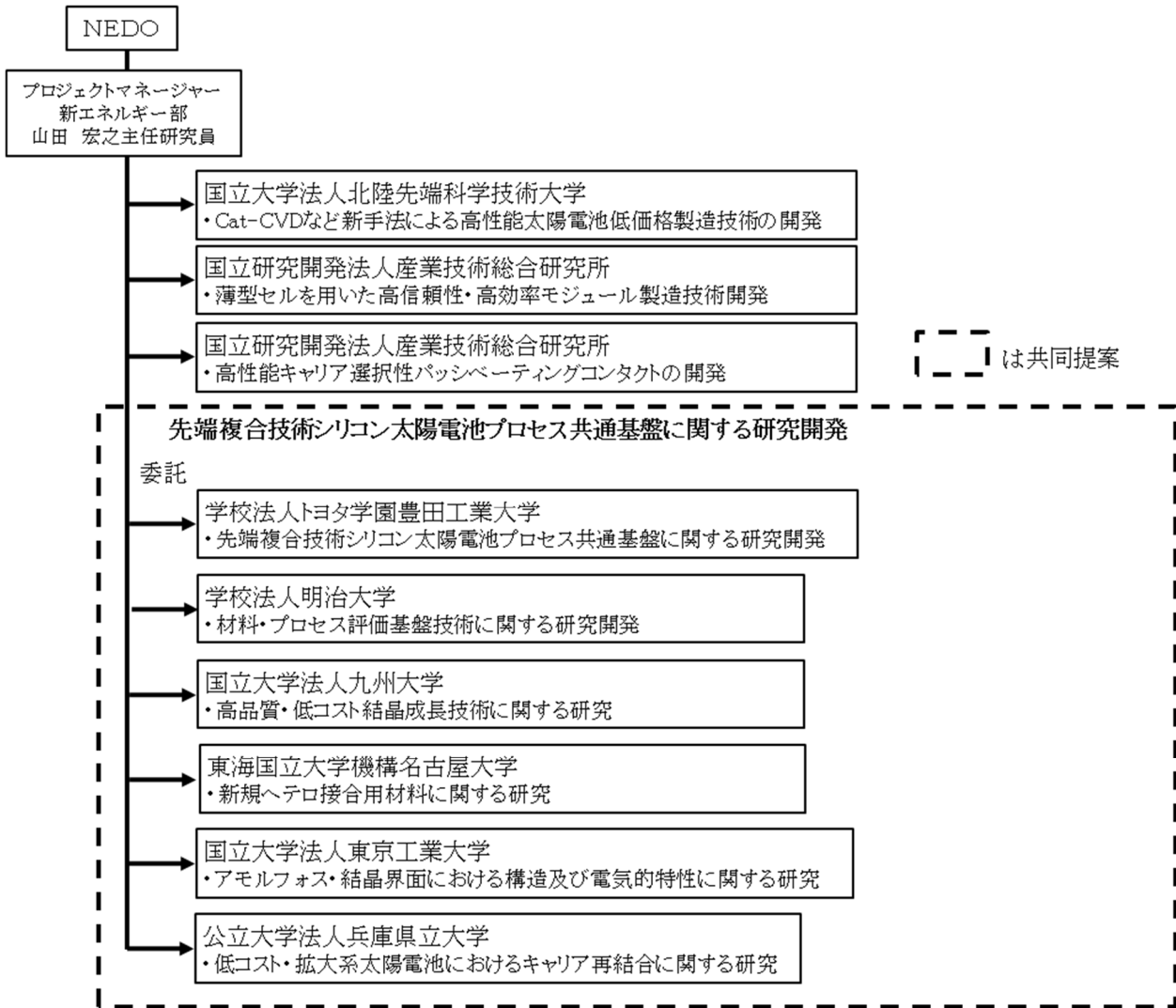
研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

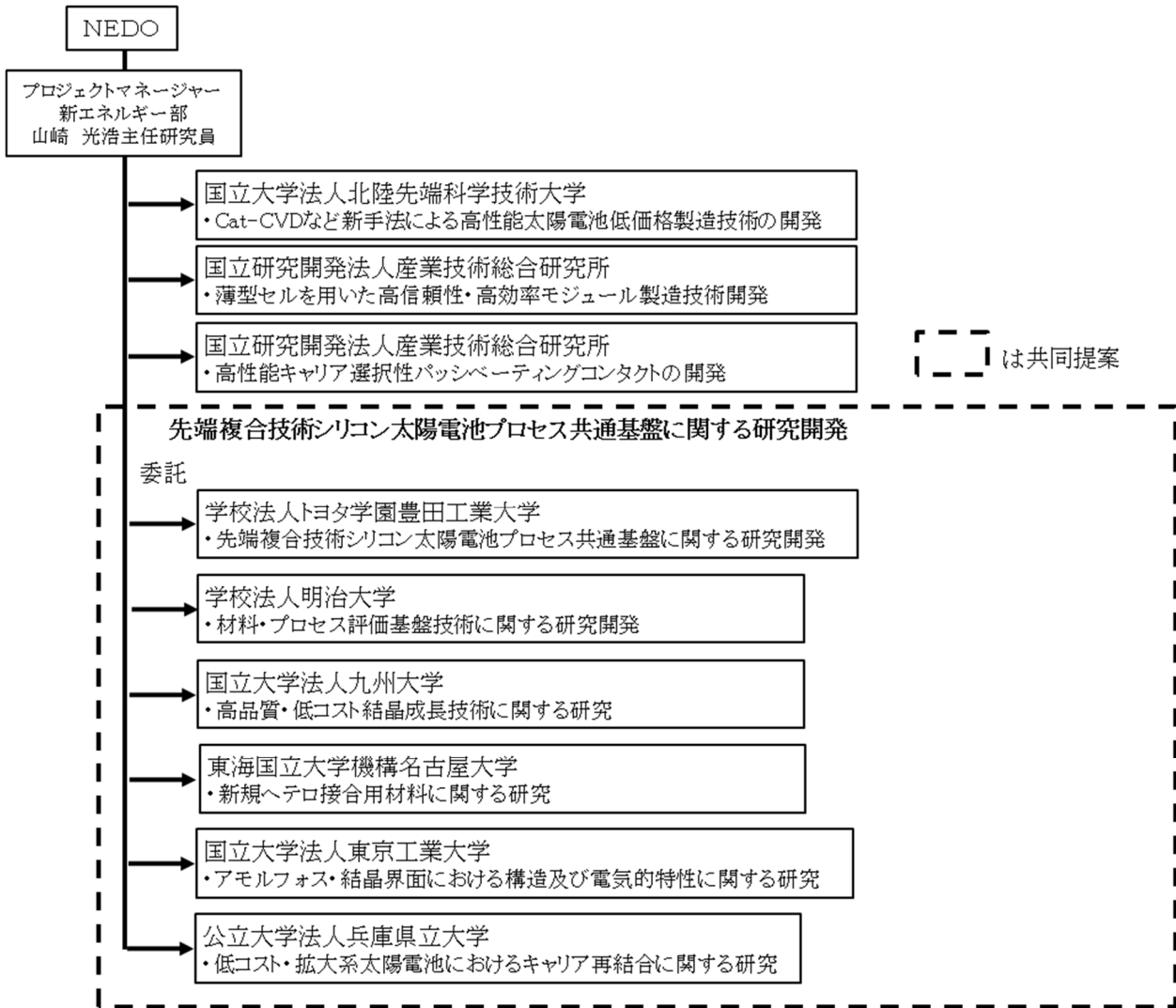
【2015年度～2017年度】



【2018年度】

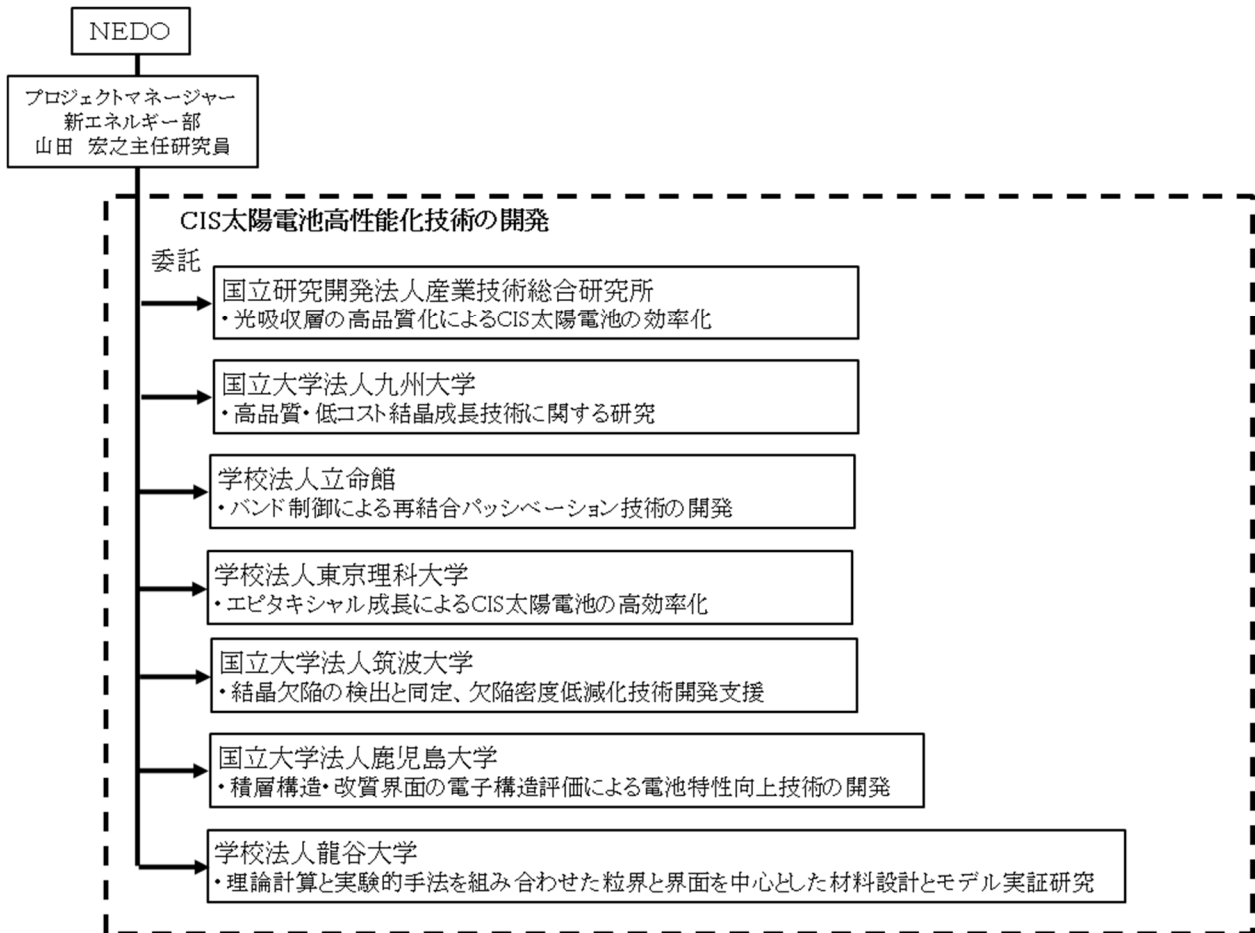


【2019 年度】

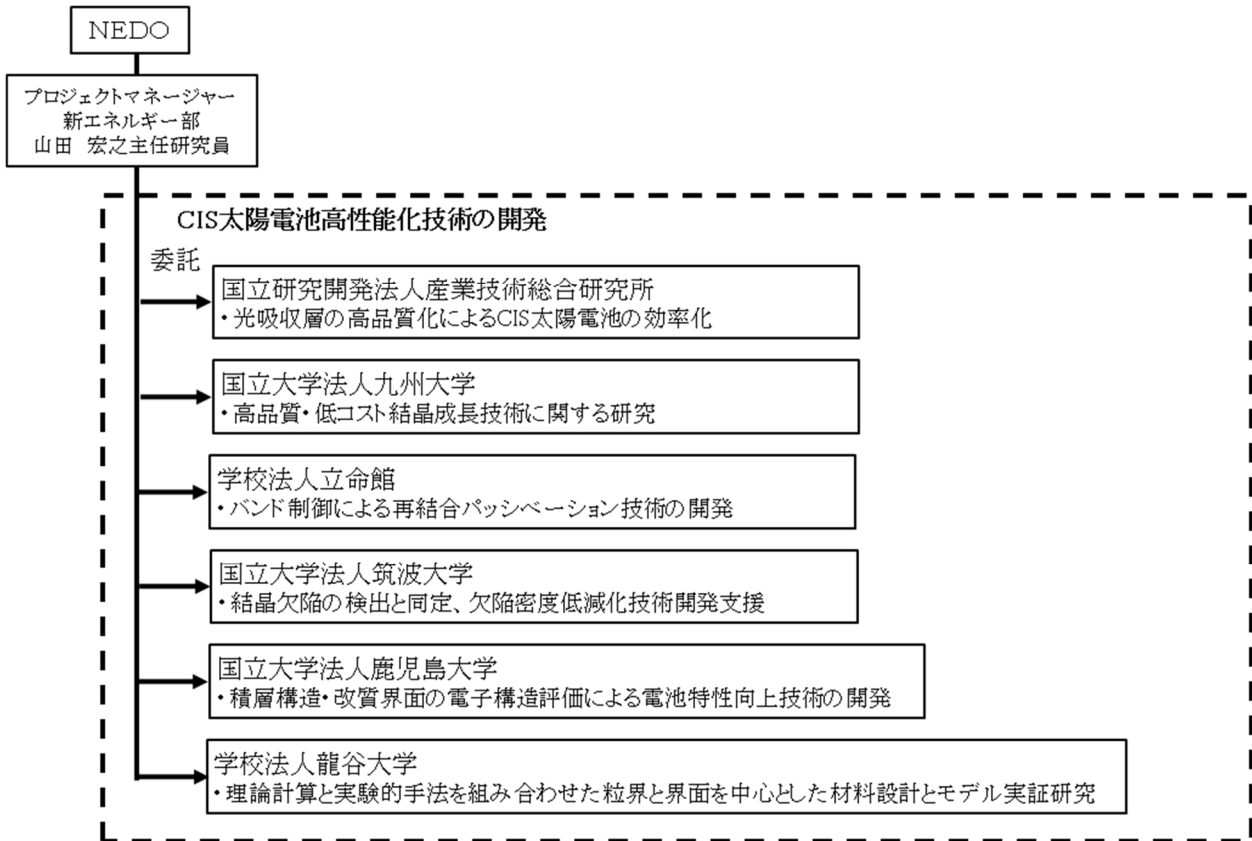


(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

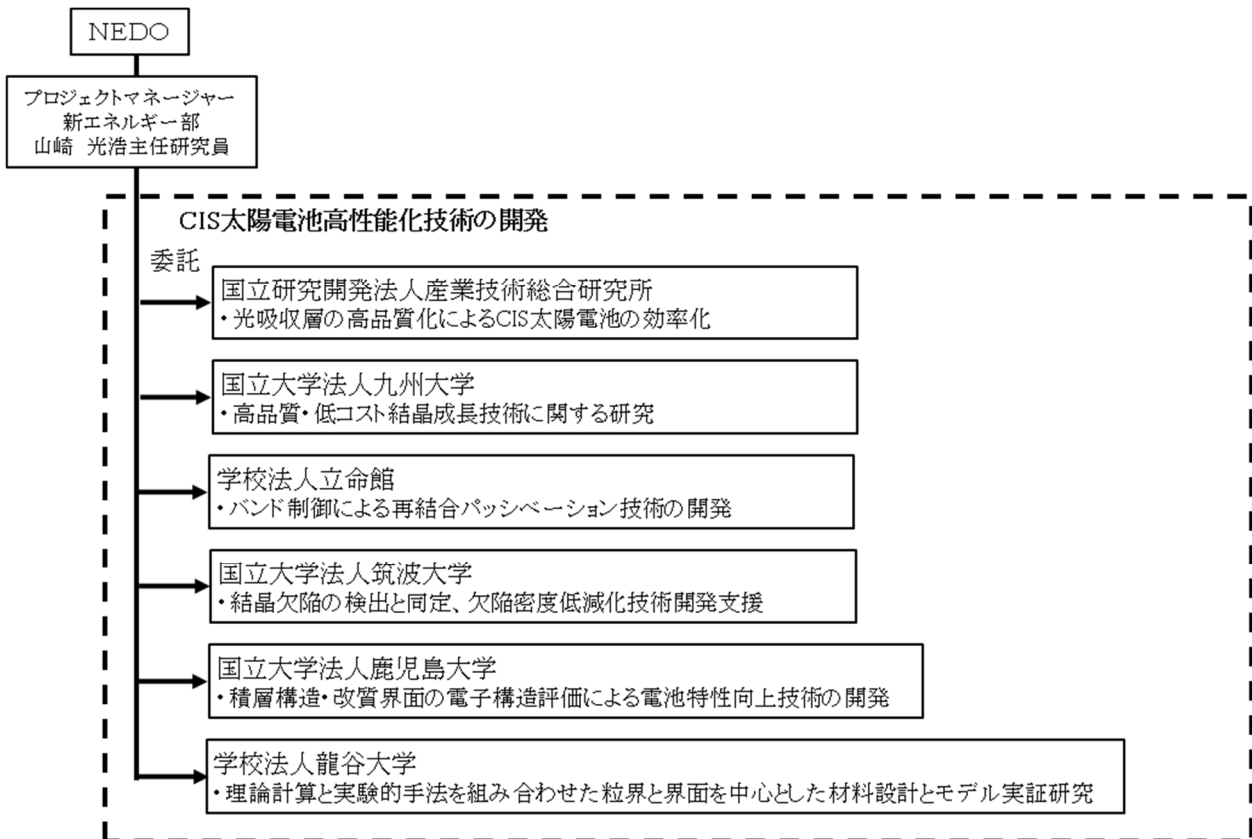
【2015 年度～2017 年度】



【2018年度】



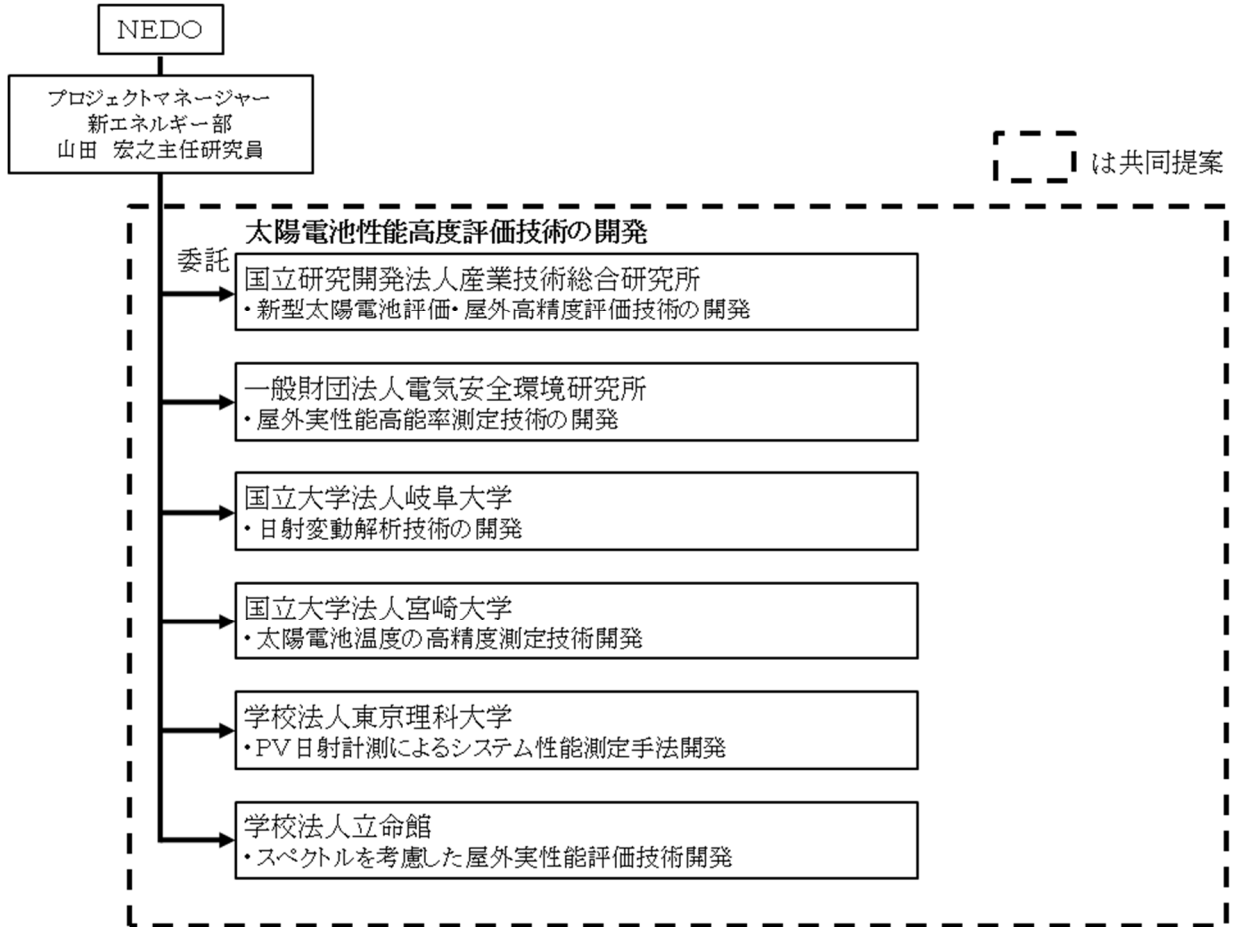
【2019年度】



研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

(1) 出力等測定技術の開発

【2015年度～2018年度】

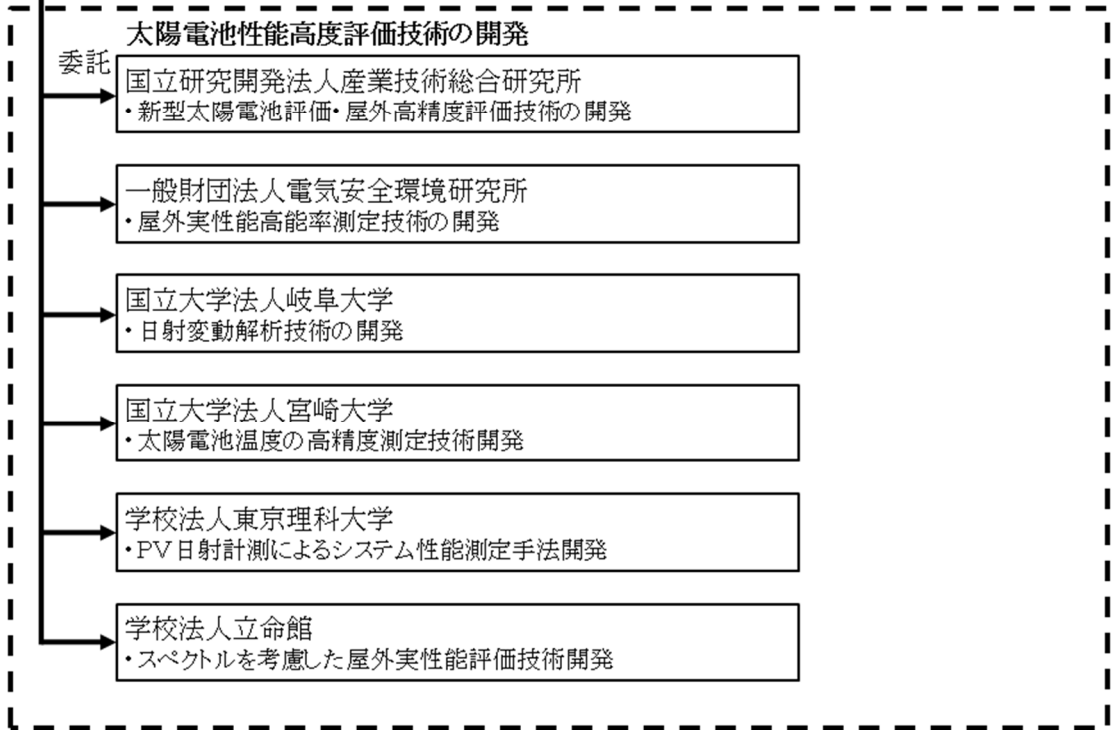


【2019年度】

NEDO

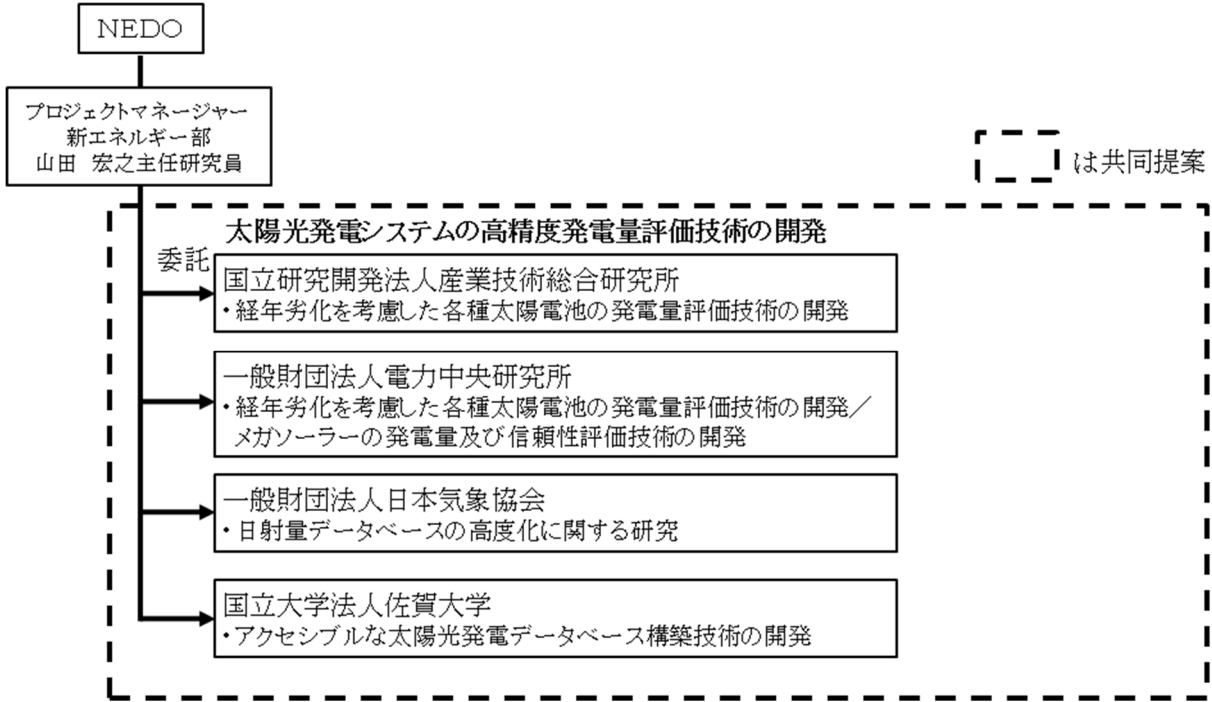
プロジェクトマネージャー
新エネルギー部
山崎 光浩主任研究員

は共同提案

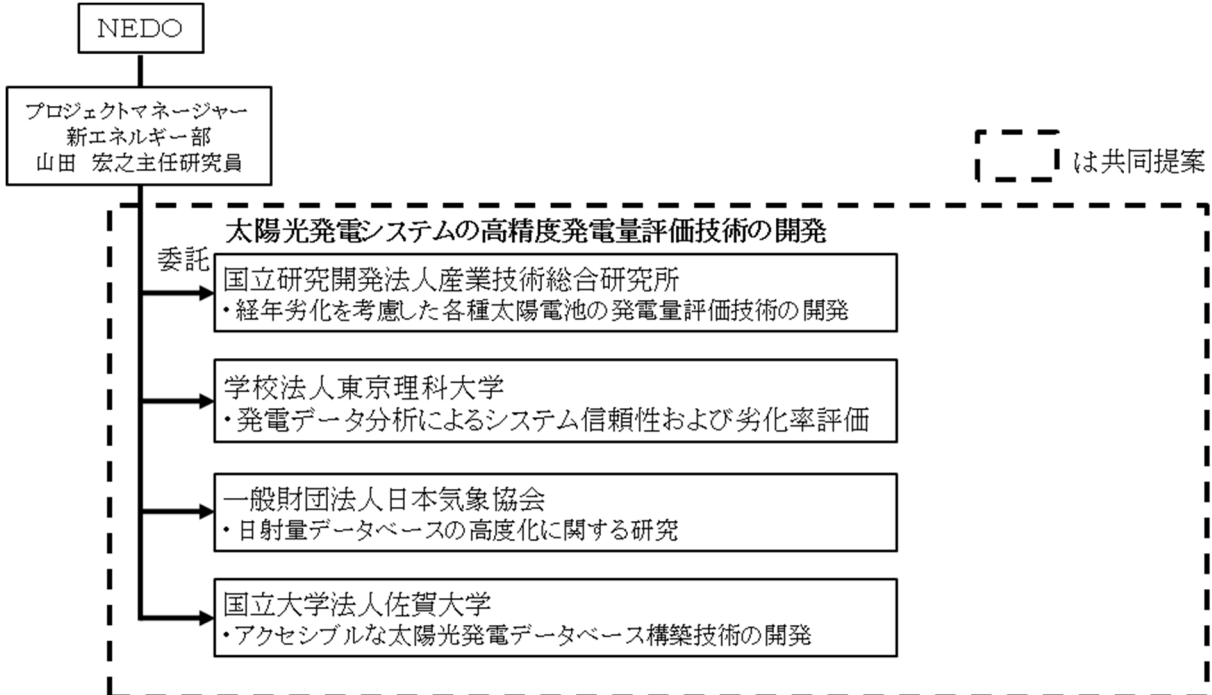


(2) 発電量評価技術

【2015年度～2017年度】



【2018年度】

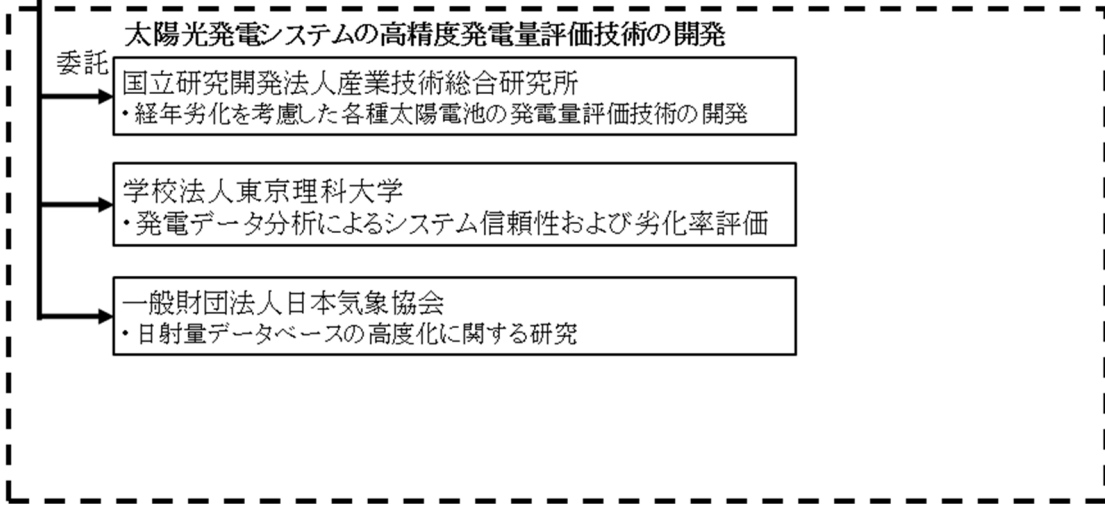


【2019年度】

NEDO

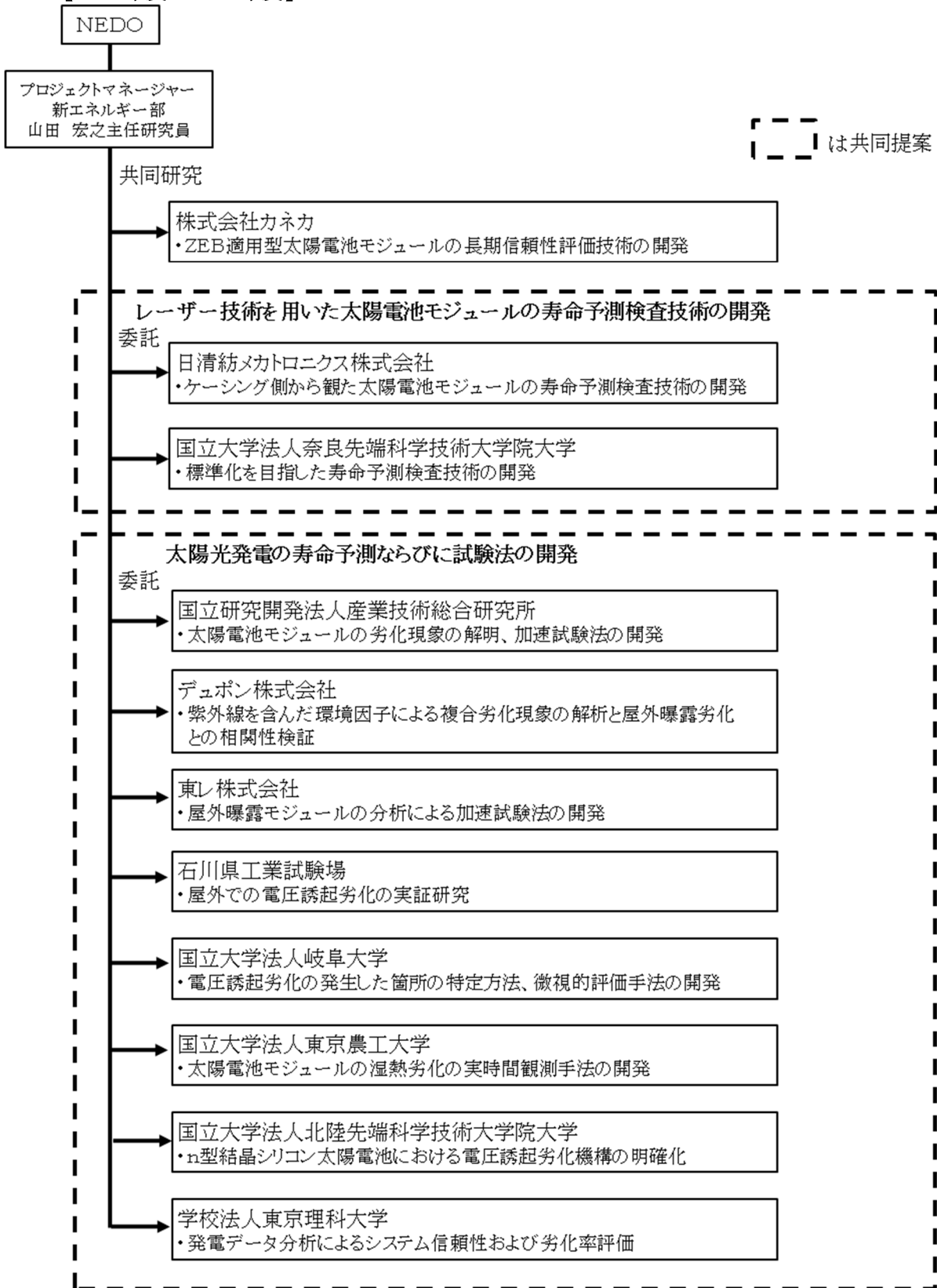
プロジェクトマネージャー
新エネルギー部
山崎 光浩主任研究員

〔 〕は共同提案



(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

【2015年度～2017年度】



【2018年度】

NEDO

プロジェクトマネージャー
新エネルギー部
山田 宏之主任研究員

〔 〕は共同提案

共同研究

株式会社カネカ
・ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発

太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発

委託

国立研究開発法人産業技術総合研究所
・太陽電池モジュールの劣化現象の解明、
加速試験法の開発

再委託

国立大学法人
奈良先端科学技術大学院大学

石川県工業試験場
・屋外での電圧誘起劣化の実証研究

国立大学法人岐阜大学
・電圧誘起劣化の発生した箇所の特定制法、微視的評価手法の開発

国立大学法人東京農工大学
・太陽電池モジュールの湿熱劣化の実時間観測手法の開発

国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学
・n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化

一般財団法人電力中央研究所
・経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発/
メガソーラーの発電量及び信頼性評価技術の開発

【2019 年度】

NEDO

プロジェクトマネージャー
新エネルギー部
山崎 光浩主任研究員

〔 〕は共同提案

共同研究

株式会社カネカ

・ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発

太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発

委託

国立研究開発法人産業技術総合研究所

・太陽電池モジュールの劣化現象の解明、
加速試験法の開発

再委託

国立大学法人

奈良先端科学技術大学院大学

石川県工業試験場

・屋外での電圧誘起劣化の実証研究

国立大学法人岐阜大学

・電圧誘起劣化の発生した箇所の特定制法、微視的評価手法の開発

国立大学法人東京農工大学

・太陽電池モジュールの湿熱劣化の実時間観測手法の開発

国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学

・n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化

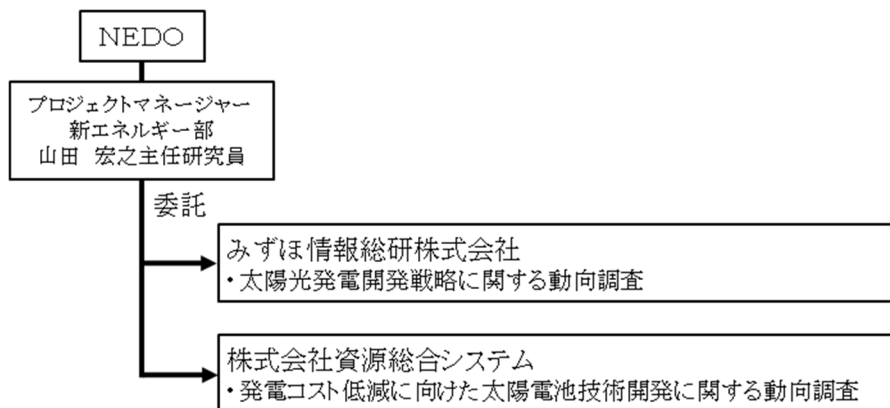
一般財団法人電力中央研究所

・経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発/
メガソーラーの発電量及び信頼性評価技術の開発

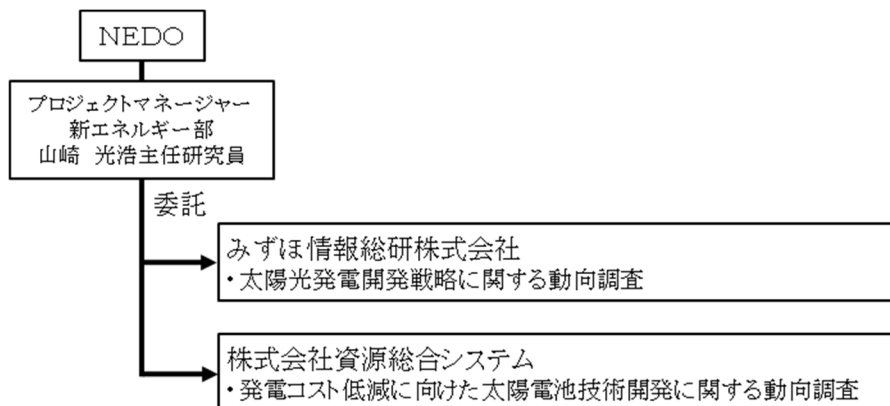
研究開発項目⑤「動向調査等」

(1) 動向調査

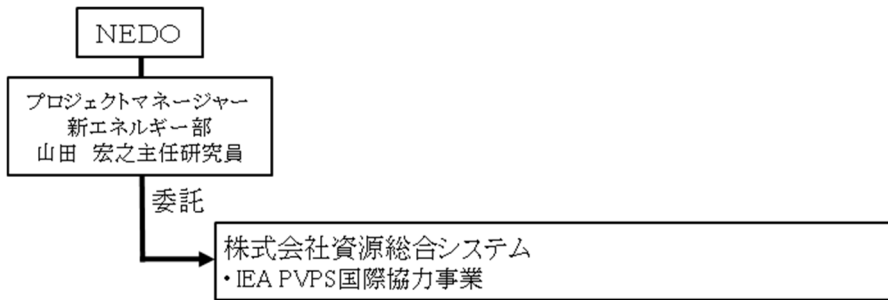
【2015年度～2018年度】



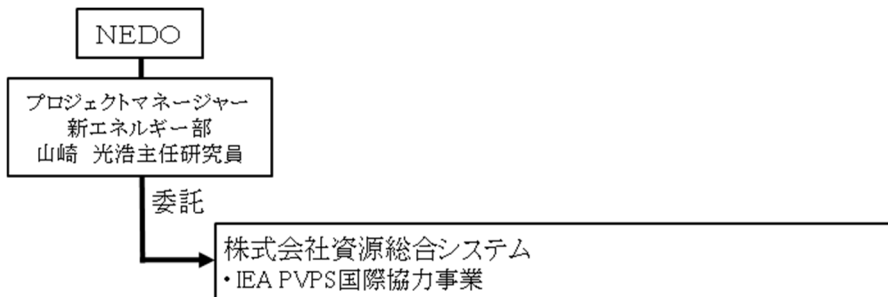
【2019年度】



(2) IEA 国際協力事業
【2015 年度～2018 年度】

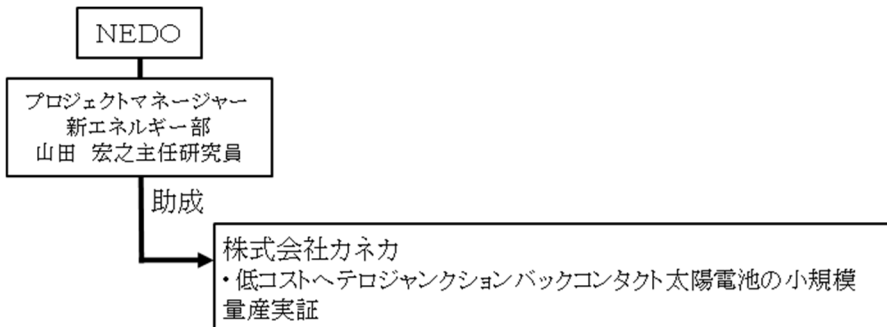


【2019 年度】

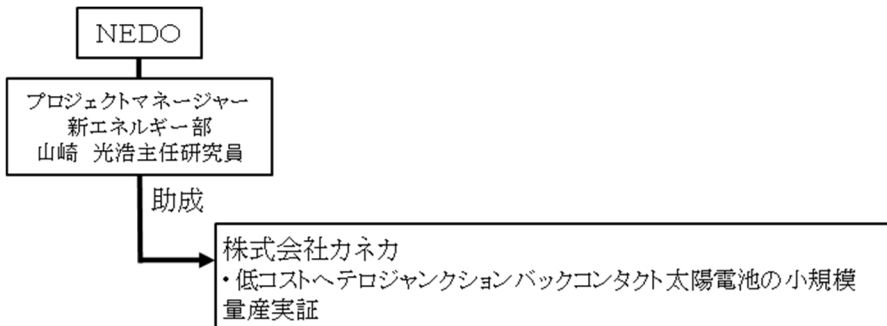


研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

【2018年度】



【2019年度】



2.3 研究開発の運営管理

2.3.1 運営方法

本プロジェクトではプロジェクトリーダーを設置せず、NEDO プロジェクトマネージャー(PM)と担当(PT)は研究開発実施者あるいはテーマリーダーと緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握するとともに、実用化時期を配慮した適切な産業財産権の出願管理を行った。各テーマ(研究開発項目)では研究開発開始当初より実施者主導で個別に行う進捗報告会等を実施していたが、研究開発全体の管理・執行をより厳格に行うため、NEDOは2016年度より外部有識者で構成する技術検討委員会等を組織し、知財管理や標準化等の重要事項について検討する他、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努めた。技術検討委員会は以下の5テーマについて個別に各々3名の技術検討委員を設置し、2~3回/年の頻度で委員会を開催するとともに研究開発の運営に反映した。

【5つの技術検討委員会】

1. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (結晶シリコン太陽電池)
2. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (CIS太陽電池)
3. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (Ⅲ-V化合物太陽電池)
4. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (ペロブスカイト太陽電池)
5. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (共通基盤技術)

【技術検討委員(敬称略)】

1. 結晶シリコン太陽電池 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)
高倉 秀行 (立命館大学教授)
山口 真史 (豊田工業大学)
2. CIS太陽電池 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)、
山口 真史 (豊田工業大学)
片桐 裕則 (長岡工業高等専門学校教授)
3. Ⅲ-V化合物太陽電池 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)
高倉 秀行 (立命館大学教授)
今泉 充 (宇宙航空研究開発機構 (JAXA))
4. ペロブスカイト太陽電池 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)
工藤 一浩 (千葉大学教授)
伊藤 紳三郎 (京都大学特定教授)
5. 共通基盤技術 : 小長井 誠 (東京都市大学教授)
高倉 秀行 (立命館大学教授)
田中 良 (NTT ファシリティーズ)

【開催実績、開催予定】

年度	2015	2016	2017	2018	2019
技術検討委員会 (5テーマそれぞれ開催)	0※	2	2 (中間評価実施)	3	3

技術検討委員会ではテーマによってテーマリーダー、テーマ内の個別のチームリーダー、或いは各委託先の担当者が個別に進捗報告を行い、技術検討委員による質疑応答、及びNEDOと技術検討委員による意見集約を通してプロジェクトにおける研究開発内容に対する見解、及び改善すべき点等について議論し、テーマリーダー、チームリーダー、各委託先担当者等に伝えた。技術検討委員会での主な指導内容を以下の表に示す。

1. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（結晶シリコン太陽電池）

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

分野	主な指導内容
結晶シリコン太陽電池（研究開発項目①、③）	<p>（2016年8月）大学、産総研はオリジナリティーのある研究開発を行うとともに、チーム間の役割分担をクリアにすべき。</p> <p>（2017年1月）研究開発が進んでいる研究テーマと探索段階のテーマとのギャップがある。研究開発が進んでいるテーマはそのまま開発を進めて頂き、探索段階のものは中間評価に向けてテーマを絞るべき。</p> <p>（2017年5月）2020年目標、2030年目標のどちらに対する開発テーマなのか区別して、見極めを急ぐべき。</p> <p>（2018年1月）実用化・事業化に向けた開発スケジュールを四半期ごとに示すことで、より明確にしていきたい。</p> <p>（2018年6月）企業と大学・産総研間の連携が強く感じられた。引き続き連携を深めていきたい。</p> <p>（2018年10月）オリジナル技術の今後の出口イメージを出してほしい。企業との連携を進めてほしい。</p> <p>（2019年3月）他社と比較してポイントとなる技術を示して、だから勝てるというところを示してほしい。</p> <p>（2019年7月）残り7カ月となり、各実施者が設定している目標や論文、出願数であるアウトプットは勿論のこと、どのような市場創出に繋がるか、世の中をどう変えるかというアウトカムをはっきりさせるように。</p> <p>（2019年11月）最終目標であるセル効率達成への道筋を示してほしい。残り3カ月となり、各実施者が設定している目標や論文、出願数であるアウトプットは勿論のこと、どのような市場創出に繋がるか、世の中をどう変えるかというアウトカムをはっきりさせるように。</p> <p>（2020年2月）企業は実用化・事業化を見据えた技術開発、大学・国研は開発した技術の出口イメージができる成果につながる研究開発をお願いしたい。</p>

2. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（CIS 太陽電池）

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

分野	主な指導内容
CIS 太陽電池（研究開発項目①、③）	<p>（2016年7月）評価指標の考え方など基本的な部分については、共通の認識で連携を進めるべき。</p> <p>（2016年12月）どのような欠陥がバルクライフタイムやFFに影響しているのかを解明し、効率向上につなげるべき。</p> <p>（2017年4月）次の開発テーマとして、ワイドギャップ化に向けた具体的なアプローチを提案するべき。</p> <p>（2018年2月）小面積で Efficiency Table に掲載できるデータなど、良い成果が得られている。研究機関の研究レベルは高いが、同じ課題で各機関の横のつながりが見えない点については改善を求む。</p> <p>（2018年5月）モジュールレベルの課題を解決するよう取り組んでいただきたい。また、Voc 損失として、多元系の均一性に関する考察についても示してほしい。</p> <p>（2018年10月）モジュールレベルの課題の解決に向けた連携（研究結果の量産化への貢献）が進んでいることが認められる。課題解決に向けた取り組み、その組み合わせも含めて、でどのような効果が得られるかを整理していただきたい。</p> <p>（2019年3月）結晶 Si 等との競争力を上げていくためにも、モジュールにおいても効率をあげる。EQE から読み取れるロスについて、コンソーシアムで分析を進め改善すべき。曲線因子が何によって悪くなっているのかについても分析すること。</p> <p>（2019年6月）小面積タイプの変換効率の努力目標に向けて近い値を出せるように引き続き努力してほしい。ロス解析の結果を踏まえて、何処をどのように改善すれば努力目標に近づけることができるのか、誰が取り組みを進めて行くのか明確にした上で次回までの進捗状況を説明してほしい。</p> <p>（2019年10月）高効率化技術開発として多項目の取り組みを行ってきたが、終盤となって</p>

きたので、コスト、今後の取り組み等を含めて、技術選択の結論を出してほしい。 (2020年2月) 今回のプロジェクトのアウトカムをより明確に打ち出してほしい。軽量化、軽量を生かした展開への取り組みとアピールもあると望ましい。
--

3. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (Ⅲ-V化合物太陽電池)

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

分野	主な指導内容
Ⅲ-V化合物太陽電池 (研究開発項目②)	<p>(2016年7月) 7円/kWhの実現に向けてそれぞれの技術開発の効果が見えるよう、全体シナリオを作成するべき。</p> <p>(2016年12月) トップセルはInGaPに重点化に特化。GaNは見極めが必要。オンシリコンはテーマが多いので集約するべき。</p> <p>(2017年5月) 最終目標に向けてリソース集中に取り組むべき。超高効率セルは量産化につなげるという観点で評価するべき。</p> <p>(2018年1月) ヘテロエピのテーマについてはブレイクスルー技術に発展する判断材料が示されなかったため、今年度で終了するべき。</p> <p>(2018年6月) Siスタック接合は、継続するための判断指標について、次回の技術検討委員会までにデータを示してはっきりさせるべき。</p> <p>(2018年10月) MOCVD、HVPEの高速成膜やELO基板再生などの低コスト化プロセスについて、実用化に向けコスト計算を絶対値で示すべき。また、車載やZEBなど、1sunでⅢ-V太陽電池を使うストーリーを用意すべき。</p> <p>(2019年3月) 量子ドットのテーマは長寿命化において優れた成果が得られているが、量子ドット有無で比較評価した結果や、バイアス光に対するライフタイム変化を示すべき。また、高密度化のテーマは長寿命化や2段階吸収が得られる構造をどのように実現するのか説明すべき。</p> <p>(2019年6月) 各々の目標構造に対し、各開発アイテムがどのような段階を踏んで、どのタイミングで導入され、最終的に実用化されるのか、横軸を時間軸とした図をもって示すべき。</p> <p>(2019年10月) 無追尾集光モジュールは車載用太陽電池を目指すのであれば、重さやコストを考慮した最適解を提案するとともに、結晶シリコンに対する優位性を示すべき。</p> <p>(2020年2月) 5年間の開発を経てモジュール効率30%以上の達成やELO剥離技術、高速成膜技術など多くの進捗が見られた。展開できるものから適用して早期の実用化、事業化につなげていただきたい。</p>

4. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (ペロブスカイト太陽電池)

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

分野	主な指導内容
ペロブスカイト太陽電池 (研究開発項目②)	<p>(2011年11月) 面積が小さいので1cm²以上のセルで特性が得られるよう検討いただきたい。コスト試算については各技術がコスト低減にどう貢献するか、最終的なビジョンを描いて進めるべき。</p> <p>(2017年1月) デバイス物理の観点から評価、解析を進めるとともに、デバイス化して目標を達成する道筋を立てるべき。</p> <p>(2017年5月) 目標達成に向けてどのような貢献ができるか検討の上、絞り込むテーマの選別を進めるべき。</p> <p>(2018年1月) 高効率化への寄与が期待できるカリウムドーピングの汎用性について明確にすべき。</p> <p>(2018年6月) 2年間で実用サイズのモジュールの実現を目指して注力すること。R-to-R塗工法、スプレー塗工法については成果の見通しが不十分なため、今後最終目標の実現に向かって努力すること。</p> <p>(2018年10月) 塗布方法と出口(想定用途)の関係が不明瞭なので、明確にすべき。塗布方法、フレキシ化に関する俯瞰図を作成すべき。目標効率25%に向けた具体的なマイルストーンを明確化が必要。</p> <p>(2019年3月) プロジェクト最終年度を直前にして、未だペロブスカイト層の構成が確定していない印象を持つ。MAフリー処方を進めるのかどうかを含め、早く結論を出すべき。</p> <p>(2019年6月) 光劣化改善、ヒステリシス解消、エージング効果の原因解明等があると認識</p>

	<p>する。解決手法の提示、説明が必要。</p> <p>(2019年9月)セル変換効率について、各委託先・再委託先の成果をどの様に結集すれば目標値の25%を達成できるのかを明確にすべき。</p> <p>(2020年1月)小面積セルの変換効率24.4%は非常に評価できる(目標に対して九分九厘まで来ている印象)。一方、大面積セル、モジュールでの高効率化、光劣化現象要因の明確化が課題であると考え。実用化面では、ZEB、BIPV、その他の領域で結晶シリコン太陽電池と如何に勝負するかがポイントと考える。</p>
--	---

5. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会 (共通基盤技術)

研究開発項目④「共通基盤技術の開発(太陽光発電システムの信頼性評価技術等)

分野	主な指導内容
共通基盤 (研究開発項目④)	<p>(2016年8月)産業界のニーズも踏まえて積極的に知財の創出に努めること。出口イメージを持って開発を進めるべき。</p> <p>(2016年12月)特許などの知財獲得の取り組みが弱い。各グループとも知財獲得の具体的な戦略を示すべき。</p> <p>(2017年5月)寿命予測、試験法の開発では劣化モードのマップ図を作り、既解明点、非解明点を明確にするべき。</p> <p>(2018年2月)性能評価技術の開発ではⅢ-V族、タンデム型、バイフェイシャルの測定技術開発を引き続き行うべき。寿命予測ならびに試験法の開発では、得られた知見をもとにPID劣化が起きないモジュール開発に向けての提案を検討すべき。</p> <p>(2019年10月)アウトプットとアウトカムをGrごとに議論してGrリーダーは次回発表してください。成果について、各Grリーダーを中心に議論しまとめること。</p> <p>(2020年2月)劣化メカニズムの解明、測定技術などの顕著な成果を企業のモジュール開発に上手く反映して欲しい。新型太陽電池の評価は重要なので引き続き取り組むこと。</p>

また他の太陽電池関連事業を含めて、ホームページや展示会による広報、事業紹介パンフレットの作成、学会やシンポジウムでの講演、国際学会への参加と発表、雑誌への寄稿などを通じて成果の発信に努めている。

2.3.2 加速・拡充

必要に応じて事業の加速・拡充を実施している。

【予算増額】

研究開発項目	主な予算増額
研究開発項目① (結晶シリコン太陽電池)	<p>(2016年度) カネカ 11,011千円増額</p> <p>ヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池の高性能化に対し、ヘテロ接合部における高品位の界面の形成技術やパターニング技術の開発等の進捗を登録研究員が従事する時間を増加させることで加速した。これにより、中間目標であるモジュール変換効率21%を22%に向上させることができるとともに、最終目標に対しても、前倒しあるいは高いレベルでの達成に寄与するものと期待された。</p>
	<p>(2017年度) カネカ 286,367千円</p> <p>「パターニング層形成装置」「出力評価装置」の導入により低コストパターニング技術開発や長期信頼性評価技術等の実用化技術の開発を加速させる。モジュール変換効率の最終目標値向上、達成の前倒し、運転年数延長が期待できる。</p>
	<p>(2019年度) カネカ 40,793千円</p> <ul style="list-style-type: none"> 新規パッシベーション技術、表面/界面制御技術 低コスト電極材料・プロセス技術を活用した技術開発を実施することで早期に実用化。
研究開発項目① (CIS太陽電池)	<p>(2017年度) ソーラーフロンティア 30,000千円増額</p> <p>開発した新技術(CIS太陽電池集積構造における表面電極技術)の量産工場への導入を目指した大面積化の検証を行う。予算増額分は、大面積モジュールの試作費用に充当される。検証の結果、大面積化における課題を明確にすることが期待できる。</p>
	<p>(2018年度) ソーラーフロンティア 50,000千円増額</p> <p>①開発した新技術(CIS光吸収層の高品質化技術)の量産工場への導入を加速させる。予算増額分は主に量産工場における試作費用に充当される。これにより、量産試作モジュール</p>

	<p>の高出力化が期待できるとともに、最終目標に対して前倒しあるいは高いレベルでの達成に寄与するものと期待できる。</p> <p>②新技術（CIS 太陽電池集積構造における表面電極技術）の前年度の検証で明らかとなった課題への対策を行う。予算増額分は表面電極形成装置の改造費用と試作費用に充当される。これにより、大面積モジュールにおける出力向上の実証、及び開発技術の量産導入加速が期待できる。</p> <p>（2018 年度）ソーラーフロンティア 24,500 千円増額 開発した新技術（CIS 光吸収層の高品質化技術）を活用した、モジュールの表面材や基板の素材を変更した軽量モジュールの開発を加速させる。予算増額分は軽量モジュールの試作費用（原材料費用、部材費用、廃棄費用）に充当する。これにより、高性能な軽量モジュール開発の成立性を評価し、今後の新規用途市場開拓を目指した開発の可否を判断することが期待できる。</p>
研究開発項目② （Ⅲ-V 化合物太陽電池）	<p>（2017 年度）大陽日酸 35,640 千円 HVPE 装置、MOCVD 装置による GaAs、InGaP 高速製膜評価において、製膜高速化のための要素技術の設計及び装置改造を行い、実証評価を実施する。量産化装置の設計指針を早期に取得することができる。</p>
	<p>（2017 年度）シャープ 119,988 千円 新規用途開発に向けた化合物太陽電池の量産性検証、及び用途の一候補である車載用との実現可能性についての検討を行う。化合物の低コスト化目標達成に向けた見通しを明確にすることができる。</p>
	<p>（2018 年度）東京大学 107,749 千円 基板剥離プロセス高速化のための ELO 装置改造により低コストプロセス開発を加速するとともに、格子整合系 4 接合実現のための成膜装置、及び評価装置の改良、量子ドット原理検証のための測定装置を導入することで超高効率化技術開発を加速した。</p>
	<p>（2018 年度）大陽日酸 25,000 千円 HVPE のドーパントガスラインを増設することにより、広い濃度範囲でドーパントガスを供給し、成膜条件の最適化を図る。InGaP/GaAs₂ 接合セルの開放電圧の最終目標を 2.0→2.4V に修正した。</p>
	<p>（2018 年度）神戸大学 24,840 千円 連続発振チタンサファイアレーザーを導入し、高精度に波長分解した定量的な電流-電圧特性を評価することにより、量子ドットボトムセルに必要な吸収波長帯に対応したセル構造の最適化を行った。</p>
研究開発項目③ （ペロブスカイト太陽電池）	<p>（2015 年度）積水化学工業 18,058 千円 ペロブスカイト塗工機へのドライエア発生装置の追加。ペロブスカイトセルの性能ばらつきを低減でき、小型モジュール装置実現が可能となった</p>
	<p>（2017 年度）積水化学工業 23,760 千円 オール R2R プロセスでのペロブスカイト太陽電池の実証を 2017 年度中に実施するためのスパッタ装置の R2R 化と原材料費の増額。ロールスパッタ装置専用のスパッタ電源を追加で導入することにより、要素検討とロール化検討を同時に進めることができ、R2R プロセス全体の開発を加速できるとともに R2R 太陽電池の早期実証が可能となった。</p>
	<p>（2017 年度）パナソニック株式会社 11,880 千円 ペロブスカイト膜均一製膜検討装置に基板への塗布液の被覆性の向上のための塗布液循環機構と塗布液供給制御機構を追加、高精細パターニング装置の透明電極のパターニング用のレーザーの変更。最終目標として 30cm 角サイズのモジュールの大面積での効率 20%実証の可能性が期待された。</p>
	<p>（2017 年度）NIMS（早稲田大学再委託先） 5,940 千円 「光照射 1000hr が可能なデバイス構造要素技術の開発」前倒達成をはじめとする、最終目標開発加速のための研究員 1 名分の陽労務費増額。</p>
	<p>（2017 年度）東京大学 57,075 千円 蒸着システムの雰囲気制御機能付き蒸着装置、成膜装置一式および材料秤量装置を導入することにより材料の仕込み量に対する雰囲気の影響を明確化することが期待された。また、精密スプレー塗布システム導入により、塗工システムにおける膜厚、膜質の影響を明確化することが期待された。</p>
	<p>（2017 年度）積水化学工業 2,970 千円 R2R 付帯設備前倒し導入及び試験研究材料の追加に伴う契約金額の増額。</p>
	<p>（2017 年度）兵庫県立大学（東京大学再委託先） 1,150 千円 無機系ホール輸送材とペロブスカイトの間で生ずるエネルギー損失を最小化するため、大型放射光施設スプリング 8 の放射光を利用し、ホール輸送層のフェルミレベル制御検討。</p>
	<p>（2018 年度）積水化学工業 11,500 千円 フィルムへのバリア成膜の検討は外注試作を利用して行いますが、その試作検討のための</p>

	<p>労務費、消耗品、外注費の増額。</p> <p>(2018年度) 東京大学 15,000 千円 ペロブスカイト劣化機構分析のための SEM リース。耐久性能改善のための要素技術確立。</p> <p>(2018年度) 早稲田大学 4,375 千円 蒸着装置の改造によるペロブスカイト組成が変換効率に与える影響の確定。</p> <p>(2019年度) パナソニック 10,890 千円 自社保有シミュレーター修理による大面積 (30cm 角) モジュール変換効率測定頻度アップによる大面積モジュール研究開発の促進。</p>
研究開発項目③ (結晶シリコン太陽電池)	<p>(2016年度) 豊田工業大学 12/3,779 千円増額 先端複合技術型結晶シリコン太陽電池の早期実現に向けて、新たに「ヘテロクラスター型高性能ヘテロ接合研究開発システム」を導入し、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合技術の開発を加速するために増額を行った。これにより、先端複合技術型結晶シリコン太陽電池のセル変換効率の向上が期待された。</p> <p>(2016年度) 名古屋大学 17,575 千円増額 先端複合技術型結晶シリコン太陽電池の早期実現に向けて、新たに装置 3 台(ドラフトチャンバー、純水製造装置、スピンドライヤー)を導入し、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合膜形成前の洗浄技術の開発を加速するために増額をおこなった。これにより、先端複合技術型結晶シリコン太陽電池のセル変換効率の向上が期待された。</p> <p>(2018年度) 九州大学 25,000 千円増額 CZ 法シリコン単結晶引上機の 6 インチ結晶対応炉体を 9 インチ結晶対応炉体へ改造するため増額を行った。CZ 法シリコン単結晶引上機は高純度シリコン単結晶の結晶成長の研究に使用しており、改造により最先端の大口径の結晶成長を実現することが可能となり、高効率化や発電コスト低減に資する研究開発を推進することが期待された。</p> <p>(2018年度) 名古屋大学 30,015 千円増額 偏光式物性評価システムを導入するため増額を行った。これにより、クラスター型高性能ヘテロ接合研究開発システムを用いて製膜した薄膜の膜厚や光学特性の評価が可能となり、バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合型太陽電池の研究開発を加速することが期待された。</p>
研究開発項目④ (共通基盤技術の開発)	<p>(2018年度) 日本気象協会 12,460 千円増額 将来の PV 導入多様化を見据えた日射量データベース高度化の基礎検討として、特定の市街地を対象に秋季および冬季における日射の移動観測を行い、建物等の影や積雪の反射の影響等について調査・検討をするため増額を行った。これにより、市街地での日射の移動観測の要件、課題等が明らかになった。</p>
研究開発項目⑤ (調査)	<p>(2015~2017年度) みずほ総研 26,556 千円 「太陽光発電システム搭載自動車」に関する調査。「高効率太陽電池」の特長を生かした「面積制約」を受ける環境での活用例として「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出等を行った。</p> <p>(2018年度) 資源総合システム 3,000 千円 太陽電池モジュールの市場環境や利用環境の変化に対応するために、国内で流通するシステム機器、大手太陽電池製造企業の業績推移、中国における太陽光発電システム価格・太陽電池モジュール価格低減要因の分析、太陽光発電システムの新用途における動向と技術課題、太陽光発電システム導入主要国の再エネ比率等について追加調査を実施した。</p> <p>(2017~2019年度) みずほ総研 86,819 千円 新たに IEA PVPS のタスク” PV and Transport” が立ち上がり、それを通じた情報収集及び運営にあたっての各種資料作成支援を実施する。 車両に搭載される太陽光発電が受光し得る日射量を把握するための手法、方向性について検討し、公開可能な資料案を作成する。</p>

2.3.3 追加応募の実施

国外のセル・モジュールメーカーに対し国内外の市場における競争力を保つためには 2030 年に 7 円/kWh の開発目標は遅いとの判断に至り、本プロジェクトの研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」、及び研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」において開発を進めている結晶シリコン太陽電池や CIS 太陽電池については、7 円/kWh の開発目標を 2025 年に達成するべく発電コスト目標を変更した。

目標の達成に向け、本プロジェクト（研究開発項目①③）において追加公募を行うことにより開発テーマを補充し、2025 年までに 7 円/kWh の実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指すこととした。追加応募の結果、研究開発項目①で 1 件、研究開発項目③で 1 件を採択した。

量産プロセスの構築を狙って新たに追加した実証事業（研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」）の体制構築（新規公募）を行った。公募の結果 1 件の提案があり、低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証を目的とする 1 件を採択した。

2.4 研究開発の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

2.4.1 実用化、事業化に向けたマネジメント

研究開発項目⑤の動向調査を通して研究開発動向、市場動向を随時把握し、マネジメントに反映させた。また、50 機関以上ある各事業者を訪問し、幹部や研究開発のキーパーソンとディスカッションを行うことにより各機関の戦略について議論するとともに、プロジェクト成果の実用化、事業化に向けたマネジメントを行った。

2.4.2 実用化、事業化につなげる戦略

- 既に市販されている結晶シリコン太陽電池、及び CIS 太陽電池の開発において、ウエハスライス技術、パッシベーション技術、電極形成技術など、実用化に近い技術はプロジェクト期間内においても研究開発成果を順次量産プロセス及び市販セルに適用し、早期に実用化を実現するとともに、2020 年に発電コスト 14 円/kWh の目標達成を目指す。バックコンタクトヘテロ構造やその他の先端複合型セル構造など、大幅なプロセスの変更を伴う技術については、本プロジェクトで実用化に向けた要素技術を構築し、プロジェクト後半、或いはプロジェクト終了後に早期に小規模な製造実証や量産プロセスの構築を行い、実用化に結び付けるとともに 2030 年に 7 円/kWh、或いは 2030 年より前倒しで 7 円/kWh 達成を目指す。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池は高速成膜装置や発電層の低コスト基板への転写などによる低コストプロセスを早期に実現し、2030 年発電コスト 7 円/kWh 達成を目指して大規模発電施設や住宅屋根など電力発電用途向け太陽電池モジュールの実用化を狙う。また、車載型太陽電池など、小面積で高効率を得られるメリットを最大限に活かせる用途についての開発を併せて行い、実用化を目指す。
- ペロブスカイト太陽電池は効率及び耐久性を担保しやすいガラス基板型モジュールと、より低コスト、軽量化を目指した樹脂フィルムや金属箔上の超軽量モジュールの両面から開発を進め、既存の太陽電池モジュールの重量では強度に課題がある建物への設置等、軽量、低コストなどのメリットを活かせる市場から順次事業化を検討する。市場投入と並行して効率、耐久性等の高性能化を進め、最終的には結晶シリコン等既存太陽電池の置き換えも念頭に 2030 年に 7 円/kWh 以下の達成を目指す。

2.4.3 知財戦略・標準化戦略

連携体制に基づき、研究開発項目、或いは連携チーム内で知財合意書を締結させ、各々の研究開発に即した知財戦略、及び発明委員会の設置など管理方法について規定した。

3. 情勢変化への対応

- 研究開発項目⑤の動向調査を通して研究開発動向、市場動向における情勢変化を把握し、基本計画・実施方針に反映することにより、研究開発の効率向上、開発目標の改定をマネジメントした。
- 発電コスト 14 円/kWh、7 円/kWh は調達価格等算定委員会でも価格目標として設定され、太陽光発電の固定価格買取制度からの自立が明確に求められるようになった。これまで開発してきた高効率セルの小規模設備製造実証や、実用化を加速するための新たな市場の創出に向けて、BIPV (ZEB) や、車載などの FS を開始した。高効率セルの小規模設備製造実証としては、「高性能太陽電池製造技術実証」として量産への架け橋となる技術開発のプロジェクトへの発展を計画中。本テーマではバックコンタクトヘテロ型太陽電池等、試作レベルで高効率を達成した太陽電池に対し小規模試作設備を導入し、多数枚同時処理プロセス、スループットやタクトタイムの向上など、量産を想定した場合に低コスト化につながる製造技術の開発を行い、2020 年 14 円/kWh を確実に達成するとともに、2025 年に発電コスト 7 円/kWh 達成を目指すこととした。
- 株式会社トクヤマの「太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御」において、2017 年度中間目標を 2016 年度に達成したが、株式会社トクヤマのグループ会社が太陽電池用ポリシリコン事業を譲渡し撤退することが決定したことにより、最終目標である最適ポリシリコンの製品化の実現が困難となったため、2016 年度末で事業を終了した。本研究で得られた知見やポリシリコンは、連携先の豊田工業大学や明治大学に引き継ぐことで太陽電池製造技術、評価技術の基礎研究に有効に活用している。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池については、技術検討委員会における「トップセルは InGaP に重点化に特化。GaN は見極めが必要。オンシリコンはテーマが多いので集約するべき」との指摘に基づき、一部チームの体制を変更。GaN のテーマについては及び開発内容の見直しを行った。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池・低コスト化プロセス技術開発について、豊田工業大学、宮崎大学が取り組んでいたヘテロエピ（シリコンをボトムセルとしてシリコン上に直接成膜してⅢ-V 化合物/Si 太陽電池を形成）について、高効率化の見込みが得られないため 2017 年度で終了とした。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池・低コストセル技術開発において、パナソニックが取り組んでいたプラスチックレンズー体型セル・モジュールを低コストモジュール開発に移動して、豊田工業大学と協力して集光モジュール開発に注力する体制にした。また、豊田工業大学が取り組んでいた部分集光セルを低コストモジュール開発に移動して低コスト無追尾モジュールの開発に注力する体制にした。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池・低コストセル技術開発において、Ⅲ-V 化合物と結晶シリコンを接合することによりⅢ-V 化合物/Si 太陽電池を形成する 3 種の方法、①産業技術総合研究所が開発するスマートスタック、②東京農工大学が取り組んでいた導電性接着剤による接合、③大阪市立大学が検討を行っていた真空下での直接接合を用いたⅢ-V/Si の接合のテーマについて 2018 年度秋に行った第 6 回技術検討委員会をステージゲートとして集約を行った。議論の結果、②東京農工大学の導電性接着剤による接合のテーマは 2018 年度で終了とした。

4. 中間評価結果への対応

以下の通り、4点の指摘事項を踏まえて、基本計画や実施方針の改定、研究開発項目の拡充、研究開発の進捗管理、などを実施した。

【指摘事項1】コスト算定の根拠や個々の要素技術開発がどのように発電コスト低減に結びつくのかについて明瞭でない点は改善を望む。

【対応1】発電コスト算定根拠、個々の要素技術開発の発電コスト低減効果については、これまでも求めてきたが、一部、明瞭さが不十分なテーマについては、明確化を図る。また、結晶シリコンや CIS など実用化実績のあるテーマについては、技術検討委員会などの研究開発の進捗管理において、NEDO の発電コスト算定方法を共通して適用することを徹底した。

【指摘事項2】最終目標達成に向けた道筋が不明確な、あるいは達成の見通しが低いテーマがあるため、現状を正確に把握し、今後の道筋を具体的に提示することが望まれる。

【対応2】NEDO は、これまでも最終目標達成に向けた道筋を示すよう実施者に求めているが、これを徹底するとともに、達成の見通しが低いテーマについては、2018 年度および 2019 年度の実施方針に記す通り、研究内容、体制の見直しを行った。

【指摘事項3】経済効果の見通しについては、状況把握をより強化する必要がある。

【対応3】本指摘は、開発成果が国際競争力を保てる事業に成長しうるのか見通すために状況把握を強化すべきというものと理解し、国内外の市場及び技術動向調査の内容を再点検し、状況把握をより強化した。これまでに得られた調査結果を踏まえ、基本計画を改定した。具体的には、結晶シリコン太陽電池、CIS 太陽電池の発電コスト目標（7 円/kWh）の到達時期を 2030 年から 2025 年に 5 年間前倒しするとともに、既存の研究開発（研究開発項目①③）の体制強化を目的として 2018 年度に追加公募を行い、①で 1 件、③で 1 件を採択した。また、競争力強化のために高効率太陽電池の低コスト製造技術開発を加速する新たな研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」を 2018 年度に追加し、1 件を採択した。

【指摘事項4】大学中心の研究開発については、成果を学術論文として発表するだけでなく、連携する企業の実用化・事業化へさらに貢献させていくことが望まれる。

【対応4】大学中心の研究開発については、実用化には直接結びつかないが開発には不可欠な共通基盤技術開発があることに留意しつつ、2018 年度および 2019 年度の実施方針において、市場獲得や新市場創出につながる事業化計画を有する企業の活動を支援する効果の高い事業に重点化して研究開発を行うことをより明確化した。

5. 評価に関する事項

【事前評価】

評価実施時期：2014 年度

評価手法：内部評価

評価部門：評価部、戦略技術センター

評価内容：事前評価書に記載

【中間評価】

評価実施時期：2017 年度

評価手法：外部評価

評価項目：研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等

評価基準：技術評価実施規程に基づき

評価内容：中間評価報告書に記載

【事後評価】

評価実施時期：2020 年度

評価手法：外部評価

評価項目：研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等

評価基準：技術評価実施規程に基づき

Ⅲ. 委託テーマの成果詳細と実用化・事業化見通し

1. 事業全体の成果

結晶シリコン、CIS、Ⅲ-V化合物、ペロブスカイトなどの各太陽電池の研究テーマにおいて、結晶シリコンとCISは2025年に発電コスト7円/kWhを、Ⅲ-V化合物とペロブスカイトは2030年に発電コスト7円/kWhを達成するための技術開発として、各々設定した中間目標を達成すべく産学連携の下で研究開発を行った。結晶シリコン、CIS太陽電池は2020年14円/kWhを達成すべく、早期に量産プロセスに適用可能な技術についても併せて開発した。発電コスト低減には太陽電池セルの変換効率向上、材料、製造コストの低減、耐久性向上によるモジュール長寿命化などが必要となるが、変換効率向上については各太陽電池で世界最高効率を達成するなど、大きな成果をあげた。低コスト化についても高い変換効率を低減させずにコスト低減させる技術を開発しており、各太陽電池において発電コスト目標を達成できるコスト試算を行いながら低コスト化の基礎技術開発を行っている。耐久性向上については材料、製造プロセスなど太陽電池開発からのアプローチに加え、共通基盤技術として太陽電池性能評価、発電量評価や劣化要因解析、寿命試験方法の開発など、耐久性向上につなげる技術を併せた開発を行っており、これらの技術についても大きな進展があった。以下に研究開発項目ごとの主要成果について示す。

研究開発項目①先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の開発

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発した。

「高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発」においては、ヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池セルの低コストパターン形成技術開発、セル間配線技術などの実用化技術を開発し、結晶シリコン太陽電池セルとして世界最高のセル変換効率26.7%を実用サイズ(セル面積180cm²)で達成した。また、モジュールにおいても、結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高の変換効率24.5%を達成した。発電コストに関しては、住宅用建材一体型モジュール前提で、2020年度14円/kWh実現の見通しを得た。また、2025年に発電コスト7円/kWh達成が可能であるとの見込みを得た。

「高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発」においては、更なる低コスト化技術開発として、新規パターンニングプロセス及び新規界面清浄化技術を開発することで、セル変換効率25.1%(156mm角)、モジュール変換効率22.1%を達成した。発電コストに関しては、2020年度発電コスト14円/kWh実現のためのプロセス開発を完了した。また、2025年発電コスト7円/kWh達成の定量的なシナリオを提示することができた。

「低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発」においては、これまでに得られた成果をベースに、シードキャスト基板結晶成長中の温度制御最適化を実施した両面受光低コストPERC量産プロセスにおいて、受光面パッシベーション及びアニールの最適化により、セル効率22.01%(産総研にて測定)を確認した。また、モジュール効率20.1%で寿命35年以上のDH/TC複合ストレス耐性を有することを確認した。発電コストに関しては、低コストセル技術の導入により2020年14円/kWhの実現が可能であることを確認した。また、2025年7円/kWh達成に向けて低コスト高効率モジュールの製造技術導入を進めるシナリオを提示した。

「基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発」においては、n+層に対する接触抵抗1.8mΩcm²、p+層に対する接触抵抗3.8mΩcm²、電極形成による再結合470fAcm⁻²を達成した。

「赤外線FZ法による高品質低コストシリコン単結晶の開発」においては、インゴット製造経費850円/kg以下、ライフタイム7397μsecで結晶欠陥および転位フリー、抵抗面内分布10.9%以下、酸素成分濃度6.9×10¹³atoms/cm³、炭素成分濃度1.2×10¹⁵atoms/cm³のシリコン単

結晶を開発した。

「高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築」においては、スライス時の欠陥評価手法と対処条件を構築した。高面品位スライス技術によりダメージエッチングを5 μm 削減可能であることを確認した。カーフロス 60 μm の加工技術開発を行い、市場量産と同等以上の生産性を確保する加工技術を構築した。さらに、カーフロス 50 μm の加工を先行評価し、加工可能であることを確認したほか、カーフロス 40 μm が可能となる固定砥粒ワイヤの製造を確認した。

「太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御」においては、太陽電池製造の熱プロセスで成長する酸素析出物の形態と数密度が、炭素不純物濃度と結晶成長条件により変化し、ライフタイムや変換効率に悪影響を及ぼすことを解明した。酸素析出物の形態と数密度を制御して高ライフタイムの単結晶インゴットを得るCZ法結晶成長技術を開発した。開発した結晶成長技術と炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用して得られた実用サイズのインゴットのライフタイムは、全長にわたって 2000 μsec 以上を達成した。開発したインゴットは熱プロセス後のライフタイム低下が抑えられ、ライフタイム下限値を 300 μsec とすると、インゴットの直胴良品歩留りが 11.5%向上した。

「低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-junction (SSHJ) 太陽電池の開発」においては、Super Bifacial-SHJ (SBF-SHJ) でモジュール効率 20.9%を実現し、2020年発電コスト 14円/kWhを達成するとともに、2025年発電コスト 7円/kWhを達成する見込みを得た。Super Back Contact-SHJ (SBC-SHJ) でモジュール効率 22.0%超を実現し、2020年発電コスト 14円/kWhを達成するとともに、2025年発電コスト 7円/kWhを達成する見込みを得た。

2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

CIS 太陽電池は結晶シリコン太陽電池より変換効率は低いですが、その分製造コストが低いことを見積もることができ、結晶シリコンとは少し異なる特性、コストバランスで 2020年発電コスト 14円/kWh達成、さらには 2025年発電コスト 7円/kWh達成を目指して開発を行っている。以下に主な成果を示す。

「CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発」において、世界最高変換効率 22.9%を達成した CdS バッファ CIS 小面積セルの技術をもとに、光吸収層の品質改善技術及び光吸収層表面パッシベーション強化技術をさらに改良することに加えて、Cd フリーバッファ層の精密な最適化を行うことにより、変換効率 23.4%を達成した。また、本変換効率を達成した Cd フリーセル技術を適用したサブモジュール(70mm角)で変換効率 20%の見込みを得た。発電コストに関しては、2020年度 14円/kWh達成の見込みを得た。また、2025年に発電コスト 7円/kWh達成に向けた定量的なシナリオを提示することができた

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1) 革新的高効率太陽電池の研究開発 (III-V化合物太陽電池)

III-V化合物は多接合化や集光により高い効率は実証されているため、目標の 2030年発電コスト 7円/kWhを達成するために、どのように高い効率を保ったまま材料コスト、製造コストを低減するかを主体とした開発を行っている。具体的には発電層の低膜厚化や高価な GaAs 系基板の使いまわしのための薄膜セルの基板からの剥離プロセス、安価な基板或いは安価な太陽電池との接合技術、及びタンデム化、光発電層の高速成膜化などである。併せて量子ドットセルなど、更なる高効率化を目指す技術開発も行っている。主な成果を以下に示す。

「低コストセル技術開発」では、コロイドリソグラフィ+ドライエッチングによる裏面テクスチャ形成を、薄膜2接合セル(InGaP 300nm/GaAs 600nm)に適用し、裏面ミラーの場合に比べて主に GaAs の光吸収を増大することにより J_{sc} 40%増加を確認した。光閉じ込めにおいて、エピタキシャル最下層への裏面反射構造の導入、サブセルベース厚さの適正化によるエピタキシャル層の薄層化、バッファ層の薄型化を組み合わせるIII-V薄膜3接合セルで総膜厚1/2(従来比)で従来と同等の電気特性を確認した。シリコン上III-Vセルでは、化合物2接合(InGaP/GaAs)とSiセル(バックコンタクト型)とを透明樹脂層を介して接合した4端子セルで変換効率 33.0%を達成した。スマートスタック技術(Cu接合)を適用した GaAs/Si 系で素子寿命

30年以上および実用的な耐久性を実証した。

「低コスト化プロセス技術開発」では、開発した自動装置で4インチウェハを20mm/hで安定的にクラックレス剥離ができることを確認した。また、10回基板利用で電気特性の維持率95%以上、歩留り81%を達成した。全面観察装置を開発し、1時間以内の4インチウェハ非接触スキャン、さらに検出された異常点の分類判定の正答率98.5%を達成した。MOCVDによりGaAs製膜速度120 μ m/hを達成、InGaP製膜速度30 μ m/hを達成した。単セルの変換効率は、それぞれ、24.5%(p on nセル)、15.3%と目標を達成した。また、これらの成果を組み合わせた2接合セルで効率22.3%(反射防止膜で効率約28%見込み)を達成した。HVPEによりGaAs製膜速度170 μ m/h、InGaP製膜速度24 μ m/hを達成。単セルの変換効率は、それぞれ、22.4%、13%を達成した。これらの成果を組み合わせたInGaP/GaAsタンデムセルの開放電圧2.32V、変換効率21.8%を実現した。

「低コストモジュール開発」では、実用セルサイズの新集光・逆積み3接合型モジュールで世界最高となる31.2%の変換効率を達成した。また、モジュール面積当たりの月積発電量で対Si 151%となることを実証した。集光型では、低コスト構造の1m角プラスチックレンズ一体型パネルで変換効率32.2%を達成し、IEC62108準拠の信頼性試験をクリアしたことを確認した。また、2030年時点で、システムコスト119円/W(100MW/年生産)と発電コスト7円/kWhの実現見通しを得た。無追尾低倍集光モジュールで変換効率32.8%を確認した。低コスト化に向けた基盤技術として反射防止コート設計最適化により効率2.52%向上を達成した。また、非集光III-V族多接合型太陽電池モジュールを含む他接合型太陽電池の屋外での発電動作が、気象条件、特に太陽光スペクトルの影響を強く受けることを、実証データをもとに世界で初めて明らかにした。さらに、各種太陽電池の実動作データをもとに、発電量シミュレーションモデルを構築し、全国837箇所における各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量予測が可能となった。

「超高効率セル開発」では、電流整合を満たすGaInNAs:Sbセルを開発し、非集光逆積み型GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb格子整合系3接合セルで変換効率30.3%(1 Sun)を達成した。GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge4接合セルの開発に国内で初めて成功(ウェハ接合)した。また今後の課題を明らかにし、50%達成に向けた見通しを得た。量子ドット中間バンドセルでラチェット構造により中間バンド内電子の長寿命化(100 nsec)を実現、室温でサブバンドギャップ光励起強度によって80%のキャリア引出効率を達成した。開発した集光型低電流・高電圧型量子ドットセルにおいて効率32.1%(225 Sun)を達成した。

2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発 (ペロブスカイト太陽電池)

ペロブスカイト太陽電池は、2030年発電コスト7円/kWh達成に向けて、モジュール変換効率は20%と結晶シリコン太陽電池より若干低いものの、大幅な低コスト(発電コスト7円/kWhの製造コスト15円/W)を実現できる材料や製造プロセスを目指した開発を行った。また、実用化に向けて課題となる耐久性(耐湿性、耐熱性、耐光性)を充足する材料、製造プロセスを構築することにも留意した開発を実施した。以下に主な成果を示す。「塗布法によるペロブスカイト太陽電池の開発」では、大面積均一インクジェット塗布を用いて30cm角サイズのモジュールで世界最高効率17.93%(AIST測定)を達成した。太陽電池セルのペロブスカイト膜の組成制御と界面修飾で高温高湿試験、光照射安定化試験の品質規格の要求事項を達成した。モジュール高効率化、プロセスタクトの短縮、設備コストの低減の可能性を確認し、モジュール製造コスト15円/Wの指針を得た。

「超軽量太陽電池モジュール技術の開発」では、従来困難であった大面積化と高効率化の両立を実現し、面積703cm²のPENフィルム基板モジュールで変換効率14.1%を実現した。ガラス基板(27×29cm)では変換効率16.1%を確認しており、PENフィルム基板モジュールへの展開を進めている。耐久性に関しては、Mixペロブスカイトを採用した5cm角フィルムモジュールで光照射500時間に対し、400時間まで相対効率低下10%を確認した。また、耐熱試験1000時間に対し、550時間まで相対効率低下10%を確認した。

「低コストR2R太陽電池製造技術の開発」では、3cmフィルム基板セルで変換効率13%を達成し、JIS規格C8381準拠の耐久性試験5項目で相対低下率10%以下を達成した。また、オールR2Rプロセスで作成した30cm角フィルム基板モジュールで変換効率11.4%を達成した。量

産時 5 円/W 以下が達成可能な内製バリアフィルムにより耐湿熱試験 (85°C85%)1000h で相対変換効率低下率 10%未満を達成した。

「高性能・高信頼性確保製造技術の開発」では、小面積セルでの変換効率 18%の構成において、100mm 角で 17.04%、240mm 角で 16.12%の変換効率を有するモジュールを実現した。従来の金電極に対して低コストのカーボン系塗布材料で組成と工法を改良し、金電極でセル変換効率 16.51%の構成において、カーボン電極で 16.22%を達成した。従来の材料 (spiro 0MeTAD) に対して低コストな有機系新ホール輸送材を開発し、spiro 0MeTAD でセル変換効率 18.7%の構成において、有機系新ホール輸送材でセル変換効率 18.2%を達成した。耐久性に関しては、カチオンサイト、Br レス・ペロブスカイト層、ホール輸送材の最適化により、光作動耐久性向上 (400hr で初期性能の 77%を維持)を確認した。

「高性能材料合成技術の開発」では、耐湿性低下の原因となるドーパントを必要としない正孔輸送材料骨格を見出し、新規正孔輸送材料を用いたセルで spiro-MeOTAD を用いたセルと同等以上の変換効率に到達した。吸収長波長端 750nm 以上を満たしつつ、変換効率の低下なくペロブスカイト膜の耐湿性が向上するペロブスカイト表面処理技術を見出した。上記の新規材料を用いて最大変換効率 14.6%を確認した (同条件における Spiro-MeOTAD: ドーパント有りの変換効率 14.2%)。

「高機能材料・セル製造技術開発」では、低コストかつ長寿命 HTM で、材料コスト 80 円/m² (層厚み 50nm)、酸化剤ドーパントフリーの HTM 組成を確立した。また、上記 HTM とペロブスカイト界面制御の組み合わせにより変換効率 22%超を実現するとともに、25%に向けた手順を提示した。製造工程簡易化によるコスト低減を目的とした一段塗布用インキの簡便なバーコート法で変換効率 17%。スピノコートで変換効率 17%を確認した。逆型構造セルを開発し連続光照射 1,000 時間超の耐久性、85°C耐熱性 500 時間を達成した。性能評価法の確立に関しては、MPPT 法、Dynamic I-V 法、Reduced Span I-V 法と 3 種類の測定法を提案し、測定条件の最適化によりヒステリシスの影響を解消できることを実証した。

「新素材と新構造による高性能化技術の開発」では、ペロブスカイト層へのカリウム添加による I-V ヒステリシス低減効果が様々な組成に有効であることを見出した。また、1cm²セルで変換効率 21.65%、3 直列モジュール (2.76cm²) で 20.7%を達成した。ペロブスカイト単結晶試料の構造と物性を検討し、励起子の特殊性を明らかにした。複数の結晶相が混在し、自発的に超格子を形成していることを見出した。劣化要因となる MA を含まないペロブスカイトでカリウムとセシウムを適切に添加し不純物を制御することにより、セル変換効率 21.9%を達成した。高電流化を狙った錫/鉛混合ペロブスカイトで Jsc 33.1mA/cm²、Voc 0.8V、セル変換効率 20.4% を達成した。100 円/m²以下無機系ホール輸送材 NiO_x を用いた逆構造型セルで効率 19.6%を確認した。混合カチオン型 (Cs_xMA_yFA_zPbI_aBr_b) 用の前駆体材料 FAPbI₃(dmf)₂を開発し、これを用いて Voc 1.21V (電圧ロス 0.38V) のセル、変換効率 22.2% (Jsc 25.2 mA/cm²、Voc 1.11 V、FF 0.793) のセルを得た。電圧ロスが小さい理由として、Aging により正孔輸送層での酸化が進行し、伝導度が向上するとともに、HOMO 準位がより深くなることを明らかにした。カリウム添加ペロブスカイト太陽電池の Br 比制御による Eg グレーディングの最適化を行い、表面側 Eg が 1.61eV (Br 比=0.15)、裏面側 Eg が 1.48eV (Br 比=0.00) の時に効率が最も高くなる (25.2%) ことを明示した。PbSn 系ペロブスカイト太陽電池の Sn/(Pb+Sn) 比制御による Eg グレーディングの最適化を行い、表面側 Eg が 1.47eV (Sn 比=0.07)、裏面側 Eg が 1.33eV (Sn 比=0.38) の時に効率が最も高くなる (25.5%) ことを明示した。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

本研究開発項目では 2025 年発電コスト 7 円/kWh 達成を目標とする研究開発項目①の結晶シリコン太陽電池の高効率化、低コスト化のための共通基盤技術として、大学や研究機関が、高品質シリコン結晶、高性能パッシベーション膜 (ヘテロ膜)、電極のコンタクト部の再結合を抑制する新規構造や、大幅に工程を削減できるイオン注入などを使ったバックコンタクト形成プロセス等の検討を行った。主な成果を以下に示す。

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」においては、p 型単

結晶 PERC セル効率 20.0%、n 型単結晶 Bifacial PERT セル効率 21.0%を達成した。開発した PERT セルプロセスは p 型 n 型両方に適用可能であることを確認し、高効率拡散系セルプロセスを確立した。SHJ セル効率 23.2%、pseudo Eff. 24.3%を達成して高効率ヘテロ系セルプロセスを確立するとともに 25%達成の目途を得た。複数の企業や大学、研究機関等と連携してモジュールを試作・評価できる体制を構築。PID や LeTID といった新しいモジュール劣化現象の原因とメカニズムの解明に貢献した。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」においては、株式会社トクヤマと共同で、 $10\text{--}20\ \Omega\cdot\text{cm}$ で 18 msec、 $1\text{--}2\ \Omega\cdot\text{cm}$ では全長の 95%以上の領域で 2 msec を超える高ライフタイム結晶の成長に成功した。発光活性化 PL により従来困難であった 10^{14}cm^{-3} 以下の低濃度測定法を開発した。また、 10^{12}cm^{-3} の定量の可能性を見出した。ダイヤモンドワイヤーでスライスした基板の目視できない欠陥の PL イメージングによる可視化し、セル特性への影響を明らかにした。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」においては、p 型基板では 5msec、n 型基板では 10msec のバルクライフタイムを実現した。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」においては、アモルファスシリコンを用いたヘテロ接合型太陽電池において、開放電圧 0.740 V 以上、変換効率 23.2%に貢献した。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」においては、ライフタイムの温度依存測定による界面のバンドオフセット評価手法を確立した。FTS 法による i-a-Si:H 層 (5 nm) により、 $J_0=4.6\ \text{fA/cm}^2$ を達成した。堆積速度は約 15 nm/min である。この i-a-Si:H を用いたシリコンヘテロ接合太陽電池 (p、n 層はプラズマ CVD 製膜) を作製し、変換効率 17.4% ($V_{oc}=0.679\ \text{V}$, $J_{sc}=35.0\ \text{mA/cm}^2$, $FF=0.732$) を得た。電子選択コンタクトとして Si ドープ nc-GaN の形成を試み、結晶性が高く電気的特性の良好な膜の形成に成功した。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」においては、裏面パッシベーション膜により $J_{0\text{rear}}$ を $260\ \text{fA/cm}^2$ 削減可能なプロセスを開発に成功し、かつエミッタプロファイルの数値シミュレーションより、 $J_{0\text{front}}$ を $50\ \text{fA/cm}^2$ 削減しうるプロセスを明らかにした。6 大学コンソーシアムにおいてシリコン単結晶の高品質化が行われ、 $J_{0\text{bulk}}$ の大幅な削減 ($100\ \text{fA/cm}^2$ 以上) に成功しており、全ての技術を組み合わせることにより、最終目標を超える J_0 の削減が可能となった。

「薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発」においては、板厚 50 μm 級の極薄ウェハを用いた SHJ セルを開発し、世界トップレベルの変換効率 22.0% (4cm²) を達成した。スクリーン印刷などの低コストプロセスを用いて、両面受光-裏面電極 (BC) 型セルの効率向上を図り、変換効率 22.3%を達成した。任意の波長で内部量子効率のマッピングが可能な内部量子効率マッピング法を新規に開発し、BC セルの電気的遮蔽損失領域の同定に成功した。高信頼性化技術については、PCT による湿熱劣化の信頼性試験により、インターコネクタに沿った劣化モードを見出し、その劣化メカニズムを初めて提案した。

「Cat-CVD など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発」においては、裏面電極型 Si ヘテロ接合太陽電池の光入射側表面に Cat-CVD 窒化 Si 膜を堆積し、開放電圧 730mV 以上、変換効率 24%以上に貢献した。非質量分離型プラズマイオン注入により p 型 a-Si を n 型に反転する技術を確立した。また、イオン注入により一旦低下するパッシベーション性能を、事後のアニールで回復できることを見出し、その機構が、P とともに注入された H による欠陥終端であることも明らかにした。この方法で形成した n 型 a-Si を用いた太陽電池の動作も確認した。

「高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発」においては、シリコンヘテロ接合太陽電池において、ナノ結晶シリコン薄膜をパッシベーションコンタクト材料に適用したすることにより、ナノ結晶を用いないベンチマークセルに比べ短絡電流密度の 2.1%向上、変換効率 23.5%を達成した。また、 TiO_x が結晶シリコン太陽電池の電子コンタクトとしてのみならず、正孔コンタクトとしても機能することを実セルで初めて実証した。従来のアモルファスシリコン p-i 層を TiO_x に置換することで J_{sc} を 4.1%改善し、解放電圧 0.700V を確認した

2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

本研究開発項目では 2025 年度発電コスト 7 円/kWh 達成を目標とする研究開発項目①の高性能 CIS 太陽電池の高効率化、低コスト化のための共通基盤技術として、大学や研究機関が CIS 太陽電池の高効率化のための手法の開発や機構解明を行った。以下に主な成果を示す。「光吸収層の高品質化による CIS 太陽電池の高効率化」においては、三段階蒸着製膜 CIS 光吸収層における銀 (Ag) やアルカリ金属添加、およびバンドギャップグレーディング制御、熱光照射処理により変換効率向上を実現した。これにより、世界最高水準の変換効率 22.2%を確認した。

「界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化」においては、CIS 太陽電池の pn ヘテロ接合界面に価電子帯オフセット ΔE_v を設けることにより界面再結合電流の抑制が可能であることを指摘した。 ΔE_v を形成する層として Cu 欠損層を用いることにより、開発開始時の開放端電圧 V_{oc} を +30mV 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 26.3 \text{ mW/cm}^2$ を実現、最終目標を達成した。さらに、3 段階法における Cu 欠損層の成長モデルを構築した。

「バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発」においては、Cd フリーかつオールドライプロセスの MOCVD-(Zn, Mg)O:B/sp-(Zn, Mg)O/CIS(Cs 処理) 構造で、従来構造よりも 30mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値は 29.0 mW/cm^2 を達成した。また、従来のウェットプロセスを用いないオールドライプロセスで、世界で初めて変換効率 22%を超える CIS 太陽電池を実現することに成功した。

「エピタキシャル成長を利用した CIS 太陽電池の高効率化指針の解明」においては、エピタキシャル製膜の下地となる Mo 薄膜について、低温バッファ層を導入した新規スパッタ法を開発し、Mo 薄膜のエピタキシャル成長に成功した。新たに開発した高温 3 段階法で Mo/サファイア基板上にエピタキシャル CIS 薄膜を作製し、キャリアライフタイム τ_2 100ns 以上 (300K) を達成した。

「結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援」においては、アルカリ処理 CIS 試料の深い欠陥準位の相関を示し、バルク改質 (アンチサイト欠陥の密度低減) の効果があることを確認した。また、バルク再結合成分が減少し、開放起電圧が改善することを、再結合解析より定量的に明らかにした。放射再結合定数の再計算とシミュレーションを組み合わせ、25%の達成に必要な開放起電圧 (欠陥準位) について明らかにした。非輻射再結合損失に加え、 J_{sc} 損失の低減が不可欠であることを示した。

「積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発」においては、電子構造の深さ方向プロファイルを評価するための技術として窓層/バッファ、バッファ/CIS 層界面形成、CIS/Mo 界面露出、「その場」アルカリ処理技術を開発した。それらと電子分光法による評価の結果、バッファ/CIS 界面のバンド接続がほぼ理想的であること、この界面の拡散電位がアルカリ処理により増大し、処理による開放電圧の増大に対応すること、三段階法、SAS 法共に高性能電池の CIS 層内、Mo 側にバンドギャップ二重傾斜、Back Surface Field が存在することを明らかにした。一方、窓層/バッファ、CIS/Mo 界面の電子接続には効率向上に向けて改善の余地が残されていることを示した。

「理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究」においては、 $\text{Cu(In, Ga)(S, Se)}_2$ [CIGSSe]系化合物半導体の禁制帯幅やバンド構造 (価電子帯上端 [VBM] と伝導帯下端 [CBM] の準位) の Ga/(In+Ga) 比と S/(S+Se) 比をパラメータとした 3 次元マップを作成し、 CuInSe_2 の Ga や S の固溶効果を明らかにするとともに、高効率太陽電池の光吸収層の深さ方向の組成分布や粒界構造モデルを提案した。深さ分解 XAFS 法を用いて、高効率太陽電池に用いられている Cs 処理は、表面だけではなく薄膜内部に与える効果で変換効率の向上に寄与していることを示した。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発 (太陽光発電システムの信頼性評価技術等)」

本研究開発項目では「出力測定技術の開発」、「発電量評価技術」および「信頼性・寿命評価技術の開発」を通じて、太陽電池の効率、耐久性を向上させるための共通基盤技術開発を行った。以下に主な成果を示す。

「出力測定技術の開発」では新型太陽電池の屋内高精度性能評価技術を開発し新型結晶シリコンペラセル及び CIGS で再現性 $\pm 0.5\%$ (1σ) の最終目標を達成した。また、屋外測定につい

ては、PVMS (PV Module Irradiance Sensor) による日射計測や高精度モジュール温度測定、従来より高精度かつ温度係数の情報不用な新温度補正式の技術開発により、高精度な屋外性能評価が様々な照度・温度条件下で実現可能であることを実証し、測定再現性 $\pm 1.0\%$ (1σ) の最終目標を達成した。

「発電量評価技術」では太陽電池モジュールの種類毎の劣化傾向を把握することにより、多くの種類の太陽電池において、発電量評価の上で考慮すべき初期劣化は飽和傾向を示し、初期劣化の程度や飽和に要する時間等の諸特性を明確化できた。また、各種太陽電池の推定発電量と実発電量を比較し、ヘテロ接合系や薄膜シリコン系でも最終目標である $\pm 5\%$ 以内の精度を十分に上回る精度で発電量推定が可能なことを実証した。

日照一日射モデル (日照時間から日射量を推定するモデル) の改良を行い、代表年時別データとして整備した。さらに衛星推定日射量による高密度な面推定データを統合することで、高精度で高密度な (1 km メッシュの解像度の) 月平均日積算日射量データを整備しデータベース化した。

「信頼性・寿命評価技術の開発」では紫外線照射試験を施したモジュールの着色と酢酸量、自由体積サイズ、発電量を定量的に評価した。さらに、PID 現象と Na の関係性を評価するとともに、各種太陽電池での PID 現象を詳細に解析した。光照射時の PID の振舞いを詳細に調査し、波長依存性を明確化するとともに、部分影の影響を見出した。これまでに見出した PID 現象を定性的ながら総合的に説明できるモデルを構築し、これまで個別のモデルで考えられていた p 型と n 型の結晶シリコン太陽電池の PID メカニズムを統一的に説明可能とした。p 型セルにおける反射防止膜を種々変更したセルを用いてより詳細に検証し、上記モデルを強化した。また、これらの知見をもとに、反射防止膜にかかる電界を遮蔽するセル構造を考案し、PID をほぼ完全に抑止できることを実証した。

ZEB 適用型太陽電池モジュールの配線接続ユニットを用いた加速評価方法により、30 年以上の耐久性を評価することができ、耐用年数 30 年以上の設計要件を明らかにすることができた。また、新規加速負荷試験 (ATC 試験) において、ガラス封止構造は、通常のフィルム封止構造 (耐用年数 20 年設計) の 3 倍の耐久性を有することを確認した。

研究開発項目⑤「動向調査等」

本研究開発項目では太陽光発電開発戦略に関する動向調査、発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査、IEA、PVPS の国際協力活動への参加、情報収集、活動提案を行った。

「太陽光発電開発戦略に関する動向調査」では、第 5 次基本計画に掲げられた再生可能エネルギーの「主力電源化」に向けて太陽光発電開発戦略の改訂が緊急の課題であるとの認識から、有識者による「太陽光発電技術戦略委員会」を立ち上げ、太陽光発電の価値・付加価値、太陽光発電の市場創出の可能性等の情報収集・分析を行うと共に、「太陽光発電開発戦略」の方向性を検討した。検討を踏まえた「太陽光発電開発戦略」を推進するべく、市場動向、システム価格や発電コストに関連する各種情報を収集し、最新の発電コストの試算および感度分析を行った。また、制度動向、技術動向、経済性評価 (グリッドパリティ等) の情報を調査し、太陽光発電の 2050 年に向けた導入量を定量的に分析した。今後市場の発展が見込めるアプリケーションとして検討を開始した「太陽光発電システム搭載自動車」の意義、市場動向を調査し、時間帯別の日射量・走行パターンを想定した太陽光発電システム搭載自動車による CO2 排出削減効果の試算を行った。また、太陽光発電搭載自動車に関する国際的な展開として、IEA PVPS におけるタスク 17: PV and Transport の立ち上げ及び運営支援を行った。

「発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査」では、太陽光発電システム設置価格とその内訳について調査・分析を行うとともに、世界における太陽電池モジュール技術および産業の現状を調査し、代表的な太陽電池製造企業の事業内容の整理および比較を行った。また、太陽電池モジュールの長期信頼性に関する研究開発動向や国際標準化について調査した。更に、「太陽光発電開発戦略」の改訂に対応するべく、太陽電池モジュールの利用動向と今後の市場と産業の可能性に関して調査した。海外主要国における太陽電池の研究開発動向を調査し、各国の太陽電池技術開発戦略を体系的かつ明確に比較・分析できるよう、その枠組み、予算配分、目標等の比較を行った。特に、新たな太陽電池技術として、量産製品における技術

トレンド、ペロブスカイト太陽電池等の研究開発動向と実用化に向けた各機関の取り組みや開発ロードマップ等を調査した。「IEA PVPS 国際協力事業」では国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた諸外国の技術開発動向や政策動向、市場動向等に関する調査・分析を実施した。具体的には、タスク1 専門家会議、ワークショップ等への参画を通じて、各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。また、各種ワークショップにおいて日本の動向について講演を行い、加盟国間の情報交換に貢献した。また、日本のタスク1に関わる調査を実施し、報告書をIEA PVPSに提出するとともに、IEA PVPS Trends Reportを始めとする各種報告書を作成するとともに、主要国の国内調査報告書等の日本語版を作成した。特別情報活動では、第7回世界太陽光発電国際会議(WCPEC-7)でタスク10Aの運営責任者を務め、日本およびEUの専門家を中心となり会議に参加したステークホルダーに対し、太陽光発電の市場、価格、産業界の総括的な概要報告と将来のビジネス展望に関するワークショップを開催した。また、第35回欧州太陽光発電国際会議(EUPVSEC-35)において、新しい市場開拓、ビジネスモデルに関するワークショップを実施すると共にIEA PVPSタスク17「PV and Transport」に係る各種情報収集およびタスク専門家発掘等の支援を実施した。

研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

本研究開発項目では2025年7円/kWhを目指し、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行った。

「低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証」において、製造プロセスの改善を進め、モジュール変換効率22%実現に必要なセル変換効率24%相当を再現性良く得られることを確認した。また、p/n、電極パターン形成に用いる部材のバリューエンジニアリング、既存材料の利用効率の改善可能により、パターン形成の変動費5円/Wの実現見込みを得た。

2. 研究開発項目毎の成果と実用化・事業化見通し

(イ) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発

【A 結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発】(株式会社カネカ)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
① 高効率バック コンタクトヘテ ロ接合結晶 Si 太 陽電池の開発	①モジュール変換 効率:24%、発電コ スト:14 円/kWh	モジュールでの変換効 率:24%(実用サイズモジ ュール) 発電コスト14 円/kWh	◎	
② 結晶 Si 太陽電 池をベースとし た複合型太陽電 池の開発	②セル変換効率: 30%、モジュール 変換効率:27%	セル変換効率 30%	△	

*1 達成度

◎: 数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○: 数値目標クリア、△: 数値目標未達

【B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発】(シャープ)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
① 出力向上技術 の開発	モジュール変換効 率 22%を試作モジ ュールで確認す る。	・フルサイズ(156mm 角) の基板を用いて、 セル変換効率 25.1%の 達成。 ・42 直モジュール試作 モジュール変換効率 22.1%確認 ・信頼性評価 IEC 規格 をクリア	◎	
② 低コスト化技 術の開発	2020 年発電コス ト 14 円/kWh を達 成するためのプロ セス技術開発を行 う。また、2025 年 発電コスト 7 円 /kWh の定量的な シナリオを提示す る。	・発電コスト 14 円/kWh のプロセス技術開発を 達成(社内試算) ・7 円/kWh の定量的な シナリオを作成	◎	

*1 達成度

◎: 数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○: 数値目標クリア、△: 数値目標未達

【C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発】（京セラ株式会社）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
低コスト量産プロセスでの高効率シリコン太陽電池の開発	発電コスト 14 円/kWh を実現し、更に 7 円/kWh に資する太陽電池モジュール製造技術を開発する（モジュール効率 20%）	テーマ完了時において、発電コスト 11.1 円/kWh（原価）を実現。 7 円/kWh 以下の実現に向けて、モジュール効率 20%（社内測定）を確認し、20.5%達成のための技術要件を明確にした。	◎	
高信頼性シリコン太陽電池モジュールの開発	長寿命モジュール（寿命 35 年）の製造技術導入	単体及び連続複合加速試験、市場回収品追加加速試験、および劣化メカニズム解析に基づく寿命予測技術を開発した。 また自社 PERC セル 60 直モジュールにて、非住宅市場で予測寿命 35 年以上であることを確認した	◎	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発】（ナミックス株式会社）
(2015 年度～2018 年度)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度	備考
基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発	・低表面濃度の n+層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (6×10 ¹⁹ cm ⁻³)	1.8 mΩ cm ² (1×10 ²⁰ cm ⁻³)	◎	
	・p+層に対する接触抵抗 5 mΩ cm ² 以下 (1×10 ²⁰ cm ⁻³)	3.8 mΩ cm ² (1×10 ²⁰ cm ⁻³)	◎	
	・電極形成による再結合 (j _{0-met}) 500 fA cm ⁻² 以下	470 fA cm ⁻²	◎	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【E 赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発】(株式会社クリスタルシステム)
(2015 年度～2017 年度)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度	備考
赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	①インゴット製造経費： ¥1700/kg	①実績に基づく試算にて目標値の半分以下のコストを達成	◎	
	②直径：220mm	②130mm	△	
	③長さ：300mm 上	③105mm	△	
	④N 型、リンドープ	④N 型、リンドープ	◎	
	⑤ライフタイム ：5000 μ sec 以上	⑤7397 μ sec	◎	
	⑥結晶欠陥 ：0.1 個/cm ³ (大きさ 100nm 以上)	⑥0 個/cm ³	◎	
	⑦転位：0 個/cm ²	⑦0 個/cm ² (ネッキング)	◎	
	⑧抵抗面内分布 ：12%以下	⑧10.9%以下	◎	
	⑨酸素成分濃度 ： $\leq 2 \times 10^{16}$ atoms/cm ³	⑨ 6.9×10^{13} atoms/cm ³	◎	
	⑩炭素成分濃度 ： $\leq 2 \times 10^{16}$ atoms/cm ³	⑩ 1.2×10^{15} atoms/cm ³	◎	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築】（コマツ NTC 株式会社）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
発電効率向上	スライスプロセスが与えるセルへの影響明確化	<ul style="list-style-type: none"> ・スライス時の欠陥評価手法と対処条件を構築。 ・高面品位スライス技術での優位性を確認。ダメージエッチング 5μm 削減可能。 	○	
	連携大学先試作セル 25%	<ul style="list-style-type: none"> ・薄板PV評価実施済 ($\eta \leq 22.4\%$) ・連携大学での試作N型Bifacialセルは $\eta = 20.8\%$ と低い。結晶およびスライス品質には問題がなく、セル製作におけるベース効率の向上が必要との見解。 	○	
製造コスト低減	切断ピッチ 0.110mm 加工技術構築	<ul style="list-style-type: none"> ・切断ピッチ狭小化でのウェハ厚さ確保を推進するため、カーフロス極小化に注力。 ・切断ピッチ 0.15mm 加工技術を確立。 ・薄板基板の品質を向上させるため、スライス面品位をコントロールし、ウェハ曲げ強度が 60%向上した。 ・試作セル結果は、80μm 厚まで性能維持が可能。（切断ピッチ 0.13～0.14mm 相当となる） ・切断ピッチ 0.13mm 加工技術開発にて、高速加工による課題抽出した。 	△	
	うちカーフロス 60 μ m スライス技術構築	<ul style="list-style-type: none"> ・カーフロス 60μm の加工技術開発を行い、市場量産と同等以上の生産性を確保する加工技術を構築した。 ・さらにカーフロス 50μm の加工を先行評価し、加工可能であることを確認したほか、カーフロス 40μm が可能となる固定砥粒ワイヤの製造を確認した。 	◎	
	スライスコストの低減 (18 円/枚)	<ul style="list-style-type: none"> ・カーフロス 60μm でシリコン結晶材料費を除いたスライスコストは、12.5 円/枚を達成した。（自社試算） 	◎	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御】(株式会社トクヤマ)
(2015年度～2016年度)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御	不純物および欠陥の影響把握と制御化	太陽電池製造の熱プロセスで成長する酸素析出物の形態と数密度が、炭素不純物濃度と結晶成長条件により変化し、ライフタイムや変換効率に悪影響を及ぼすことを解明した。 酸素析出物の形態と数密度を制御して高ライフタイムの単結晶インゴットを得る CZ 法結晶成長技術を開発した。	○	
	ライフタイム目標値は1000μsec	開発した結晶成長技術と炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用して得られた実用サイズのインゴットのライフタイムは、全長にわたって2000μsec以上を達成した。	○	
	ライフタイム下限値は300μsec以上	開発したインゴットは熱プロセス後のライフタイム低下が抑えられ、ライフタイム下限値を300μsecとすると、インゴットの直胴良品歩留りが11.5%向上した。	○	

*1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【H CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発】(ソーラーフロンティア株式会社)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
高性能化：高性能サブモジュール技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 製品サイズ試作モジュール変換効率16%の実証 サブモジュール変換効率20%の技術確立(小面積セル変換効率23%) 	<ul style="list-style-type: none"> 製品サイズ試作モジュール変換効率16.1%(197.2W) サブモジュール変換効率19.8%(Fh-ISE測定) 小面積セル変換効率23.4%(産総研測定) 	○	
低コスト化：モジュールコスト削減技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 2014年度比モジュールコスト10%削減 	<ul style="list-style-type: none"> 2014年度比モジュールコスト15%以上削減済 	○	
追加目標①：新表面電極技術の大面積化検証	<ul style="list-style-type: none"> 製品サイズモジュールにおける新表面電極技術による出力向上の実証 	<ul style="list-style-type: none"> 出力向上(+7.1W)を実証 量産適用準備が進行中 	○	

追加目標 ②： 軽量化モ ジュール 技術開発	既存モジュール比 ・重量比 1/3 以下 ・出力比 80%以上	既存モジュール比 ・重量比 1/3 (6.6kg) ・出力比 90% (166.6W)	○	
------------------------------------	---------------------------------------	---	---	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【I 低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero- Junction (SSHJ) 太陽電池の開発】
(パナソニック株式会社) (2018 年度～2019 年度)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
①Super Bifacial-SHJ (SBF-SHJ) 開発	・セル効率：24.0% ・モジュール効率：20.8% ・発電コスト 7 円/kWh 相当の性能を実現	・セル効率：23.2% ※自社測定値 AIST 測定は 9 月予定 ・モジュール効率：20.9% (計算値) 発電コスト 7 円/kWh 相当	○	
②Super Back Contact-SHJ (SBC-SHJ) 開発	・セル効率：25.0% ・モジュール効率：22.0% ・発電コスト 7 円/kWh 相当の性能を実現	・セル効率：25.4% ※自社測定値 (目標達成見込み) AIST 測定は 9 月予定 ・モジュール効率：22.0%以上達成見込み 発電コスト 7 円/kWh 相当	○	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

A 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発（株式会社カネカ）

1. 成果詳細

1.1 達成状況

① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

バックコンタクトヘテロ接合（HJBC）結晶Si太陽電池セルにおいて変換効率26.7%（産業技術総合研究所での測定値）を、HJBC太陽電池モジュールにおいて変換効率24.5%（産業技術総合研究所での測定値）をそれぞれ達成した。いずれもSi太陽電池の世界最高記録である。なお、社内測定ではあるが、小サイズモジュールにおいて変換効率25%以上を得た。

モジュール加速劣化試験、屋外環境試験を実施し、HJBC太陽電池は両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池と同等以上の信頼性および発電量が期待できることを明らかにした。

② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

複合型太陽電池として、トップセルにペロブスカイト太陽電池、ボトムセルに両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いた二端子タンデム、及び、トップセルにペロブスカイト太陽電池、ボトムセルにHJBC太陽電池を用いた三端子タンデム構造の複合型太陽電池に関し、設計技術、作製技術、特性評価技術等の要素技術開発を実施し、変換効率向上に向けた技術的な課題とその対応策を明確にした。このなかで、タンデム化により、ヘテロ接合を有する結晶Si系太陽電池の単接合太陽電池セルより変換効率が向上することを確認した。

また、技術開発で得られたデータをもとにデバイス設計を実施し、光学・回路シミュレーションにより、30%以上の変換効率を実現できる見通しを得た。

以上の取り組みにより、本研究開発テーマにおける最終目標を達成した。

1.2 成果の詳細

(1) 概要

本研究開発テーマでは、発電コスト14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化するための技術開発の観点から、「① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発」を実施し、この開発成果を活用し、2020年までの実用化と、2025年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目的に、結晶Si太陽電池と非結晶Si系太陽電池とを組み合わせた太陽電池であり、更なる高効率化が見込まれる「② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発」を実施した。以下に各開発項目の概要を記す。

① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

本項目では、太陽電池セル裏面側に集電極を集約することで光入射面側の遮光損を低減させることで、高出力化したバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セル及びモジュールを開発した。また、本研究開発テーマにて開発した太陽電池モジュールに対し、モジュール長寿命化を見据えた各種信頼性試験を実施する。信頼性試験の一部は、国立研究開発法人産業技術総合研究所に再委託して実施した。

② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

本開発項目では、結晶Si太陽電池と非結晶Si系太陽電池を組み合わせた高効率複合型太陽電池を実現するために必要な非結晶Si系太陽電池セルの開発、積層界面での光学損の低減技術、非結晶Si系太陽電池と結晶Si太陽電池との電氣的接続構造の開発を実施するとともに、長期信頼性の評価、低コスト量産要素技術開発等を実施する。非結晶Si太陽電池の要素技術開発の一部は、国立大学法人京都大学と国立大学法人東京工業大学に再委託して実施した。

(2) 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

(2-1) 要素技術開発

バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池は、図Ⅲ-2-(イ)-A-1に外観写真と断面構造を示すように、電力を取り出すための電極を太陽電池の裏側のみに形成した構造を有する。このように、電極を裏面に集約することで、受光面での光吸収や反射が抑制でき、両面電極構造よりも変換効率を高めることが可能である。本テーマでは、高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池を実現するために必要な要素技術開発として、表Ⅲ-2-(イ)-A-1に記す事項等に取り組んだ。

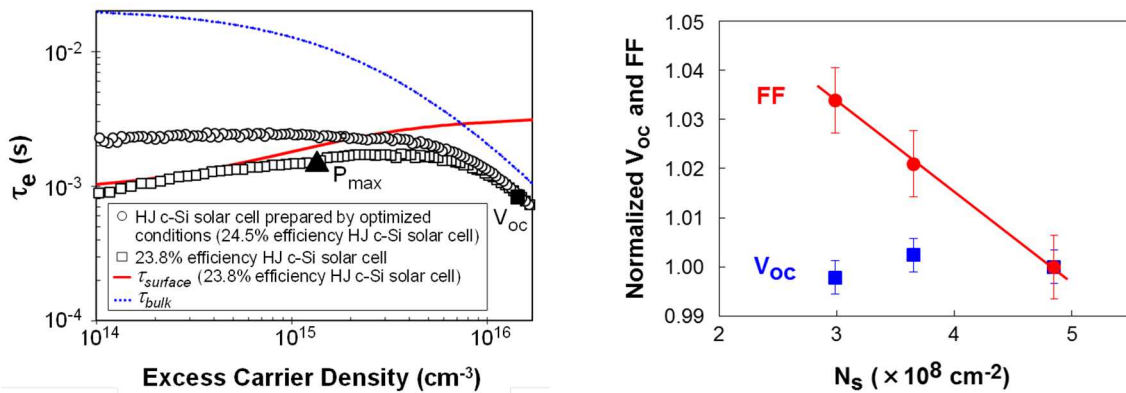


図III-2-(イ)-A-1：バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルの外観写真（左）と構造模式図（右）の一例

表III-2-(イ)-A-1：高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池を実現するために取り組んだ主な要素技術開発項目

構成要素	要素技術の開発項目
受光面保護層	低光反射率/低光吸収
受光面パッシベーション層	低いキャリア再結合速度（長キャリアライフタイム） /低光吸収
i 型非晶質シリコン (a-Si)	
電極	界面抵抗、ライン抵抗による損失低減、高反射率

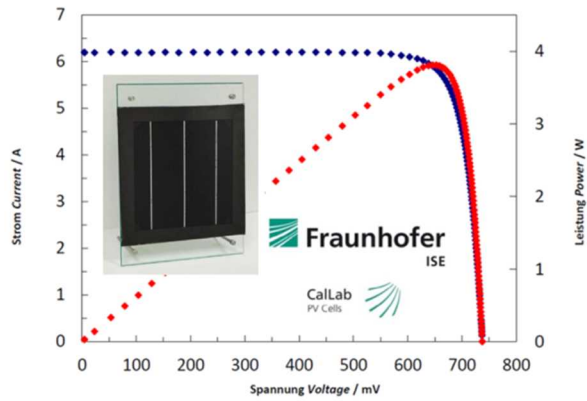
まず、両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いて、パッシベーション特性や界面抵抗の観点からヘテロ接合部の改善に取り組み、ヘテロ接合部におけるキャリア再結合速度や界面抵抗損を低減させることが可能となった。ヘテロ接合部の特性改善技術の開発と並行して評価技術の開発を進め、ヘテロ接合界面におけるキャリアの再結合中心密度と開放端電圧 (V_{oc}) 及び曲線因子 (FF) の関係を明確にし、ヘテロ接合部の特性改善がFFの向上に大きく寄与することを明らかにした。ヘテロ接合部におけるキャリア再結合に関する検討結果の一例を図III-2-(イ)-A-2に示す。



図III-2-(イ)-A-2：高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池におけるライフタイム (τ_e) の注入キャリア濃度依存性 (左) と、この関係等から求めたヘテロ接合界面におけるキャリア再結合中心密度 (N_s) と V_{oc} 、FFの関係 (右) の一例。本検討により、高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池におけるキャリア再結合中心密度の低減は、 V_{oc} よりFFの向上に大きく寄与することが明らかとなった。

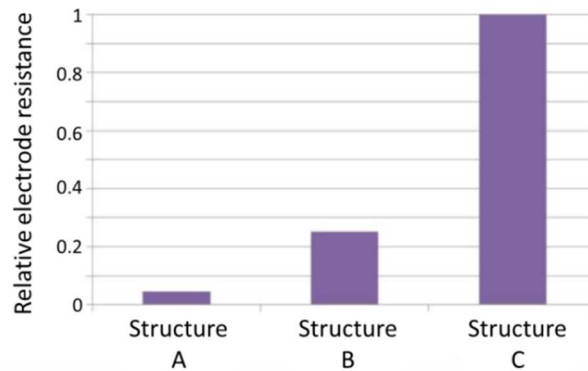
これらの技術開発の結果、2015年度に結晶Si太陽電池のFFとしては世界最高となる83.5%を実現、両面電極型結晶Si太陽電池では世界最高となる変換効率25.1%（第三者機関認証測定値）を実用サイズヘテロ接合結晶Si太陽電池セルにおいて達成した（図III-2-(イ)-A-3）。これによりヘテロ接合界面の特性改善が、FFの向上に有効であることを実証するとともに、更なるヘテロ接合界面の特性改善によりセル特性の改善が期待できることを明らかにした。

Area	151.9 cm ²
V _{oc}	738 mV
J _{sc}	40.8 mA/cm ²
FF	83.5%
Eff.	25.1%



図Ⅲ-2-(イ)-A-3：高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池の第三者機関における認証測定結果の一例

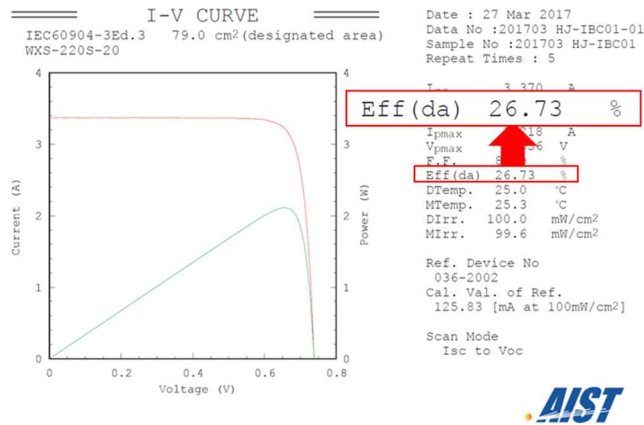
あわせて、バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池において、6インチセルに対するパターン形成技術及び電極抵抗の低減技術の開発を進めた。バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池は裏面側に電極等の構造が集約した構造であることから、片面にp型パターン用電極とn型パターン用電極、インターコネクション用電極を配置する必要があり、配置パターンに関しては制約が多い。一方で、両面電極型結晶Si太陽電池よりも遮光損に関しては制約が少ないため電極の低抵抗化は実現しやすい。これらの特徴を踏まえ、電極抵抗の低抵抗化に関し6インチセルに対して開発した技術の成果の一例を図Ⅲ-2-(イ)-A-4に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-A-4：6インチバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池における電極抵抗の相対値を示す図。両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池における典型的な電極抵抗値 (C) に対する開発品 (A、B) の電極抵抗値を記す。これらの検討により電極抵抗値を大幅に低減させることが可能となった。

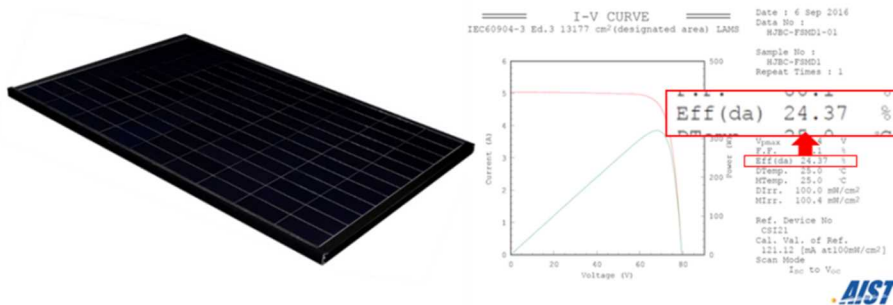
(2-2) 高効率セル、モジュール技術開発

上記のように要素技術開発により実現した高品質アモルファスSiを用いたヘテロ接合技術や、電極の直列抵抗を低減させる技術、太陽光をより効率的に利用できるバックコンタクト技術を、結晶Si太陽電池において組み合わせることで、結晶Si太陽電池セルとして世界最高となるセル変換効率26.33%を実用サイズ(セル面積180cm², designated area measurement: da)のバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池において達成した(2016年度に報告)。更に、要素技術の開発を進め、セル変換効率は26.7%まで到達した(産業技術総合研究所での測定により確認：図Ⅲ-2-(イ)-A-5)。



図Ⅲ-2-(イ)-A-5：バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の産業技術総合研究所での測定結果 (da)。変換効率(EFF)26.7%はSi太陽電池セルにおいて世界最高の値である。

また、高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルを用い、モジュール内での抵抗損失を最小限にするためのセル間配線技術やモジュールに照射された光の収集効率を高める技術などを新たに開発することで、結晶Si太陽電池モジュールとして世界最高の変換効率24.37%（面積13,177cm²）を2016年度に実現した（図Ⅲ-2-(イ)-A-6）。



図Ⅲ-2-(イ)-A-6：実用サイズである大判のバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池モジュールの産業技術総合研究所での測定結果 (da)（右）と測定したモジュールの外観写真（左）。変換効率 (EFF)24.37%はSi太陽電池モジュールにおいて世界最高の値である。

太陽電池の使用環境ではモジュールは高温になることが多く、実発電量は定格出力に加え、出力の温度係数によって大きく変化することが知られている。このことから、高効率(変換効率26%台)のバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルを用いて出力の温度依存性を測定した。この結果、出力の温度係数として-0.26%/℃が得られた。この値は、測定したバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池と同等のVocを有する両面電極型ヘテロ接合太陽電池と同等の値であった。

(2-3) 信頼性評価

バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の要素検討として、両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池の信頼性評価を実施した。その結果、小サイズのモジュール（ミニモジュール）の高温高湿試験（条件：85℃/85%RH）において、6,000時間以上経過後も出力保持率95%以上を維持しており、ヘテロ接合結晶Si太陽電池の各構成要素が十分高い信頼性を有することを確認できた。また、ミニモジュールにおいて、高温高湿試験や温度サイクル試験等を実施し、本テーマで開発したバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池が標準的な試験条件において、特に問題が生じないことを確認した。主な信頼性試験結果を表Ⅲ-2-(イ)-A-2に記す。

表Ⅲ-2-(イ)-A-2: HJBC太陽電池モジュールの信頼性試験結果の一例

試験方法 (試験条件)	構造	暫定基準	結果
湿耐久性試験 (85度/85%DH)	ミニモジュール	Pmax保持率: 95%以上	合格 (7,500時間)
PID試験 (産総研 A1法)	ミニモジュール	Pmax保持率: 95%以上	合格 (1,000V、7日間)
温度サイクル試験 (85°C⇄-40°C)	大判モジュール	Pmax保持率: 95%以上	合格 (1,000回)
屋外暴露試験 (系統連結)	大判モジュール	Pmax保持率: 95%以上	1年間では、 出力低下なし

(2-4) 高効率Si太陽電池の変換効率

高効率Si太陽電池モジュールの変換効率の記録を表Ⅲ-2-(イ)-A-3に記す。変換効率として23%以上得られている太陽電池はHJBC太陽電池に限られているが、その中でも、本プロジェクトで得た変換効率は特に、高い値を示すことが分かる。なお、本テーマで開発したHJBC太陽電池モジュールの変換効率は、小サイズのGaAs太陽電池モジュールの変換効率の記録である25.1%に匹敵する値である。

表Ⅲ-2-(イ)-A-3: 各機関 (企業) の高効率モジュールの記録

		Voc (V)	Isc (A)	FF (%)	EFF (%)	面積 (cm ²)	発表 時期	測定 機関
HJBC	Kaneka (大判)	79.5	5.04	80.1	24.4	13,177	2016/10	AIST
	Kaneka (建材一体型サイズ)	13.3	4.40	81.7	24.5	1,944	2017/10	AIST
	A社 (大判)	53.4	6.32	81.6	23.8	11,562	2016/03	AIST
	B社 (1セル)	0.736	Jsc=40.2 mA/cm ²	78.0	23.1	不明	2018/10	JET
IBC	C社 (大判)	69.4	6.46	80.0	22.8	15,739	2012/08	NREL
GaAs	D社	11.08	2.303	85.3	25.1	866.45	2017/11	NREL

(3) 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

(3-1) はじめに

結晶Si太陽電池では、研究開発レベルでは、前述のように既に26.7%まで到達しており、27.1%までは達成の見込みを得ている。しかしながら、結晶Si太陽電池では、1sun条件での理論効率限界は29%程度であり、30%を超えるような変換効率の実現を期待することは難しい。太陽電池の高効率化は、太陽光発電の発電コスト低減に向けた重要な技術であり、更なる高効率化を実現するためには、タンデム化は有望な技術である。

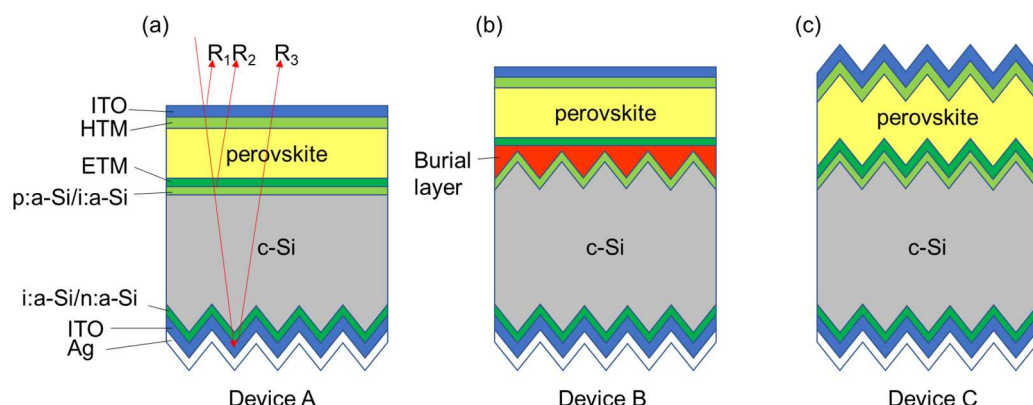
このことから、本テーマでは、圧倒的な低コスト化と高効率化との両立を目指し、既に低コスト化が進んだ結晶Si太陽電池をボトムセルとし、低コスト化が期待されており、近年急速に変換効率が向上したペロブスカイト太陽電池をトップセルとしたタンデム型太陽電池に注目し、研究開発を実施した。

(3-2) 複合型太陽電池の設計

タンデム太陽電池の設計方針を明確にするため、まず二端子構造において構造設計を実施し、その特徴を把握することを試みた。二端子構造では、両面電極型の太陽電池からなるボトムセルの上にトップセルを直接積層して作製する。セルの構造が単純であり、システムも単純にすることができ低コスト化が実現しやすいと期待できる。一方で、トップセルとボトムセルの電流をマッチングさせないと、高い

変換効率が実現できない。このことから二端子タンデム構造でのトップ/ボトムセルの電流マッチングを前提に、セル構造、特にトップセルとボトムセルの界面の形状が電流に与える検討した。

トップセル、ボトムセルの各層のパラメータは、各層の単膜の光学特性を実測して求めた値を用いて、図III-2-(イ)-A-7に示す構造のタンデムセルにおいて光学シミュレーションを実施した。



図III-2-(イ)-A-7：トップセルとボトムセルの界面の形状が異なるタンデムセルの断面模式図

その結果、最も高い電流は、ボトムセルを両面テクスチャ構造にしたとき (Device C) に得られる (20.25 mA/cm^2)。これは反射率の低減や界面での散乱により光路長を大きくすることができるためである。トップセルをスピコート等のウェットコーティングで形成することを容易にするため、単純にトップ/ボトムセル界面の、ボトムセルの表面を平坦にすると (Device A)、トップセル表面 (図III-2-(イ)-A-7における R_1) 及び、トップセル/ボトムセル界面での反射 (図III-2-(イ)-A-7エラー! 参照元が見つかりません。における R_2) が大きくなり、高い電流は得られない (17.28 mA/cm^2)。トップセルの形成面を平坦にしつつ、ボトムセルの表面を凹凸構造にする手法として、平坦化層を形成することが考えられる (Device B)。平坦化層の屈折率を制御することで、界面での反射を抑制することができる。また、トップセル再表面の反射は、適切な反射防止層 (AR層) を形成することで抑制でき、ボトムセルを両面テクスチャ構造にしたときに近い電流が得られる (19.57 mA/cm^2)。このようにトップ/ボトムセル界面の形状および界面に設ける層の光学特性は、高い電流を得るためには、非常に重要な要素であることを確認することができた。

(3-3) トップセルの試作結果

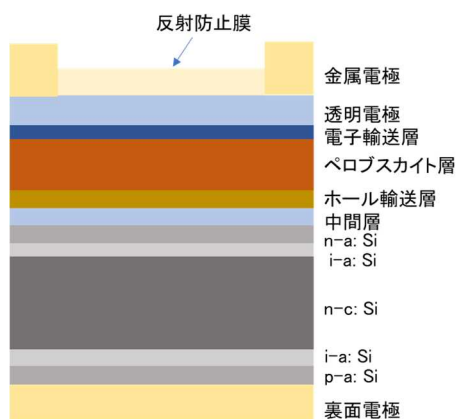
試作したセルや要素サンプルから得られたパラメータを用いて、複合型太陽電池の特性を計算機シミュレーション (光学、回路) により検討し、中間目標達成の前提条件を明確するとともに、各要素セルの構造・光学特性が太陽電池特性に与える影響を明らかにした。また、トップセルの高効率化検討を行い、トップセルの候補であるペロブスカイト太陽電池において変換効率として当時の世界最高水準である21.5%を得た (表III-2-(イ)-A-4)。

表III-2-(イ)-A-4：3-FTO基板を用いて作製したペロブスカイト太陽電池の太陽電池特性の測定結果 (社内測定)

Scan direction	Jsc (mA/cm^2)	Voc (V)	FF (%)	Efficiency (%)
Forward	24.1	1.15	77.3	21.50
Backward	24.1	1.15	77.8	21.53

(3-4) タンデムセルの試作結果

ボトムセルに両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いて図III-2-(イ)-A-8に記す構造のペロブスカイト/Siタンデム太陽電池セルの試作を行い、特性を評価した (社内測定)。結果を表III-2-(イ)-A-4に記す。



図III-2-(イ)-A-8：ペロブスカイト/Si タンデム太陽電池の試作セルの構造模式図

表III-2-(イ)-A-4：試作したペロブスカイト/Si タンデムセルの特性。タンデムセルのボトムセルに使用したセルと同一条件で作製したヘテロ接合太陽電池セルの単独の太陽電池特性の測定結果を Bottom cell (ref)の欄に記した。

	Jsc	Voc	FF	EFF.
Bottom cell(ref)	1.00	1.00	1.00	1.00
Tandem cell	0.50	2.32	0.93	1.09

タンデムセルにおいては、Jscはボトムセル単独と比べて約1/2であるのに対し、Vocは2倍以上に大きく向上していることから、タンデム化による出力向上のポテンシャルを確認した。

2. 実用化・事業化見通し

株式会社カネカ（以下、カネカ）は、ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いた住宅用ならびに産業用太陽光発電システムの販売を行っている。今後、HJBC太陽電池の量産技術開発を進めるとともに、カネカの保有する太陽電池モジュールの商品設計技術、製造技術、太陽光発電システムの販売チャンネル等を活用することで、本プロジェクトで得られた成果の実用化・事業化は早期に実現できる見通しである。

なお、本テーマで開発した、a-Siによる高品質ヘテロ接合技術、モジュール高効率化技術、高信頼性技術は、バックコンタクト型ヘテロ接合太陽電池に加え、両面電極型ヘテロ接合太陽電池にも適用可能な技術であり、自社製品の開発にも適用している。

また、プロジェクトの成果を活用した高効率太陽電池は、展示会やニュースリリースなどで広くアピールすることで潜在的な顧客に対してもアプローチを図っている。また、国際会議での発表などを通じて、国内外の太陽電池関連の研究者、技術者へのアピールも積極的に行っており、いずれのチャンネルにおいても高い評価を得ている。

3. 波及効果

太陽電池の変換効率の向上は、発電量の増加に加え、一定の発電量がより小面積で得られることから、太陽光発電システムの導入費等の低減にも繋がる。現在導入が進む結晶シリコン太陽電池で27%近いセル変換効率と24%を大きく超えるモジュール効率をあわせて実現したことは、発電コストの低減に大きく寄与するといえる。

プロジェクトで開発したシリコン太陽電池の高効率化技術は、特に、設置面積が制限される住宅やビルにおける太陽電池の更なる普及に貢献するものと期待される。このことは、近年普及に向けた活動が進むZEHやZEBの実現可能性を高めることから、省エネルギー化への取り組みに弾みをつけるものと期待される。

設置面積の観点では車載用途も住宅、ビル用途と同様の課題を有しており、車載用太陽電池の市場拡大にも貢献するものと期待される。

4. 今後の展開

「2. 実用化・事業化見通し」で記したように本テーマで開発した技術を活用した太陽電池の事業化に向け、引き続き、太陽電池の変換効率向上、製造コスト低減、信頼性向上等の技術開発に取り組む。また、カネカは、今回の成果を活用した高効率太陽電池の製品の実用化に向け開発を進める。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	2 (0)	13 (2)	17 (5)	42 (16)	43 (25)	117 (48)
論文	1	2	2	2	0	7
研究発表・講演 (うち国際会議)	5 (2)	4 (4)	9 (7)	2(2)	2 (2)	22 (17)
新聞・雑誌等への掲載	2	3	1	1	0	7
その他	2	2	1	0	0	5

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	株式会社 カネカ	特願2016- 049569	国内	2016年3月14 日	登録	積層型光電変換装置およびその製造方法	三島良太 他
2	株式会社 カネカ	特願2016- 049562	国内	2016年3月14 日	登録	積層型光電変換装置およびその製造方法	三島良太 他
3	株式会社 カネカ	特願2016- 094106	国内	2016年5月9 日	みなし取り 下げ	積層型光電変換装置およびその製造方法	三島良太 他
4	株式会社 カネカ	特願2016- 093754	国内	2016年5月9 日	出願	積層型光電変換装置の製造方法	三島良太 他
5	株式会社 カネカ	特願2016- 102521	国内	2016年5月23 日	みなし取り 下げ	太陽電池及びその製造方法、並びに太陽電池パネル	河崎勇人 他
6	株式会社 カネカ	特願2016- 161825	国内	2016年8月22 日	みなし取り 下げ	太陽電池および太陽電池モジュール	吉河訓太 他
7	株式会社 カネカ	特願2016- 182546	国内	2016年9月20 日	みなし取り 下げ	太陽電池用配線材および太陽電池モジュール	小泉玄介 他
8	株式会社 カネカ	特願2016- 186019	国内	2016年9月23 日	出願	シリコン基板の製造方法	吉田航 他
9	株式会社 カネカ	特願2016- 186020	国内	2016年9月23 日	出願	太陽電池セル、及び太陽電池セルの製造方法	吉田航 他
10	株式会社 カネカ	特願2016- 202414	国内	2016年10月 14日	みなし取り 下げ	光起電装置	中野邦裕 他
11	株式会社 カネカ	特願2016- 220573	国内	2016年11月 11日	出願	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	日野将志 他
12	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/0 04503	PCT	2017年2月8 日	出願	太陽電池及びその製造方法、並びに太陽電池パネル	吉河訓太 他

13	株式会社 カネカ	201780031451	CN	2017年2月8日	出願	太陽電池及びその製造方法、並びに太陽電池パネル	河崎勇人 他
14	株式会社 カネカ	特願2017-053808	国内	2017年3月17日	みなし取り下げ	太陽電池およびその製造方法	藤本貴久 他
15	株式会社 カネカ	特願2017-063968	国内	2017年3月28日	みなし取り下げ	太陽電池モジュール及びその製造方法	寺下徹 他
16	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/017356	PCT	2017年5月6日	出願	積層型光電変換装置およびその製造方法	日野将志 他
17	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/021546	PCT	2017年6月9日	出願	太陽電池および太陽電池モジュール	河崎勇人 他
18	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/023790	PCT	2017年6月28日	出願	太陽電池用配線材および太陽電池モジュール	寺下徹 他
19	株式会社 カネカ	特願2017-205339	国内	2017年10月24日	出願	バックコンタクト型太陽電池モジュール	吉田航 他
20	株式会社 カネカ	特願2017-214849	国内	2017年11月7日	出願	積層型光電変換装置および積層型光電変換装置モジュールの製造方法	三島良太 他
21	株式会社 カネカ	特願2018-001320	国内	2018年1月9日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
22	株式会社 カネカ	PCT/JP2018/001079	PCT	2018年1月16日	出願	太陽電池およびその製造方法	小西克典 他
23	株式会社 カネカ	特願2018-009997	国内	2018年1月24日	出願	太陽電池セル用の接続部材セット、並びにそれを用いた太陽電池ストリング及び太陽電池モジュール	小島広平 他
24	株式会社 カネカ	特願2018-010332	国内	2018年1月25日	出願	太陽電池モジュール	寺下徹 他
25	株式会社 カネカ	特願2018-030753	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
26	株式会社 カネカ	特願2018-030758	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
27	株式会社 カネカ	特願2018-030759	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
28	株式会社 カネカ	特願2018-030796	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
29	株式会社 カネカ	特願2018-030800	国内	2018年2月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法	三島良太 他
30	株式会社 カネカ	PCT/JP2018/011512	PCT	2018年3月22日	出願	太陽電池モジュール及びその製造方法	小泉玄介 他
31	株式会社 カネカ	特願2018-055925	国内	2018年3月23日	出願	太陽電池の製造方法、および、太陽電池	三島良太 他
32	株式会社 カネカ	特願2018-055926	国内	2018年3月23日	みなし取り下げ	太陽電池の製造方法、および、太陽電池	三島良太 他
33	株式会社	特願2018-	国内	2018年6月29日	出願	太陽電池の製造方法及び	中野邦裕

	カネカ	089819		日		それに用いるホルダ	他
34	株式会社 カネカ	特願2018- 519083	国内	2018年7月25 日	出願	太陽電池及びその製造方 法、並びに太陽電池パネ ル	河崎勇人 他
35	株式会社 カネカ	特願2018- 139518	国内	2018年7月25 日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
36	株式会社 カネカ	特願2018- 145634	国内	2018年8月2 日	みなし取り 下げ	洗浄浴槽	渡邊真悟 他
37	株式会社 カネカ	特願2018- 145632	国内	2018年8月2 日	みなし取り 下げ	カセット及び洗浄浴槽セ ット	渡邊真悟 他
38	株式会社 カネカ	特願2018- 152517	国内	2018年8月13 日	みなし取り 下げ	光電変換素子および光電 変換素子の製造方法	吉河訓太 他
39	株式会社 カネカ	特願2018- 516996	国内	2018年8月22 日	出願	積層型光電変換装置およ びその製造方法	三島良太 他
40	株式会社 カネカ	特願2018- 169680	国内	2018年9月11 日	みなし取り 下げ	太陽電池デバイスおよび 太陽電池モジュール	寺下徹 他
41	株式会社 カネカ	特願2018- 169681	国内	2018年9月11 日	みなし取り 下げ	太陽電池モジュール	寺下徹 他
42	株式会社 カネカ	特願2018- 176970	国内	2018年9月21 日	みなし取り 下げ	太陽電池セル、太陽電池 デバイスおよび太陽電池 モジュール	中村淳一 他
43	株式会社 カネカ	PCT/JP2018/0 36419	PCT	2018年9月28 日	出願	太陽電池の製造方法	足立大輔 他
44	株式会社 カネカ	特願2018- 187564	国内	2018年10月2 日	みなし取り 下げ	太陽電池デバイスおよび 太陽電池モジュール	寺下徹 他
45	株式会社 カネカ	TW107136682	TW	2018年10月 22日	出願	太陽電池之製造方法	三島良太 他
46	株式会社 カネカ	201780028271	CN	2018年11月7 日	出願	積層型光電変換装置およ びその製造方法	三島良太 他
47	株式会社 カネカ	16/186069	US	2018年11月9 日	出願	Stacked photoelectric conversion device and method for producing same	三島良太 他
48	株式会社 カネカ	特願2018- 213112	国内	2018年11月 13日	みなし取り 下げ	太陽電池モジュール及び その製造方法	小島広平 他
49	株式会社 カネカ	16/197843	US	2018年11月 21日	出願	Solar cell and method for manufacturing same, and solar cell panel	河崎勇人 他
50	株式会社 カネカ	特願2018- 535473	国内	2018年11月 21日	出願	太陽電池および太陽電池 モジュール	吉河訓太 他
51	株式会社 カネカ	特願2018- 218208	国内	2018年11月 21日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法	口山崇 他
52	株式会社 カネカ	17796084	EP	2018年12月3 日	出願	Stacked photoelectric conversion device and method for producing	三島良太 他

						same	
53	株式会社 カネカ	特願2018- 232943	国内	2018年12月 12日	みなし取り 下げ	太陽電池モジュール	寺下徹 他
54	株式会社 カネカ	特願2018- 232944	国内	2018年12月 12日	みなし取り 下げ	太陽電池デバイスおよび 太陽電池モジュール	寺下徹 他
55	株式会社 カネカ	特願2018- 234470	国内	2018年12月 14日	みなし取り 下げ	裏面電極型太陽電池の製 造方法	入江暢 他
56	株式会社 カネカ	特願2018- 234638	国内	2018年12月 14日	みなし取り 下げ	裏面電極型太陽電池の製 造方法	浅谷剛 他
57	株式会社 カネカ	特願2018- 544976	国内	2018年12月 17日	出願	光起電装置	中野邦裕 他
58	株式会社 カネカ	特願2018- 235250	国内	2018年12月 17日	みなし取り 下げ	太陽電池モジュール集積 デバイス	岡本紳平 他
59	株式会社 カネカ	特願2018- 243545	国内	2018年12月 26日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法およ び太陽電池の製造装置	中野邦裕 他
60	株式会社 カネカ	特願2018- 244093	国内	2018年12月 27日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法	藤本貴久 他
61	株式会社 カネカ	特願2018- 54064	国内	2019年1月7 日	出願	太陽電池用配線材および 太陽電池モジュール	小泉玄介 他
62	株式会社 カネカ	特願2019- 022614	国内	2019年2月12 日	出願	大判半導体基板および割 断半導体基板の製造方法	中野邦裕 他
63	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 05405	PCT	2019年2月14 日	出願	太陽電池の製造方法	口山崇 他
64	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 05407	PCT	2019年2月14 日	出願	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
65	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 05408	PCT	2019年2月14 日	出願	太陽電池の製造方法	足立大輔 他
66	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 06133	PCT	2019年2月19 日	出願	太陽電池の製造方法	三島良太 他
67	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 06135	PCT	2019年2月19 日	出願	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
68	株式会社 カネカ	201780051332	CN	2019年2月21 日	出願	太陽電池および太陽電池 モジュール	吉河訓太 他
69	株式会社 カネカ	16/282407	US	2019年2月22 日	出願	Solar cell and solar cell module	吉河訓太 他
70	株式会社 カネカ	特願2019- 034248	国内	2019年2月27 日	みなし取り 下げ	光電変換素子および光電 変換素子の製造方法	三島良太 他
71	株式会社 カネカ	201780057262	CN	2019年3月18 日	出願	太陽電池用配線材および 太陽電池モジュール	小泉玄介 他
72	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 11116	PCT	2019年3月18 日	出願	太陽電池の製造方法、お よび、太陽電池	吉河訓太 他
73	株式会社 カネカ	16/335119	US	2019年3月20 日	出願	Wiring member for solar cells and solar cell module	小泉玄介 他

74	株式会社 カネカ	特願2019- 054986	国内	2019年3月22 日	みなし取り 下げ	太陽電池の製造方法および太陽電池の仕掛品	中野邦裕 他
75	株式会社 カネカ	17852645	EP	2019年4月9 日	出願	Wiring member for solar cells and solar cell module	小泉玄介 他
76	株式会社 カネカ	16/341848	US	2019年4月12 日	出願	Photovoltaic device	中野邦裕 他
77	株式会社 カネカ	201780063287	CN	2019年4月15 日	出願	光起電装置	中野邦裕 他
78	株式会社 カネカ	17860034	EP	2019年5月14 日	出願	Photovoltaic device	中野邦裕 他
79	株式会社 カネカ	特願2019- 092215	国内	2019年5月15 日	みなし取り 下げ	素子の製造方法	日野将志 他
80	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 19526	PCT	2019年5月16 日	出願	太陽電池デバイスおよび太陽電池モジュール	寺下徹 他
81	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 19527	PCT	2019年5月16 日	出願	太陽電池モジュール	中村淳一 他
82	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 19528	PCT	2019年5月16 日	出願	太陽電池セル、太陽電池デバイスおよび太陽電池モジュール	寺下徹 他
83	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 22183	PCT	2019年6月4 日	出願	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	河崎勇人 他
84	株式会社 カネカ	特願2019- 509678	国内	2019年6月21 日	出願	太陽電池モジュール及びその製造方法	寺下徹 他
85	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 26990	PCT	2019年7月8 日	出願	太陽電池の製造方法	口山崇 他
86	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 27758	PCT	2019年7月12 日	出願	洗浄浴槽	口山崇 他
87	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 27760	PCT	2019年7月12 日	出願	カセット及び洗浄浴槽セット	口山崇 他
88	株式会社 カネカ	201880010220	CN	2019年8月5 日	出願	太陽電池モジュール及びその製造方法	寺下徹 他
89	株式会社 カネカ	特願2019- 152164	国内	2019年8月22 日	出願	太陽電池の製造方法	三島良太 他
90	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 35203	PCT	2019年9月6 日	出願	裏面電極型太陽電池の製造方法	口山崇 他
91	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/3 5888	PCT	2019年9月12 日	出願	太陽電池デバイスおよび太陽電池モジュール	小島広平 他
92	株式会社 カネカ	特願2019- 169753	国内	2019年9月18 日	出願	太陽電池モジュール	中野邦裕 他
93	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 36765	PCT	2019年9月19 日	出願	太陽電池の製造方法	口山崇 他
94	株式会社 カネカ	16/495509	US	2019年9月19 日	出願	Solar cell module and manufacturing method thereof	寺下徹 他

95	株式会社 カネカ	特願2019- 175115	国内	2019年9月26 日	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池	中野邦裕 他
96	株式会社 カネカ	特願2019- 175116	国内	2019年9月26 日	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池	兼松正典 他
97	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 41160	PCT	2019年10月 18日	出願	太陽電池モジュール及びその製造方法	寺下徹 他
98	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 43497	PCT	2019年11月6 日	出願	太陽電池モジュール	岡本紳平 他
99	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 43498	PCT	2019年11月6 日	出願	太陽電池デバイスおよび太陽電池モジュール	中村淳一 他
100	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 44929	PCT	2019年11月 15日	出願	太陽電池モジュール集積デバイス	寺下徹 他
101	株式会社 カネカ	特願2019- 214677	国内	2019年11月 27日	出願	太陽電池の製造方法	兼松正典 他
102	株式会社 カネカ	特願2019- 223983	国内	2019年12月 11日	出願	光電変換素子のエッチング方法、および光電変換素子のエッチング装置	兼松正典 他
103	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 48701	PCT	2019年12月 12日	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池の製造装置	中野邦裕 他
104	株式会社 カネカ	PCT/JP2019/0 50859	PCT	2019年12月 25日	出願	太陽電池の製造方法	岡本紳平 他
105	株式会社 カネカ	特願2020- 001243	国内	2020年1月8 日	出願	太陽電池製造方法及び太陽電池	兼松正典 他
106	株式会社 カネカ	特願2020- 009252	国内	2020年1月23 日	出願	太陽電池モジュール製造方法	小島広平 他
107	株式会社 カネカ	PCT/JP2020/0 02820	PCT	2020年1月27 日	出願	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	日野将志 他
108	株式会社 カネカ	特願2020- 019069	国内	2020年2月6 日	出願	太陽電池ストリングおよび太陽電池ストリング製造方法	小島広平 他
109	株式会社 カネカ	特願2020- 030874	国内	2020年2月26 日	出願	太陽電池および太陽電池製造方法	兼松正典 他
110	株式会社 カネカ	PCT/JP2020/0 08626	PCT	2020年3月2 日	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池の仕掛品	中野邦裕 他
111	株式会社 カネカ	特願2020- 049344	国内	2020年3月19 日	出願	太陽電池製造方法及び太陽電池	入江暢 他
112	株式会社 カネカ	特願2020- 051037	国内	2020年3月23 日	出願	太陽電池および太陽電池製造方法	古牧周 他
113	株式会社 カネカ	特願2020- 052373	国内	2020年3月24 日	出願	太陽電池および太陽電池製造方法	入江暢 他
114	株式会社 カネカ	特願2020- 053233	国内	2020年3月24 日	出願	太陽電池の製造方法	中野邦裕 他
115	株式会社 カネカ	PCT/JP2020/0 16964	PCT	2020年4月17 日	出願	素子の製造方法	口山崇 他
116	株式会社	特願2020-	国内	2020年4月23	出願	太陽電池の製造方法および太陽電池	兼松正典

	カネカ	076477		日		び太陽電池	他
117	株式会社 カネカ	特願2020- 078070	国内	2020年4月23 日	出願	太陽電池の製造方法およ び太陽電池	兼松正典 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	足立大輔	株式会社 カネカ	Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline Silicon solar cell with 25.1% efficiency	Applied Physics Letters 107, 233506	あり	2015年12月
2	足立大輔 他	株式会社 カネカ	Effects of SiO _x barrier layer prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition on improvement of long-term reliability and production cost for Cu-plated amorphous Si/crystalline Si heterojunction solar cells	Solar Energy Materials & Solar Cells 163, 204	あり	2017年1月
3	吉河訓太 他	株式会社 カネカ	Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%	Nature Energy 2, 17032	あり	2017年3月
4	三島良太 他	株式会社 カネカ	High-current perovskite solar cells fabricated with optically enhanced transparent conductive oxides	Applied Physics Express 10, 062301	あり	2017年5月
5	吉河訓太 他	株式会社 カネカ	Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology	Solar Energy Materials & Solar Cells 173, 37	あり	2017年6月
6	山本憲治 他	株式会社 カネカ	High-efficiency heterojunction crystalline Si solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB20	あり	2018年7月
7	山本憲治、 Rudi Santbergen 他	株式会社 カネカ、 デルフト工 科大学	Optimization of three-terminal perovskite/Silicon tandem solar cells	IEEE Journal of Photovoltaics 9, 446	あり	2019年1月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
----	-----	----	------	-----	------

1	山本 憲治	株式会社 カネカ	Progress & Challenges in Thin-Film Silicon Photovoltaics: Heterojunctions & Multijunctions	EUPVSEC2015 (招待講演)	2015年9月
2	宇都 俊彦	株式会社 カネカ	25.1% efficiency Cu metallized heterojunction crystalline Si solar cell	PVSEC-25&GVPC6 (口頭発表)	2015年11月
3	山本 憲治	株式会社 カネカ	薄膜シリコン太陽電池技術の展開 —高効率ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池、及びそのペロブスカイト太陽電池との組み合わせへの適用	PVEXP02016 (口頭発表)	2016年3月
4	足立大輔	株式会社 カネカ	高効率銅電極ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池	第63回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)	2016年3月
5	足立大輔	株式会社 カネカ	薄膜技術を用いたヘテロ接合結晶シリコン太陽電池の展開	日本化学会第96春季年会 (招待講演)	2016年3月
6	吉河訓太	株式会社 カネカ	6 inch High Efficiency Back Contact Crystalline Si Solar Cell Applying Heterojunction and Thin film Technology	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference	2016年6月
7	足立大輔	株式会社 カネカ	Over 25% Efficiency Heterojunction Crystalline Si Solar Cell (INVITED)	26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	2016年8月2
8	山本 憲治	株式会社 カネカ	26.33% heterojunction back contact Silicon solar cell (INVITED)	7th Silicon-based Heterojunction and Tandem Solar Cells Conference	2016年11月
9	足立大輔	株式会社 カネカ	Record-breaking Efficiency Back-contact Heterojunction Crystalline Si Solar Cell and Module (PLENARY)	Global Photovoltaic Conference 2017	2017年3月
10	吉河訓太	株式会社 カネカ	Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaic	2017年4月
11	吉河訓太	株式会社 カネカ	Record-breaking Efficiency Heterojunction Interdigitated Back-contact Crystalline Si Solar Cell and Module	IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference	2017年6月
12	小西克典	株式会社 カネカ	世界最高効率結晶シリコン太陽電池	第14回 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
13	宇津恒	株式会社 カネカ	High Efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells	27th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors	2017年8月

14	山本憲治	株式会社 カネカ	高効率ヘテロ接合結晶シリコン 太陽電池	第78回応用物理学会秋季 学術講演会	2017年9月
15	山本憲治	株式会社 カネカ	Record-breaking Efficiency Back-contact Heterojunction Crystalline Si Solar Cell and Module	34th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017年9月
16	山本憲治	株式会社 カネカ	High Efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells	The 27th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017年11月
17	小西克典	株式会社 カネカ	Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell	The 8th BC workshop on back contact solar cell and module technology,	2017年11月
18	足立大輔	株式会社 カネカ	High Efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells	2017 Material Research Society Fall Meeting	2017年11月
19	山本憲治	株式会社 カネカ	High efficiency Hetero- junction back contact Si solar cell and module	First International Workshop on Silicon Heterojunction Solar Cells: Science and Industry Technology	2018年10月
20	山本憲治, 足立大輔	株式会社 カネカ	High efficiency hetero- junction back contact crystalline Si solar cells - How high efficiency will be achievable in production -	7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018年11月15 日
21	山本憲治	株式会社 カネカ	Towards the Record Efficiency of Si Based Solar Cells	The 26th International Workshop on Active- Matrix Flat panel Displays and Devices - TFT Technologies and FPD Materials- (AM- FPD' 19)	2019年7月2日
22	足立大輔	株式会社 カネカ	High Efficiency Heterojunction Back Contact Crystalline Si Solar Cells	The 29th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019年11月8 日

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	株式会社 カネカ	高効率の太陽電池開発	日本経済新聞 13面	2015年7月29日
2	株式会社 カネカ	太陽電池 変換効率25.1%	日本産業新聞 8面	2015年10月27日
3	株式会社 カネカ	セル変換効率 初の26%超	日刊工業新聞 15面	2016年9月15日
4	株式会社 カネカ	「効率世界一」を巡る攻防 アモルファス活用が鍵に	日経エコロジー	2016年5月
5	株式会社 カネカ	太陽電池モジュール 変換効率、世界最高24.37%	日本産業新聞 13面	2016年10月28日

6	株式会社 カネカ	変換効率26.63%達成 カネカ 省エ ネ住宅へ展開狙う	日刊工業新聞 15面	2017年8月25日
7	株式会社 カネカ	No.1を生む科学技術	日本産業新聞 30面	2018年9月30日

【その他】

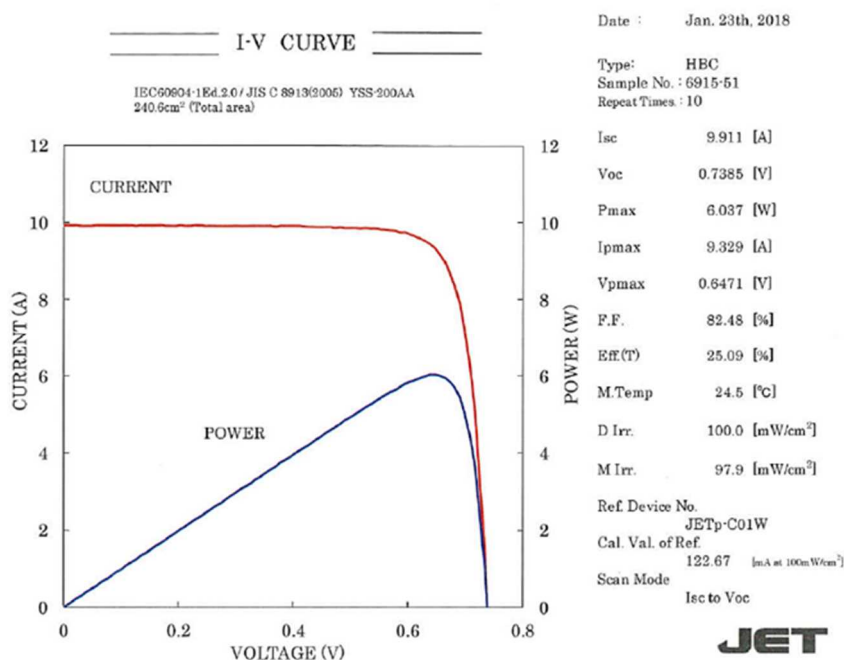
番号	年度	タイトル	内容	発表年月
1	2015年度	「ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池、変換効率24.5%を達成」	ニュースリリース	2015年7月
2	2015年度	「結晶シリコン太陽電池でセル変換効率25.1%を達成ー両面電極型結晶シリコン太陽電池における世界最高記録を実用サイズで更新ー」	ニュースリリース	2015年10月
3	2016年度	「結晶シリコン太陽電池で世界最高変換効率26.33% ー世界初、実用サイズで達成ー」	ニュースリリース	2016年9月
4	2016年度	「結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高変換効率24.37%を達成」	ニュースリリース	2016年10月
5	2017年度	「結晶シリコン太陽電池で変換効率世界最高記録を更新 ーセル変換効率26.63%を実用サイズで達成ー」	ニュースリリース	2017年8月

B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発（シャープ株式会社）

1. 成果詳細

本プロジェクトでは前プロジェクトで開発した高効率のヘテロバックコンタクト（HBC）型太陽電池（2014年3月にセル変換効率25.1%（セル面積3.72cm²かつdesignated area）を達成）の量産化を目指し、大面積高効率化、低コスト化および長期信頼性技術を含めたモジュール化技術開発を推進した。

大面積高効率化について、短絡電流、開放電圧、曲線因子の向上の観点から開発項目を選択した。主に短絡電流の向上では受光面構造形成技術開発、電極パターン設計、裏面反射構造の最適化検討を推進した。また開放電圧の向上ではシリコン基板ライフタイム向上技術、表面洗浄技術、アモルファスシリコン成膜技術検討を進めた。さらに曲線因子の向上では並列抵抗成分の高抵抗化技術開発、直列抵抗成分の低抵抗化技術開発、ダイオード因子改善技術開発を中心に推進した。これらの検討により、240.6cm²の大面積シリコン基板において、セル変換効率25.1%を得ることができた。（図Ⅲ-2-(イ)-B-1）



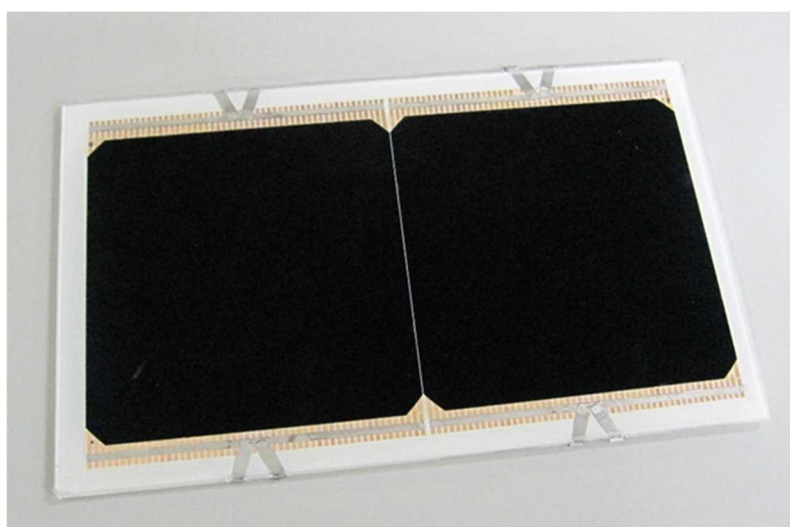
図Ⅲ-2-(イ)-B-1 HBC型太陽電池太陽電池セルのIV特性
（財）電気安全環境研究所にて測定

低コスト化について、最もコスト低減効果が大きいパターンニングプロセスと洗浄プロセスについてセル特性とコストを詳細検討した。パターンニングプロセスではパターン印刷技術、パターンマスク成膜技術、ドーピングペースト技術、イオンインプランテーション技術、ドライエッチング技術等の比較検討を行い、最終的にパターン印刷技術を基準プロセスとし、電極形成にはパターンマスク成膜技術を採用することでセル特性とコストを最適化できることが判明した。また、洗浄プロセスでは洗浄方法そのものの変更をはじめ、その洗浄プロセスに関連するエッチング材料変更、電極材料変更、また一連のプロセスの見直し等を行うことで、洗浄プロセスのコストダウン検討を行った。その結果、当初の当社試算コストから材料費の75%を低減することができ、目標コストである14円/kWhを見込めるプロセスが得られた。尚、将来のコストダウンのシナリオとして、2025年に7円/kWhを達成するためのシナリオについて当社の見解を示した。（表Ⅲ-2-(イ)-B-1）

表Ⅲ-2-(イ)-B-1 発電コスト7円/kWhのシナリオ

	2015年	2017年	2020年	2025年
発電コスト [円/kWh]	(製品)	17.3 (基準)	13.2	7
モジュール変換効率【%】	(19.1)	21 (基準)	22 (-0.4円/kWh)	23 (-0.7円/kWh)
信頼性技術(運転年数)【年】	(20)	20 (基準)	20	30 (-3.5円/kWh)
信頼性技術(劣化率)【%/年】	—	0.9 (基準)	0.9	0.7 (-0.3円/kWh)
コストダウン(新規プロセス開発含む)	—	—	(-3.7円/kWh)	(-5.8円/kWh)
想定用途 住宅/非住宅	住宅用			

モジュール化について、当社で生産している IBC 型太陽電池でも採用している配線シートを用いた表面実装方式を HBC 型太陽電池に適用する検討を推進した。BLACKSOLAR で採用している IBC 型(拡散方式)と異なり、HBC 型では接合に a-Si 層を用いているため、特に導電性接着剤の選定が重要と考えられる。各種材料の比較検討を行った結果、特性とコストを両立し、HBC 型太陽電池に適した接着性の高い材料の選択が可能になった。次に、更なる低コスト配線シート技術の開発として、従来の高精度のパターニングが必要なフレキシブルプリント基板(Flexible Printed Circuits=FPC)の技術に対して、低コストのフレキシブルフラットケーブル(Flexible Flat Cable=FFC)の技術を応用した新型配線シートの開発を推進した。これらの検討の結果、ミニモジュールを作製し、低コスト化の見通しを得ることができた。(図Ⅲ-2-(イ)-B-2)

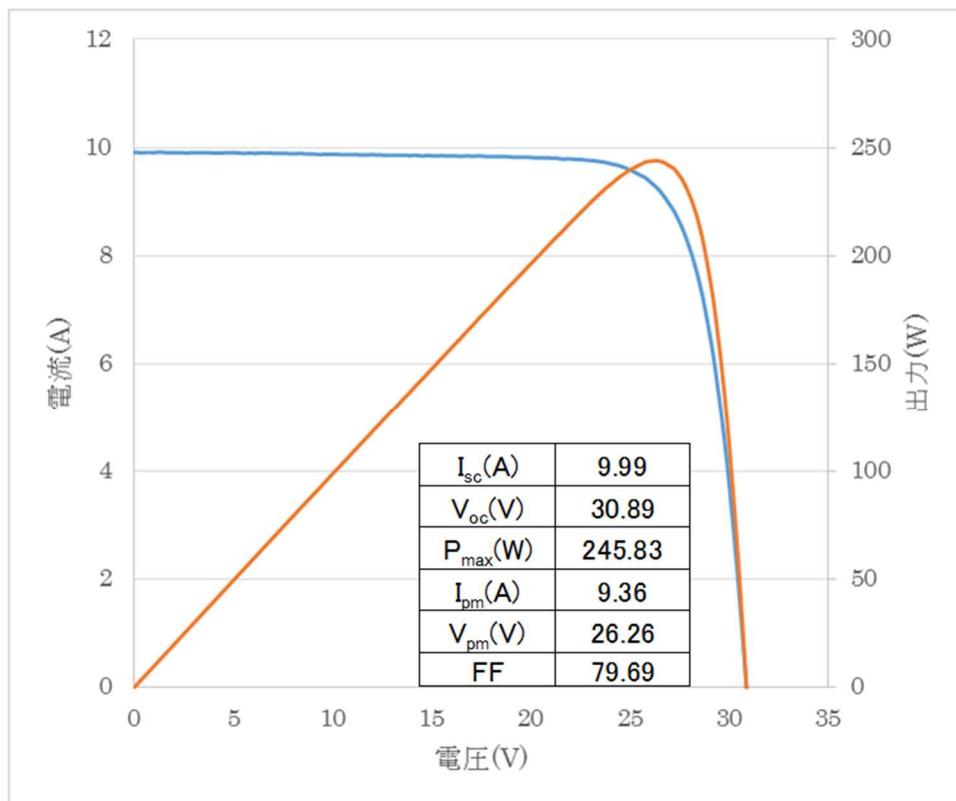


図Ⅲ-2-(イ)-B-2 FFC方式ミニモジュール外観

一連のモジュール開発の総括として、市販サイズである42直モジュールを作製し、電気特性評価を行った。その結果、モジュール変換効率(Aperture)23.4%が得られ、NEDO最終目標(モジュール変換効率22%)を達成することができた。(図Ⅲ-2-(イ)-B-3～図Ⅲ-2-(イ)-B-4、表Ⅲ-2-(イ)-B-2)



図Ⅲ-2-(イ)-B-3 42 直列モジュール外観



図Ⅲ-2-(イ)-B-4 42 直列モジュール電気特性

表Ⅲ-2-(イ)-B-2 42直モジュール変換効率

	η (%)
モジュール変換効率(Aperture)	23.4%
モジュール変換効率(フルエリア)	21.3%

更に、信頼性評価結果から IEC 規格で規定されている試験内容を十分クリアできていることを確認した。(表Ⅲ-2-(イ)-B-3)

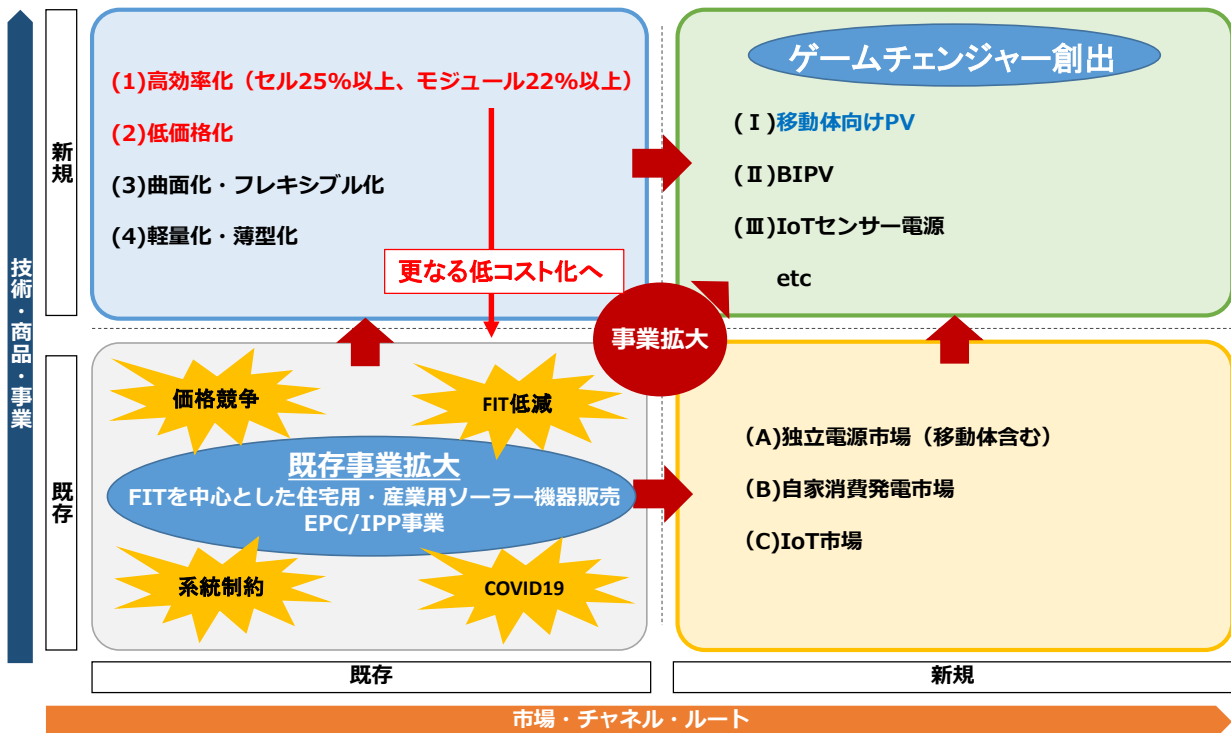
表Ⅲ-2-(イ)-B-3 信頼性試験条件と合格基準

試験	条件		結果※
光照射試験	1SUN	>60kWh/m ²	○
温度サイクル試験	-40°C/85°C	200cyc	○
高温高湿試験	85°C85%RH	1000h	○
結露凍結試験	-40°C/85°C85%RH	10cyc	○

※試験を行ったモジュールのPmaxの低下が5%以内を○としている。

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトの開始時より、終了に至るまでに、太陽光発電市場は大きく変化したといえる。①中国の太陽光発電市場拡大に伴う低コスト商品が国内に参入してきたこと、②FIT 買い取り価格の低下、③系統連系の制約などの影響により、国内市場が縮小化してきている。さらには、④COVID19 の影響により、太陽光発電市場の将来像も見通しにくくなっている。太陽光発電市場の大きな変化に伴い、実用化、事業化の見通しも変化しているといえる。図Ⅲ-2-(イ)-B-5 に本事業の「実用化・事業化」の考え方の模式図を示す。また図Ⅲ-2-(イ)-B-6 に、今後の事業化に向けてのスケジュールを示す。



図Ⅲ-2-(イ)-B-5 本事業の「実用化・事業化」の考え方

項目	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
	上	下	上	下	上	下	上	下	上	下
技術開発 (NEDO)	要素技術開発		高効率化開発							
	量産化技術開発完了									
設備	量産検証設備導入(社内投資)		成果活用							
	量産検証設備導入(NEDO)		21%モジュール		22%モジュール					
事業化	HBC第一量産ライン導入(小規模)		各種量産検証設備の導入				信頼性・寿命評価		信頼性・寿命評価	
	HBC第一量産ライン導入(高出力)						更なる低コスト化検討		事業化検討	
新規事業検討							高付加価値市場検討			
							商品化開発			
							信頼性・寿命評価			
							事業化検討			

図Ⅲ-2-(イ)-B-6 実用化・事業化のスケジュール

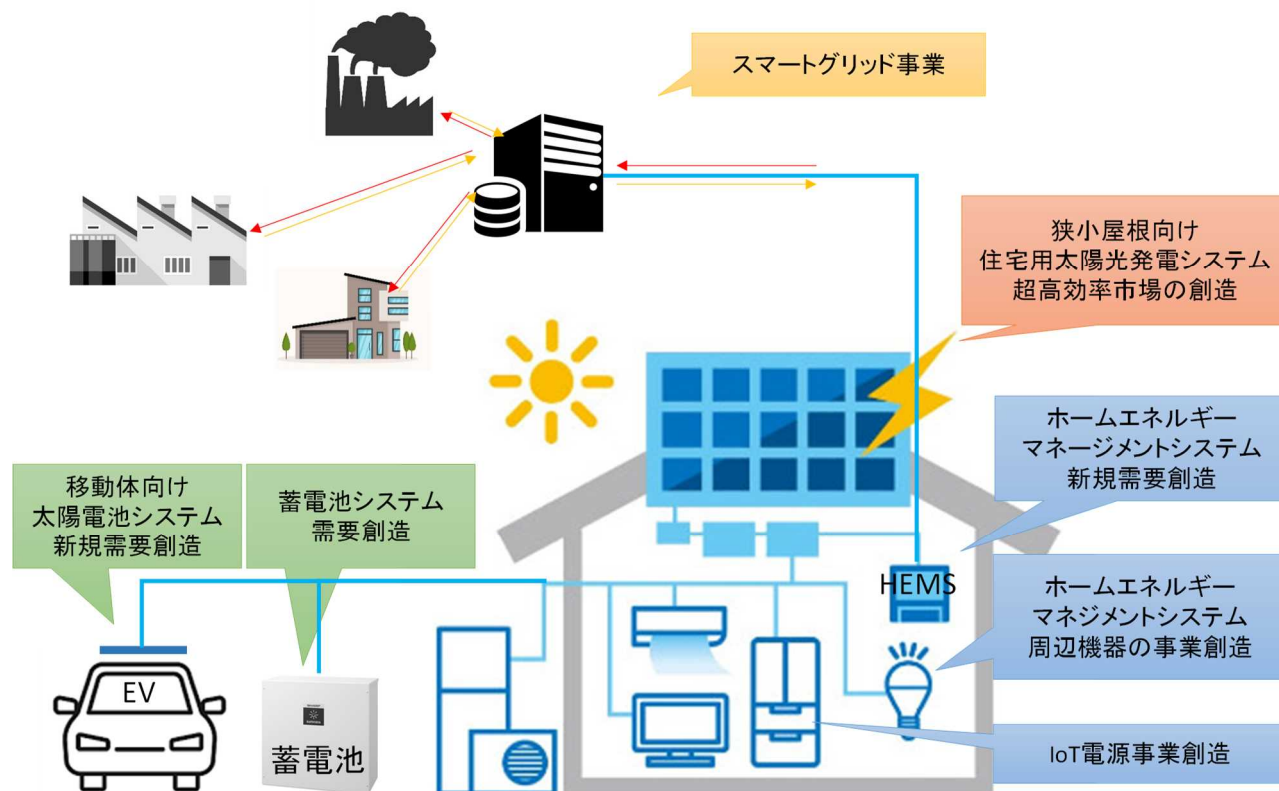
本プロジェクトにて達成した高効率・低コスト化のモジュール開発の成果をもって現国内市場に参入するには、プロジェクト開始時よりも事業リスクが高くなった。当初に設定したコストは、開発当初は十分なものであったが、海外メーカーの参入などにより、現市場ではさらなる低コスト化の必要性があることが確認された。本事業の既存市場への参入にあたり、ヘテロバックコンタクト太陽電池のさらなる低コスト化を推進する。

太陽光発電市場環境は、新規市場として、(A)独立電源市場、(B)自家消費発電市場、(C)IoT電源市場などが、直近、拡大の気配を見せている。そういった中、太陽光発電の技術は、(1)高効率化、(2)低コスト化、(3)曲面化・フレキシブル化、(4)軽量化・薄型化といった高付加価値を持つ技術開発が活発に行われている。本プロジェクトで達成した高効率モジュールは狭小エリアでの発電は十分であり、さらには曲面化、軽量化を目指せるモジュール化技術を有している。

以上のことより、本プロジェクトにおける実用化・事業化の見通しとしては、さらなる低コスト化による既存事業拡大を検討するとともに、高付加価値のある新規市場への事業展開を推進する。特に新規市場としては移動体PV、BIPV、IoT独立電源などが考えられる。本事業の成果は、ゲームチェンジャーとなりえる技術であると考えられる。

3. 波及効果

図Ⅲ-2-(イ)-B-7に、本事業の波及効果に関して示した。



図Ⅲ-2-(イ)-B-7 本事業の波及効果

太陽光発電システムは、多くの産業と係わりながら成立しているため、太陽光発電の普及は多くの産業への波及効果が大きい。本事業は、太陽電池モジュール変換効率 22% を達成し、製品の競争力を高め、事業化、実用化を目指すことを目的としている。本事業により開発された製品を太陽光発電システムとして確立する際に、主体となる「電気機械」分野だけではなく、周辺機器である「重電機器」分野の「開閉制御装置及び配電盤」や「配線器具」、「半導体素子・集積回路」分野の「半導体素子」(インバーター) や、製造プロセスで必要となる「化学製品」、モジュール化に必要な「ガラス・ガラス製品」、周辺機器や架台に使用される「鉄鋼」の「鋼材」など、多数の分野での波及効果がある。

本事業の太陽電池に係わる産業に対する波及効果としては、以下のことが挙げられる。

- ・高効率化による、狭小屋根向け住宅用太陽光発電システムの超高効率市場
- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進に伴うホームエネルギー管理システムなどの周辺機器の新規需要創造
- ・高効率化による低照度での高電圧化の実現が可能になることで創造される IoT 電源市場
- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進に伴うインバーター、蓄電池などの周辺の周辺機器の新規需要創造
- ・高効率化による狭小エリアでの高効率発電が可能になることで創造される移動体向け太陽電池システムの新規需要
- ・プラットフォームの構築によるスマートグリッド事業の拡大

また、太陽光発電の普及に伴い、以下の波及効果も得られる

- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進による CO₂ 削減、地球温暖化問題の解決
- ・上記開発及び生産に携わる開発者、技術者、生産者の知識およびスキルの向上
- ・競合国(中国等)に対する、特に変換効率・信頼性の点での高い技術的優位性および、安易に模倣されない技術の確立

以上、本事業により、日本の技術優位性の維持による技術基盤強化・産業競争力向上が見込める。

4. 今後の展開

本プロジェクトにて達成した高効率・低コスト化のモジュール開発の成果をもって現国内市場に参入するには、プロジェクト開始時よりも事業リスクが高くなった。当初に設定したコストは、開発当初は十分なものであったが、海外メーカーの参入などにより、現市場ではさらなる低コスト化の必要性があることが確認された。本事業の既存市場への参入にあたり、ヘテロバックコンタクト太陽電池のさらなる低コスト化を推進する。

太陽光発電市場環境は、新規市場として、(A)独立電源市場、(B)自家消費発電市場、(C)IoT 電源市場などが、直近、拡大の気配を見せている。そういった中、太陽光発電の技術は、(1)高効率化、(2)低コスト化、(3)曲面化・フレキシブル化、(4)軽量化・薄型化といった高付加価値を持つ技術開発が活発に行われている。本プロジェクトで達成した高効率モジュールは狭小エリアでの発電は十分であり、さらには曲面化、軽量化を目指せるモジュール化技術を有している。

以上のことより、本プロジェクトにおける実用化・事業化の見通しとしては、さらなる低コスト化による既存事業拡大を検討するとともに、高付加価値のある新規市場への事業展開を推進する。特に新規市場としては移動体 PV、BIPV、IoT 独立電源などが考えられる。本事業の成果は、ゲームチェンジャーとなりえる技術であると考えられる。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	9(0)	2(1)	6(1)	13(11)	4(4)	34(17)
論文	0	0	1	0	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	2(1)	2(1)	3(1)	3(2)	1(0)	11(5)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	9	0	0	9
その他	3	0	1	0	0	4

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	シャープ (株)	2016-042064	国内	2016/3/4	放棄	光電変換素子および 光電変換モジュール	松本雄太 他
2	シャープ (株)	2016-042076	国内	2016/3/4	放棄	光電変換素子および 光電変換素子の 製造方法	石井真人 他
3	シャープ (株)	2016-042085	国内	2016/3/4	放棄	光電変換素子および 光電変換素子の 製造方法	石井真人 他
4	シャープ (株)	2016-057951	国内	2016/3/23	登録	光電変換装置	酒井敏彦 他
5	シャープ (株)	2016-057981	国内	2016/3/23	放棄	光電変換装置、光電 変換モジュールお よび太陽光発電シ ステム	東川誠 他
6	シャープ (株)	2016-057982	国内	2016/3/23	登録	光電変換装置、光電 変換モジュールお よび太陽光発電シ ステム	東川誠 他
7	シャープ (株)	2016-061535	国内	2016/3/25	放棄	光電変換素子および それを備えた光	森健史 他

						電変換モジュール	
8	シャープ（株）	2016-063868	国内	2016/3/28	放棄	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	浅野直城
9	シャープ（株）	2016-064139	国内	2016/3/28	審査中	光電変換装置、光電変換モジュールおよび光電変換装置の製造方法	鄒柳民 他
10	シャープ（株）	2016-159105	国内	2016/8/15	放棄	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明 他
11	シャープ（株）	2016-073889	PCT	2016/8/16	放棄	半導体基板、光電変換素子、半導体基板の製造方法および光電変換素子の製造方法。	森健史 他
12	シャープ（株）	2017-093770	国内	2017/5/10	放棄	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
13	シャープ（株）	2017-135626	国内	2017/7/11	放棄	光電変換装置、それを備える太陽電池ストリングおよびそれらのいずれかを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
14	シャープ（株）	2017-029280	PCT	2017/8/14	放棄	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明 他
15	シャープ（株）	2017-207565	国内	2017/10/26	出願中	太陽電池モジュール、配線シートおよびその製造方法	土津田義久 他
16	シャープ（株）	2017-219149	国内	2017/11/14	出願中	光電変換装置、およびそれを備える太陽電池ストリング	東川誠 他
17	シャープ（株）	2018-058360	国内	2018/3/26	出願中	光電変換素子	肥後輝明 他
18	シャープ（株）	2018-018064	PCT	2018/5/10	出願中	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
19	シャープ（株）	2018-025895	PCT	2018/7/9	出願中	光電変換装置、それを備える太陽電池ストリングおよびそれらのいずれかを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
20	シャープ（株）	16/087599	外国	2018/9/21	登録	PHOTOVOLTAIC CONVERSION DEVICE, PHOTOVOLTAIC MODULE, AND SOLAR POWER GENERATION SYSTEM	東川誠 他
21	シャープ（株）	2018-179316	国内	2018/9/25	出願中	太陽電池モジュール	土津田義久 他

22	シャープ (株)	2018-191658	国内	2018/10/10	登録	光電変換装置	浅野直城 他
23	シャープ (株)	201811209905.4	外国	2018/10/17	審査中	太陽電池モジュール、配線シートおよびその製造方法	土津田義久 他
24	シャープ (株)	16/168739	外国	2018/10/23	審査中	SOLAR CELL MODULE, WIRING SHEET, AND METHOD OF MANUFACTURING WIRING SHEET	土津田義久 他
25	シャープ (株)	16/191205	外国	2018/11/14	審査中	PHOTOVOLTAIC DEVICE AND SOLAR CELL STRING INCLUDING PHOTOVOLTAIC DEVICES	東川誠 他
26	シャープ (株)	201811355287.4	外国	2018/11/14	審査中	光電変換装置、およびそれを備える太陽電池ストリング	東川誠 他
27	シャープ (株)	2018-534396	PCT	2019/2/14	審査中	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明 他
28	シャープ (株)	201780050299.3	外国	2019/2/15	審査中	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明 他
29	シャープ (株)	16/326182	外国	2019/2/15	審査中	PHOTOVOLTAIC DEVICE AND PHOTOVOLTAIC UNIT	肥後輝明 他
30	シャープ (株)	201910231029.3	外国	2019/3/26	審査中	光電変換素子	肥後輝明 他
31	シャープ (株)	2019-517684	PCT	2019/10/25	審査中	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
32	シャープ (株)	2019-529714	PCT	2019/10/25	審査中	光電変換装置、それを備える太陽電池ストリングおよびそれらのいずれかを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
33	シャープ (株)	201880029963.0	外国	2019/11/6	審査中	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川誠 他
34	シャープ (株)	201880041877.1	外国	2019/12/23	審査中	光電変換装置、それを備える太陽電池ストリングおよびそれらのいずれかを備える太陽電池モジュール	東川誠 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
----	-----	----	------	----------------	----	------

1	C. T. Nguyen, K. Koyama, S. Terashima, C. Okamoto, S. Sugiyama, K. Ohdaira, and H. Matsumura	JAIST	Novel chemical cleaning of textured crystalline silicon for realizing surface recombination velocity <0.2 cm/s using passivation Cat-CVD SiNx/a-Si stacked layers	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 056502-1-7	有	2017
---	--	-------	---	------------------------------------	---	------

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Cong Thanh Nguyen	JAIST	Effect and Optimization of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Flat and Textured Structure	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/20
2	Cong Thanh Nguyen	JAIST	Effect of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Textured Structures	Material Research Society	2016/3/28
3	Cong Thanh Nguyen	JAIST	Effect and Optimization of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Flat and Textured Structure	IEEE-PVSC	2016/6/5
4	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO 2016 年度成果報告会	2016/10/31
5	岡本 親扶	シャープ (株)	企業若手研究者によるパネルディスカッション	175 委員会	2017/7/20
6	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO2017 年度成果報告会	2017/9/22
7	小出 直城	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	PVSEC	2017/11/13
8	岡本 親扶	シャープ (株)	Fabrication of 25.1% Efficient Hetero Junction Back Contact Si Solar Cells by Mass-Production Process	WCPEC-7	2018/6/13
9	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO2018 年度成果報告会	2018/10/4
10	小出 直城	シャープ (株)	Recent Advances of Heterojunction Back Contact Si Solar Cells in SHARP	SHJ 太陽電池国際ワークショップ	2018/10/26

11	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO2019 年度成果報告会	2019/10/17
----	--------	----------	-------------------------	------------------	------------

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	新聞	シャープ、6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて世界最高の変換効率 25.09%を達成	日経新聞	2018/3/27
2	新聞	6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて、世界最高の変換効率 25.09%を達成	産経新聞	2018/3/27
3	ニュース	6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて、世界最高の変換効率 25.09%を達成	Nifty ニュース	2018/3/27
4	ニュース	シャープ：6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて世界最高の変換効率を達成	Carview	2018/3/27
5	ニュース	シャープ、6 インチ単結晶 Si 太陽電池で 25.09%を達成	MoterFan	2018/3/27
6	雑誌	Sharp hits 25.09% efficiency on full size HJT cell	PV magazine	2018/3/27
7	雑誌	Sharp hits 25.09% conversion efficiency for 6-inch HBC solar cell	PV-tech	2018/3/27
8	ニュース	Sharp touts 25.09% efficiency for mono c-Si solar cell	Renewables Now	2018/3/27
9	ニュース	Sharp's 6-Inch Mono-Crystalline Silicon Solar Cell has a Full Size Conversion Efficiency of 25.09 Percent	CDRinfo	2018/3/27

【その他】

番号	年度	タイトル	内容	発表年月
1	2015	次世代 BLACKSOLAR ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池セル変換効率 25.1%(1.9cm 角セル)	PVJAPAN2015 展示	2015/7/29~31
2	2015	次世代 BLACKSOLAR ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池セル変換効率 25.1%(1.9cm 角セル)	[関西] PVEXPO2015 展示	2015/9/2~4
3	2015	次世代 BLACKSOLAR ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池セル変換効率 25.1%(1.9cm 角セル)	PVEXPO2016 展示	2016/3/2~5
4	2017	6 インチサイズの単結晶シリコン太陽電池セルにおいて、世界最高の変換効率 25.09%を達成	大阪機械記者クラブ	2018/3/27

C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発（京セラ株式会社）

1. 成果詳細

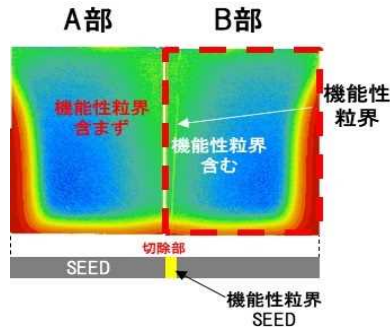
①低コスト量産プロセスでの高効率シリコン太陽電池の開発(セル効率 22%、モジュール効率 20%)

(1) 高品質、低コスト結晶成長技術開発

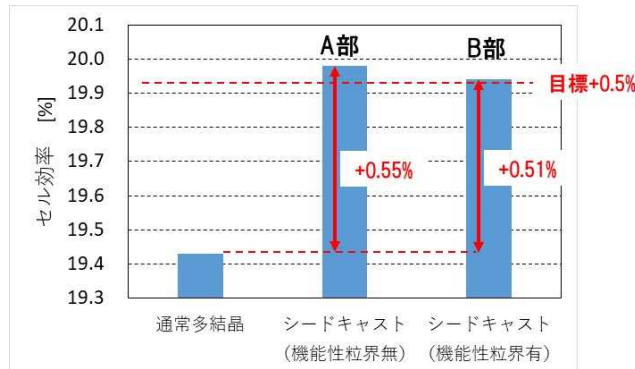
セル変換効率+0.5 ポイントに寄与する結晶品質の実現に向け、シードキャスト法による高品質な結晶育成方法の技術開発に取り組んだ。

結晶成長中の温度制御方法を最適化し、機能性粒界を含む基板においても転位クラスターを大幅に低減した図Ⅲ-2-(イ)-C-1 のようなシードキャストインゴットを実現した。生産ラインの少量試験にてセル効率評価を実施し、このインゴットの高さ方向全領域において、図Ⅲ-2-(イ)-C-2 のようにセル効率の向上（平均+0.51%）を確認した。

上記結果より、シードキャスト法による高品質な結晶育成方法の基本プロセス仕様を確立した。



図Ⅲ-2-(イ)-C-1 機能性粒界有無での断面ライフタイム（赤（低）⇔青（高））

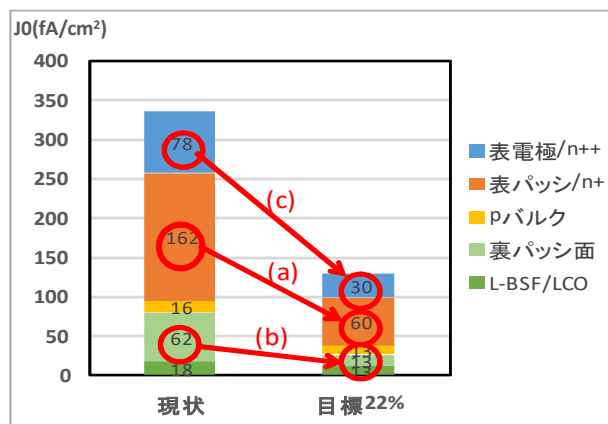


図Ⅲ-2-(イ)-C-2 機能性粒界有無でのセル効率比較

(2) 高効率、低コストセル・モジュール技術開発

P型PERC構造でセル効率22%を達成するための設計指針を明らかにするために、デバイスシミュレーションにより暗電流（飽和電流密度）ロス内訳解析を行った。その結果、ロスの改善効果の大きい順に、

(a) 表パッシベーション層+受光面拡散層、(b) 裏パッシベーション層、(c) 表電極下拡散層となった（図Ⅲ-2-(イ)-C-3）。



図Ⅲ-2-(イ)-C-3 22%達成のためのJ0(飽和電流密度)内訳

(a)においては、受光面拡散層の高シート抵抗化と表パッシベーション層構造の改善によって、高 Voc 化が可能である見込みを得た。具体的には、受光面拡散層シート抵抗 $120\Omega/\square$ で SiN/A10x によるパッシベーション層を形成する事により 680mV 達成の見込みを得た。

(b)においては、裏面 A10x 製膜後のアニール条件を検討し、アニールなしに対して、 $650^{\circ}\text{C}-15\text{min}/\text{N}_2$ 雰囲気条件において変換効率で 0.24 ポイント向上の結果が得られた。長波長感度が大きく向上しており、裏面パッシベーション効果によるものと考えられる。

(c)においては、材料メーカーと高シート抵抗用かつ低ダメージの電極ペーストの検討をおこなった。SiN/A10x 構造の受光面パッシベーション層においては、SiN 構造に比して表電極部のコンタクト抵抗が増大することが問題となっていたが、電極ペースト中のガラスフリットの成分/調整によりコンタクト抵抗を改善させることができた。結果として、SiN/A10x 構造において SiN 構造比で、0.1 ポイントの効率向上を確認した。

また上記 (a) から (c) の改善に加えて、電極抵抗損失改善のために、バスバー本数の検討を行った。現状の 3 本バスバーから 5 本バスバーへ変更し、受光面 n+層のシート抵抗と表電極フィンガー幅/ピッチを最適化することで、効率で 0.46 ポイントの向上が確認された。

以上の素子高効率化要素技術を、(1) 高品質、低コスト結晶成長技術開発で得られたシードキャストウエハに適用し、両面受光 PERC 構造でのプロセス技術の最適化を行った。その結果、セル効率は最大値で 22.01% (AIST 測定) を得た(図 III-2-(イ)-C-4)。

また、上記セルを用いた光閉じ込め構造でのモジュール評価を実施し、ハーフカット 60 直セル×2 並列モジュールにおいて、変換効率 20.10% (社内測定) が得られ(図 III-2-(イ)-C-5)、2019 年度最終目標のモジュール変換効率 20%を達成した。

本プロジェクトにおいて開発した両面受光 PERC 構造セルを、屋外での実使用上での発電量を向上させることを目的に、両面発電モジュール構造で発電量の実証を行った。設置環境として、地上設置を検討した。アルベドが 0.2 の草地設置と、アルベドが 0.85 の反射シート設置で比較評価を行った(図 III-2-(イ)-C-6)。草地設置では、両面発電モジュールは片面発電モジュールに対し発電量の向上は約 2%程度であるが、反射シート設置では約 10%の発電量向上を確認した(図 III-2-(イ)-C-7)。

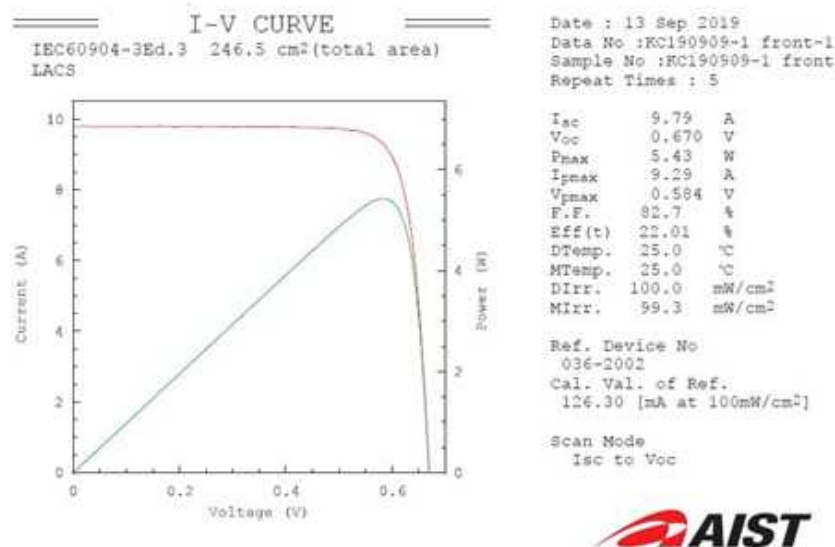
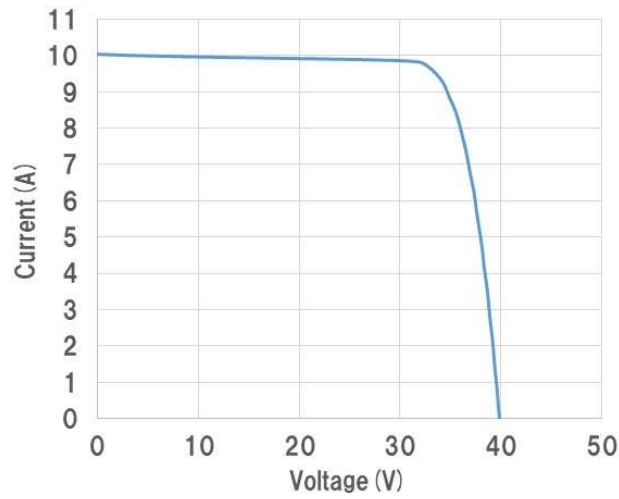


図 III-2-(イ)-C-4 シードキャスト+両面受光 PERC 構造セル特性(最大値)



Voc (V)	Isc (A)	FF (-)	Pm (W)	η (%)
39.90	10.06	0.796	319.2	20.10

図III-2-(イ)-C-5 シードキャスト+両面受光 PERC+光閉じ込め構造モジュール特性(最大値)

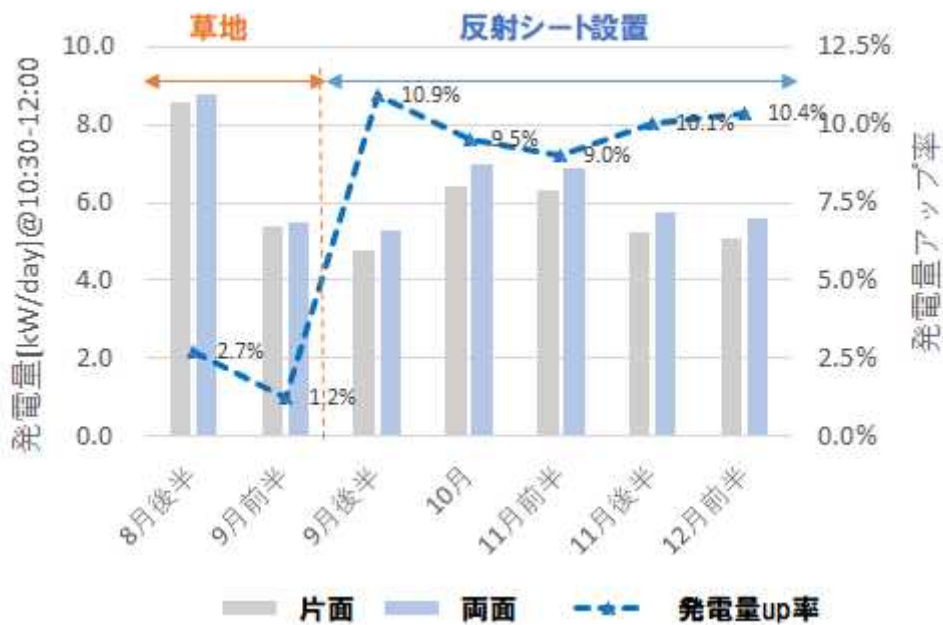


(a) 草地設置



(b) 反射防草シート設置

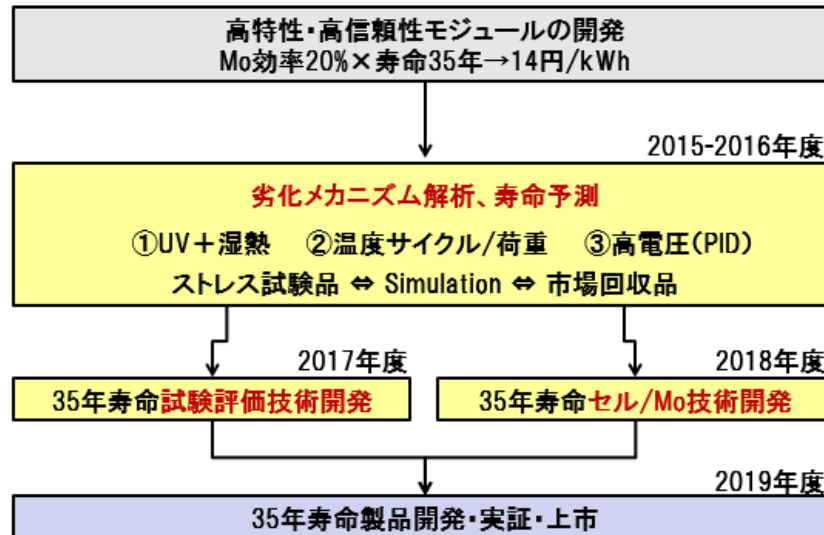
図III-2-(イ)-C-6 地上設置での発電量測定の様子



図III-2-(イ)-C-7 両面発電モジュールの草地設置と反射シート設置の発電量推移
III-2-(イ)-C[3]

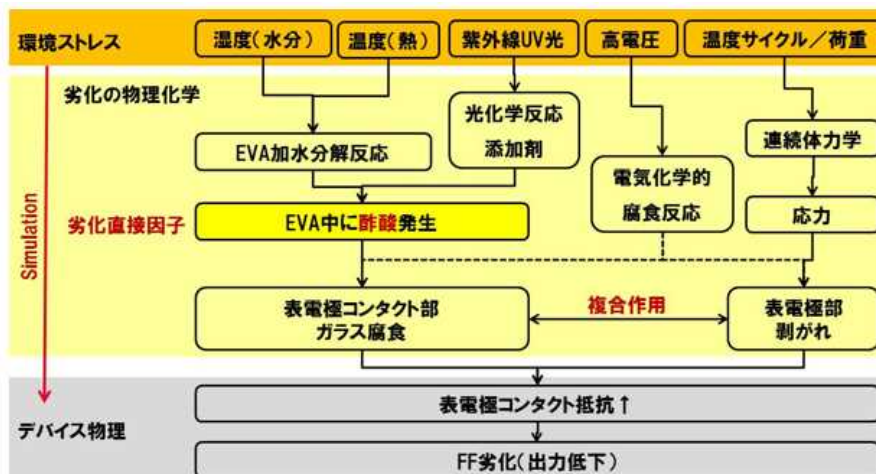
②高品質量産プロセスでの高信頼性シリコン太陽電池の開発（寿命 35 年）

本テーマでは、寿命 35 年以上の実証を目標に、各種ストレス試験、寿命劣化モードの確認、劣化メカニズムの解析、寿命予測技術の開発、寿命予測精度の検証、長寿命化技術の検討、高効率セルを用いた大型モジュールでの寿命 35 年以上の実証を行った。図Ⅲ-2-(イ)-C-8 に、本信頼性テーマの目標を示す。



図Ⅲ-2-(イ)-C-8 信頼性テーマの目標

ストレス試験としては、ストレス要因として紫外線（UV 光）／湿熱／温度サイクル（TC）／電位差（PID を想定）を取り上げ、これらについて単体ストレス試験およびシーケンシャル複合ストレス試験を行った。シーケンシャル複合ストレス試験においては、複合サイクル試験も行った。試験のストレス水準は 2 水準以上とし、また試験は出力劣化が有意明確に検知されるまで行い、寿命予測に必要な情報が得られるように設計した。特に製品寿命を決める湿熱試験においては、特性が屈曲劣化を迎えるまで試験を行った。図Ⅲ-2-(イ)-C-9 に、環境ストレス因子と出力劣化までの因果関係図を示す。



関連確認：ストレス試験品 ⇄ Simulation ⇄ 市場回収品

図Ⅲ-2-(イ)-C-9 環境ストレス因子と出力劣化までの因果関係図

寿命劣化モードの確認は、上記ストレス試験での劣化品やフィールド回収品を評価／分析することで行った。評価は、IV 特性、EL（エレクトロルミネッセンス）像、PL（フォトルミネッセンス）像などの情報を得て行った。分析は、封止材中の水分量や酢酸量の定量分析や、電極コンタクト部の断面 SEM 観

察や EPMA 元素分析などを行った。特に、寿命劣化をもたらす湿熱劣化モードは、封止材中に発生した酢酸によって電極コンタクト部のガラス層が腐食することで生じることが確認された。また、酢酸は湿熱起因で発生するものと、UV 光起因で発生するものがあることが明らかとなった。

劣化メカニズムの解析は、上記評価／分析情報を踏まえつつ、寿命劣化をもたらす湿熱劣化モード、経年劣化をもたらす TC 劣化モード、および PID (pn 接合リーク) をもたらすモジュールフレームとモジュール内セルの間に発生する電位差に起因した劣化モードについて行い、それぞれ劣化物理モデルを構築した。図 III-2-(イ)-C-10 に、UV 湿熱ストレス起因の劣化メカニズムモデルを、図 III-2-(イ)-C-11 に、電位差起因の PID メカニズムモデルを示す。

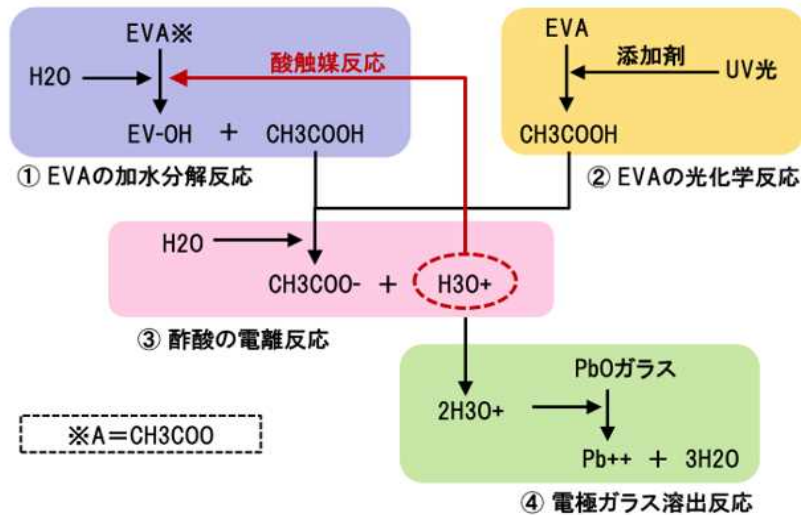


図 III-2-(イ)-C-10 UV 湿熱ストレス起因の劣化メカニズムモデル

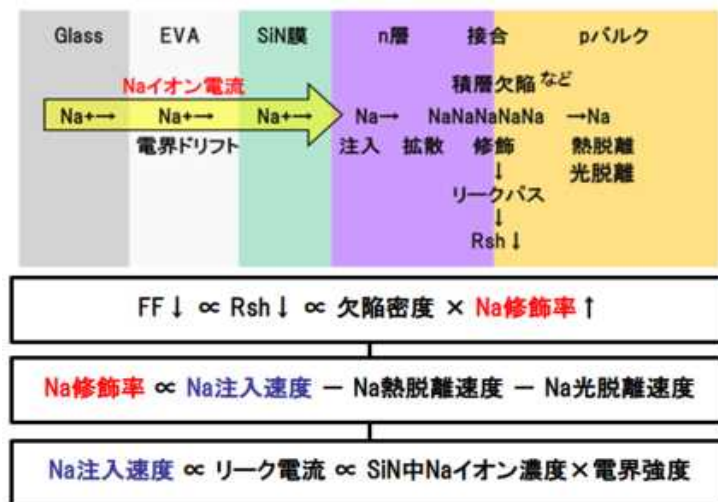
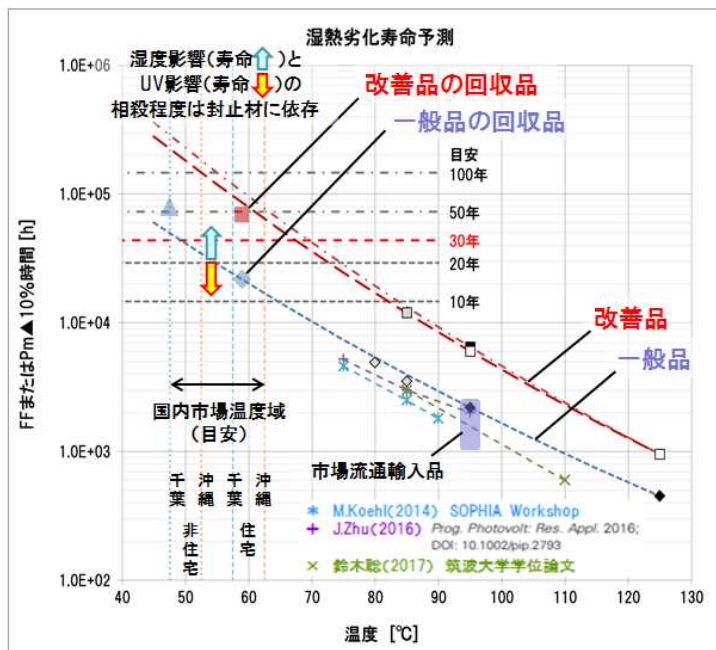


図 III-2-(イ)-C-11 電位差起因の PID メカニズムモデル

寿命予測技術については、前記した劣化物理モデルを踏まえて、劣化シミュレーションシステムを開発した。劣化シミュレーション結果は実際の劣化挙動をよく再現していることが確認された。寿命劣化をもたらす湿熱劣化モードについての寿命予測にあたっては、前記ストレス試験結果から得られる寿命ストレス量と太陽電池モジュールが設置されるフィールド環境条件から見積もられる年間ストレス量から寿命年数を見積もった。開発した寿命予測技術については、産総研と共願で特許出願を行った。図 III-2-(イ)-C-12 に、UV 湿熱ストレス劣化寿命の予測結果を示す。



UV/DH試験による寿命予測と
市場回収品追加試験法による
寿命予測が整合

自社改善品は国内非住宅市場において寿命 ≫ 35年
(NEDO目標: 寿命35年)

出力保証を30年とした場合
安全率 ≧ 1.5 を確保

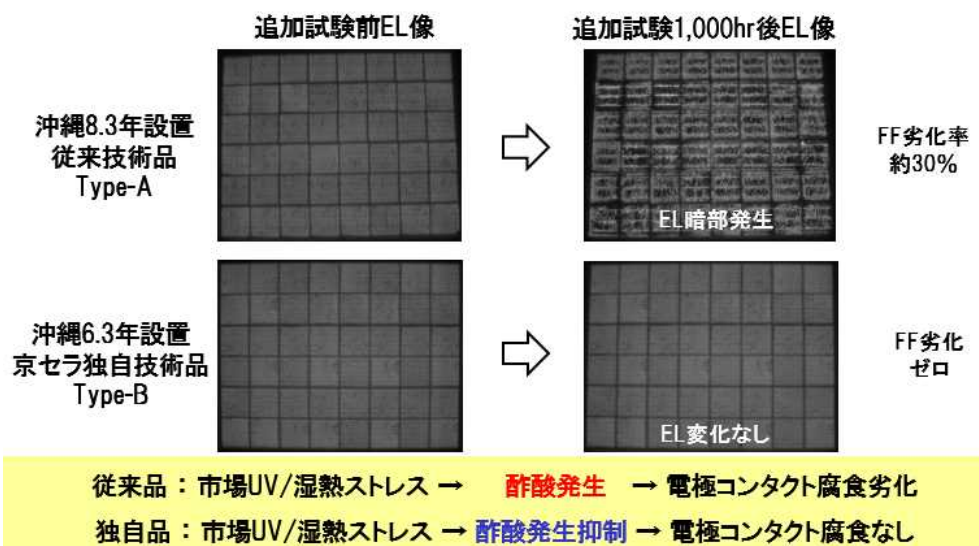
$$\text{安全率} = \frac{\text{製品寿命年数}}{\text{出力保証年数}}$$

図III-2-(イ)-C-12 UV湿熱ストレス劣化寿命の予測結果

寿命予測精度の検証については、フィールド（市場）回収品を追加加速試験にかけることでフィールドダメージ量と残存寿命を把握する方法を検討した。寿命劣化をもたらす湿熱劣化モードについて、この方法による寿命年数を見積もったところ、前述したストレス試験結果から見積もられる寿命年数に対して、比較的よい一致が得られることを確認した。図III-2-(イ)-C-13に、フィールド（市場）回収品の追加湿熱試験結果（EL像）を、図III-2-(イ)-C-14に、フィールド（市場）回収品の追加温度サイクル試験結果を示す。

【市場回収品→追加湿熱(DH)試験】

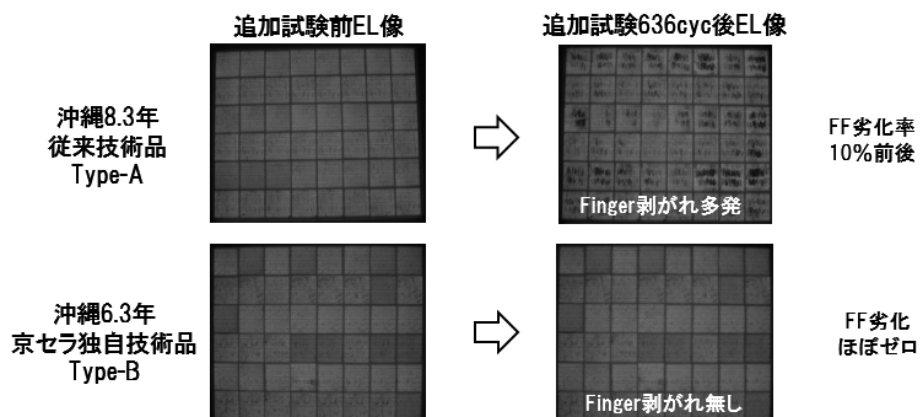
DHストレス ≧ IEC規格試験



図III-2-(イ)-C-13 フィールド（市場）回収品の追加湿熱試験結果（EL像）

【市場回収品→追加温度サイクル(TC)試験】

TCストレス \geq IEC規格試験

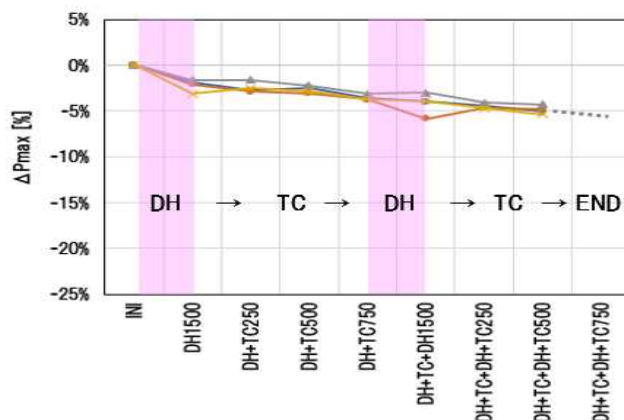


従来品：市場UV/湿熱ストレス→酢酸発生→電極コンタクト腐食→TCストレス→電極剥離劣化
独自品：市場UV/湿熱ストレス→酢酸発生抑制→TCストレス→電極剥離なし

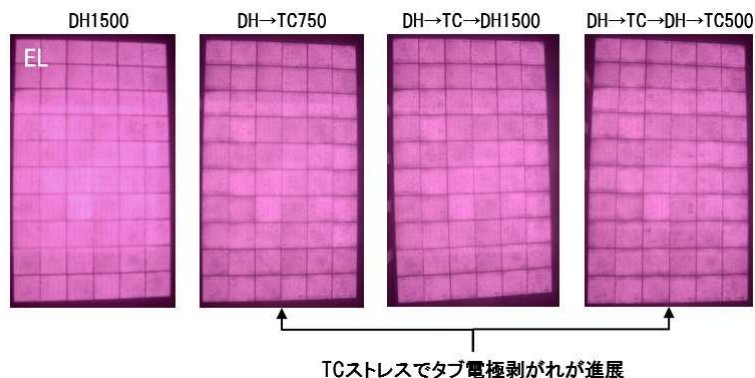
図III-2-(イ)-C-14 フィールド（市場）回収品の追加温度サイクル試験結果

長寿命化技術の検討については、封止材仕様やモジュール構造の検討を行った。封止材仕様については添加剤の配合設計が極めて重要であることが確認された。モジュール構造については、両面受光 PERC セルを念頭に、ダブルガラス構造を含めて検討した。

高効率セルを用いた大型モジュールでの寿命 35 年以上の実証では、両面受光 PERC セルを用いた 60 直製品サイズモジュールについて、国内非住宅市場寿命 35 年相当以上のストレス耐性を有することを、DH/TC シーケンシャル複合サイクル試験と寿命予測技術によって実証した。図III-2-(イ)-C-15 に、両面受光 PERC セル 60 直モジュールの複合サイクル試験結果の特性推移を、図III-2-(イ)-C-16 に、同試験結果の EL 像を示す。



図III-2-(イ)-C-15 両面受光 PERC セル 60 直モジュールの複合サイクル試験結果（特性推移）



図III-2-(イ)-C-16 両面受光 PERC セル 60 直モジュールの複合サイクル試験結果（EL 像）

最後に、高品質量産プロセスでの高信頼性シリコン太陽電池の開発に関する委託研究期間の計画と主な実施内容について図Ⅲ-2-(イ)-C-17にまとめた。また、主な成果と将来課題について図Ⅲ-2-(イ)-C-18にまとめた。

年度	計画	実績
2015	・加速試験と市場での劣化破壊モードの紐付 ・各部位の寿命評価技術開発開始	●市場品の回収→劣化モード解析/分析 ●単体ストレス試験実施 ※ ●湿熱劣化寿命予測
2016	・メカニズム把握/寿命評価技術開発 →材料/構造開発開始 ・寿命評価実証用加速試験装置導入 (前倒し)	●市場品の回収→劣化モード解析/分析 ●単体ストレス試験品→劣化前後分析 ※ ●UV+湿熱劣化寿命予測 ●PID寿命予測 ●温度サイクル寿命解析 ●UV複合試験装置導入(前倒し) ●複合連続ストレス試験開始 ※
2017	・信頼性評価技術確立 ・部材/構造の設計指針確立	●UV及び温度サイクル試験装置導入 ●複合連続ストレス試験→寿命予測 ※ ●市場回収品追加ストレス試験(DH,TC)→寿命検証 ●試験/解析結果まとめ→長寿命化設計指針抽出 ●EVA代替封止材/Wガラス構造試験実施 ※
2018	・Mo20%/寿命35年以上のセル/Mo構造決定 ・実証評価開始	●複合試験(継続)、市場回収品試験(継続) ●PERC両面受光Moの信頼性試験→8月より開始 ※ ●実証用大型光照射試験装置→2月より運用開始 ●実証用大型温湿度試験装置→3月より運用開始
2019	・上記セル/Mo化技術の実証	●PERCセルMoの複合試験遂行 ※ ●複合ストレス試験結果解析→予測寿命35年以上

※ 産総研FREA(福島再生可能エネルギー研究センター)との共同研究

図Ⅲ-2-(イ)-C-17 高信頼性シリコン太陽電池の開発に関する計画と実施内容

成果まとめ	将来課題
<p>①フィールド設置品の回収/分析 → 寿命劣化モードを把握</p> <p>②UV/DH/TC/PID試験を実施、劣化状態の分析 ※ → 劣化メカニズムを定量把握 → 基準複合ストレス試験(UV→DH→TC)を抽出</p> <p>③寿命予測技術を開発 設置地域/設置形態を考慮 → 特許出願 ※</p> <p>④フィールド回収品の残寿命評価技術を開発 → 特許出願 ※</p> <p>⑤改善封止材を用いることで 国内非住宅市場にて寿命35年以上を予測</p> <p>⑥両面受光PERCセル60直モジュールにて 寿命35年相当以上のストレス耐性を実証 ※</p> <p>※ 産総研FREAとの共同研究</p>	<p>①信頼性試験時間の短縮 →シミュレーション技術の開発</p> <p>②経年劣化/発電量予測技術の開発(寿命予測技術と統合)</p> <p>③両面受光モジュール導入 (裏面構造/材料の選択)</p> <p>④海上など高ストレス市場向け 信頼性設計技術の発展開発</p> <p>⑤市場ユーザーへの情報提供 安全率(寿命/保証期間)の重要性</p>

図Ⅲ-2-(イ)-C-18 高信頼性シリコン太陽電池の開発で得られた主な成果と将来課題

第5次エネルギー基本計画(2018年7月3日閣議決定)では、「再生可能エネルギーの主力電源化」を目指すことが明確に位置付けられた。太陽光発電が脱炭素化に向けての将来の主力電源のひとつとして果たすべき役割は大きい。そのためには発電コスト[円/kWh]の更なる低減を進めて7円/kWh以下を実現することが必要不可欠であり、出力保証年数の長年数化、すなわち太陽電池モジュールの長寿命化が求められる。

妥当な出力保証年数は、寿命情報と妥当な安全率から設定されるべきである(出力保証年数=寿命年数/安全率)。しかし、現時点では寿命についても安全率についても、全うに論じられていない状況である。現在のIEC規格試験(湿熱試験条件は85°C85%1000h)では太陽電池モジュールの寿命評価はできない。寿命予測には、UV/湿熱複合ストレス試験、温度2水準試験(これは寿命劣化が確認されるまで

行う)、湿熱/TC 複合ストレス試験、そして、フィールド回収品による検証（追加加速試験）が必要不可欠である。

今後の太陽光発電産業/市場の健全な成長発展に向けては、長期信頼性情報の市場/ユーザーへの積極的な提供が大切になってくると考える。主力電源化の背景には、今後拡大が見込まれるセカンダリー市場、将来の大量廃棄問題、SDGs のような脱炭素化に向けての世界的な潮流がある。寿命予測試験方法の標準化も検討されるべき将来課題である。

2. 実用化・事業化見通し

高効率シリコン太陽電池の低コスト量産プロセスについては、2017 年より順次製造導入を実施しており、セル効率 21.4%、モジュール効率 19.4%の量産プロセスラインを確立済みである。

また、高信頼性化技術の実用化に関しては、開発した複合ストレス試験の導入と、開発した寿命予測技術を用いた信頼性試験判定基準の標準化について実施・運用中である。事業としては、国内市場 35 年相当以上のストレス耐性を確認した PERC モジュールの量産を実施しており、一部の発電所案件向けに 35 年保証を適用し、今後対象案件の拡大を図る見込みである。

3. 波及効果

まず、要素技術としてシードキャスト法による高品質な結晶育成方法に関連して開発した機能性粒界技術を用いることで、インゴット径が制約となる CZ 法では実現不可能な基板サイズまで大型化することも原理的に可能となり、低コスト化要求に適応して基板サイズを柔軟に選択・生産することが出来る。

また、高信頼性技術の活用による波及効果としては、2012 年から多大な国民負担を課して普及促進を進めた FIT 案件を、長期にわたり貴重な分散電源リソースとして活用する事で、買取期間終了（卒 FIT）後に出力低下が原因で収益が見込めない事を理由に廃棄処分される事を抑制する効果が期待出来る。長期信頼性情報が市場ユーザーに提供されるようになれば、寿命予測情報を踏まえたテクニカルデューデリジェンスやしかるべき保険料率/保険メニューの設定、セカンダリー市場では残寿命評価情報（資産価値）を踏まえた適正価格での取引、などが実現してくると予想される。残寿命評価情報は、将来の大量廃棄問題に対して適切な判断/対処をするためにも重要である。

また、長寿命化技術を取り入れた製品は大量廃棄問題を緩和する方向で環境負荷の軽減に貢献できる。長期信頼性情報は、市場の透明性の確保や適正な市場価格形成、ひいては太陽光発電産業の健全な成長発展、SDGs/脱炭素社会の実現に向けて、必要不可欠な情報として位置づけられていくものと考えられる。

4. 今後の展開

本事業における高信頼性・低コスト・高効率シリコン太陽電池開発による発電コスト 14 円/kWh の実現を通過点として、高信頼性技術を基盤とした太陽光発電システムの普及を通して、リサイクル周期の延伸による関連コストの削減と、更なる高効率セル開発、両面受光タイプのモジュール構造採用による実質的な設備利用率の向上等に取り組み、2025 年より早期に発電原価 7 円/kWh 以下の実現を目指す。

国内市場向けの活用例としては、政府のエネルギー基本計画に基づく 2030 年までの新築住宅の平均での ZEH 実現に向けて、昨今の住宅長寿命化に合わせた高信頼性モジュールを適用することで、とりわけ建材一体型モジュールなどのワンストップサービス提供への貢献が期待できる。

また、太陽光発電産業/市場の健全な成長発展のため、当該プロジェクトで確立した寿命予測技術を公開し、広く世に問う事で、業界全体の技術レベルの向上に貢献する。

さらに、当該プロジェクトで確立した高信頼性技術を活かして、例えば赤道近傍諸国、砂漠、海上といった高ストレス地域への太陽電池モジュールの設置を可能なものとし、再生可能エネルギーの更なる普及に貢献していく。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	5(0)	21(11)	24(14)	18(11)	12(4)	80(40)
論文	0	0	0	1	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	0	0	2 (1)	2 (0)	3 (0)	7 (1)
新聞・雑誌等への掲載	9	7	0	2	0	20
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	京セラ(株)	特願 2015-168467	国内	2015/8/28	登録	太陽電池素子およびその製造方法	伊藤憲和 他
2	京セラ(株)	特願 2015-189563	国内	2015/9/28	拒絶	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川信哉 他
3	京セラ(株)	特願 2015-254634	国内	2015/12/25	取下	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川信哉 他
4	京セラ(株)	特願 2016-035189	国内	2016/2/26	取下	太陽電池素子	吉田貴信 他
5	京セラ(株)	特願 2016-068921	国内	2016/3/30	取下	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
6	京セラ(株)	特願 2016-079806	国内	2016/4/12	取下	絶縁性ペーストおよび太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
7	京セラ(株)	特願 2016-088824	国内	2016/4/27	取下	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川信哉 他
8	京セラ(株)	特願 2016-148131	国内	2016/7/28	取下	太陽電池素子およびその製造方法	佐藤順平 他
9	京セラ(株)	特願 2016-189501	国内	2016/9/28	取下	太陽電池素子	村尾彰了 他
10	京セラ(株)	特願 2016-190693	国内	2016/9/29	取下	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
11	京セラ(株)	特願 2016-204546	国内	2016/10/18	取下	太陽電池素子	村尾彰了 他
12	京セラ(株)	特願 2016-209570	国内	2016/10/26	取下	太陽電池素子	荒浪順次 他
13	京セラ(株)	201680076150.8(中国)	外国	2016/12/26	登録	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他

14	京セラ(株)	特願 2017-531639	国内	2016/12/26	登録	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他
15	京セラ(株)	1801003804(タイ)	外国	2016/12/26	公開	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他
16	京セラ(株)	16/007907(米国)	外国	2016/12/26	公開	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他
17	京セラ(株)	PCT/JP2016/088744	PCT	2016/12/26	各国移行	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川信哉 他
18	京セラ(株)	201780013015.3(中国)	外国	2017/2/24	公開	太陽電池素子	吉田貴信 他
19	京セラ(株)	特願 2017-533988	国内	2017/2/24	登録	太陽電池素子	吉田貴信 他
20	京セラ(株)	1801005014(タイ)	外国	2017/2/24	公開	太陽電池素子	吉田貴信 他
21	京セラ(株)	16/108841(米国)	外国	2017/2/24	公開	太陽電池素子	吉田貴信 他
22	京セラ(株)	PCT/JP2017/007144	PCT	2017/2/24	各国移行	太陽電池素子	吉田貴信 他
23	京セラ(株)	201780021223.8(中国)	外国	2017/3/28	公開	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
24	京セラ(株)	特願 2018-508063	国内	2017/3/28	登録	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
25	京セラ(株)	16/089330(米国)	外国	2017/3/28	登録	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
26	京セラ(株)	PCT/JP2017/012602	PCT	2017/3/28	各国移行	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川信哉 他
27	京セラ(株)	特願 2017-077981	国内	2017/4/11	公開	絶縁性ペースト、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	佐藤順平 他
28	京セラ(株)	15/484881(米国)	外国	2017/4/11	拒絶	絶縁性ペーストおよび太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
29	京セラ(株)	特願 2017-088210	国内	2017/4/27	取下	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
30	京セラ(株)	特願 2017-145318	国内	2017/7/27	公開	太陽電池素子および太陽電池モジュール	岩佐優太 朗
31	京セラ(株)	201780046035(中国)	外国	2017/7/28	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
32	京セラ(株)	17834548.4(欧州)	外国	2017/7/28	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
33	京セラ(株)	特願 2018-530431	国内	2017/7/28	登録	太陽電池素子	佐藤順平 他

34	京セラ(株)	16/255561(米国)	外国	2017/7/28	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
35	京セラ(株)	PCT/JP2017/027494	PCT	2017/7/28	各国移行	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	佐藤順平 他
36	京セラ(株)	201780060259.7(中国)	外国	2017/9/25	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
37	京セラ(株)	特願 2018-509860	国内	2017/9/25	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
38	京セラ(株)	1901001940(タイ)	外国	2017/9/25	出願	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
39	京セラ(株)	16/365527(米国)	外国	2017/9/25	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
40	京セラ(株)	PCT/JP2017/034492	PCT	2017/9/25	各国移行	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
41	京セラ(株)	特願 2018-512641	国内	2017/9/26	登録	太陽電池素子	村尾彰了 他
42	京セラ(株)	16/365551(米国)	外国	2017/9/26	出願	太陽電池素子	村尾彰了 他
43	京セラ(株)	PCT/JP2017/034704	PCT	2017/9/26	各国移行	太陽電池素子	村尾彰了 他
44	京セラ(株)	106133280(台湾)	外国	2017/9/28	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島徳彦 他
45	京セラ(株)	特願 2017-201848	国内	2017/10/18	公開	太陽電池素子	荒浪順次 他
46	京セラ(株)	特願 2018-516081	国内	2017/10/26	登録	太陽電池素子	村尾彰了 他
47	京セラ(株)	16/388631(米国)	外国	2017/10/26	出願	太陽電池素子	村尾彰了 他
48	京セラ(株)	PCT/JP2017/038683	PCT	2017/10/26	各国移行	太陽電池素子	村尾彰了 他
49	京セラ(株)	特願 2017-230825	国内	2017/11/30	取下	太陽電池素子	松島徳彦 他
50	京セラ(株)	特願 2018-033054	国内	2018/2/27	取下	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	高橋宏明 他
51	京セラ(株)	201880026320(中国)	外国	2018/4/2	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
52	京セラ(株)	18791131.8(欧州)	外国	2018/4/2	公開	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
53	京セラ(株)	特願 2018-544377	国内	2018/4/2	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
54	京セラ(株)	16/660530(米国)	外国	2018/4/2	出願	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
55	京セラ(株)	PCT/JP2018/014096	PCT	2018/4/2	各国移行	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
56	京セラ(株)	107113809(台湾)	外国	2018/4/24	登録	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤憲和 他
57	京セラ(株)	特願 2018-091196	国内	2018/5/10	登録	太陽電池素子	村尾彰了 他
58	京セラ(株)	特願 2018-137000	国内	2018/7/20	取下	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板およびシリコンのインゴットの製造方法ならびに太陽電池	田辺英義 他

59	京セラ(株)	16/044327(米国)	外国	2018/7/24	登録	太陽電池素子および太陽電池モジュール	岩佐優太郎
60	京セラ(株)	201810841488.9(中国)	外国	2018/7/26	公開	太陽電池素子および太陽電池モジュール	岩佐優太郎
61	京セラ(株)	201880077215.X(中国)	外国	2018/11/20	公開	太陽電池素子	松島徳彦 他
62	京セラ(株)	特願 2019-516264	国内	2018/11/20	登録	太陽電池素子	松島徳彦 他
63	京セラ(株)	PCT/JP2018/042747	PCT	2018/11/20	各国移行	太陽電池素子	松島徳彦 他
64	京セラ(株)	107142396(台湾)	外国	2018/11/28	登録	太陽電池素子	松島徳彦 他
65	京セラ(株)	特願 2020-502881	国内	2019/1/31	出願	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	高橋宏明 他
66	京セラ(株)	PCT/JP2019/003277	PCT	2019/1/31	取下	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	高橋宏明 他
67	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2019-043208	国内	2019/3/8	取下	情報処理装置、制御方法、予測方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
68	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2019-043209	国内	2019/3/8	取下	情報処理装置、制御方法、予測方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
69	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2019-114877	国内	2019/6/20	取下	情報処理装置、制御方法、予測方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
70	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2019-114880	国内	2019/6/20	取下	情報処理装置、制御方法、予測方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
71	京セラ株式会社	PCT/JP2019/026800	PCT	2019/7/5	公開	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板、シリコンのインゴットの製造方法、および太陽電池	田辺英義 他
72	京セラ株式会社	特願 2019-127135	国内	2019/7/8	公開	太陽電池素子	村尾彰了 他
73	京セラ株式会社	特願 2019-132730	国内	2019/7/18	取下	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板、シリコンのインゴットの製造方法および太陽電池	小柏陽平
74	京セラ株式会社	特願 2019-141352	国内	2019/7/31	取下	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板および太陽電池	小柏陽平 他
75	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2020-039351	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
76	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2020-039352	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
77	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	特願 2020-039355	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他

78	京セラ(株) (国研)産業技術総合研究所	PCT/JP2020/009892	PCT	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	新楽浩一郎 他
79	京セラ株式会社	PCT/JP2020/027856	PCT	2020/7/17	出願	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板、シリコンのインゴットの製造方法および太陽電池	小柏陽平
80	京セラ株式会社	PCT/JP2020/029233	PCT	2020/7/30	出願	シリコンのインゴット、シリコンのブロック、シリコンの基板および太陽電池	小柏陽平 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	入江祐太	京セラ(株)	Development of high efficient and long-term reliable crystalline silicon solar cells and modules by low cost mass production process	Japanese Journal of Applied Physics, Vol.57 P.853	有	2018/7

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	入江祐太	京セラ(株)	Development of high efficient and long-term reliable crystalline silicon solar cells and modules by low cost mass production process	PVSEC-27	2017/11
2	小島拓人	明治大学 ※共同発表	多結晶シリコンの非鏡面表面における機械学習を用いたエッチピット検出	第65回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3
3	田中和文	京セラ(株)	京セラにおける長期信頼性太陽電池モジュール開発の取り組み	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7
4	坂元智成	京セラ(株)	結晶Si太陽電池モジュールの湿熱ストレス寿命に及ぼすUV光の影響と添加剤の影響	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3
5	伊野裕司	(国研)産業技術総合研究所 ※共同発表	Lifetime Prediction of Crystalline Si PV Modules under UV-Hygrothermal Stress	The 29th edition of the International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29), (6-Nov-19, Xi'an, China)	2019/11

6	伊野裕司	(国研)産業技術総合研究所 ※共同発表	Lifetime prediction under UV-hygrothermal stress for developing long-term reliable crystalline Si PV Modules	4th International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2019 (SAYURI-PV 2019), 0-13, 19-Nov-19, Tokyo (Japan)	2019/11
7	新楽浩一郎	京セラ (株)	結晶シリコン太陽電池モジュールの寿命予測	第 67 回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム	2020/3 (講演会は中止)

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	京セラ (株)	京セラ搭載要領が 30%向上～住宅用太陽光 屋根を効率的利用	電気新聞	2016/3/2
2	京セラ (株)	京セラ 7 種類のモジュールで屋根搭載容量 30% 増～住宅用新 PV システム	化学工業日報	2016/3/3
3	京セラ (株)	京セラ、単結晶 PV 技術に磨き 変換効率、1 % 高まり 19. 8%に	化学工業日報	2016/3/9
4	京セラ (株)	京セラ住宅用太陽光の新製品～「Roof1eX」4 月から順次発売	電波新聞	2016/3/9
5	京セラ (株)	京セラ発電効率アップ～太陽光システム新製品	京都新聞	2016/3/11
6	京セラ (株)	太陽光パネルの搭載容量 30%増加～新モジュールでゼロエネへ提案 京セラ	日刊木材新聞	2016/3/12
7	京セラ (株)	太陽光パネル住宅争奪戦～京セラ同面積で積載 3 割増	日経産業新聞	2016/3/14
8	京セラ (株)	搭載容量が 30%向上 ～京セラ 7 種類のモジュール組み合わせ	プロパン新聞	2016/3/21
9	京セラ (株)	PV EXP02016 レビュー～PERC 技術の導入急増	電子デバイス産業新聞	2016/3/24
10	京セラ (株)	ニュースワンダー ワンダーのトビラ 電力自由化	関西テレビ	2016/5/26
11	京セラ (株)	「報道ステーション」週 2 回 CM	テレビ朝日系列	2016/4/20～9/31
12	京セラ (株)	「エキサイティング! J」 週 1 回 CM	KBS 京都放送	2016/4/1～ 2019/2/28
13	京セラ (株)	エネルギー自給自足の商品を知ろう	住まいの設計	2016/7/1

14	京セラ (株)	太陽パネルメーカー問い合わせ一覧	ソーラージャーナ ル	2016/8/1
15	京セラ (株)	自家消費型システム提案	化学工業日報	2016/11/4
16	京セラ (株)	自社製 SOFC を投入	プロパン新聞	2016/11/14
17	京セラ (株)	自家消費向け開発加速 京セラ両面発電、EV 連携も	化学工業日報	2018/6/29
18	京セラ (株)	PV Japan2018 AI、EV の活用提案 京セラが新型モジュール	電子デバイス産業 新聞	2018/7/5

【その他】

なし

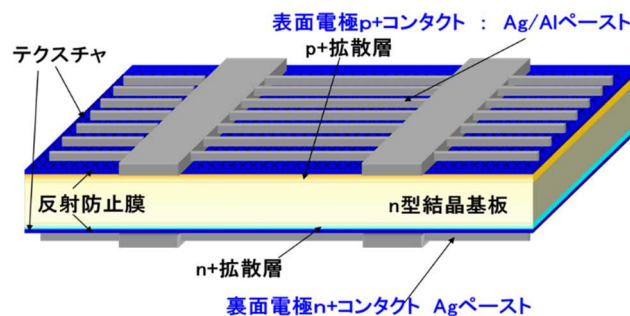
D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発 (ナミックス株式会社)

1. 成果詳細

1.1 n-PERT 用低再結合電極の開発 (実施期間 2015年7月21日～2018年3月31日)

1.1.1 はじめに

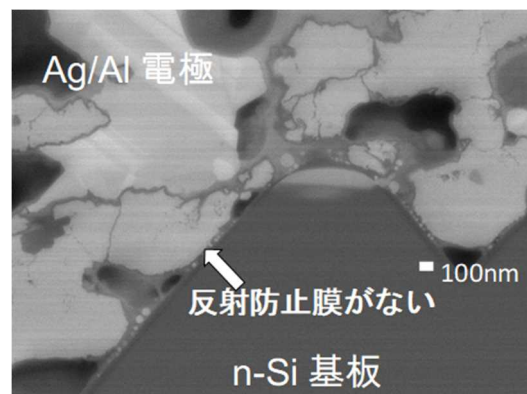
ホモジャンクションセル用の電極材料には非晶質複合酸化物が含まれており、これが基板表面の SiN_x 層と反応し、取り除くことで電流経路を形成している。しかし、 SiN_x を取り除くことが特性低下につながる場合、この SiN_x 層を活用し、一種の Passivated Contact の構造を形成できれば良いと考えられる。このような新しい接続構造を有する電極により、電極直下での再結合が抑制され高い開放電圧に基づく高効率化が期待できる。本研究では、高効率化が期待されている n-PERT 構造(図Ⅲ-2-(イ)-D-1)の太陽電池を対象として、基板の作成は豊田工業大学、電極-基板の接続のメカニズム解析は明治大学にて行い、表面・裏面での再結合電流を抑制した電極の開発を共同にて実施した。



図Ⅲ-2-(イ)-D-1 n-PERT 太陽電池構造

1.1.2 本研究の目標

従来の n-PERT 型の p^+ エミッタ用の電極に使用されるペーストは、基板と電極とのコンタクトを取ることが目的でアルミ金属を含有しているのが一般的である。しかし、生成したアルミ合金が基板と接触し金属が Si へ拡散してしまうことで V_{oc} (開放電圧) が下がり、変換効率が低下してしまうことがわかっている。また、ペースト中のガラスフリットにより反射防止膜をファイヤースルーすることで、電極下部の反射防止膜は全体に除去されるため金属とシリコンが直接接触する面積が増大する(図Ⅲ-2-(イ)-D-2)。これに伴い再結合電流密度も大きくなり V_{oc} が低下するという問題があった。



図Ⅲ-2-(イ)-D-2 n-PERT p^+ 層 Ag/Al 電極断面 SEM 写真

本検討ではアルミ金属を使用せず、ガラスフリットの反応性をコントロールして反射防止膜を残し、基板と電極金属と直接の接触面積を少なくすることでパッシベーション効果を維持したまま部分的にコンタクトする構造を界面で作ることにより、上記問題を解決できる電極の開発を実施した。従来の n-PERT 構造の太陽電池用の受光面裏面 n+コンタクト電極及び p^+ コンタクト電極の基板との接続の接触抵抗は、n+層に対しては $5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ 、 p^+ 層に対して $2 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ 程度であり、電極と基板の界面での再結合電流密度は $\sim 1000 \text{ fA cm}^{-2}$ と程度が一般的となっている。変換効率は、基板自体の性能が大きく反映されるため、開発電極の開発項目としては、上述の①n+層に対する接触抵抗値、② p^+ 層に対するコンタクト抵抗値、③電極形成による再結合電流密度の3点とした。目標としては、n+層、 p^+ 層それぞれの電極の接触抵抗は現行電極レベルを維持、再結合電流密度は現行電極の半分以下まで下げることとした。表Ⅲ-2-(イ)-D-1 参照。

表Ⅲ-2-(イ)-D-1 開発項目と目標値

開発項目	目標値
①低表面濃度のn+層に対する接触抵抗低減	2 mΩ cm ² 以下 (基板表面濃度1×10 ²⁰ cm ⁻³)
②p+層に対する接触抵抗低減	5 mΩ cm ² 以下 (基板表面濃度1×10 ²⁰ cm ⁻³)
③電極形成による再結合(j _{0-met})抑制	500 fA cm ⁻² 以下

1.1.3 成果内容

ガラスフリットの窒化膜との反応性を変更して作成した開発 Ag 電極 4 点にて n-PERT セル (156mm²、n=3) を試作した。このときのリファレンスセル (Ref) は Ag/Al 電極を用いた。IV 特性を測定した結果を表Ⅲ-2-(イ)-D-2 に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-D-2 IV 測定結果 n=3Cell 測定平均

ペースト	F.F	Isc(A)	Voc(V)	Eta(%)	Rs(mΩ)
Ag/Al	0.770	9.940	0.649	20.72	3.41
試作1	0.752	9.965	0.655	20.55	5.27
試作2	0.762	9.987	0.657	20.93	4.48
試作3	0.769	9.950	0.657	21.04	4.22
試作4	0.732	9.979	0.655	20.02	6.76

試作 1-4 全てにおいて Ref より +6~8mV 高い Voc が得られた。試作 1、4 は Rs (直列抵抗) が高く FF が低い変換効率 (Eta) が ref より低い。一方で、試作 2、3 については Rs も低く FF が高く、変換効率が試作 2 で 20.93% (Ref 対比+0.21 ポイント)、試作 3 で 21.04% (Ref 対比+0.32 ポイント) の結果となった。

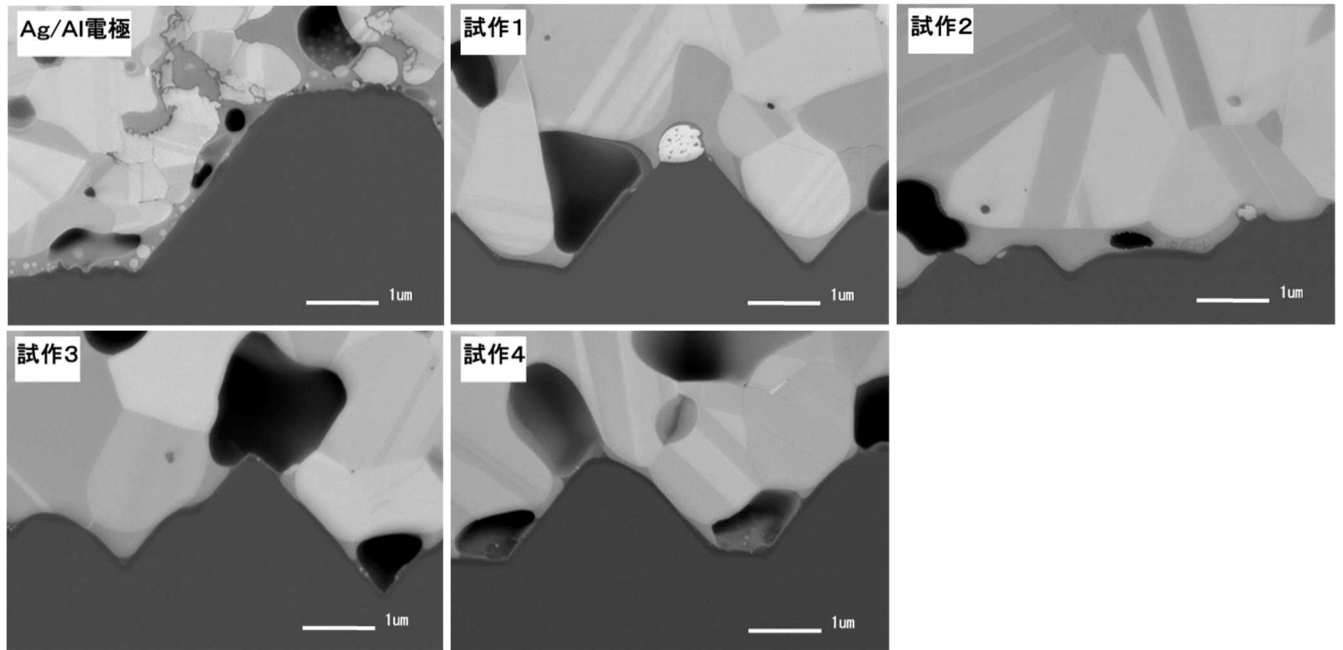
次に試作 3 の Voc、FF が高くなる原因を調べることを目的として、n⁺、p⁺層に対する接触抵抗値と再結合電流値を調べた (表Ⅲ-2-(イ)-D-3)。試作 1 と試作 4 は n⁺層、p⁺層ともに接触抵抗が高い。試作 2 は n⁺層に対する接触抵抗は低い p⁺層に対しては高い。試作 3 のみ n⁺層および p⁺層とも接触抵抗が低い結果となった。これが試作 3 の Rs が低い原因と考えられる。また、Ag/Al 電極 (ref) と比較して試作 1~4 の電極全てにおいて再結合電流 j_{0-met} の値は低く抑えられていることが高 Voc の原因と考えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-D-3 n+層、p+層に対する接触抵抗値と再結合電流密度

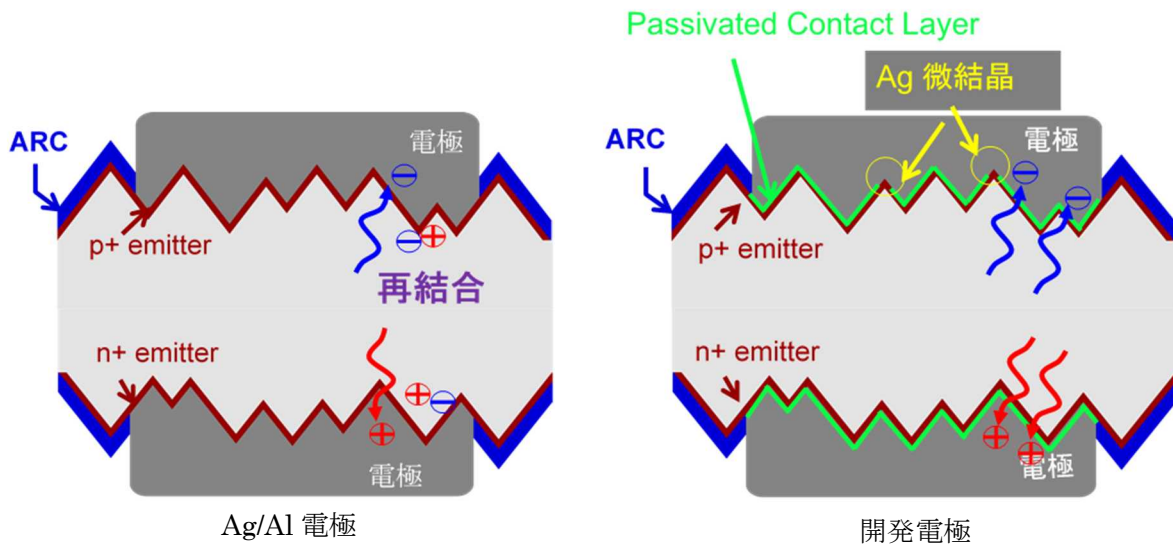
電極	①n+層に対する接触抵抗 (mΩ・cm ²)	②p+層に対する接触抵抗 (mΩ・cm ²)	③再結合電流 j _{0-met} (fAcm ⁻²)
Ag/Al電極	-	1.4	720
試作1	2.4	5.6	490
試作2	1.9	5.1	510
試作3	1.8	3.8	470
試作4	3.2	8.2	550

次に電極と基板面の界面状態を観察する目的で p⁺層の断面 SEM 写真を観察した (図Ⅲ-2-(イ)-D-3)。Ag/Al 電極ではガラスフリットによって反射防止膜が全体に除去され、Ag/Al 合金が接基板と接触し一部が Si 基板に刺さるような形で形成されている。Ag/Al 電極では電極直下の金属との接触面積が増大することで再結合が促進されていることが Voc 低下の原因と考えられる。一方、試作 1~試作 4 については反射防止膜が残留していて電極と基板が直接、接触している箇所が少なく、試作 1<試作 2<試作 3<

試作4の順で残留量が多い。試作4では残存する反射防止膜の厚みが厚く面積も大きく、Agの微結晶の生成も確認できない。このため接触抵抗が高い。一方、試作1、2ではテクスチャ頭頂部に巨大なAgの微結晶が生成しており、ガラスの反射防止膜への反応性が高すぎると考えられる。試作3はテクスチャ底部の反射防止膜は残したまま、テクスチャ頭頂部の反射防止膜が一部除去され、小さなAgの微結晶を生成することにより基板と適切にコンタクトしていることがわかる。概念は、図III-2-(イ)-D-4でコンタクトモデル図として、示した。



図III-2-(イ)-D-3 電極断面 SEM 写真



図III-2-(イ)-D-4 コンタクトモデル図

1.1.4. まとめ

目標の達成状況を表Ⅲ-2-(イ)-D-4 に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-D-4 目標値と達成状況

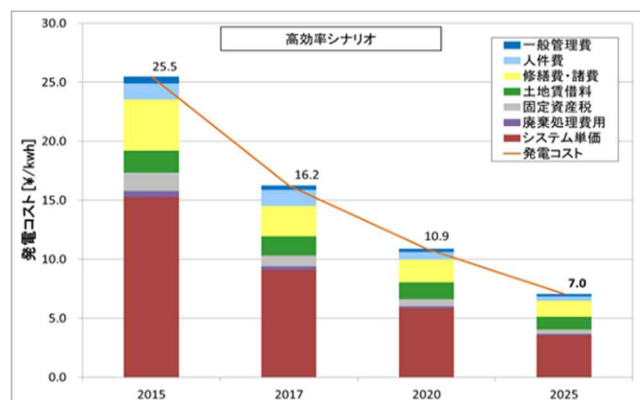
開発項目	目標値	達成状況
①低表面濃度のn+層に対する接触抵抗低減	2 mΩ cm ² 以下 (1 × 10 ²⁰ cm ⁻³)	1.8mΩ cm ² (1 × 10 ²⁰ cm ⁻³)
②p+層に対する接触抵抗低減	5 mΩ cm ² 以下 (1 × 10 ²⁰ cm ⁻³)	3.8mΩ cm ² (1 × 10 ²⁰ cm ⁻³)
③電極形成による再結合(j0-met)抑制	500 fA cm ⁻² 以下	470fA cm ⁻²

n⁺層、p⁺層に対する接触抵抗値目標および電極形成による再結合電流密度 j_{0-met} の低減目標を達成。接触抵抗値を現行品レベルで維持したままで、再結合電流を低減した電極の開発に成功した。また、ガラスフリットの組成を変更することで反射防止膜との反応性の調整と金属微結晶の生成度をコントロールすることが可能となり、V_{oc} を高く維持したままで接触抵抗を低減できた。最終的な IV 特性として、現行 Ag/Al ペーストと比較して開放電圧(V_{oc})+8mV、変換効率(E_{ta})+0.32%を実現した。今後はペーストのガラスフリットの調整で異なる反射防止膜に対してもこの技術の応用が期待できる。

1.2 ヘテロジャンクション用卑金属電極の開発 (実施期間 2018年4月1日~2019年3月31日)

1.2.1 はじめに

本研究では高効率化が期待されているヘテロジャンクション構造の太陽電池を対象として、卑金属を使用した電極ペーストを開発することで、変換効率及び信頼性を現行の Ag 電極レベルを維持したままで電極コストの低減化することを検討する。基板の作成は豊田工業大学、電極-基板の接続のメカニズム解析は明治大学にて行い、新しい卑金属を使用した電極の開発を実施した。



図Ⅲ-2-(イ)-D-5 高効率化による発電コスト低減シナリオ

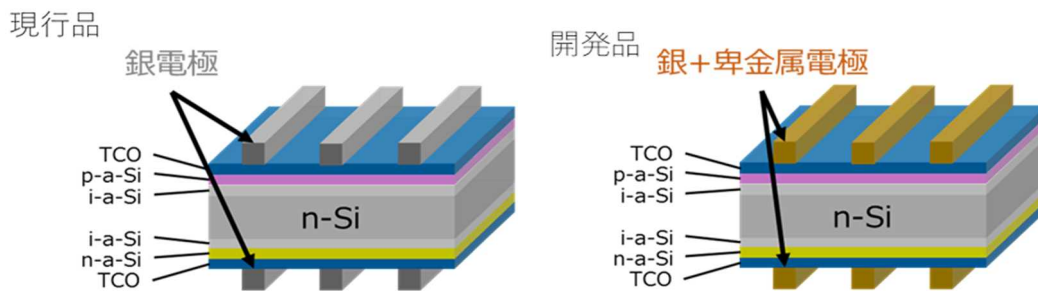
1.2.2 本研究の目標

2025年発電コスト7円/kWh実現のために豊田工業大学と明治大学により提唱された高効率化による発電コスト低減シナリオの中で電極材料費の削減目標が掲げられている。この中で太陽電池電極の材料費の削減率は2017年を基準に2020年で-17%、2025年で-33%を目標としている。(表Ⅲ-2-(イ)-D-5)

表Ⅲ-2-(イ)-D-5 高効率化による発電コスト低減シナリオによる電極材料費削減目標

	2015年	2017年	2020年	2025年
ポリシリコン価格	¥1,600/kg	¥1,000/kg	¥1,000/kg	¥700/kg
インゴット製造経費	¥2,600/kg	¥2,000/kg	¥1,700/kg	¥1,500/kg
ウエハ加工費	¥47.0/枚	¥22.0/枚	¥19.0/枚	¥18.0/枚
セル効率	20.0%	23.0%	25.0%	26.5%
モジュール効率	17.7%	20.4%	22.1%	25.0%
モジュール製造原価	¥56.9/W	¥34.8/W	¥27.4/W	¥24.9/W
セル搭載材料	¥40.5/枚	¥30.0/枚	¥25.0/枚	¥20.0/枚
電極材料費	¥26.3/枚	¥19.5/枚	¥16.3/枚	¥13.0/枚
電極材料費削減率	35%	0	-17%	-33%
運転年数(寿命)	20.0年	20.0年	25.0年	30.0年
システム単価	¥280,438/kW	¥161,138/kW	¥125,925/kW	¥93,603/kW
設備利用率	13.0%	13.0%	13.7%	15.0%
発電コスト	¥25.5/kWh	¥16.2/kWh	¥10.9/kWh	¥7.0/kWh

本研究では高効率化が期待できるヘテロジャンクション用の銀電極をターゲットとして、ペーストに含まれる Ag 粉末の一部を卑金属粉末へ変更し、高価な貴金属 Ag の量を減らすことで電極材料費の削減を検討した(図Ⅲ-2-(イ)-D-6)。開発目標値としては2018年度電極材料費削減率30%(2017年度対比)とし、材料コスト削減目標の大幅な前倒しを狙う。また、その他の目標はセル変換効率、接触抵抗値とし、目標値は現行 Ag ペースト同等水準とした(表Ⅲ-2-(イ)-D-6)。



図Ⅲ-2-(イ)-D-6 ヘテロジャンクションセル電極構造

表Ⅲ-2-(イ)-D-6 開発目標値

開発目標	最終目標 (2018年度)
① 電極コスト削減率(%)	-30% (銀ペースト対比)
② 変換効率(%)	-0.05%差以内 (銀ペースト対比)
③ 接触抵抗	8.0mΩ cm ² 以内

1.2.3 成果内容

最初に卑金属材料として Ag コート Cu 粉末、Ni 粉末を選び、その添加効果を確認する目的でペーストを試作した。ペーストは、下記の Ag 含有率の比率で卑金属粉末と Ag 粉末と混合して三本ロールミルで作成した。

【試作ペーストの配合】

1. Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末 ペースト

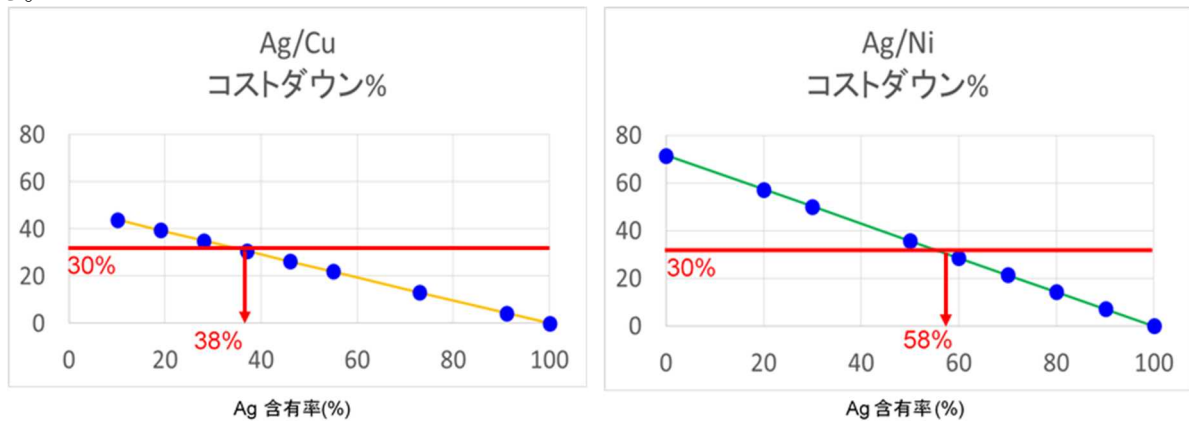
Ag 比率 10%、19%、28%、37%、46%、55%、73%、91%、100%

2. Ni 粉末+Ag 粉末 ペースト

Ag 比率 20%、30%、50%、60%、70%、80%、90%、100%

また、作成したペーストのコストの低減率を示す(図Ⅲ-2-(イ)-D-7)。それぞれのペーストのコストは Ag の含有率に対して負の相関があり目標の30%コスト削減するためには、Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末ペ

ーストの場合 Ag 含有率 38%以下、Ni 粉末+Ag 粉末の場合 Ag 含有率 58%以下まで Ag 含有率を下げる必要がある。



図III-2-(イ)-D-7 Ag コート Cu 粉末、Ni 粉末添加に対する Ag 含有率と材料コストダウン率

続いて各ペーストの電極と基板との接触抵抗、電極の比抵抗の測定を行った(図III-2-(イ)-D-8、図III-2-(イ)-D-9)。接触抵抗は Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末では全 Ag 含有率のペーストに対して低い値を示し目標値の $8\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下を示した。一方、Ni 粉末+Ag 粉末ペーストの場合、Ag 含有率 30%以上では目標値の $8\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下であるが 20%では急激に接触抵抗値が増加した。また、比抵抗は Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末では Ag 含有率 38%以上で目標値の $10\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以下を達成した。Ni 粉末+Ag 粉末ペーストの場合、Ag 含有率 80%以上でようやく目標値の $10\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 以下となった。以上の結果より Ag コート Cu 粉末を使用したほうが低銀含有率で接触抵抗および比抵抗ともに低く維持でき、コストも有利になることがわかった。



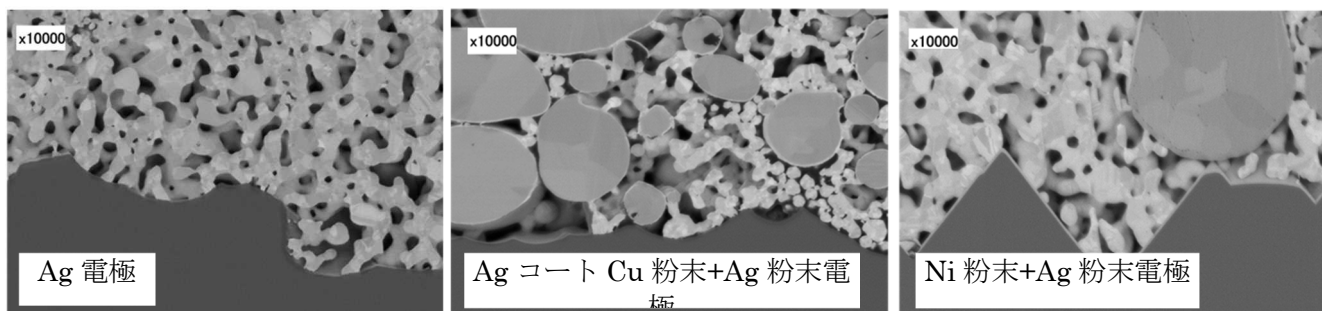
図III-2-(イ)-D-8 Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末電極接触抵抗、比抵抗グラフ



図III-2-(イ)-D-9 Ni 粉末+Ag 粉末電極 接触抵抗値、比抵抗グラフ

更に接触抵抗、比抵抗の挙動を調べる目的で電極の断面 SEM 写真を観察した(図III-2-(イ)-D-10)。Ag 電極では、Ag 粒子が隣接する粒子と融着することで導電性が発現している。また、基板の界面では ITO の表面と Ag の粒子が接触により導通し、接触抵抗が確保されている。Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末の電極では、上記の銀粒子同士の接続の他に Cu コア表面の Ag と Ag 粉末との接続も確認された。また、Ag コート Cu 粉末の表面が Ag でコートされていることで、ITO との接触でも同様に接続が得られ、これが

Ag コート Cu 粉末+Ag 粉末電極の接触抵抗が Ag 含有率に関係なく低いレベルを維持できる理由と考えられる。一方、Ni 粉末+Ag 粉末の電極の電極では、Ni と Ag との接続はあるが、融着は確認されていない。Ag コート Cu 粉末と比較して比抵抗値が高いのは、Ag 粒子との接続が Ag コート Cu 粉末に対して脆弱であり、加えてNi 金属自体の金属抵抗値も高いことに由来する。また、ITO との接続性についても同様に不利に働いていると考えられる。



図Ⅲ-2-(イ)-D-10 電極断面 SEM 写真

接触抵抗と比抵抗値の目標値をクリアした Ag コート Cu 粉末の Ag 含有率 37%ペーストを使用して太陽電池セルを作成した。比較は Ag 粉末を使用したペーストとした。このときセルは①4BB (バスバー) design、②SWCT (スマートワイヤ) design セルの 2 種類 n=3 枚。詳細の条件は表Ⅲ-2-(イ)-D-7 に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-D-7 セル作成条件

①4BB design			②SWCT desin		
スクリーンマスク	メッシュ	SH-ER380CAL-Φ14	メッシュ	ER325-Φ16	
	乳剤厚	12um	乳剤厚	15um	
	フィンガー設計幅	40um	フィンガー設計幅	60um	
	パターン	120本, 4BB	パターン	61本, 0BB	
	メーカー	ムラカミ	メーカー	ムラカミ	
印刷工程	印刷機	MT-550TV (Micro-tec)	印刷機	MT-550TV (Micro-tec)	
	印刷スピード	100mm/sec	印刷スピード	100mm/sec	
	スナップオフ	1.7mm	スナップオフ	1.7mm	
	印圧	0.3Mpa	印圧	0.3Mpa	
	スキージ角度	70°	スキージ角度	70°	
	スキージ硬度	70°	スキージ硬度	70°	
	スキージタイプ	Micro-Squeegee	スキージタイプ	Micro-Squeegee	
乾燥工程	装置	Muffola Oven	装置	Muffola Oven	
	条件	150C, 10min.	条件	150C, 10min.	
硬化工程	装置	Muffola Oven	装置	Muffola Oven	
	条件	200C, 45min.	条件	200C, 45min.	
IV	装置	DENKEN PV cell I-V Tester	装置	SpotLIGHT Cell Tester (PASAN)	
	ステージ	4BB	ステージ	GridTOUCH unit	

次に、太陽電池 IV 測定結果を示す。①4BB では Ag と比較して、Ag コート Cu 粉末の Ag 含有率 37%ペーストでは Rs が 1.07mΩ 高く、FF が 0.76 ポイント低い結果となった (表Ⅲ-2-(イ)-D-8)。接触抵抗とライン抵抗が Ag と比較して高いことに起因していると考えられる。また、②SWCT でも Ag と比較して、Ag コート Cu 粉末の Ag 含有率 37%ペーストでは同様に Rs が 0.29mΩ 高く、FF が 0.22 ポイント低い結果となった (表Ⅲ-2-(イ)-D-9)。SWCT でも同様の結果であるが、4BB と比較して Rs の上昇と FF の低下の割合が小さい。これは 4BB と比較して SWCT のほうがワイヤ間の距離が短くフィンガー電極のライン抵抗が高い影響を受けにくいことに起因している。最終的な変換効率では①4BB で-0.02 ポイント、②SWCT で+0.02 ポイントとなった。マスクデザインの最適化も合わせて実施することで、Ag 電極と比較しても実用可能なレベルと考えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-D-8 ①4BB IV 結果

ペースト	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	Rs(mΩ)	FF(%)	Eta(%)
Ag	0.721	38.16	1.39	82.84	22.78
Ag/Cu	0.716	38.75	2.46	82.08	22.76

表Ⅲ-2-(イ)-D-9 ②SWCT IV 結果

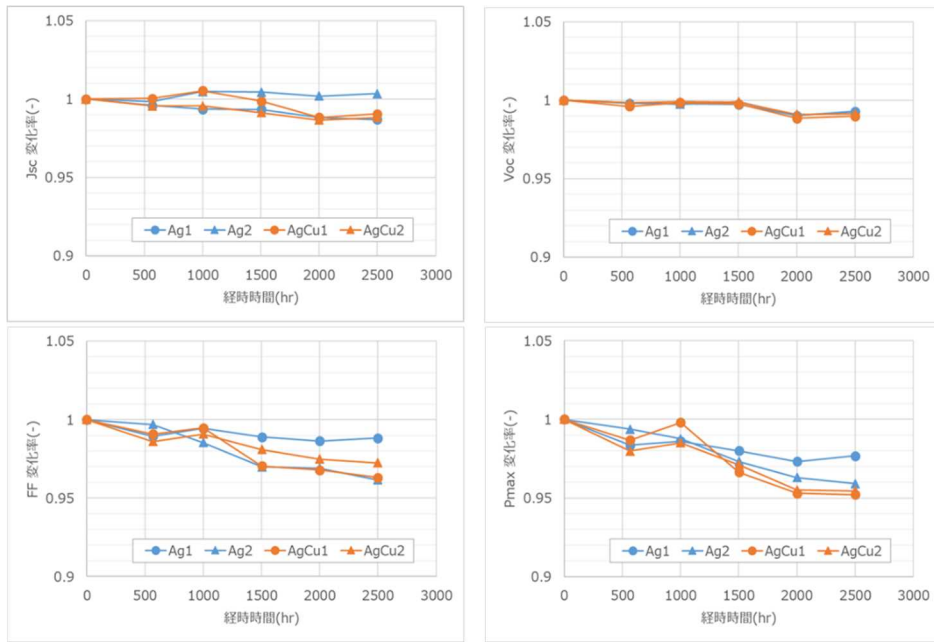
ペースト	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	Rs(mΩ)	FF(%)	Eta(%)
Ag	0.7235	38.35	5.01	79.78	22.13
Ag/Cu	0.7248	38.42	5.30	79.56	22.15

作成した 4BB のセルを使用して 1 セルモジュールを作成し、85℃/85%の条件で信頼性試験を実施した。セル/モジュールの作成条件および信頼性テストの条件を表Ⅲ-2-(イ)-D-10 に示す。セルには上述の IV 測定で使用した、Ag ペースト及び Ag コート Cu 粉末の Ag 含有率 37%ペーストで作成した 4BB 品を用いた(n=2)。タブ付けはコンダクティブフィルム(CF)を使用して国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所(FREA)にて実施した。また、モジュール作成及び信頼性評価は国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域太陽光発電研究センターにて実施した。

表Ⅲ-2-(イ)-D-10 セル/モジュールの作成条件および信頼性テスト条件

信頼性テスト		
スクリーンマスク	メッシュ	SH-ER380CAL-Φ14
	乳剤厚	12μm
	フィンガー設計幅	40μm
	パターン	120本, 4BB
	メーカー	ムラカミ
印刷工程	印刷機	MT-550TV (Micro-tec)
	印刷スピード	100mm/sec
	スナップオフ	1.7mm
	印圧	0.3Mpa
	スキージ角度	70°
	スキージ硬度	70°
乾燥工程	スキージタイプ	Micro-Squeegee
	装置	Muffola Oven
硬化工程	条件	150C, 10min.
	装置	Muffola Oven
DHテスト	条件	200C, 45min.
	モジュール構成	G/G 1セルモジュール, CF接合
	条件	85C/85%RH, 0, 500, 1000, 1500hr

信頼性試験の結果を示す(図Ⅲ-2-(イ)-D-11)。Ag 粉末品と Ag コート Cu 粉末品を使用した電極の両方で FF が経時によって低下しており、この影響で Pmax も低下がみられた。ただし両電極の出力低下の程度は 2500hr 時点で 5%以内に抑えられており、低下の程度も同程度であった。このことから Ag コート Cu 粉末品はモジュール化の信頼性においても、実用できるレベルであることがわかった。



図Ⅲ-2-(イ)-D-11 信頼性試験 (DH85°C/85%) 結果

1.2.4 まとめ

目標の達成状況を表Ⅲ-2-(イ)-D-11 に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-D-11 目標達成状況

開発項目	現状	最終目標 (2018 年度)	達成状況
① 電極コスト削減率 (%)	Ref Ag 電極	-30% (銀ペースト対比)	-31% 達成
② 変換効率 (%)	Ref Ag 電極	-0.05%差以内 (銀ペースト対比)	-0.02%差 達成
③ 接触抵抗	8.0mΩ cm ² 以内	8.0mΩ cm ² 以内	6.0mΩ cm ² 達成

Ag コート Cu 粉末と Ag 粉末の併用による銀含有率を 37%まで低下させた電極により目標のコスト 30%低減できるペーストができた。比抵抗については、現行の Ag ペーストと比較してわずかに高い結果であるが、SWCT などのマルチバス工法を用いることによりカバーできると考えられる。接触抵抗も 8mΩ cm² 以内、変換効率も Ag 同等の結果となり、目標を達成できた。また、1セルモジュールによる 85°C/85%の信頼性結果でも 2500hr、出力低下 5%以内で Ag 電極と同程度の低下に抑えられ、実用化可能な電極の開発ができた。

2. 実用化・事業見通し

現在、n-PERT 型の構造では変換効率の伸びが小さく、セルを生産するメーカーも少数となってしまった。現行のセルメーカーが少ないこと、今後 n-PERT セルの市場成長も見込めないことから、本研究で進めてきた n-PERT 用電極の事業化については中止とすることとした。

一方、ヘテロジャンクションの太陽電池の需要は増えている。更に銀地金の高騰による電極価格の上昇も追い風となり、ヘテロジャンクション用の電極の低コスト化の要求は増えてきている。図Ⅲ-2-(イ)-D-12 に示すスケジュールにて事業化を計画している。

年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	
製品設計 ヘテロジャンクションセル用ペースト 最終目標 ・ TCO に対する接触抵抗 $< 8\text{m}\Omega\text{cm}^2$ ・ 電極コスト 70% (対銀電極)		→ 最終設計完了				
量産検討			→			
販売活動/サンプルワーク			→			
顧客認証/信頼性試験				→		
生産					→	
販売					→	

図Ⅲ-2-(イ)-D-12 ヘテロ用非金属電極事業化スケジュール

3. 波及効果

電極の非金属化を進めることで電極のコストが低減できれば、セルのコスト低減となり、ヘテロジャンクション太陽電池構造のさらなる普及につながる。

4. 今後の展開

セルメーカー、モジュールメーカーでの信頼性試験評価により採用活動進めていく。今後の高信頼性試験要求に合わせて組成の検討も進める。また、変換効率向上のためにさらなる低抵抗化、細線印刷可能な電極の開発を進めることで普及に努めていく。

5. 特許論文等リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
論文	0	0	0	1	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	0(0)	0(0)	2(2)	1(1)	0(0)	3(3)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	3	0	0	0	0	0

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

なし

【論文】

番号	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	発表年月
1	School of Science and Technology, Meiji University	Study on chemical bonding states at electrode-silicon interface fabricated with fire-through control paste	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB23 (2018)	published online2018/7/20

【学会発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Takefumi Kamioka	Toyota Technological Institute	Carrier Transportation at Novel Silver Paste Contact	2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)	June 25-30 2017
2	Kyotaro Nakamura	Toyota Technological Institute	Novel Silver Paste for N-type bifacial PERT Cell	PVSEC-27	Nov. 14, 2017
3	Kyotaro Nakamura	Toyota Technological Institute	Newly Developed Ag Coated Cu Paste for Si Hetero-Junction Solar Cell	35th EUPVSEC poster	Sep. 24-28, 2018

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

E 赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発（株式会社クリスタルシステム）

1. 成果詳細

1-1. 大型赤外線単結晶育成装置の改造

試作開発済みの大型赤外線単結晶製造装置について、高品質単結晶育成条件と赤外線の強度分布、角度依存性などの相関関係を明らかにしながら、直径 220mm を超える N 型シリコン単結晶育成条件の確立を目指した。具体的には、装置の新たな開発は行わず、以下に記載する赤外線強度分布制御法、照射角度の最適化などに必要な改造を実施するとともに、単結晶歩留まりの向上と安定化を可能とする制御装置および計測装置を試作した。

1-1-1. 赤外線集光分布制御装置

開発済みの既存装置はこれまでの大口径単結晶育成試験の結果、熔融帯を形成させるには十分な赤外線量を集光できることが分かったが、赤外線集光分布状態は育成単結晶の直径変化に合致させて最適状態に制御する必要があることが明確となった。そこで、単結晶育成の連続したプロセス（ネッキング工程、クラウン工程、そして直胴工程）において、赤外線の照射位置が直径変化に合致するよう追尾して育成が可能な「赤外線集光分布制御装置」を導入した。本制御装置の導入により、単結晶育成中の赤外線集光分布を常に最適な状態に保つことが可能となり、安定的に直径 130mm までのシリコン単結晶を育成することに成功した。

1-1-2. 固液界面直上の液相拡がり角度精密測定装置

無転位単結晶を育成するには種子付け後にネッキング工程により無転位化させ、直径を太らせるクラウン工程を経て所定の直径の単結晶育成を行う直胴部に至る連続した安定制御が必要である。クラウン部では下側の単結晶の直径よりも大きな直径の融液が上に乗ることになるため、直径差が小さいとクラウン部が長尺化し製造コストの上昇を招く。逆に大きくし過ぎると上側の融液が固化する前に落下してしまう。そこで、原料棒から供給される融液量を正確に測定し、最適に制御する技術が必要となる。本研究開発では、単結晶育成時の最適融液量及び融液形状を正確に測定できる「液相拡がり角度精密測定装置」の設計、導入を行い、ネッキングから直胴部に至る連続したプロセスに使用し、単結晶育成中における固液界面形状の測定を行うことで液相量の制御を行った。従来からのオペレーター制御に本装置による自動測定を付加することで、単結晶成長の安定化及び直径制御技術が向上した。

1-1-3. 液相量制御自動装置

1-1-2 に記載した「液相拡がり角度精密測定装置」により測定された固液界面の液相量について、得られた液相量を最適状態へと制御し自動制御を行うことで、安定した結晶成長を継続させるための「液相量制御自動装置」の設計、導入を行った。結果、単結晶成長の安定性が向上し、「液相拡がり角度精密測定装置」と併せて用いることで直径 130mm、長さ 105mm の単結晶シリコンの育成に成功した。

1-1-4. 大型赤外線単結晶育成装置本体部の改造

1) 種子棒シャフトへの結晶保持装置の付加

無転位シリコン単結晶成長をネッキング法にて行う場合、ネッキングと呼ばれる絞り（直径 4mm 以下、長さ 50mm 以上）を行い、その後直径 220mm まで径を拡げる。この場合、単結晶が成長するにつれ絞り部へかかる重量が増大するため絞り部の破損による結晶落下、および振動が発生しやすくなる。従って、上記問題を回避し、安全かつ安定して結晶育成が可能となる結晶保持機構として、種子棒シャフト結晶保持装置の設計、導入を行い装置への付加を行った。

2) 原料保持シャフト中心軸調整装置

原料となるポリシリコンと育成単結晶の境界となる熔融帯は 20mm 以下の幅で制御されており、安定成長を行うためには熔融帯の安定した制御、即ち双方の回転軸の一致が必要となる。しかし、使用する原料ポリシリコンが 1000mm と長い円柱状のため、長さ方向に若干の湾曲を含み、育成プロセス中に原料の回転軸中心が変動するという問題を含んでいる。

従って、育成中に原料の回転軸中心を調整する原料保持シャフト中心軸調整装置を設計、導入し、育成中に中心軸ズレを調整可能とし、熔融帯の安定化を向上させることで、単結晶成長を最適化した。

1-2. 高品質シリコン単結晶育成条件の検討

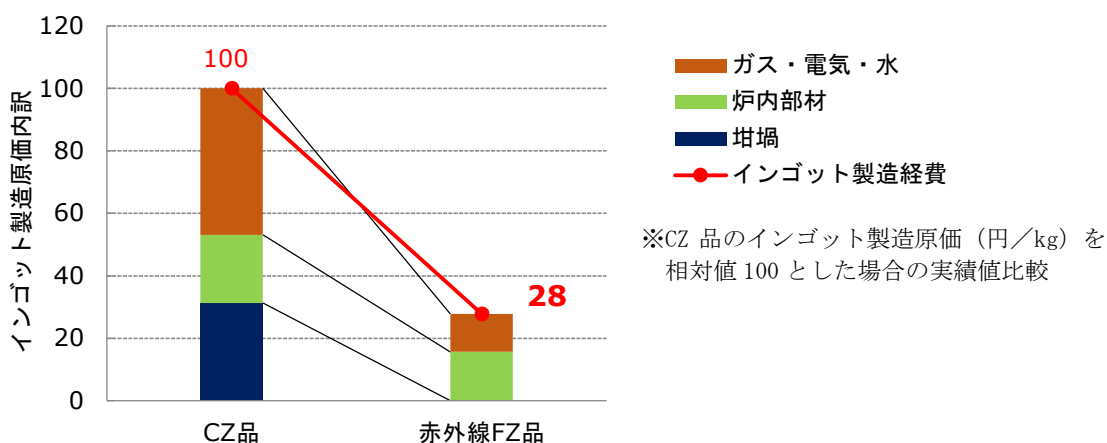
1-2-1. インゴット製造経費

赤外線 FZ 法は CZ 法、高周波 FZ 法等の既存の方法よりも低廉なコストで高品質品を製造可能な方法である。

赤外線 FZ 法がコストメリットを有する主たる理由として以下が挙げられる。

- 1) 主たる変動費である石英るつば、カーボン材等の消耗品部材を一切使用しない。
- 2) 使用するポリシリコン原料は、シーメンズ法で製造された丸棒原料棒をそのまま使用できる。
- 3) シリコン単結晶を太陽電池として利用する場合、変換効率の観点から最適なキャリア濃度 (N 型の場合はリン) が仕様として定められ、一方向凝固法の場合は偏析現象により結晶成長方向でのリン濃度は変動するため、最適組成部は 1 本の単結晶から限られた長さしか得ることができない。一方で、溶媒移動法が適用される赤外線 FZ 法では成長方向に均質組成を持った最適濃度品のみので育成が可能であり、結晶製造時の歩留まりに影響を与えない。

実際に赤外線 FZ 法から育成された単結晶について、実績に基づき算定したインゴット製造原価を図Ⅲ-2-(イ)-E-1 に記載する。なお、比較に用いた CZ 品は N 型シリコン単結晶 HIT 品 (比抵抗 5~20Ω cm) のインゴット製造原価の市況価格を参考とした (相対評価)。



図Ⅲ-2-(イ)-E-1 CZ品と赤外線FZ品のインゴット製造原価比較

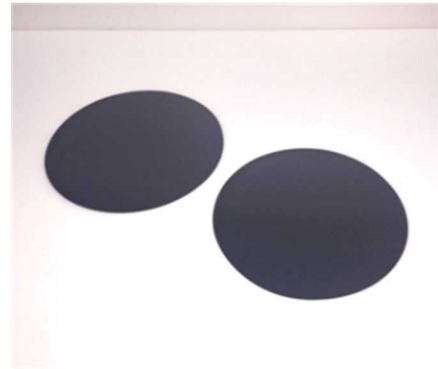
結果、赤外線 FZ 品のインゴット製造原価は CZ 法のシリコン単結晶に対して 1/3 以下となる原価を達成し、非常に低コストでシリコン単結晶が育成できることが実証された。

また、上記インゴット製造原価実績値は、本書内では相対値として表記しているが、実際の数値としては「インゴット製造経費最終目標値：¥1700/kg」の半分以下のコストであり、本赤外線 FZ 法のコストメリットを実証した。

1-2-2. 直径および長さ

赤外線集光分布の最適化ならびに固液界面の液相量制御を行うことで、安定的な原料溶融と結晶固化を両立し、直径 130mm、長さ 105mm のシリコン単結晶を育成した (図Ⅲ-2-(イ)-E-2)。得られた結晶は、シリコン特有の金属光沢が認められ、結晶軸<100>において結晶側面には育成方向に沿って伸びる明確な晶癖線が 4 回対称の位置、即ち(110)の方向に認められた。このことは得られた結晶には大きな結晶粒界は無く、単結晶であることを示している。

また、育成した単結晶から直径 125mm のシリコン鏡面ウェハを作製し、赤外線 FZ 法により育成された単結晶が通常プロセス (市販されているウェハと同一プロセス) にて遜色ない加工が可能であることを実証した (図Ⅲ-2-(イ)-E-3)。



図Ⅲ-2-(イ)-E-2 育成したシリコン単結晶 図Ⅲ-2-(イ)-E-3 シリコン鏡面ウェハ

なお、育成単結晶の大口径化を試み、直径 130mm 品までは成功したが、これ以上の大口径化には届いていない。単結晶の大口径化には安定した原料の溶解と結晶固化の継続、即ち融液の供給と育成結晶側での固化が安定し且つ持続する条件の確立が必要となる。本研究開発においては、原料棒の予備加熱と育成結晶に対する加熱を併用して、原料棒の熔融とシリコン単結晶の固化、双方を安定的に継続させ、実際に直径 130mm の原料棒を使用することで同じく直径 130mm までの単結晶育成に成功している。

今後、直径 130mm 以上の単結晶を育成する場合、使用する原料棒の直径を育成する単結晶と同等まで大きくするか、若しくは直径は 130mm のままで供給するメルト量を増やすか、の二者択一となるが、実際には下記の市況的ならびに技術的問題があることが判明した。

- 1) 市況に存在する原料棒の最大直径は、130mm 程度が限界であり、それ以上の大口径品は入手が困難となる。また、万が一入手が可能であっても、特別な製造と品質調整が必要となり高価となり実用化には適さない。
- 2) 育成単結晶よりも小さい径の原料を使用して単結晶育成を行う場合、原料棒の溶解速度を上げメルト量を増大供給させることで、原料径を超える直径の単結晶を育成することになる。

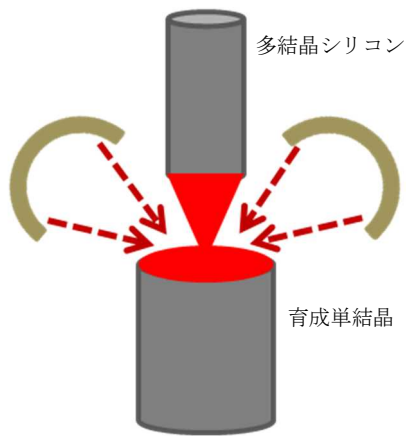
この場合、

- i) 原料溶解に必要となるエネルギー量（赤外線量）が膨大となり、原料熔融の安定条件と単結晶固化の安定条件をイコールとすることが難しくなる。即ち、固液成長界面近傍にて、メルト供給に必要な温度と結晶固化に必要な温度の温度勾配差をつけることが難しく、結晶の安定的な断続固化が困難となる。
- ii) 仮に育成単結晶より小さい直径の原料棒を使用するという上記技術が確立しても、育成単結晶を長尺化しようとした場合、原料棒を長くするか、複数本交換しながらの育成継続をしなくてはならない。即ち、大型赤外線単結晶育成装置の更なる大型化、ないしは製造工場（建屋）の大型化をせざるを得ないという物理的な制約が生ずる。

以上より、本研究開発では直径 130mm のシリコン単結晶を育成した段階にて、更なる大口径化を行う際の育成条件の安定化ならびに実用化を踏まえ、新たな育成方法の検討が必要であると判断した。そして、新たな原料供給方法の提案として、粒状多結晶シリコンを用いた供給機構を採用し、本研究開発の棒状原料を用いた赤外線 FZ 法と並行して、新たな検討と開発を進めた。（図Ⅲ-2-(イ)-E-4、-5 参照）。

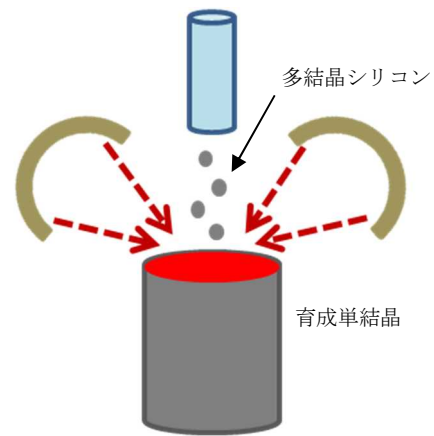
最終的には目標である 220mm 直径品の育成には至っていないが、粒状多結晶シリコンを用いた融液供給機構の開発、基礎技術の確立、そして装置の設計、導入まで完了し、大口径化に対する改善課題と育成メカニズムを明確化することができている。また、特許を含めた実用化に向けた戦略的な構築も進み、本新規技術の確立、そして目標値達成への目途を付けることに成功した。

尚、具体的な粒状多結晶シリコンを用いた方式、および開発成果は「1-2-9. 粒状多結晶シリコン原料を用いた単結晶育成方法の開発」に記載する。



図Ⅲ-2-(イ)-E-4

棒状多結晶シリコンによる育成法



図Ⅲ-2-(イ)-E-5

粒状多結晶シリコンによる育成方法

1-2-3. 導電型

シリコン単結晶の比抵抗値は添加される添加剤の濃度と相関関係にある。本研究開発においては、N型としてリンを添加剤に用い、比抵抗値 $5\Omega\text{cm}$ 品の制御を目指し、当該比抵抗に合致する濃度のリンを添加した単結晶を合成することとした。本質的には原料棒に予め必要量のリンが添加されていることが望ましいが現実問題としては、市販品は無添加品なので、購入後、必要濃度のリン添加が必要となる。

本研究開発では、一般的なシーメンズ法による多結晶シリコン棒（直径 130mm）に溝を設け、ここに CZ（引上げ）法で作製された高濃度リン添加単結晶片をレーザ法で溶着する。溶着する CZ 法育成単結晶片は育成軸方向に沿ってリン濃度が変化しているため育成軸方向を互いに逆にした単結晶片を二枚、一組として溶着し、添加するリン濃度の均質化を図ることに成功した。実際に製造した原料棒を図Ⅲ-2-(イ)-E-6 に示す。

なお、溶着に洗浄プロセスを施すことにより、最終的に汚染の無い多結晶シリコン原料棒の作製技術を確立した。

育成した単結晶は PN 判定器により N 型を有していることを確認した（エヌピーエス(株)製 PN-01 による）。

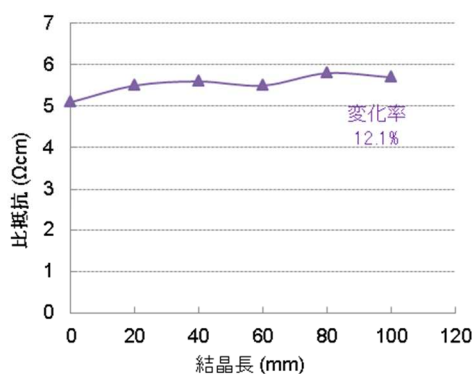


図Ⅲ-2-(イ)-E-6
ドーパントを溶着した
多結晶シリコン棒

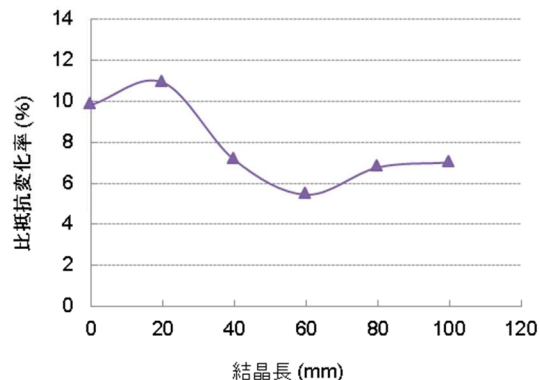
1-2-4. 抵抗面内分布

1-2-3 の手法において、多結晶シリコン原料棒に溶着させる単結晶片のリン添加濃度および単結晶片の量を調整することにより以下の通り最終目標を達成する結晶育成に成功した。

- ・ 中心比抵抗：目標とする $5\Omega\text{cm}$ に対して $5.1\sim 5.8\Omega\text{cm}$ 。
- ・ 比抵抗分布 成長方向：目標とする 15%以内に対して、12.1%。（図Ⅲ-2-(イ)-E-7）
- ・ 比抵抗分布 面内方向：目標とする 12%以内に対して、10.9%以下。（図Ⅲ-2-(イ)-E-8）



図Ⅲ-2-(イ)-E-7 結晶長と比抵抗の関係



図Ⅲ-2-(イ)-E-8 比抵抗変化率と結晶長の関係

注 1) 比抵抗測定装置：四探針抵抗率測定器

注 2) 比抵抗分布： $((\text{比抵抗 max} - \text{比抵抗 min}) / \text{比抵抗 max}) \times 100$

1-2-5. ライフタイム

赤外線 FZ 法により育成したシリコン単結晶を晶癖線に沿って切断し、ラッピング研削およびエッチングによる表面加工変質層の除去後、ライフタイム測定を実施した。目標とする比抵抗 $5 \Omega \text{ cm}$ に対し、比抵抗 $1 \sim 5 \Omega \text{ cm}$ の単結晶における測定結果を表 III-2-(イ)-E-1 に記載する。尚、測定は擬定常状態光伝導度測定法 (QSSPC 法) により行い、SEMI PV13-1111 に準拠した測定を実施した。

結果、各比抵抗におけるライフタイムは最終目標 $7000 \mu \text{ sec}$ を大幅に超えた数値を得ることに成功した。

表 III-2-(イ)-E-1 ライフタイム測定結果

試料	比抵抗 ($\Omega \text{ cm}$)	ライフタイム ($\mu \text{ sec}$)
1	1	7397
2	2	7350
3	5	7962

1-2-6. 結晶欠陥

太陽電池としての性能劣化を抑止するため、本研究開発では点欠陥 (負結晶) ならびに層状欠陥 (離溶)、転位等の結晶欠陥を制御した高品質単結晶の開発を実施した。尚、転位については、後述する「1-2-7. 転位」の項にて詳細を記載する。

1) 点欠陥

シリコン単結晶の点欠陥として、空孔起因の負結晶である COP (Crystal Originated Particle) について、最終目標 $0.1 \text{ 個}/\text{cm}^3$ (大きさ 100 nm 以上) に対する評価結果を以下に記載した。なお、COP の評価を行うには、一般的に種々の測定器、測定対象試料の高度な表面前処理技術、ならびに付随して要する測定環境、雰囲気を制御する設備、そしてノウハウが必要となり、本研究開発期間にて正確な評価をすることは難しい。これに対して、COP と欠陥分布の一致ならびに欠陥発生源が同一であり、且つウェットエッチャントにて評価可能な欠陥として FPD (Flow Pattern Defects) が古くから知られている。従って、本研究開発においても FPD を評価することにより、点欠陥の制御ならびに評価を実施した。

評価は、単結晶のスライス加工後、表層の加工歪層を完全に除去することが必要であり、当該プロセスの確立を併せて行うことで、自社プロセスでの結晶欠陥評価を可能とした。本プロセスにて加工した試料を、セコエッチングと呼ばれるエッチャントで処理し、微分干渉顕微鏡にて表面観察を行うことで、FPD を評価した。

結晶欠陥は種々の結晶育成速度にて行い、個数を密度として換算した結果を図 III-2-(イ)-E-9 に示す。

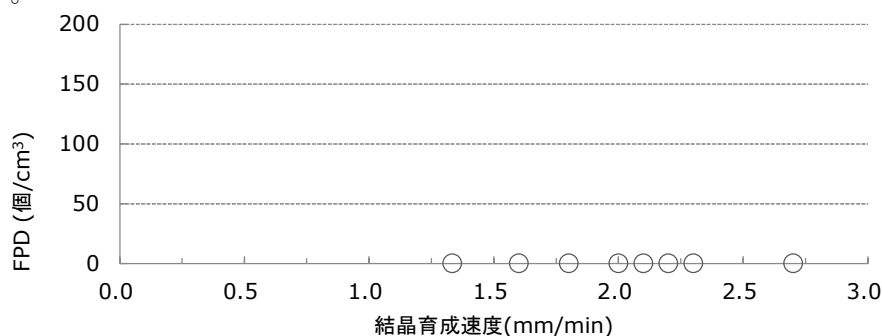


図 III-2-(イ)-E-9 結晶育成速度と FPD の関係

結果、赤外線 FZ 法にて育成された単結晶には、FPD は一切確認されず、 $0 \text{ 個}/\text{cm}^3$ であることを確認した。即ち、赤外線 FZ 法では負結晶であるボイド欠陥の生成要因となる固形不純物の混入を抑止可能であることが確認できた。

2) 層状欠陥

シリコン単結晶に酸化ケイ素が固溶している場合、熱処理を行うと (若しくはデバイスプロセス等で熱処理が行われると)、過飽和状態にある固溶酸化ケイ素が離溶によりシリコン単結晶の (111) 面に沿って層状に析出し、結晶特性を著しく劣化させる事が知られている。

従って、以下熱酸化処理による評価を実施し、実際の層状欠陥の発生状況を評価した。

①評価条件

- ・評価試料：625 μ m片面鏡面ウェハ
- ・試料加工内容：赤外線 FZ 法にて育成した単結晶にスライス、ラップ、エッチング、鏡面研磨、表裏面ウェット洗浄を実施
- ・評価熱処理：780 $^{\circ}$ C \times 4時間 (Dry O₂) +1000 $^{\circ}$ C \times 16時間 (Dry O₂)
(熱処理条件は ASTM F416-91 に準拠する)
- ・欠陥観察：熱処理後のウェハを選択エッチングし、微分干渉顕微鏡観察を実施
- ・観察方法：ASTM F47-94 FIG10, And Table1 準拠

②評価結果

育成したシリコン単結晶のトップ側、ミドル側、テイル側より作製したシリコンウェハについて、各部位 2 枚ずつの評価を実施した。

表 III-2-(イ)-E-2 層状欠陥評価結果

結晶部位	試料	欠陥密度 (個/cm ³)
ヘッド	1	0
	2	0
ミドル	1	0
	2	0
テイル	1	0
	2	0

※微分干渉顕微鏡 \times 200 (Nikon Optiphot200)

結果、結晶中に層状欠陥は一切確認されずに、0 個/cm³であることを確認した。即ち、赤外線 FZ 法で育成した単結晶は固溶する酸化ケイ素が極低密度であり、熱処理により酸化ケイ素の離溶は生じておらず、抑制可能であることが確認できた。

以上より、赤外線 FZ 法により育成した単結晶では、点欠陥（負結晶）ならびに層状欠陥（離溶）の制御が可能であり、高品質のシリコン単結晶を育成できることを実証した。よって、最終目標は問題なく達成された。

1-2-7. 転位

従来の CZ 法、ならびに高周波 FZ 法によるシリコン単結晶育成においてはダッシュ法と呼ばれるネッキング手法を用いて無転位単結晶を製造している。この方法は細い結晶を成長させることにより種子結晶と原料棒を接合した際に導入される転位を外側に誘導して排除し無転位化する手法である。本赤外線 FZ 法においても、ダッシュ法の導入により ϕ 65mm までの単結晶にて無転位化 (0 個/cm²) が可能となった (図 III-2-(イ)-E-10)。

なお、転位の評価は選択エッチング法によるエッチピット観察、及び X 線トポグラフ法により行った (図 III-2-(イ)-E-11)。また、 ϕ 130mm 品が得られているネッキングレス法では転位密度 $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ 個/cm²であることを確認した。



図 III-2-(イ)-E-10 実際のネッキング品



図 III-2-(イ)-E-11 X線トポグラフ像

1-2-8. 酸素成分濃度および炭素成分濃度

赤外線 FZ 法により育成したシリコン単結晶について、酸素成分濃度、炭素成分濃度分析結果を以下に記載する。なお、双方ともにフーリエ変換赤外分光法による分析を行ったが、酸素成分濃度の分析のみは、本赤外線 FZ 法では極低濃度となるが故に、検出下限の低い低温測定

を使用した。結果、酸素成分濃度、炭素成分濃度ともに最終目標を大幅に下回る数値を有していることが確認できた（表Ⅲ-2-(イ)-E-3）。

以上より、本研究開発で試作した赤外線単結晶製造装置は酸素成分濃度、および炭素成分濃度を低濃度とする高純度単結晶育成が可能であることを実証した。

表Ⅲ-2-(イ)-E-3 低温 FT-IR

(Unit : atoms/cm³)

サンプル	酸素成分濃度 ^{※1}	炭素成分濃度 ^{※2}
赤外線 FZ 品	6.9×10 ¹³	1.2×10 ¹⁵

※1 : Bruker 製 120HR

※2 : Bruker 製 IFS-66V/s

1-2-9. 粒状多結晶シリコン原料を用いた単結晶育成方法の開発

1) 粒状多結晶シリコン原料の溶解

育成単結晶への融液の供給は、粒状多結晶シリコンをそのまま供給するのではなく、融液化し供給する方法を使用する。本供給方式を用いることで、原料の溶解と融液の固化が分離され、各々の制御が安定的に行うことができるため、より安定した単結晶育成が実現可能となる。

粒状多結晶シリコンの融液化は、まず原料である粒状多結晶シリコンを、融液供給器へ供給し、供給器を赤外線で加熱し融液を形成させる。形成した融液を断続的に育成単結晶の成長界面へ供給し固化を続けることで、安定した単結晶成長が可能となる。

本研究開発期間においては、上記一連の装置システム（粒状多結晶シリコンの自動供給装置、融液供給器の形状設計、育成単結晶への融液供給機構）の設計、作製、そして装置への組み込みまでを実現した。

結果、直径 100mm、長さ 30mm のシリコン結晶を得ることに成功し、大口径化への糸口を掴むことに成功した（図Ⅲ-2-(イ)-E-12）。

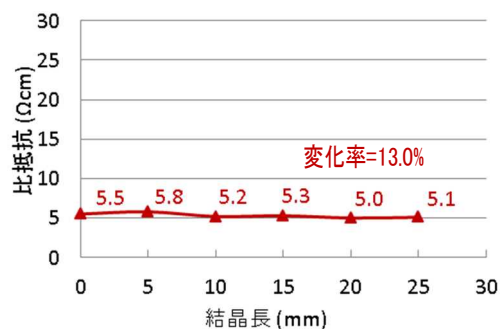


図Ⅲ-2-(イ)-E-12 育成した直径 100mm のシリコン結晶

2) 比抵抗の制御方法

シリコン単結晶中に取り込まれるリン濃度はシリコン融液中の濃度との比率である偏析係数で決定される。即ち、棒状原料を使用した場合と同様に、リンの偏析係数である 0.35 を基に、目標とする比抵抗を達成するために必要なリン濃度を見積もることができる。

本方法では、供給する粒状多結晶シリコン原料に、別途 CZ 法で育成されたリン添加単結晶片を同サイズの粒状形状として粉碎加工し混合した。混合した粒状多結晶シリコン原料を供給器にて同時に溶解し、結晶成長界面へ供給、固化させることにより結晶中の比抵抗制御を可能とし、粒状リン添加単結晶片のリン添加濃度、混合する量、等を調整することにより、棒状原料使用時と同様に、任意の組成のリン添加単結晶を自由に育成できる。結果、目標とする 5Ωcm に対して 5.0～5.8Ωcm の単結晶を育成することに成功した。



※変化率 : ((比抵抗 max - 比抵抗 min) / (比抵抗 max)) × 100

図Ⅲ-2-(イ)-E-13 比抵抗と結晶長の関係

2. 実用化・事業化見通し

シリコン単結晶を用いた太陽電池について、目下のところ最も効率が高いとされているセルはリンを添加したN型シリコン単結晶とアモルファスシリコンを併せたHIT型に電極を裏側にのみ配置したバックコンタクト方式を組み合わせたHBC型と呼ばれる方式であり、これにはN型単結晶基板が必要とされている。

また、太陽電池として使用される素材はシリコン結晶以外にもあるが、依然としてシリコン単結晶は高い占有率を示しており、将来に涉って主要な基材であると言われている。市場規模としても拡大の一途を辿ると期待されている。それでも太陽電池の発電コストは依然として高いのが現状であり、さらなるコスト削減策が求められている。従って、安価で高性能なシリコン単結晶基板製造方法の確立は極めて重要な課題であり、本研究開発の成果はこのようなニーズに合致したものである。

従来のCZ法もしくはキャスト法は一方向凝固法と呼ばれる方法に属しており、これらの方法でリンを添加した結晶を育成するとリンの分配係数は0.35であり、得られた単結晶中のリン濃度は成長に伴って急激に変化するため、最適なリン濃度（比抵抗値）品のみを使用すると製品の歩留まりが低く、製造コストが極めて高額となる。そこで製造コストを下げるために比抵抗値範囲を広げて使用しているのが現状である。さらには使用する石英ルツボから固溶する酸化ケイ素による影響（酸素析出、酸化励起積層欠陥）や結晶中に内在する結晶欠陥（COP、転位）により性能劣化を招いているのが現状である。他方、高周波FZ法では原理的には均質組成の単結晶を育成可能であるが、特別に調整された高価なポリシリコン原料棒が必要であり、コスト的に安価に製造することは困難である。

本研究開発において大型赤外線単結晶製造装置で育成された直径130mmの単結晶では、現在までに得られている比抵抗値、ライフタイム値、転位、結晶欠陥、酸素および炭素成分濃度は目標値を大幅に超過達成しており、本赤外線FZ法で現状のCZ法、ならびに一方向凝固法の結晶が抱える問題を解決できる高品質単結晶が製造可能であることが実証された。

また、本赤外線FZ法ではルツボなどの消耗品が不要であり、必要電力量も半分以下と推定されるので、製造コストは大幅に低くなる上に最適組成で均質組成の高品質単結晶が製造可能であることが実証された。従って、従来法よりも遥かに高品質品を安価に製造、販売することが可能であり実用化の可能性は極めて高い。

なお、現在までに育成できているN型シリコン単結晶は直径が130mmに止まっているが、本研究開発では直径220mmの大口径化に対する技術的な課題はクリアにされており、赤外線の照射方向、分布制御などの要素技術を最適化することにより大口径化の達成、及び実用化は可能であると確信している。また、並行して開発を進めている粒状多結晶シリコンによる新たな原料供給法に関しても、基礎的な育成技術も確立し、実用化に向け特許を含めた戦略的な構築も進み、本新規技術の実用化の目途が立つまでに至った。即ち、大口径化シリコン単結晶育成方法としての粒状多結晶シリコン供給法の有用性が証明され、今後の実用化と更なる大口径化が可能となった。

3. 波及効果

シリコンは多くの単結晶材料の中でも最も市場規模の大きい素材であり太陽電池産業以外にもLSI用、パワー半導体用など多岐な分野において多用されている。他に光通信分野、医療機器分野、など多くの産業分野でさまざまな単結晶材料が利用されているが主な製法は引上法（CZ法）である。しかしシリコン単結晶育成の例でも示したように引上法はルツボを使用して一方向凝固法により単結晶を得る方法であるため、ルツボから不純物が製品中に混入してしまう他、添加物濃度を均質にできない本源的な欠点がある。

赤外線FZ法はルツボを使用しないために安価に高純度の単結晶製造が可能であり、かつ添加物濃度を最適組成で均質化できる方法であるが、従来は育成可能な最大直径がせいぜい30mm程度とされていた。本研究開発では、すでに直径130mm品の合成に成功しており、更には新たな原料供給手段となる粒状原料供給方式の技術確立も進めており、直径220mm品の合成法もまもなく確立されると予測される。このことは、シリコン以外の多くの単結晶材料製造法への適用が可能となることであり、極めて大きな波及効果が期待される。

4. 今後の展開

本赤外線 FZ 法は世界的にも全く新しい大型単結晶製造法であり、基本特許は株式会社クリスタルシステムが国内外において取得している（日本、米国、ヨーロッパ、中国、韓国）。それでも基本特許以外に多くのノウハウを内包しており、知的所有権の海外への流出を抑止するためにも当面は装置の外販を行わず、シリコン単結晶材料のみの製造、販売を想定している。

尚、事業化に際しては製造工場の新設のみではなく、既存の半導体工場を活用して早期の生産規模拡大を図ることも検討する。

さらには本研究開発事業で開発した大型赤外線 FZ 法は太陽電池産業以外のシリコン市況、具体的にはパワー半導体、センサー、MEMS 業界への進出も可能であるとともに、シリコン以外の光材料、蛍光体材料などの単結晶製造にも最適な方法でありこれらの産業への普及についても積極的に推進していく。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	2 (0)	2 (2)	2 (2)	0 (0)	6 (4)
論文	0	0	0	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	0 (0)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	0 (0)	3 (0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(株)クリスタルシステム	特願2016-128546	国内	2016年6月29日	国内優先 みなし取 下げ	単結晶製造装置および単結晶製造方法	進藤勇
2	(株)クリスタルシステム	特願 2016-148306	海外	2016年7月28日	国内優先 みなし取 下げ	単結晶製造装置	進藤勇
3	(株)クリスタルシステム	PCT/JP2017/20227	海外	2017年5月31日	審査中	単結晶製造装置および単結晶製造方法	進藤勇
4	(株)クリスタルシステム	PCT/JP2017/20228	海外	2017年5月31日	審査中	単結晶製造装置	進藤勇
5	(株)クリスタルシステム	PCT/JP2018/13162	海外	2018年3月29日	審査中	単結晶製造装置および単結晶製造方法	進藤勇
6	(株)クリスタルシステム	PCT/JP2018/13163	海外	2018年3月29日	審査中	単結晶製造装置および単結晶製造方法	進藤勇

【論文】

なし

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	佐藤剛, 仁田原智	(株)クリスタルシステム	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	口頭発表、ポスター発表 (2016 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会)	2016 年 10 月 31 日
2	佐藤剛	(株)クリスタルシステム	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	口頭発表、ポスター発表 (2017 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会)	2017 年 9 月 22 日
3	仁田原智 佐藤剛	(株)クリスタルシステム	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	口頭発表、ポスター発表 (2018 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会)	2018 年 10 月 4 日

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

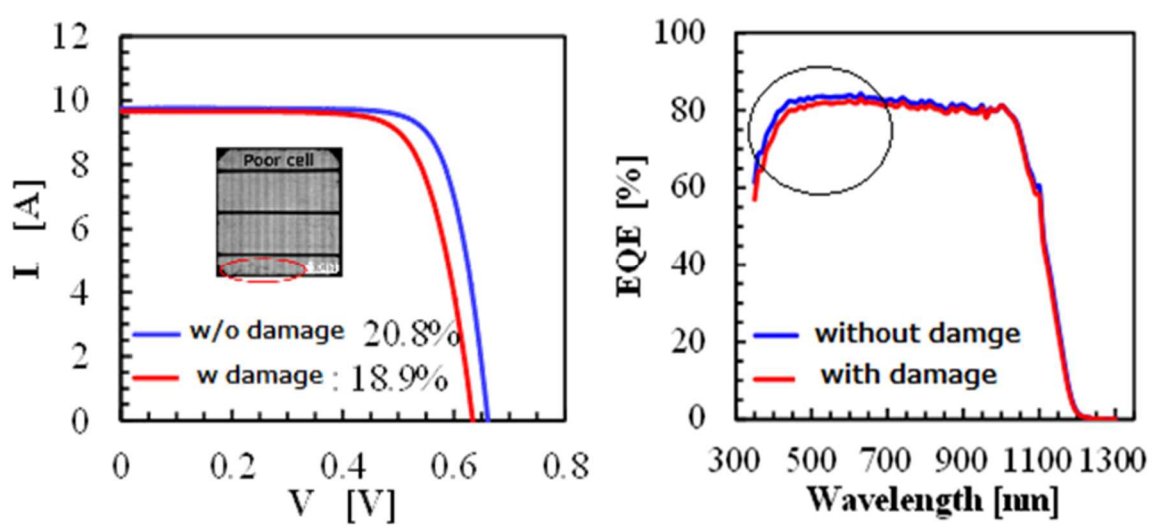
F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築（コマツ NTC 株式会社）

1. 成果詳細

(1) 結晶シリコン太陽電池の発電効率向上（目標：セル効率 25%以上）

(1) - 1. 太陽電池セル変換効率への影響

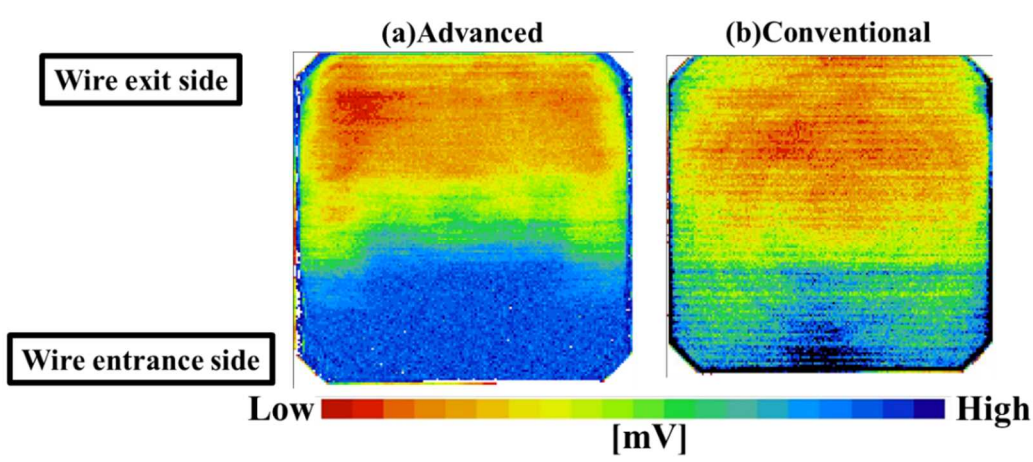
連携先である豊田工業大学の太陽電池セル試作品において、発電効率の異なる太陽電池セルが確認された。この発電効率の悪化原因について、連携大学である明治大学および豊田工業大学とともに解析した。その結果、外部量子効率での短波長側での効率が低下していることがわかった。また、分光感度マッピングやPLイメージングでの可視化により、ウェハスライスプロセスにて生じるダメージやソーマーク、形状不良などのマクロ/マイクロ両視点での問題であることを確認できた。そのほか、一部の不良については、ウェハスライスプロセス前後工程での問題であることも確認し、これらの解決するスライス条件を構築した。（図Ⅲ-2-(イ)-F-1 参照）



図Ⅲ-2-(イ)-F-1 試作セルの太陽電池特性（左図：I-V 特性 右図：外部量子効率）

(1) - 2. ウェハ表面の結晶状態

面状態の大きく異なる試料に対し、 μ -PCR 法により面内のダメージの分布を評価するとともに、ラマン分光法による結晶評価を実施した。なお、 μ -PCR 測定において、励起光源の波長、マッピングサイズをそれぞれ 349 nm、1 mm とし、マイクロ波の反射光のピーク値をマッピングした。図Ⅲ-2-(イ)-F-2 に μ -PCR 法によって得られたマイクロ波反射光のピーク値のマップを示す。マップから、ダメージが改良された高面品位 (Advanced) と低面品位 (Conventional) の試料で異なることがわかり、高面品位の優位性が確認された。



図Ⅲ-2-(イ)-F-2 μ -PCR 法マッピング結果

(1) - 3. スライスダメージ評価

スライスプロセスで生じる表面のダメージが生じると、キャリアライフタイムへ影響を及ぼし、太陽電池性能の低下が懸念される。一般的には、太陽電池セル製造工程で、ダメージ層を除去するエッチングが採用されているが、このエッチング量の過不足によって、太陽電池性能への悪影響や製造コストが嵩むことにつながる。準備した面品位の異なる試料を国立研究開発法人産業技術総合研究所へ展開し、スライス条件の違いにおけるウェハ表面に対するダメージ評価を、マイノリティキャリアライフタイム (MCLT) がシリコン結晶状態まで回復する率を表面からのエッチング除去量で測定した。その結果を図 III-2-(イ)-F-3 に示す。高面品位のウェハは、片面 3 μm の除去量でほぼ MCLT は回復し、低面品位のものは 12 μm のダメージ層を除去しなければならず、高面品位スライス技術の優位性によりエッチング量の低減が可能となるものと考えられる。

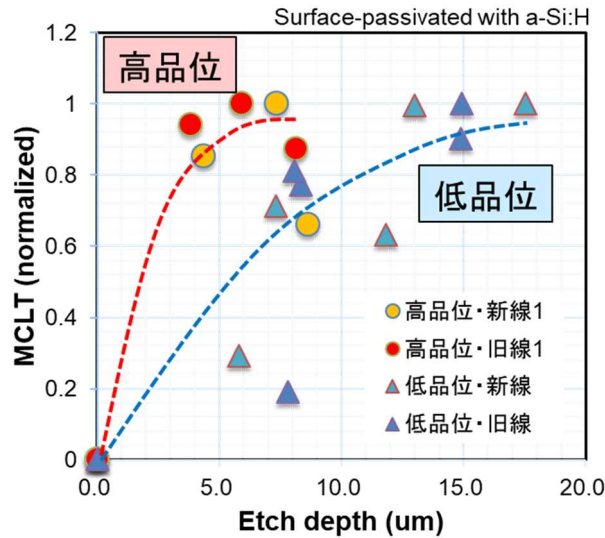


図 III-2-(イ)-F-3 ダメージエッチング除去量とマイノリティキャリアライフタイム (MCLT) 回復率

(1) - 4. 薄型結晶シリコン太陽電池の試作評価

薄板基板による太陽電池性能への影響は、国立研究開発法人産業技術総合研究所に協力いただき、厚さ 40 μm から 400 μm までの SHJ 型太陽電池の試作評価および改善検討により、薄板太陽電池の課題と品質指針を実験的に求めた。その結果を図 III-2-(イ)-F-4 に示す。厚さ 50 μm 級の超薄型セルとしては世界トップレベルの値となる発電効率 22.2%を確認した (厚さ 55 μm にて)。しかし J_{sc} および FF の低下が厚さ 80 μm 以下で顕著に低下し、発電効率を制限する結果となった。この効率低下は、各種シミュレーションの結果、TCO における寄生吸収削減と表面パッシベーション向上が必要であると判断された。

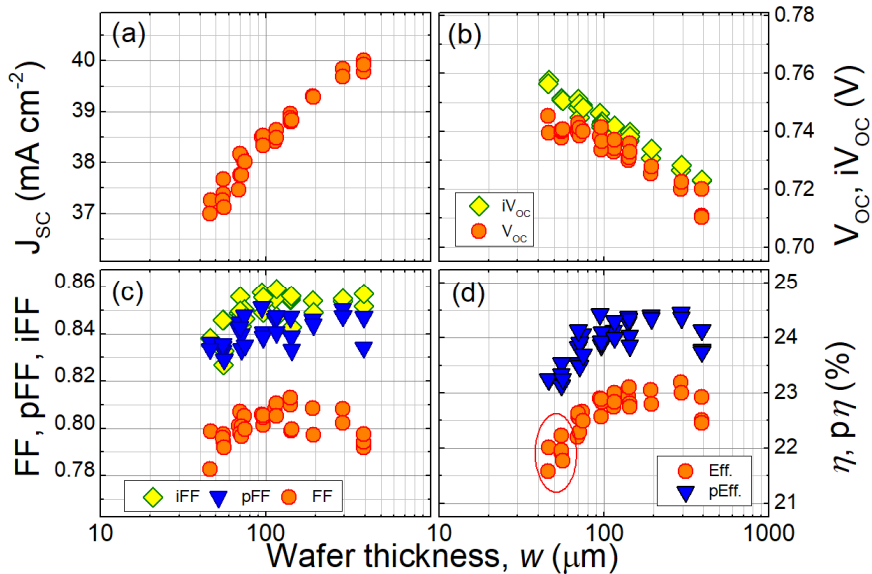


図 III-2-(イ)-F-4 小サイズ SHJ 太陽電池セル性能の厚さ依存性結果まとめ

(1) - 5. 156mm 角極薄 N 型 Bifacial PERT セル試作評価

ワイヤソーを使って切り出した極薄ウェハを用いて N 型 Bifacial PERT セルを試作した結果を図 III-2-(イ)-F-5 に示す。この実験においては、セル厚を 186 μm から 97 μm に薄型化した場合、 η_{front} は若干低下するのに対して η_{rear} は向上していることが確認できた。したがって、セル厚低減に伴って裏面効率が向上する傾向にあることが確認できた。このようにセル厚低減に伴って裏面効率が向上するとすれば、N 型 Bifacial セルを使った両面受光モジュールにおいてウェハを薄型化することは単にモジュールコストを低減するだけでなく、発電量を向上させる効果があることになり、発電コスト低減に大きく寄与することになる。このような知見が得られたことは大きな成果と言える。

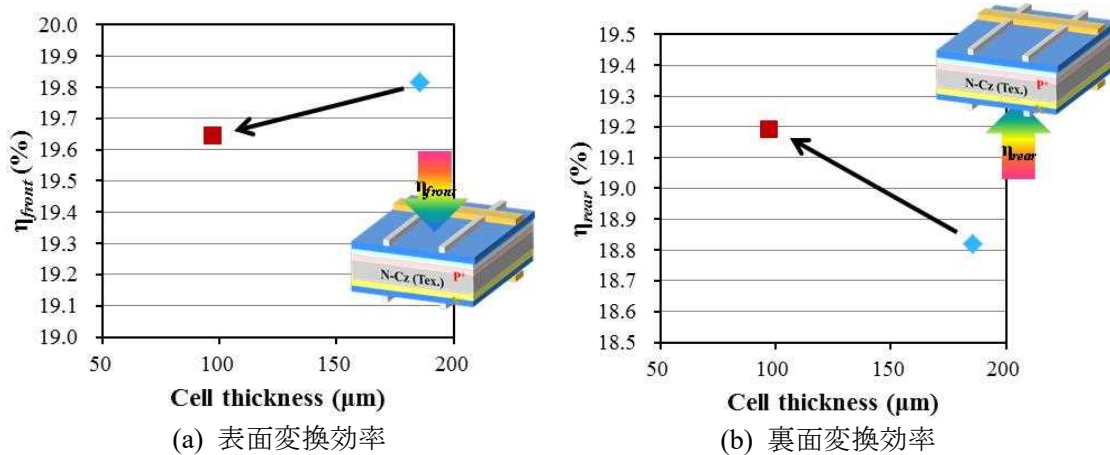


図 III-2-(イ)-F-5 ワイヤソーにより薄型化した N 型 Bifacial PERT セルのセル厚に対する効率依存性

(1) - 6. 156mm 角極薄 SHJ セル試作評価

上記の拡散系セルに加え、薄型スライスウェハを使った SHJ セル試作も行い、セル厚とセル特性の関係性を調査した。その結果、117 μm 厚セルで V_{oc} 0.737V、91 μm 厚セルで効率 19.4% を確認し、さらに最薄で 66 μm 厚セル試作にも成功した。図 III-2-(イ)-F-6 に示したように J_{sc} 、 V_{oc} はセル厚が薄くなるにしたがって低下する傾向が見られた。 V_{oc} はセル厚低減に伴って最高値は上昇する傾向がみられるもののはらつきが大きくなる。これらの変化を総合した結果、ウェハ薄型化に伴って効率は低下した。

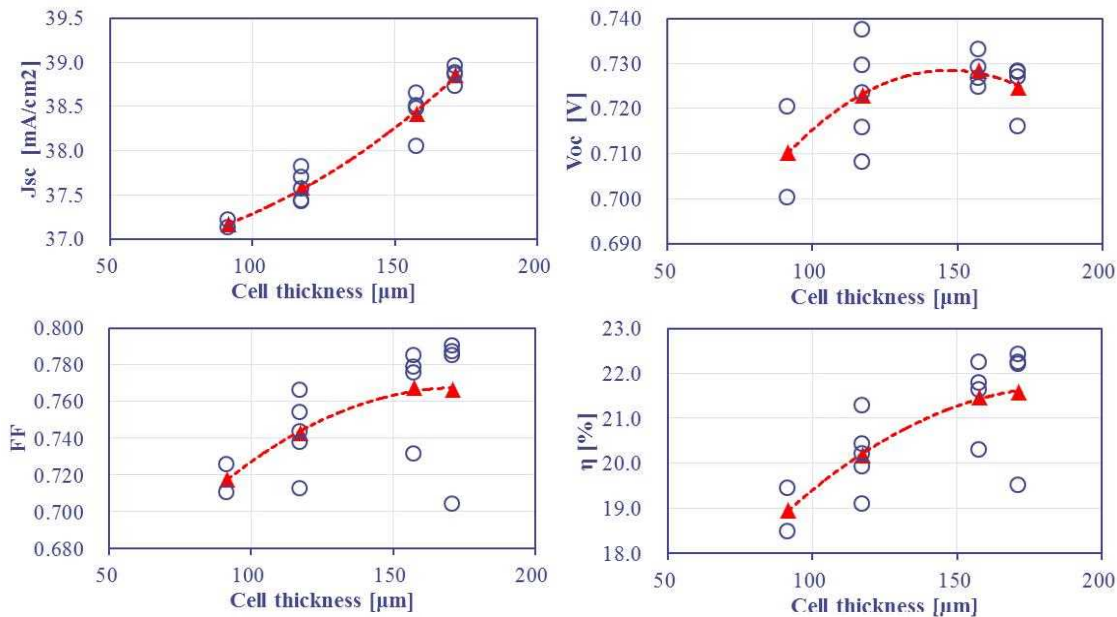


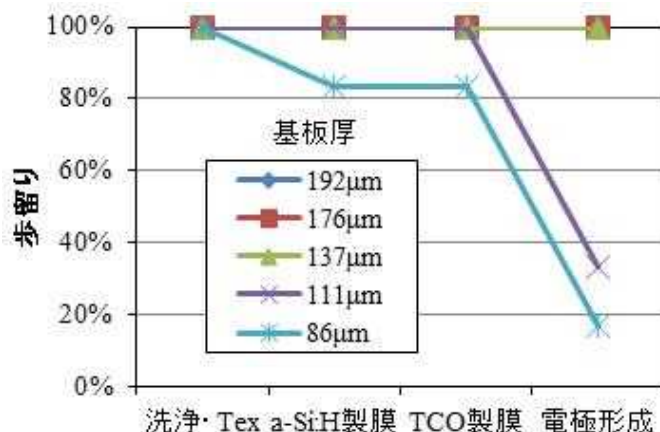
図 III-2-(イ)-F-6 SHJ セル特性のセル厚依存性

また、上記のセル試作における割れ歩留りが基板厚さによってどのような影響を受けるか、調査した。図Ⅲ-2-(イ)-F-7は工程毎の歩留りを示しているが、137 μm 厚までは100%であった歩留りが111 μm 厚では電極形成工程（搬送・検査を含む）で大幅に低下し、さらに86 μm 厚ではアモルファス製膜工程でも割れが発生していることがわかる。

電極形成工程で発生した割れの原因をさらに細かく分析したところ、

- ・手作業での搬送割れが発生。外周クラックの影響も確認。
- ・工程装置の薄板化対応必要。印刷機ガイド、吸着板平坦度、バキューム穴サイズ、IV測定器の電圧測定ピン、搬送（ベルト・チェーン）などの調整が必要。
- ・電極印刷パラメータ（スキージ速度や圧力、角等度）の最適化が必要。

などの課題が明らかとなった。したがって100 μm 以下の極薄基板を使ってセル生産を行う場合、スライダダメージ（クラック）の低減とセル製造装置の技術開発も必要であることを確認した。

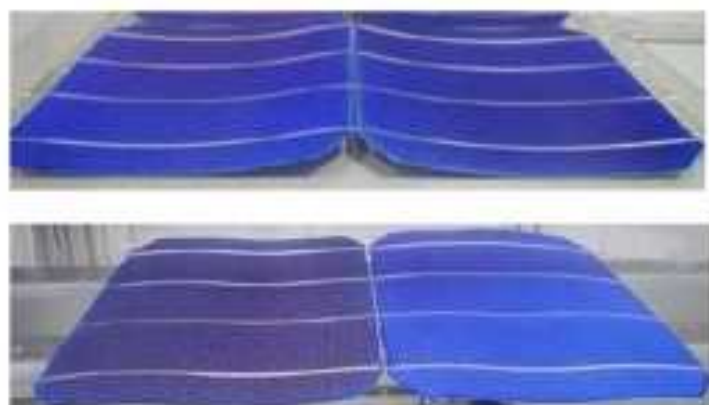


図Ⅲ-2-(イ)-F-7 SHJセル工程毎歩留りの基板厚による影響

(1) - 7. 薄型結晶シリコン太陽電池モジュール試作

薄板基板を用いた太陽電池モジュールの試作は、国立研究開発法人産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所（FREA）に協力頂き評価した。その結果、厚さ80 μm のP型両面受光セル製作時に搬送系で半数以上のセルが割れ、歩留まりが悪化した。

また、両面強化ガラスのモジュール試作を行ったが、タブストリング作成時や導電性フィルム接続時において、太陽電池基板の反りが確認された（図Ⅲ-2-(イ)-F-8参照）。フィルム加圧条件の最適化などの課題が明確となった。



図Ⅲ-2-(イ)-F-8 タブストリング作成時のセル反り

(2) シリコン材料歩留まり向上技術 (目標：切断ピッチ 0.110mm)

(2) - 1. 固定砥粒ワイヤの細線化によるカーフロス削減

スライス時の切り代 (カーフロス) を極小化する固定砥粒ワイヤの細線化を行うことで、結晶の材料歩留まりが向上する。この極細線固定砥粒ワイヤを使用したスライスにおいて、開発当初はワイヤの切断軌跡が蛇行し、隣り合うウェハを切り落とした結果、ワイヤが加工中に破断してしまう加工不良が多発した。そのため、固定砥粒ワイヤのダイヤモンド砥粒径や集中度、ワイヤに砥粒を付着させる Ni メッキ厚さなどを調整するとともに、使用するクーラントの探索や供給方法、またスライス条件 (ワーク送り速度およびワイヤ走行条件) などの条件探索を繰り返した。その結果、中間目標および最終目標で掲げたカーフロス下においても、市場要求のウェハスライス精度を満足する結果が得られた (図 III-2-(イ)-F-9 参照)。

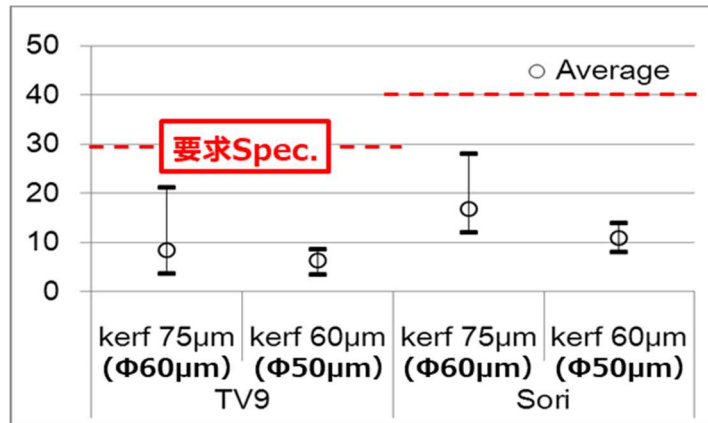


図 III-2-(イ)-F-9 目標カーフロス下におけるウェハ切断精度結果

また、更なる固定砥粒ワイヤの細線化を狙い、芯線径 $\phi 40\mu\text{m}$ での切断試験も実施した。そのワイヤでの切断では、実カーフロスは図 III-2-(イ)-F-10 のように約 $50\mu\text{m}$ であり、よりシリコン材料の高歩留まり化に寄与できる。ウェハ品質については図 III-2-(イ)-F-11 のように厚さばらつきを示す TV9 やそのり最大の値は、図 III-2-(イ)-F-9 に示した精度と比較すると悪化しているが、本プロジェクトの最終目標であったカーフロス $60\mu\text{m}$ を大幅に削減できる成果が得られた。

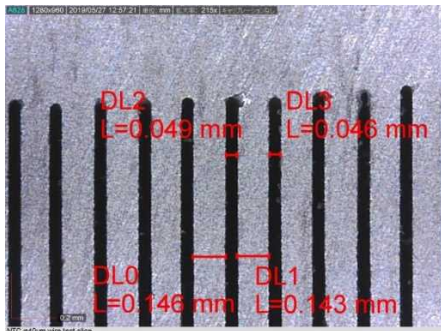


図 III-2-(イ)-F-10 カーフロス $50\mu\text{m}$ 切断面

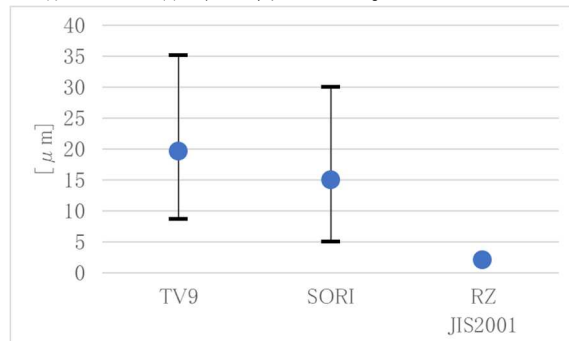


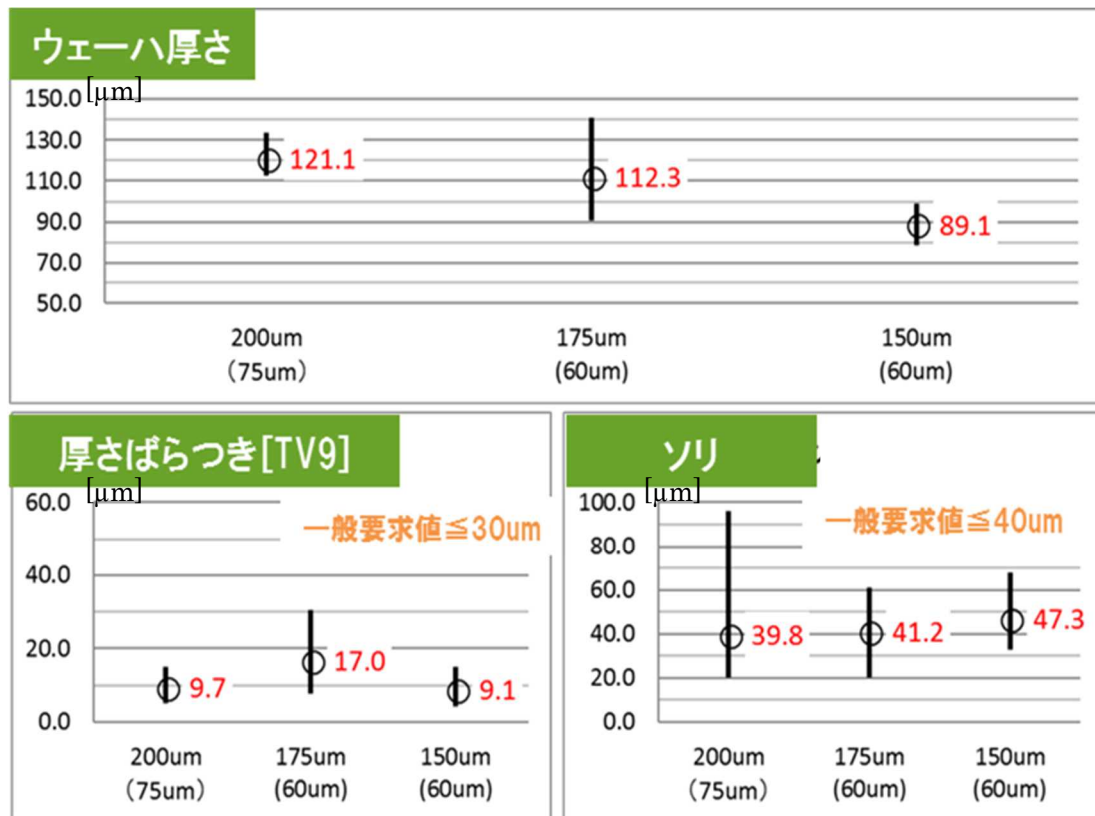
図 III-2-(イ)-F-11 カーフロス $50\mu\text{m}$ 切断精度結果

(2) - 2. 狭切断ピッチスライスによる材料歩留まり向上およびウェハ薄板化

結晶シリコン太陽電池のシリコン材料コストを削減するには、切断ピッチの狭小化によりシリコンインゴットからの基板取得枚数の増加させる必要がある。すなわち、スライス時の切り代 (カーフロス) を極小化と、基板となるシリコンウェハ薄板化が必須となる。

切断ピッチの狭小化については、ワイヤソー主要部品であるメインローラに狭いピッチを形成し、ワイヤの切断ピッチを狭小化させる必要がある。この狭ピッチ溝形成技術において、ピッチ 0.110mm までの溝形成が可能となる技術を構築した。

図 III-2-(イ)-F-12 に、狭切断ピッチスライス技術の切断精度結果を示す。狭ピッチスライス技術においては、切断時の真直性を保つためにワイヤ仕様やスライス条件の最適化を図った。その結果、最終目標には未達となったが、切断ピッチが 0.150mm までの加工技術を構築した。また、その条件で切り出されるウェハ厚さは約 $90\mu\text{m}$ であった。



図III-2-(イ)-F-12 狭切断ピッチスライス技術の切断精度例

(3) スライス製造コスト削減および発電コスト低減効果

(3) - 1. 開発成果による発電コスト低減効果

これまで、スライスプロセスにおける細線化による省カーフロスおよび狭切断ピッチによる薄板化にてシリコン材料の使用量削減や、固定砥粒ワイヤの使用量削減に代表されるスライスコストの削減についての成果を述べてきた。本研究では、固定砥粒ワイヤの使用量削減や加工速度の高速化を推進し、スライスプロセスにおけるシリコン原材料を除く製造コストは、12.5 円/枚と大幅なコスト削減を達成した。

その製造コスト削減に対する発電コストの低減効果を 2015 年の発電コストを基本に算出した。それぞれの発電コスト低減値は、省カーフロスで 0.43 円/kWh、狭切断ピッチで 0.38 円/kWh、スライスコスト削減で 0.52 円/kWh となり、開発成果を合計すると、1.33 円/kWh の低減に寄与することがわかった。

また、シリコン市場取引価格は、単結晶ウェハで 47.9 円/枚 (2020 年 1 月) となっている。そのウェハ単価において、シリコン材料費のほか、変動費および固定費の割合を中国大手スライスメーカーに聞き取り調査した。その結果を基に、本研究開発成果の効果を試算した結果、ウェハ単価は 32.5 円/枚まで削減できることが分かった。

(3) - 2. 将来技術予測による低減シナリオ

一方、太陽光発電における発電コストは大量導入にともない、モジュール価格の低下のほかにも、BOS コストが低減されているものと推察できる。また、設備利用率も向上しており、日本国内の推定発電コストはメガソーラなどの非住宅用において、2020 年で既に 14 円/kWh を下回っているものと推察される。この発電コスト下におけるスライスプロセスでの狭切断ピッチの開発成果を織り込んだ発電コスト低減効果は、0.22 円/kWh となる。

また、これまで NEDO が取り組んだ結晶シリコン太陽電池の各研究成果を鑑みると、太陽電池セルおよびモジュール効率の向上や長寿命化が大いに期待できる。その成果が量産展開されると、2025 年に発電コストは 7 円/kWh を下回る 6.69 円/kWh となり、ジェネレーションパリティを達成できるものと見込む。

2. 実用化・事業化見通し

当社は、2009年以降より固定砥粒用マルチワイヤソーを商品化し、市場ポジションを確立してきたが、後進メーカーの廉価版ワイヤソー市場投入により価格競争に晒され、急激にシェアを奪われつつある。本開発によって得られた極細固定砥粒ワイヤ加工技術は、優位性を確保したものと考えられる。また、連携先と実施した技術開発である発電効率向上加工技術や薄板加工技術による太陽電池試作実績は、到底後進メーカーが達成できない技術と位置づけることができ、廉価版ワイヤソーとの差別化が可能な新機種投入を計画中であり、シェア奪還を狙う。

3. 波及効果

結晶シリコン太陽電池のスライスプロセスに必要な固定砥粒ワイヤにおいても、これまで日本国産ワイヤが圧倒的なシェアを有していた。しかし、現在ではワイヤソー同様に廉価版ワイヤが市場投入されており、そのシェアを徐々に奪われつつある。本開発は、ワイヤ仕様の最適化も加工技術の構築の一環として行っており、国内ワイヤメーカーの技術力向上とマーケットシェア確保を担っている。

また、これまで量産化への移行が進まなかった超薄型結晶シリコン太陽電池の実現においても、アカデミアとの連携により明らかにしてきたことで、実現できることが示唆できている。その具現化においては、搬送などの付帯技術も改善が必須であり、産業の活性化につながる。

しいては、得られた薄板太陽電池基板の特徴である抗折強度向上による3D湾曲対応や軽量化は、移動体や強度の弱い屋根への需要が見込まれる新用途への展開が可能で、太陽光発電の市場開拓に繋がることが期待される。

4. 今後の展開

本研究開発にて低コストシリコンウェハのスライス加工を実現し、この構築した技術の一部は量産加工に適用され、結晶シリコン太陽電池の製造コスト削減に貢献してきた。また、超薄型結晶シリコン太陽電池の基盤技術開発をプロジェクト体制により推進したことで、更なる発電コスト低減に向けた課題や施策を示した。

この成果により、発電コストの目標7円/kWh(2025年)の実現に資する要素技術を確認することができた。本成果で提示した課題を解決し、実用化に向けた量産化開発を推進していく必要がある。また、更なる発電コスト低減に向け、シリコンウェハの大口径化などが検討されており、スライスプロセスはより高難度化するが、本研究開発で得られた成果を適応させ、導入量拡大を推進していく。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	2 (2)	0	0	0	2 (2)
論文	0	0	0	1	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	1 (1)	4 (2)	9 (6)	2 (1)	3 (2)	19 (12)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	コマツNTC株式会社	特願 2017-013394	国内 および 中国	2017/1/27	公開	ワイヤソー及びワイヤソーによるワークの切断加工方法	河津知之 他
2	コマツNTC株式会社	特願 2017-045111	国内 および 中国	2017/3/9	公開 中国登録	ワイヤソー及びワイヤソーによるワークの切断加工方法	河津知之 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Hitoshi Sai ^{1,2} , Hiroshi Umishio ^{1,3} , Takuya Matsui ^{1,2} , Shota Nunomura ^{1,2} , Tomoyuki Kawatasu ⁴ , Hidetaka Takato ² , and Koji Matsubara ^{1,2}	1 産総研(太陽光) 2 産総研(FREA) 3 筑波大 4 コマツNTC	Impact of silicon wafer thickness on photovoltaic performance of crystalline silicon heterojunction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB10	有	2018年7月3日

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	K. Nakamura ¹ , A. Tanizaki ² , K. Okamoto ³ , Y. Kawamoto ⁴ , Y. Ohshita ⁵	1 Meiji University 2 Komatsu NTC Ltd. 3 Mitsuboshi Diamond Industrial Co., Ltd. 4 Noritake Co., Ltd. 5 Toyota Technological Institute	Mono Crystalline Si PERC using Less Than 100 μm-thick Wafer by MWS Slicing	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015年11月20日
2	鈴木 涼太 ¹ 小島 拓人 ¹ 木下 晃輔 ¹ 河津 知之 ² 中村 京太郎 ¹ 大下 祥雄 ³ 小椋 厚志 ¹	1 明治大理工 2 コマツNTC株式会社 3 豊田工大	PL イメージングを用いた結晶シリコン太陽電池のスライスダメージ評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016年9月15日

3	鈴木 涼太 ¹ 小島 拓人 ¹ 木下 晃輔 ¹ 河津 知之 ² 中村 京太郎 ¹ 大下 祥雄 ³ 小椋 厚志 ¹	1 明治大理工 2 コマツ NTC 株 式会社 3 豊田工大	Evaluation of Saw Damages with Diamond-Coated Wire in Crystalline Silicon Solar Cell by Photoluminescence Imaging	PVSEC-26, Singapore	2016 年 10 月 26 日
4	Kyotaro Nakamura ¹ , Tomoyuki Kawatsu ² , Kazuo Muramatsu ³ and Yoshio Ohshita ⁴	1 Meiji University, 2 Komatsu NTC Ltd., 3 NAMICS CORPORATION, 4 Toyota Technological Institute	P-type Bi-facial PERT Solar Cell using Less Than 100 μ m thick CZ Wafer and Cu Paste	PVSEC-26, Singapore	2016 年 10 月 27 日
5	齋均 ¹ , 海汐寛史 ¹ , 布村正太 ¹ , 松井卓矢 ¹ , 河津知之 ² , 高遠秀尚 ¹ , 松原浩司 ¹	1 産総研, 2 コマツ NTC	極薄ウェハを用いた a-Si:H/c- Si ヘテロ接合太陽電池の検討	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会	2017 年 3 月 17 日
6	Yoshio Ohshita ¹ , Takuto Kojima ² , Ryota Suzuki ² , Kosuke Kinoshita ² , Tomoyuki Kawatsu ³ , Kyotaro Nakamura ² , and Atsushi Ogura ²	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji University, 3 Komatsu NTC Ltd.	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	2017 年 6 月 25 日
7	H. Sai ¹ , H. Umishio ¹ , T. Matsui ¹ , S. Nunomura ¹ , H. Takato ¹ , T. Kawatsu ² , and K. Matsubara ¹	1 産総研, 2 コマツ NTC	Potential of a a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with very thin wafers	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017 年 6 月 28 日
8	Yoshio Ohshita ¹ , Takuto Kojima ² , Ryota Suzuki ² , Kosuke Kinoshita ² , Tomoyuki Kawatsu ³ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Ogura ²	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji University, 3 Komatsu NTC Ltd.	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), June 25-30, 2017, Washington D.C, U. S.	2017 年 6 月 29 日
9	河津 知之、 長井 俊樹、 溝口 由佳、 野田 大輔	コマツ NTC 株 式会社	結晶シリコン太陽電池の発電 コスト低減スライシング技術	学振 175 委員会 第 14 回「次世代の太陽光発 電システム」シンポジ ウム	2017 年 7 月 21 日

10	齋均 ¹ 海汐寛史 ¹ 松井卓矢 ¹ 布村正太 ¹ 河津知之 ² 高遠秀尚 ¹ 松原浩司 ¹	1 産総研 2 コマツ NTC	極薄ウェハを用いた a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池の検討(2)	2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017年 9月 6日
11	Y. Ohshita ¹ , T. Kojima, T. Kawatsu ³ , K. Kinoshita, K. Nakamura ¹ , A. Ogura ²	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji University, 3 Komatsu NTC Ltd.	Low Kerf Loss (<100 μm) High Quality Silicon Wafer Fabricated by Advanced Diamond Wire Saw	EU PVSEC 2017, Amsterdam	2017年 9月 25日
12	Tomoyuki Kawatsu ¹ , Yoshio Ohshita ² , Kyotaro Nakamura ³ and Atsushi Ogura ³	1 Komatsu NTC Ltd. 2 Toyota Technological Institute 3 Meiji University	THIN WAFER AND LOW KERF-LOSS DIAMOND MULTI-WIRE SAW	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017年 11月 14日
13	齋均 ¹ 松井卓矢 ¹ 布村正太 ¹ 海汐寛史 ¹ 河津知之 ² 高遠秀尚 ¹ 松原浩司 ¹	1 産総研 2 コマツ NTC	自立・超薄型ウェハによる高効率結晶シリコン太陽電池の実現に向けて	第65回応用物理学会春季学術講演会(招待講演)	2018年 3月 17日
14	齋均 ¹ 松井卓矢 ¹ 布村正太 ¹ 河津知之 ² 高遠秀尚 ¹ 松原浩司 ¹	1 産総研 2 コマツ NTC	Impact of wafer thickness on the photovoltaic performance in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells	8th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (Silicon PV 2018)	2018年 3月 19日
15	Kyotaro Nakamura ¹ , Tomoyuki Kawatsu ² , Takefumi Kamioka ³ , and Yoshio Ohshita ¹	1 Toyota Technological Institute 2 Komatsu NTC Ltd. 3 Meiji University	Performance Improvement of Front Junction N-type PERT Solar Cell by Wafer Thinning	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018年 6月 12日
16	原豊 ¹ 横川凌 ^{1,5} 大西康平 ¹ 神岡武文 ¹ 中村京太郎 ² 大下祥雄 ² 河津知之 ³ 長井俊樹 ³ 山田昇 ⁴ 宮下幸雄 ⁴ 小椋厚志 ^{1,6}	1 明治大理工 2 豊田工大 3 コマツ NTC 4 長岡技大 5 学振 DC 6 再生可能エネルギー研究インスティテュート	単結晶 Si 太陽電池の薄型化へ向けたスライスダメージ評価	第67回応用物理学会春季学術講演会	2019年 3月 13日
17	N. Yamada ¹ , K. Onishi ² , R. Yokogawa ² , T. Nishihara ² , T. Kamioka ² , K. Nakamura ³ , T. Kawatsu ⁴ ,	1 Nagaoka University of Technology 2 Meiji University 3 Toyota Technological	Characterization of bendable crystalline Si solar cells made by ultra-thin wafer slicing	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019年 11月 4日

	T. Nagai ⁴ , Y. Kotake ¹ , Y. Miyashita ¹ , Y. Ohshita ³ , A. Ogura ²	Institute 4 Komatsu NTC Ltd.			
18	小竹 裕也 ¹ , 長井 俊樹 ² , 河津 知之 ² , 小椋 厚志 ³ , 大下 祥雄 ⁴ , 宮下 幸雄 ¹ , 山田 昇 ¹	1 長岡技科大 2 コマツ NTC 3 明治大学 4 豊田工業大 学	マルチワイヤソーで切断され た薄型単結晶 Si ウェハの機械 特性評価	日本機械学会 [No. 207- 1] 北陸信越支部 第 57 期総会・講演会	2020 年 3 月 7 日
19	Yutaka Hara ¹ , Kohei Onishi ¹ , Ryo Yokogawa ^{1,2} , Tappei Nishihara ¹ , Takefumi Kamioka ¹ , Kyotaro Nakamura ³ , Yoshio Ohshita ³ , Tomoyuki Kawatsu ⁴ , Toshiki Nagai ⁴ , Noboru Yamada ⁵ , Yukio Miyashita ⁵ , and Atsushi Ogura ^{1,6}	1 Meiji University 2 JSPS Research Fellow DC 3 Toyota Technological Institute 4 Komatsu NTC 5 Nagaoka University of Technology 6 Meiji Renewable Energy Laboratory	Evaluation of Sawing Damage for Thin Flexible Silicon Solar Cells	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-47)	2020 年 6 月 15 日

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御（株式会社トクヤマ）

1. 成果詳細

1-1. 不純物および欠陥の影響把握と制御化

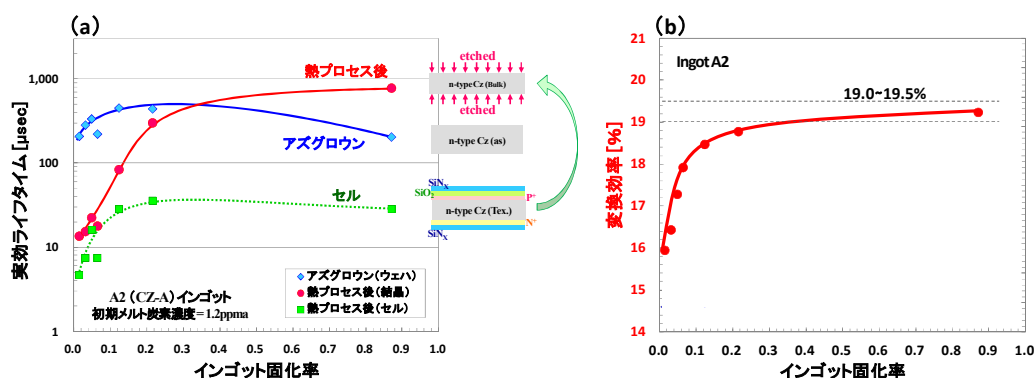
金属および炭素不純物の太陽電池セル性能に及ぼす影響を調べるため、不純物濃度を変えた単結晶インゴットを引上げ、ウェハスライス加工、太陽電池セル（平均変換効率が 19.5%の両面受光型セル）の試作を行ない、セル特性を評価した。また、太陽電池セル製造のプロセス中でシリコン基板（ウェハ）の品質がどのように変化していくのかをライフタイム測定により評価した。さらに、太陽電池性能を低下させるキラ欠陥を特定・解析するため、透過電子顕微鏡等による観察を実施した。

単結晶インゴットは、チョクラルスキー（CZ）法で直径 8~9 インチ、全長 1500~2000mm、実用サイズの n 型単結晶を引上げた。図Ⅲ-2-(イ)-G-1 にインゴットの外観を示す。ドーパントにはリンを添加し、インゴットのトップからボトムまでの比抵抗が 3.1~0.7 $\Omega \cdot \text{cm}$ （リン濃度 27~118ppba）となるように調整した。引上げ条件は従来技術（CZ-A）と本研究開発の成果である開発技術（CZ-B）の 2 種を採用した。



図Ⅲ-2-(イ)-G-1 引上げた単結晶インゴット

図Ⅲ-2-(イ)-G-2(a)に、一般的な太陽電池用インゴット（後述の A2）の全長のライフタイム変化、アズグロウン結晶（アズスライスウェハ）、太陽電池セル、熱プロセス後の結晶バルク（太陽電池セルの表面層をエッチング除去した単結晶バルク=太陽電池セル中のウェハ）の実効ライフタイムを、図(b)には太陽電池の変換効率を、インゴット固化率に対してプロットした。熱プロセス後のライフタイムが変換効率に対応している。インゴット全長で見ると、トップ側（引上げ初期）のライフタイムは熱プロセスにより、アズグロウンよりも大きく低下し、ボトム側（引上げ後半）では高くなっている。

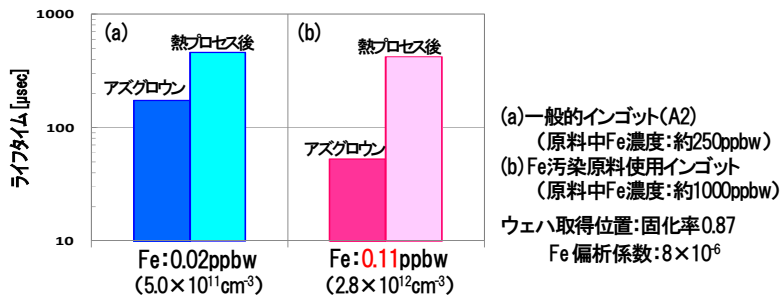


図Ⅲ-2-(イ)-G-2 太陽電池プロセスにおけるインゴット全長のライフタイムと変換効率の変化

1-1-1. 金属不純物の影響

アズグロウン結晶のボトム側でのライフタイム低下の原因は、金属不純物の濃縮と考えられる。原料ポリシリコンに鉄（Fe）を微量添加して、ライフタイムへの影響を調べた（図Ⅲ-2-(イ)-G-3）。インゴットのボトム側（固化率 0.87）の同位置から取得したウェハのライフタイムを比較すると、アズグロウン結晶では Fe 汚染（0.11ppbw）により低下したが、熱プロセス後には差異は見られない。ある程度の金属汚染であれば、太陽電池製造のリン拡散工程でゲッターリングされ、変換効率への影響は非常に小さい。

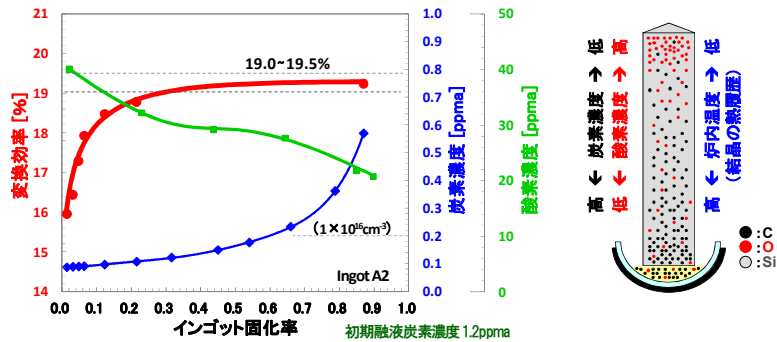
単結晶中に含まれる金属不純物は、その殆どはインゴット製造工程における汚染である。トクヤマグループ会社のシーメンス法により製造したポリシリコン中の金属不純物の濃度は数 ppbw 未満であり、また金属不純物の偏析係数が 10^{-4} ~ 10^{-6} のオーダーであることから、原料ポリシリコン由来の金属不純物が単結晶シリコン中に取り込まれる量は極めて微量で、ライフタイム等の太陽電池性能に及ぼす影響が極めて小さいことを確認した。



図III-2-(イ)-G-3 熱プロセス前後のライフタイム変化

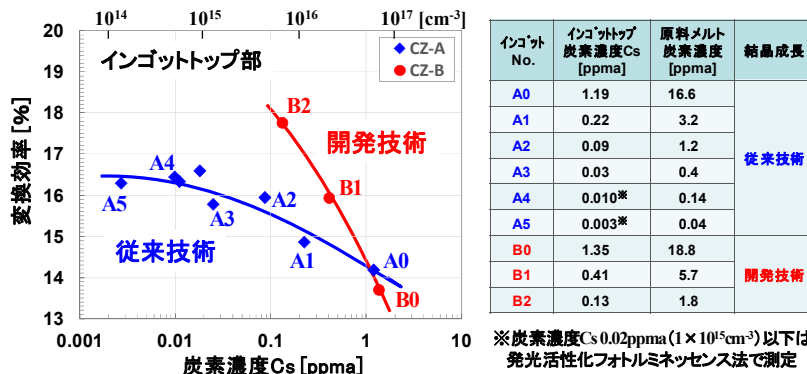
1-1-2. 炭素不純物の影響とキラ欠陥の制御

熱プロセスによるインゴットトップ側のライフタイム低下に着目した。図III-2-(イ)-G-4 にインゴット全長における炭素濃度（置換型炭素 Cs）、酸素濃度（格子間酸素 Oi）、太陽電池セルの変換効率の変化を示す。インゴット中の炭素濃度は偏析によって成長初期には低いのが、成長の後半で急激に上昇している。逆に、酸素濃度はインゴットのトップ側で高い。トップ側のライフタイム低下は、炭素不純物を核に成長する酸素析出物が関係している。



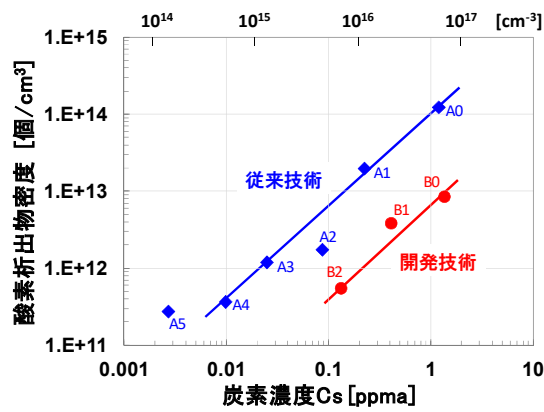
図III-2-(イ)-G-4 インゴット全長の変換効率と炭素濃度、酸素濃度の関係

本共同研究で開発した結晶成長技術（開発技術）と従来技術で、炭素濃度の異なる原料ポリシリコンを使用してインゴットを引上げ、トップ側の同一部位（酸素濃度が高く、酸素析出の影響の顕著な部位）から取得したウェハから作製したn型両面受光セルの変換効率を比較した（図III-2-(イ)-G-5）。開発技術によるインゴットは、トップ部において従来技術のインゴットよりも変換効率が高く、結晶中の炭素濃度が低くなるほどその効果も大きく優れている。



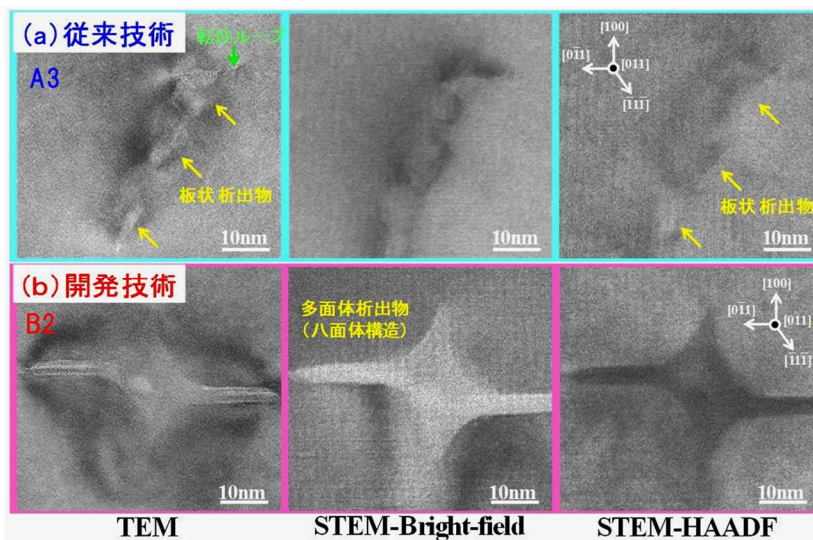
図III-2-(イ)-G-5 インゴットトップ部の変換効率と炭素濃度の関係

開発技術で上げたインゴットの変換効率が優れる理由は以下のとおりである。太陽電池製造の熱プロセスを経てセル中に成長した酸素析出物を透過電子顕微鏡で観察した。図III-2-(イ)-G-5 に対応するシリコン結晶中の酸素析出物の数密度と炭素濃度の関係を図III-2-(イ)-G-6 に示す。結晶中の炭素濃度が低いほど、酸素析出物密度も低くなるが、開発技術による単結晶ウェハでは、炭素濃度に対する酸素析出物密度が従来技術の単結晶ウェハに比べて約1桁低い。

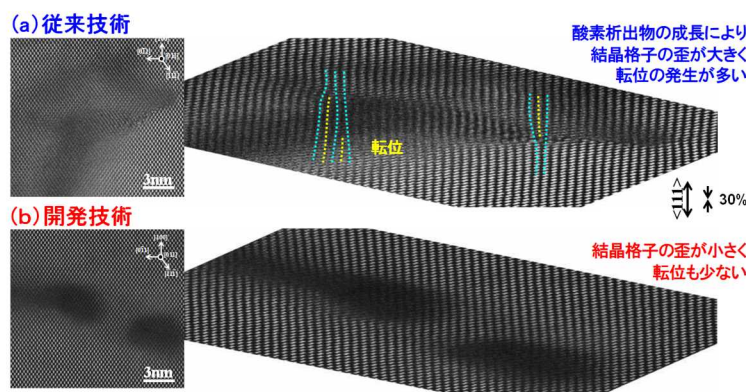


図Ⅲ-2-(イ)-G-6 酸素析出物密度と炭素濃度の関係

高分解能透過電子顕微鏡で観察した酸素析出物の形態を図Ⅲ-2-(イ)-G-7 に示す。これらの結晶欠陥が酸素析出物であることはEDS 元素分析により確認した。従来技術による単結晶ウェハ中に成長した酸素析出物が薄い板状であるのに対して、本研究成果である開発技術では酸素析出物の形態が八面体（多面体）構造であることが特徴である。



図Ⅲ-2-(イ)-G-7 酸素析出物の透過電子顕微鏡像（2,000,000倍）



図Ⅲ-2-(イ)-G-8 酸素析出物の STEM-HAADF 像（8,000,000倍、 $\langle 111 \rangle$ 方向に像を圧縮）

図Ⅲ-2-(イ)-G-8 は、さらに高倍率の高角散乱環状暗視野走査透過電子顕微鏡像（STEM-HAADF）を比較した。図は原子配列を観やすくするため、像を $\langle 111 \rangle$ 方向に30%まで圧縮した画像である。従来技術の結晶は酸素析出物の成長に伴う歪が大きく、転位の発生も多い。一方の開発技術は、歪の小さい八面体酸素析出物が成長するため、転位の発生も極めて少ない。太陽電池製造の熱プロセスの温度域（～

1000℃) で成長する酸素析出物の形態は一般に板状であり、八面体の酸素析出物は 1100℃以上の高温で成長すると言われている。開発した結晶成長技術（特願 2018-526343）は、通常の板状析出物が成長する熱プロセスにおいても八面体析出物が成長するように、インゴット成長工程においてアズグロウン結晶中に形成する析出核が制御されていると考えている。その結果、熱プロセスで成長する酸素析出物の数密度と形態が制御でき、歪や転位の少ない八面体構造にすることで、インゴットトップ部でもライフタイムや変換効率の高い単結晶ウェハが得られる。

炭素を核に成長する酸素析出物がキラー欠陥となり、結晶のライフタイムや太陽電池の変換効率に悪影響を及ぼす。炭素濃度と結晶成長条件により、酸素析出物の数密度と形態が変化し、ライフタイムや変換効率が変わることを明らかにした。

太陽電池製造の熱プロセスを経ることで、単結晶ウェハ中に酸素析出物が成長し、転位等の二次的な欠陥が発生することを高分解能透過電子顕微鏡により観察した。半導体分野では、シリコン基板に高温・長時間の熱処理で 100~1000nm のサイズに成長した酸素析出物を観察解析しているが、本共同研究では、実際の太陽電池セル中に短時間の熱プロセスで成長した 7~30nm 程度の微小な析出初期の酸素析出物の形態を観察した。このような実際の太陽電池のウェハ内部に成長した酸素析出物の形態を解析した例はこれまでに無かった。

1-2. ライフタイム目標値および下限値の達成

1-2-1. ライフタイム目標値 1000μsec

市場で取引される単結晶インゴットやウェハのライフタイム値は、太陽電池製造の熱プロセスを経ないアズグロウン結晶のライフタイム値である。一般的な n 型単結晶のライフタイムは 100μsec 以上と言われているが、ライフタイムは比抵抗、すなわちドーパント濃度によっても変化する（高抵抗ほど高ライフタイム）。CZ 法単結晶の場合、結晶引上げ中に偏析によってドーパント濃度が変化するため、インゴットのトップ~ボトムでも変化する。本研究では、インゴットのトップ~ボトムの比抵抗が 3~1Ω・cm の範囲の比較的低抵抗の結晶を作製して評価した。ライフタイムの測定は、明治大学に導入したバルクライフタイム測定装置 Sinton BLS-1 を使用した。

熱処理を受けていないアズグロウンの単結晶インゴットのライフタイム目標値を 1000μsec 以上とした。一般的な太陽電池用ポリシリコンを原料として従来技術で成長させたインゴット（トップ部の炭素濃度 0.066ppma=3.3×10¹⁵cm⁻³）の長手方向のライフタイム分布は 300~900μsec であったが、炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用し、前述の開発した成長技術で得られたインゴット（トップ部の炭素濃度 0.012ppma=6.0×10¹⁴cm⁻³）のライフタイムは全長にわたって 2000μsec (2msec) 以上であり、ライフタイム目標値の 1000μsec 以上を達成した（図 III-2-(イ)-G-9）。従来技術による一般的なインゴットに比べて、ライフタイムは約 3 倍以上に向上した。

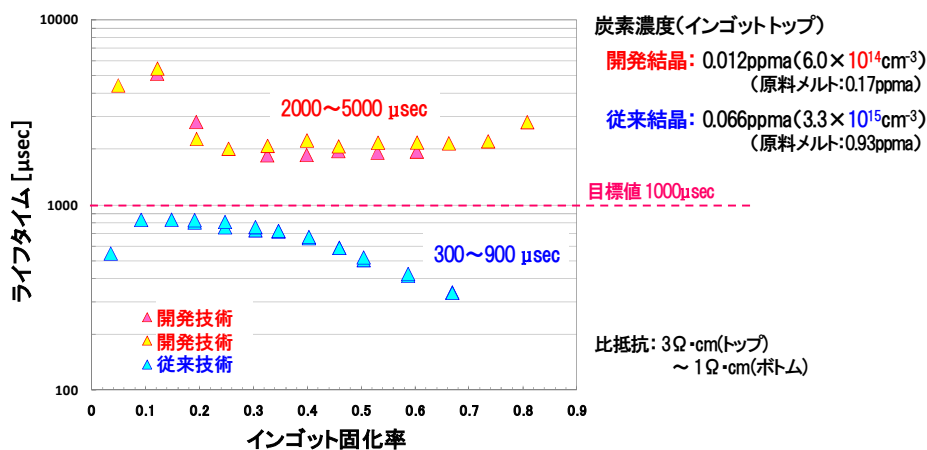
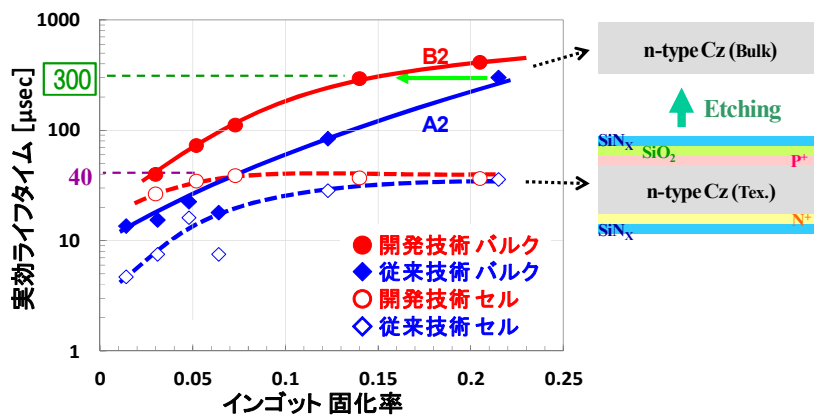


図 III-2-(イ)-G-9 単結晶インゴット全長のライフタイム分布

1-2-2. ライフタイム下限値 300 μ sec 以上

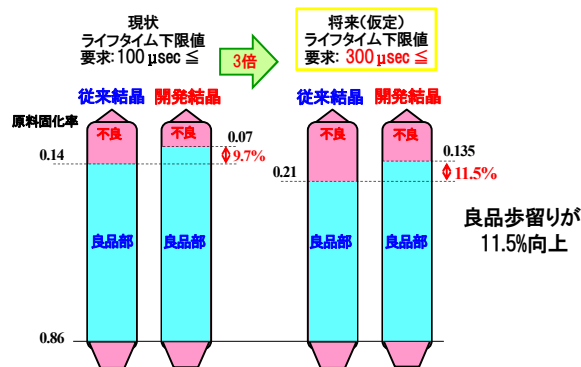
太陽電池製造の熱プロセスを経るとウェハのライフタイムは大きく変化した。特に結晶中の酸素濃度が高く、結晶成長中に CZ 炉内で徐冷されて酸素析出核の多いインゴットのトップ側は熱プロセス後のライフタイム低下が著しかった (図III-2-(イ)-G-2)。

図III-2-(イ)-G-10 には、炭素濃度が同程度で、従来技術 A2 と開発技術 B2 のインゴットトップ側の太陽電池セルの実効ライフタイム (破線) と、セル表面の拡散層およびバッシベーション層をエッチングにより除去した結晶バルクのライフタイム (実線) の関係を示す。現状の太陽電池では、セルの実効ライフタイムはセル設計で決まる限界値で頭打ちするが、セル中の結晶バルクのライフタイムはもっと高いということがわかった。本研究で評価した太陽電池セルの限界値は約 40 μ sec であり、熱プロセス後のバルクのライフタイムが 100 μ sec 以上であれば、セルの実効ライフタイムは限界値 40 μ sec に達することがわかる。すなわち、セルの実効ライフタイムが限界値になるバルク (ウェハ) の熱プロセス後のライフタイムの下限値が 100 μ sec である。ウェハのライフタイムは、熱プロセス後にこの下限値以上であればよい。言い換えれば、同じセル設計ではライフタイムの高いウェハを使用しても、変換効率は一定値以上に高くなることはない。このような単結晶の品質 (ライフタイム) と太陽電池性能 (変換効率) との関係を確認することができた。このような関係から、現在の太陽電池製造においては、単結晶インゴットのライフタイムの極端に低い部位を除いて使用すれば、ライフタイムにばらつきがあっても、変換効率が一定の安定した太陽電池を製造することができている。



図III-2-(イ)-G-10 熱プロセス後の実効ライフタイム (バルクとセルの比較)

また図III-2-(イ)-G-10 は、太陽電池技術が向上して変換効率が向上してくれば、すなわち、上記のセルの限界値が高くなれば、ウェハ (結晶バルク) の品質の差が顕在化してくることを示唆している。将来の変換効率の向上を考慮して、必要なバルクのライフタイム下限値を3倍の300 μ sec と仮定した。この場合、従来技術のインゴットではトップ側の固化率 0.21 以上の部位が良品となるが、開発した結晶成長技術によれば、固化率 0.135 以上の部位が良品となり、300 μ sec 以上の直胴良品部が長くなる。本実験結果では、直胴長を固化率 0.86 まで成長させたインゴットにおいて、直胴良品部が固化率 0.21 以上 (すなわち、直胴良品部 0.21~0.86) から、固化率 0.135 以上 (0.135~0.86) に改善され、固化率で 0.075、直胴良品部の歩留りとして 11.5%向上した (図III-2-(イ)-G-11)。



図III-2-(イ)-G-11 開発技術によるインゴットの良品歩留りの向上

図Ⅲ-2-(イ)-G-10は、トップ部の炭素濃度が約0.1ppmaと比較的高いインゴットの結果であるが、開発技術により直胴部の良品歩留まりが向上してコストダウンに効果のあることが証明された。特に、インゴット引上げ回数とともに偏析によって原料融液中の炭素濃度が濃縮されるマルチプリング法においては、開発した結晶成長技術の適用が非常に有効である。また前述のように、開発した結晶成長技術では、使用する原料ポリシリコンの不純物炭素濃度が低くなるほど、高ライフタイムの単結晶を得ることができる。したがって、より高い変換効率を目指した太陽電池開発のためのウェハとしても期待できる。

1-3. 2020年発電コスト目標14円/kWhに対する貢献度の試算

豊田工業大学と明治大学による2020年発電コスト目標14円/kWhに至るコスト試算では、NEDOプロジェクトにおける結晶成長、スライス加工、セルプロセスの各技術開発成果を活用することによってモジュール製造原価を23.4円/W、発電コストを4.0円/kWh低減する。さらに、BOSコストの低減および設備利用率向上を織り込むことにより、発電コスト14円/kWh達成が可能と見込んでいる(表Ⅲ-2-(イ)-G-1)。ここで、結晶成長技術開発による発電コスト低減は0.2円/kWhの試算である。本コスト試算プログラムを使用して、研究成果の2020年発電コスト目標14円/kWhに対する貢献度を試算した。

表Ⅲ-2-(イ)-G-1 豊田工大・明治大による発電コスト14円/kWh試算(メガソーラー高効率)

	インゴット製造経費(円/kg)	スライス加工費(円/枚)	ウェハ厚+カープロス(mm)	セル搭載材料費(円/枚)	セル効率	PCS・BOS・施工費・販売経費(円/kWh)	設備利用率	モジュール製造原価(円/W)	発電コスト(円/kWh)	モジュール製造原価低減効果(円/W)	発電コスト低減効果(円/kWh)
2015年見積り	¥2,600							¥61.4	¥24.2		
結晶成長技術開発によるインゴット製造経費低減		¥47.0	0.350	¥40.5	20.0%	¥223,500	13.0%	¥58.6	¥24.0	¥2.8	¥0.2
スライス加工技術開発によるスライス加工費低減								¥52.9	¥23.5	¥5.7	¥0.4
スライス加工技術開発によるウェハ薄型・カープロス低減								¥46.1	¥23.0	¥6.8	¥0.5
セルプロセス開発によるセル搭載材料費低減	¥2,000	¥22.0	0.200	¥30.0	23.0%	¥136,335		¥43.7	¥22.9	¥2.4	¥0.2
セルプロセス開発によるセル効率向上								¥38.0	¥20.2	¥5.7	¥2.7
生産効果(経験曲線)によるBOSコスト低減								¥38.0	¥15.0	¥0.0	¥5.2
設備利用率向上(2015年実績)							14.0%	¥38.0	¥14.0	¥0.0	¥1.1

1-3-1. インゴットのライフタイム向上

図Ⅲ-2-(イ)-G-9に示すように、従来技術で上げたインゴットのライフタイム300~900μsecに対し、開発した技術によるインゴットのライフタイムは全長で2000μsec以上に向上した。ウェハのライフタイム向上がセルの変換効率にどのくらい寄与するのかを、豊田工業大学のPC1Dデバイスシミュレーションにより、n型両面受光セルとして見積もった。従来技術のライフタイム平均600μsecで得られる変換効率が20.5%であるのに対して、開発技術によるライフタイム2000μsecでは20.8%、変換効率で0.3%向上する。上記コスト試算プログラムによれば、2015年見積りを基準に、変換効率が20.5%から20.8%に向上した場合、モジュール製造原価で0.9円/W、発電コストで0.31円/kWhのコスト低減効果を見込むことができる。

1-3-2. インゴットの良品歩留まり向上

図Ⅲ-2-(イ)-G-10に示すように、開発した結晶成長技術により、太陽電池製造の熱プロセス後のウェハのライフタイムが、従来技術のウェハよりも高くなる。太陽電池プロセスの技術開発により変換効率が向上し、熱プロセス後のライフタイムが300μsec以上のウェハが必要になったと仮定する。本実験の結果では、従来技術では固化率0.21未満のインゴットトップ側は不良、開発技術によれば不良部が0.135未満に低減(直胴良品部の歩留まりが11.5%向上)した。このインゴット直胴歩留りの改善11.5%を、コスト試算プログラムを用いて試算した結果、モジュール製造原価で1.0円/W、発電コストで0.07円/kWhのコスト低減効果を見込むことができる。また、インゴット原価を199円/kg、ウェハ価格を4.0円/枚低減する効果を見込むことができる。

尚、試算においては2015年見積りのうちインゴット収率のみを変更し、セルの変換効率は20%のままとした。実際には、ライフタイムの高いウェハが要求されるのは、セルの変換効率が高くなった場合であるため、変換効率向上による発電コスト低減も見込むことができる。変換効率の向上は、材料コスト低減よりも発電コスト低減への寄与が大きいいため、インゴット収率低下の影響を十分に吸収できる。

上記のインゴットのライフタイム向上分と、良品歩留まり向上分とを合わせると、モジュール製造原価を目標23.4円/Wに対して1.9円/W低減する効果を見込める。また、発電コストの目標14円/kWhのうちNEDOプロジェクトの技術開発分4.0円/kWh、さらに結晶成長技術開発による発電コスト低減0.2円/kWhの試算に対して、0.38円/kWh低減する効果を見込むことができる。

太陽電池セルの性能に及ぼす、原料ポリシリコンと単結晶シリコンインゴット・ウェハの品質の影響を明らかにすることができた。本研究開発の開始時には、これらの関係が不明確であったが、インゴット引上げ実験と太陽電池セル試作評価、結晶内部の欠陥解析をとおして、それぞれの品質・性能の関係を解明した。トクヤマが製造する太陽電池用ポリシリコンは、現在の高効率太陽電池に対して十分高い品質（純度）を有していることを確認できた。単結晶インゴットは、その直胴の引上げ後半においては十分高い品質（ライフタイム）を有しているものの、トップ側においては、太陽電池製造の熱プロセスで炭素を核に成長する酸素析出物がキラ欠陥となり、ウェハ品質（ライフタイム）を著しく低下させる。本研究開発では、酸素析出物の形態・数密度とライフタイム・変換効率との関係を調べ、インゴットトップ部においても高ライフタイムの得られるCZ法結晶成長技術を開発した。2017年度の間目標を1年前倒しで達成した。発電コストを2030年に7円/kWhの実現に資する技術開発目標は達成できなかったが、2020年に14円/kWhの実現に資する技術の開発には成功した。

2. 実用化・事業化見通し

本研究開発の開始時においては、太陽電池に要求される原料ポリシリコンの品質レベルが把握できていなかったが、本検討の結果、トクヤマのグループ会社で製造するポリシリコンの金属および炭素不純物に関する品質が、太陽電池に要求されるレベルを十分満足していることが確認できた。しかしながら、トクヤマとしては、太陽電池用ポリシリコンの事業を譲渡・撤退したことにより、開発した技術の事業化は困難になった。尚、事業譲渡先では、太陽電池用ポリシリコンの製造・販売の事業を継続している。

本研究開発で得られた単結晶シリコン中での不純物の挙動や結晶品質に及ぼす影響等の成果は、トクヤマの主要事業である半導体用ポリシリコンの品質においても重要な知見であり十分活かされている。

3. 波及効果

熱プロセス後の単結晶ウェハのライフタイムが、太陽電池セルの変換効率に関係することが解った。現状の太陽電池ではその影響は未だ小さいものの、将来のさらなる変換効率向上においては、単結晶インゴット・ウェハの低炭素濃度化と酸素析出物等の欠陥制御による結晶品質の改良が必要であることを示唆した。

本研究開発の成果である結晶成長技術による単結晶インゴットおよびスライス加工したウェハ、太陽電池セル評価したサンプルおよび測定・解析データ等は、本プロジェクトの連携先である明治大学、豊田工業大学に引き継ぎ、酸素析出メカニズムの解明や高変換効率太陽電池の試作、研究に活用することで、発電コスト低減の目標達成に寄与する。また、試作したインゴットおよびウェハは、大学コンソーシアムの豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学へ提供した。

高分解能透過電子顕微鏡を用いて、太陽電池セル中に形成した10nmレベルの酸素析出物の構造を捉えた。太陽電池や半導体のシリコン結晶における酸素析出挙動の研究に有用な手法である。

また、図III-2-(イ)-G-5に示した低炭素インゴット(A4, A5)の炭素濃度は、明治大学で開発した発光活性化フォトルミネッセンス法で測定した。従来の赤外分光法では測定困難な低濃度の測定が可能であった。パワー半導体では、単結晶シリコンのさらなる低炭素濃度化が望まれており、有効な評価技術である。

4. 今後の展開

トクヤマとしては太陽電池用ポリシリコンの事業を譲渡・撤退したが、半導体用ポリシリコンは主要事業であり、さらなる高品質化を継続中である。本研究開発で得られた炭素不純物と酸素析出の挙動に関する知見や結晶成長技術は、半導体用シリコンにも共通する技術であるため、出願した知的財産権の権利化を進めている。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	1 (0)	9 (8)	0 (0)	0 (0)	10 (8)
論文	0	0	2	1	0	3
研究発表・講演 (うち国際会議)	3 (1)	9 (3)	3 (2)	0 (0)	0 (0)	15 (6)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	トクヤマ	特願 2016-134375	国内	2016/07/06	取下 →PCT	単結晶シリコン板状体	正田勲 橘昇二
2	トクヤマ	PCT/JP2017/024235	PCT	2017/06/30	移行	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
3	トクヤマ	特願 2018-526343	国内	2017/06/30	登録	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
4	トクヤマ	2018-7037710	韓国	2017/06/30	登録	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
5	トクヤマ	201780041617X	中国	2017/06/30	登録	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
6	トクヤマ	11201900068P	シンガポール	2017/06/30	登録	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
7	トクヤマ	112017003436.1	ドイツ	2017/06/30	公開	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
8	トクヤマ	16/315216	アメリカ	2017/06/30	公開	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二
9	トクヤマ	201917000521	インド	2017/06/30	公開	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橘昇二

10	トクヤマ	106122354	台湾	2017/07/04	公開	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 橋昇二
----	------	-----------	----	------------	----	---------------------	------------

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	T. Tachibana, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, T. Shimoda, I. Masada, E. Nishijima	AIST, Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effects of thermal budget in n-type bifacial solar cell fabrication processes on effective lifetime of crystalline silicon	American Institute of Physics Advances, 7, 045111 (2017)	有	2017/04/12
2	H. Kiuchi, M. Tajima, F. Higuchi, A. Ogura, N. Iida, S. Tachibana, I. Masada, E. Nishijima	Meiji University, Tokuyama Corp.	Determination of low carbon concentration in Czochralski-grown Si for solar cells by luminescence activation using electron Irradiation	Japanese Journal of Applied Physics Rapid Communication Vol. 56, No. 7, 070305 (2017)	有	2017/06/09
3	正田勲	トクヤマ	太陽電池用 CZ シリコンの品質に及ぼす炭素と酸素析出の影響	JETI, Vol. 66, No. 5, 77 (2018)	無	2018/04/22

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	T. Tachibana, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, T. Shimoda, I. Masada, N. Hayashi, E. Nishijima	AIST, Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	The effects of annealing processes on effective lifetime in n-type crystalline silicon	31st European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC-2015)	2015/09/14 ~09/16
2	小椋厚志, 小島拓人, 中村京太郎, 田島道夫, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橋昇二	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	結晶シリコン太陽電池におけるウェハとプロセスの相性	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/03/19 ~03/22

3	小島拓人, 鈴木涼太, 小椋厚志, 立花福久, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橋昇二	明治大学 産総研福島 豊田工業大学 トクヤマ	n型CZシリコンのキャリア寿命に対する熱処理による酸素析出の影響	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03/19 ~03/22
4	T. Kojima, R. Suzuki, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, E. Nishijima, I. Masada, N. Iida, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Influence of Growth Conditions on Thermal Process Sensitivity for n-Type CZ Silicon	32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC-2016)	2016/06/20 ~06/24
5	正田勲, 橋昇二, 飯田伸仁, 西島英一, 小島拓人, 中村京太郎, 小椋厚志, 大下祥雄	トクヤマ 明治大学 豊田工業大学	単結晶シリコンの品質に及ぼす炭素と酸素析出の影響	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09/13 ~09/16
6	小島拓人, 木下晃輔, 鈴木涼太, 中村京太郎, 小椋厚志, 立花福久, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橋昇二	明治大学 産総研福島 豊田工業大学 トクヤマ	n型CZシリコン太陽電池のプロセス起因酸素析出に対する成長条件の影響	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09/13 ~09/16
7	木内広達, 田島道夫, 樋口史仁, 小椋厚志, 飯田伸仁, 橋昇二, 正田勲, 西島英一	明治大学 トクヤマ	電子線照射発光活性化PL法による太陽電池用CZ-Si中の低濃度炭素の定量	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09/13 ~09/16
8	T. Kojima, R. Suzuki, K. Kinoshita, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, E. Nishijima, I. Masada, N. Iida, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effects of carbon concentration and growth conditions lifetime degradation by oxygen precipitation in CZ silicon	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/24 ~ 10/28

9	H. Kiuchi, M. Tajima, F. Higuchi, A. Ogura, N. Iida, S. Tachibana, I. Masada E. Nishijima	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Determination of Low Carbon Concentration in CZ-Si for Solar Cells by Luminescence Activation Using Electron Irradiation	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials (JSPS Silicon Symp.)	2016/11/21 ~11/25
10	正田勲	トクヤマ	太陽電池用 CZ シリコンの品質 に及ぼす炭素と酸素析出の影響	第 5 回パワーデバイス 用シリコンおよび関連 半導体材料に関する研 究会	2017/02/22 ~02/23
11	木下晃輔, 小島拓人, 鈴木涼太, 小林弘人, 大下祥雄, 正田勲, 橋昇二, 小椋厚志	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	赤外線トモグラフィーによる 太陽電池用 n 型 C-Si 中の酸素 析出挙動の評価 - 炭素濃度と成長条件の影響 -	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会	2017/03/14 ~03/17
12	小島拓人, 木下晃輔, 鈴木涼太, 中村京太郎, 小椋厚志, 大下祥雄, 正田勲, 橋昇二	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	TEM 像解析による太陽電池用 n 型 CZ-Si 中の酸素析出挙動の 評価 - 炭素濃度と成長条件の影響 -	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会	2017/03/14 ~03/17
13	T. Kojima, R. Suzuki, K. Kinoshita, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, I. Masada, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Cor p.	Effect of Carbon Concentration and Growth Conditions on Oxygen Precipitation Behavior in n-type CZ-Si	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (IEEE PVSC-44)	2017/06/25 ~06/30
14	K. Kinoshita, T. Kojima, H. Kobayashi, Y. Ohshita, I. Masada, S. Tachibana, A. Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effects of Carbon Concentration on Oxygen Precipitation through Annealing Process in n-type CZ-Si Evaluated by IR Laser Scattering Tomography	33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC-2017)	2017/09/25 ~09/29
15	正田勲	トクヤマ	太陽電池プロセスにおける酸 素析出初期状態の直接観察	学振 145 委員会 第 156 回研究会	2017/12/14

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

H CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発（ソーラーフロンティア株式会社）

1. 成果詳細

(1) 目標と成果の概要

本共同研究事業においては発電コスト低減目標として最終目標 14 円/kWh を掲げている。この目標を実現する性能指標とその水準として、製品サイズ試作モジュール変換効率 16%（開口部変換効率 17.3%）を技術到達目標としている。図 1 に CuInSe₂ 系太陽電池（以降 CIS 太陽電池と略す）の変換効率の推移を示す。本事業では CIS 太陽電池の高性能化に必要な要素技術の基礎検討を小面積セル（面積約 0.5～1.0 cm²）で行い、開発された要素技術群は量産モジュールと同じ集積構造を有するサブモジュール（30～7 cm 角）における実証を経て量産工場へと移転され、量産モジュールの生産に適用される。最終目標達成に向けた要素技術の達成水準はサブモジュール開口部変換効率 20%としている。基礎検討用の小面積セルについては Cd フリーバッファ層と比較のために Cd を含むバッファ層を用いたものの両方を研究しており、サブモジュールおよび量産モジュールはすべて Cd フリーである。本事業の成果として小面積セル（Cd フリー）において変換効率 23.4%、サブモジュール（7 cm 角）において変換効率 19.8%を達成した（いずれも世界最高変換効率）。最終技術到達目標としては量産工場の生産ラインを用いて作製した製品サイズ試作モジュールにおいてモジュール変換効率 16.1%を達成し、発電コスト最終目標に関しては市場において 13.3 円/kWh を実現し、いずれも最終目標を達成した。また将来の新分野開拓に向けた軽量化モジュールの開発を事業途中より開始し、既存モジュールとの重量比 1/3、出力比 80%とした最終目標をともに達成した。

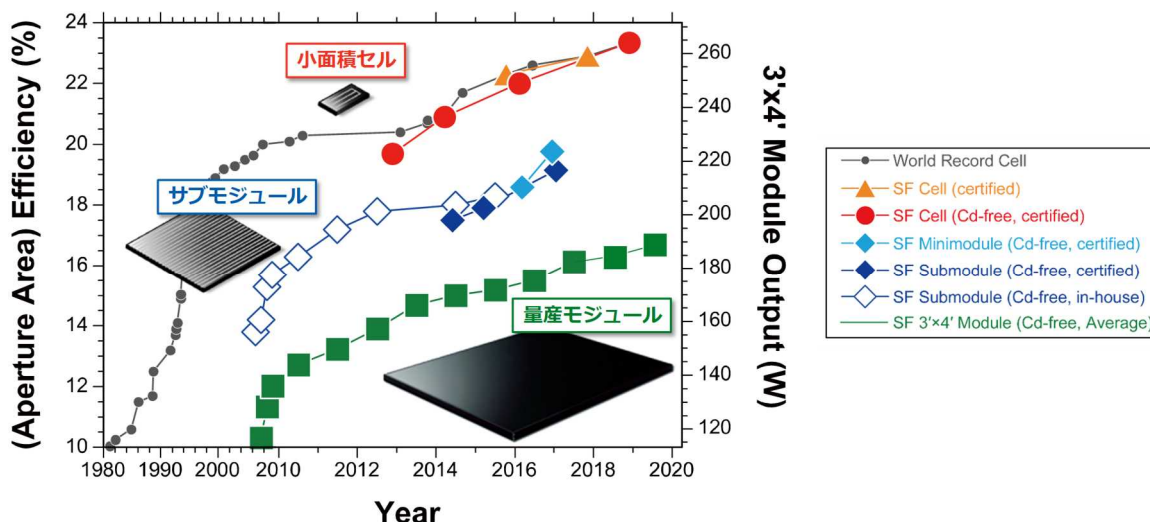


図 III-2-(イ)-H-1 各種 CIS 太陽電池の変換効率の推移。

(2) 小面積セルを用いた要素技術の基礎検討

(2.1) CIGSSe 表面の重アルカリ金属処理効果

CIS 太陽電池における Na 効果は古くから良く知られており、高性能な CIS 太陽電池を作製するうえでガラス基板からの Na の供給、あるいは他の何らかの手法を用いて光吸収層である Cu(In, Ga)(Se, S)₂ (CIGSSe) 層に Na を拡散させることが有効であることが知られている。近年、Na よりも重いアルカリ金属である K、Rb、Cs を含む化合物を CIGSSe 層上に製膜し、熱処理を行うことで CIS 太陽電池の特性が向上されることが発見され、「アルカリ PDT (Post Deposition Treatment)」として注目されている。この技術は当初段階同時蒸着法で製膜された硫黄 (S) を含まない光吸収層を用いた CIS 太陽電池において開発された。我々の光吸収層は金属プリカーサーを用いたセレン化硫化法によって製膜された S を含む CIGSSe であるため、我々の光吸収層に適した独自の重アルカリ金属処理を開発した。具体的にはセレン化硫化法によって製膜した CIGSSe 層の上に重アルカリ金属フッ化物 (KF、RbF、CsF) を蒸着し、H₂S 雰囲気中で熱処理を行うものである。表 1 に小面積セルにおける重アルカリ金属 (K、Cs) 処理効果の比較を示す。処理を行っていない試料と比較して、K 処理、Cs 処理とアルカリ金属の原子番号が大きくなるほど時間分解フォトルミネッセンス法で測定した少数キャリア寿命 (τ) が向上し、太陽電池特性における開放電圧 (V_{oc}) に改善が見られた。詳細なメカニズムはまだ調査中だが、 V_{oc} の照度依存性から算出した界面、空乏層、バルク領域におけるキャリア再結合係数 (それぞれ R_0^i 、 R_0^d 、 R_0^b) が全体的に低減されているため、CIGSSe 光吸収

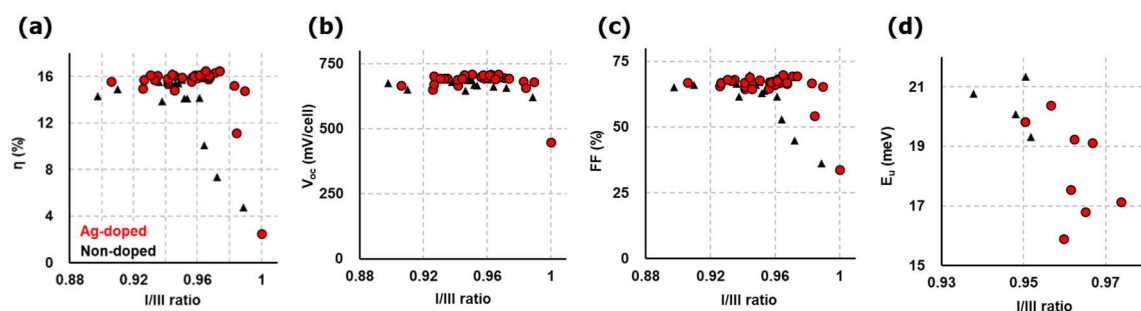
層の界面と光吸収層内両方におけるキャリア再結合の低減が V_{oc} の向上に寄与しているものと考えられる。

表III-2-(イ)-H-1 CIS 太陽電池における重アルカリ金属処理効果の比較。

Alkali treatment	τ (ns)	V_{oc} (mV)	$R_0^a+R_0^b$ (cm^2s^{-1})	R_0^d (cm^2s^{-1})
n/a	14	659	2.8×10^6	2.7×10^{11}
K	60	679	1.0×10^6	2.0×10^{11}
Cs	100	690	6.3×10^5	1.3×10^{11}

(2.2) CIGSSe への Ag 添加効果

CIS 太陽電池の光吸収層である CIGSSe においては、CGI ($[\text{Cu}]/([\text{Ga}]+[\text{In}])$) が化学量論組成である 1 に近づくと $\text{Cu}(\text{S}, \text{Se})_x$ の異相が形成されるために CIS 太陽電池特性の低下を引き起こすことが知られている。図III-2-(イ)-H-2(a)に示すように我々のプロセスにおいては CGI (この図では I/III 族比) = 0.96 が上限となり、それ以上 Cu 組成が増加すると急激に変換効率 (η) が低下する。一方で CIGSSe 自体の結晶品質としては化学量論組成に近い方が Cu 空孔をはじめとする種々の点欠陥が少なくなるため優れていると考えられ (図III-2-(イ)-H-2(d)参照)、一般的に特性の急激な低下が起こる前までは Cu 組成を増加させるほど η は向上する。そこで我々は Cu と同じ I 族元素である Ag の添加効果を詳細に調べた。Ag の添加量は 1 at%以下である。その結果、図 2a-c 赤丸で示すように、従来 0.96 程度であった I/III 族比の上限が 0.98 程度へと向上し、それにともない最高到達変換効率も向上することが分かった。そのメカニズムはまだ明らかではないが、図 2c に示すように、I/III 族比が化学量論組成に近くなると曲線因子 (FF) が顕著に低下することが分かっている。詳細な分析によりこれは硫化が過剰になっていることが要因と判明しており、おそらくセレン化時に形成された CuSe_x が液相となることで硫化時に過剰な硫化を引き起こすと考えている。Ag-Se は Cu-Se よりも一般に融点が高いので、Ag を添加することでこの異常がある程度低減できたのではないかと推察している。いずれにしても I/III 族比の上限が引き上げられたことでより欠陥の少ない CIGSSe を用いることができるようになったことが CIGSSe への Ag 添加効果の帰結であり、これは図 2d に示すように I/III 族比の増加とともに単調に減少するアーバックエネルギー (E_b) にも見て取ることができる。

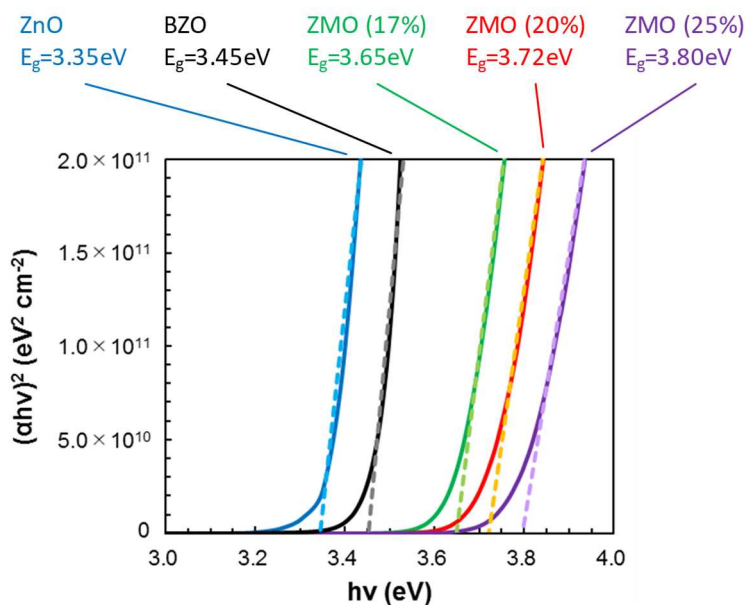


図III-2-(イ)-H-2 各太陽電池特性 (η 、 V_{oc} 、FF) と外部量子効率から算出したアーバックエネルギー (E_b) の I/III 族比 ($([\text{Ag}]+[\text{Cu}])/([\text{Ga}]+[\text{In}])$) 依存性。黒三角が Ag 添加なし、赤丸が Ag 添加ありの試料に対するデータ点。

(2.3) ワイドギャップ第2バッファ層

CIS 太陽電池の光学損失を低減するためには、窓層 (光吸収層上部のバッファ層と透明電極層; 図III-2-(イ)-H-5および図III-2-(イ)-H-7参照) の透過率を高めてより多くの光を光吸収層に届け、光吸収層においては到達した光を余すことなく吸収することが重要である。本事業開始以前までに我々は、透明導電膜である $\text{ZnO}:\text{B}$ (BZO) の高易動度化と低キャリア密度化を通じた長波長領域の透過率向上と、光吸収層のバンドギャッププロファイル改善による長波長光の吸収率向上を合わせて行うことで光学損失を大幅に軽減することに成功している。本事業では短波長領域の光学損失の軽減を目的に広いバンドギャップ (E_g) を有するワイドギャップバッファ層の開発を行った。我々は従来第2バッファ層に ZnO ($E_g \sim 3.35$ eV) を用いており、これが窓層透過光波長の下限を制限し

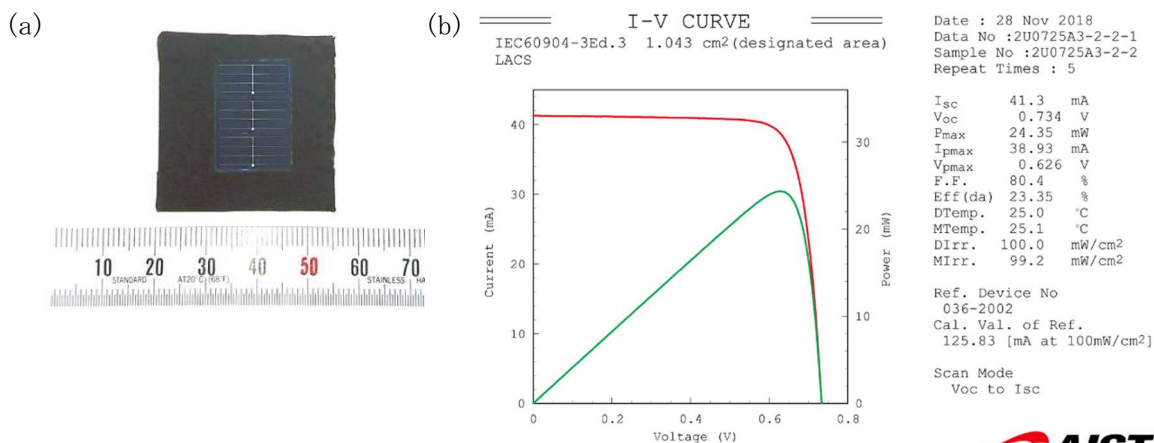
ていた(図III-2-(イ)-H-5 および図III-2-(イ)-H-7 参照)。今回原子層堆積(ALD)法を用いた(Zn, Mg)O (ZMO)を第2バッファ層として用いることを検討した。図III-2-(イ)-H-3に示すように、MgO固溶比を増やすほどZMOの E_g は増大し、より高エネルギー(短波長)の光を光吸収層に届けることが可能となる。ただし、図から明らかなように、透明電極に用いているBZOの E_g の方が小さいため、これが窓層の透過光波長の下限となる。CIGSSe表面とのバンドアライメントの詳細検討の結果、仕込み値でZnOにMgOを20%固溶させた $Zn_{0.8}Mg_{0.2}O$ が新たな第2バッファ層として最適であることが分かった。



図III-2-(イ)-H-3 BZO(透明導電膜)、従来の第2バッファ層であるZnO、および(Zn, Mg)O (ZMO)のTaucプロット。ZMOに続く括弧内の数字はZMO中のMgOの固溶比を示す。

(2.4) 世界最高変換効率の達成

上述の主な要素技術をはじめとして、小面積セルを用いた基礎検討において開発した種々の要素技術の最適な組み合わせを検討した結果、図4に示す通り約 1 cm^2 のCdフリーCIS太陽電池において23.4%の変換効率を達成した。これは一般にCdフリーよりも高い性能を実現しやすいCdSをバッファ層に用いたセルを含めても世界最高の変換効率となる。図III-2-(イ)-H-5と表III-2-(イ)-H-2には本事業開始前の2014年における最高変換効率(20.9%)を達成した小面積セルから最新のセルに至るまでの各記録セルのデバイス構造と太陽電池特性を比較してそれぞれに示す。本事業開始前と比較して絶対値で2.5%の変換効率の向上に成功した。重アルカリ金属処理、ZMO第2バッファ層、およびAg添加CIGSSeのいずれもがCdS、Cdフリー両方のバッファ層を用いたセルの高性能化において重要な貢献をしている。特に、Cdフリーバッファ層を用いたセルがCdSバッファ層を用いたセルの特性を凌駕することができたのは、Cs処理による界面の改善がCdフリーバッファ層の弱みであった界面におけるシャントや再結合を抑制する効果があったためと考えられる。



図III-2-(イ)-H-4 23.4%の世界最高変換効率を達成した小面積セルの(a)外観写真と(b)第三者測定機関による太陽電池特性測定結果。

Year	Structure	Efficiency	Notes
(2014) 20.9%	MgF ₂ /ZnO:B/ZnO/Zn(O,S,OH) _x /CIGSSe (E _{g,min} =1.07eV)/Mo/glass	20.9%	Cd-free
(2015) 22.3%	MgF ₂ /ZnO:B/ZnO/CdS/K treatment/CIGSSe (E _{g,min} =1.11eV)/Mo/glass	22.3%	
(2016) 22.0%	MgF ₂ /ZnO:B/(Zn,Mg)O/Zn(O,S,OH) _x /K treatment/CIGSSe (E _{g,min} =1.10eV)/Mo/glass	22.0%	Cd-free
(2017) 22.9%	MgF ₂ /ZnO:B/ZnO:CdS/Cs treatment/CIGSSe:Ag (E _{g,min} =1.13eV)/Mo/glass	22.9%	
(2018) 23.4%	MgF ₂ /ZnO:B/(Zn,Mg)O/Zn(O,S,OH) _x /Cs treatment/CIGSSe:Ag (E _{g,min} =1.08eV)/Mo/glass	23.4%	Cd-free

図III-2-(イ)-H-5 本事業開始前の2014年から現在までの各記録セルのデバイス構造の比較。

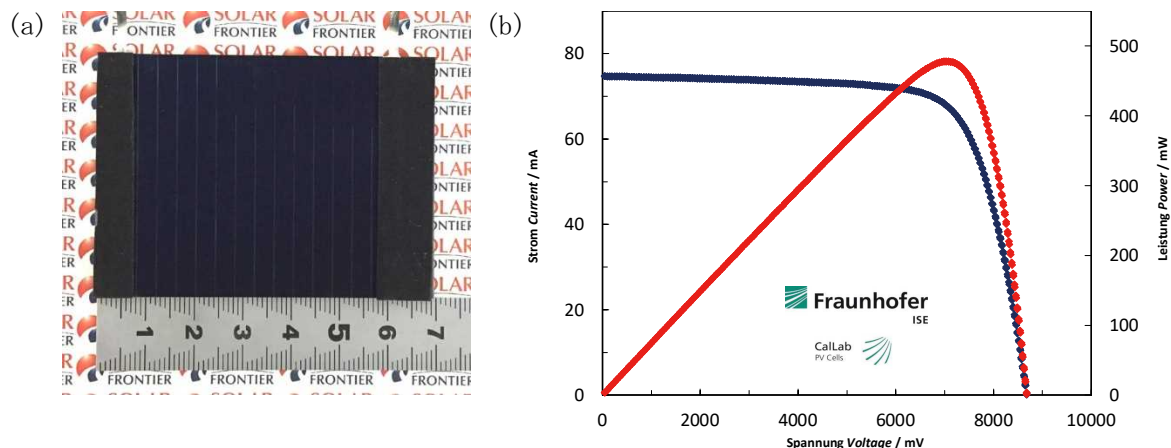
表III-2-(イ)-H-2 各記録セルの太陽電池特性の比較。J_{sc} : 短絡電流密度、E_{g,min} : CIGSSe 光吸収層の最小バンドギャップ、V_{oc,def} = E_g/q - V_{oc} : 開放電圧損失。

Year	Absorber	Alkali treatment	1 st buffer	2 nd buffer	η (%)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} × J _{sc} (mW/cm ²)	FF (%)	E _{g,min} (eV)	V _{oc,def} (mV)	Test Center
2014	CIGSSe	n/a	Zn(O,S,OH) _x	ZnO	20.9	686	39.9	27.4	76.5	1.07	384	FhG-ISE
2015	CIGSSe	K	CdS	ZnO	22.3	722	39.4	28.4	78.2	1.11	383	FhG-ISE
2016	CIGSSe	K	Zn(O,S,OH) _x	(Zn,Mg)O	22.0	717	39.4	28.2	77.9	1.10	381	FhG-ISE
2017	CIGSSe:Ag	Cs	CdS	n/a	22.9	746	38.5	28.7	79.7	1.13	380	AIST
2018	CIGSSe:Ag	Cs	Zn(O,S,OH) _x	(Zn,Mg)O	23.4	734	39.6	29.1	80.4	1.08	350	AIST

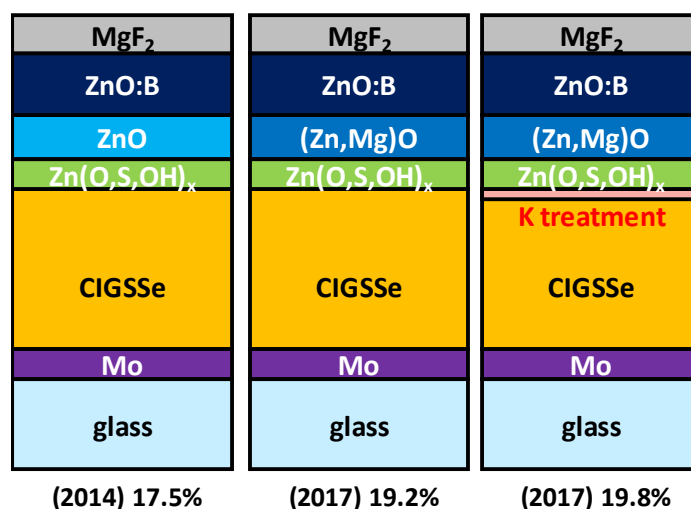
(3) サブモジュール高性能化技術の研究開発

前述のとおり、小面積セルの基礎検討において開発された各要素技術は量産モジュールと同様の集積構造を有するサブモジュールにおいてその効果の実証を行う。サブモジュールおよび量産モジュールはCdフリーであるため、Cdフリー小面積セルで開発された技術を移転する。本事業においては2016年に22.0%を達成したCdフリーセルの技術をサブモジュールへと移転した(図III-2-(イ)-H-5および表III-2-(イ)-H-2参照)。2018年に23.4%を達成したCdフリーセルの技術は本事業期間中にはサブモジュールを用いた実証は行えなかったため今後検討を行いたい。ここで重要となった要素技術はK処理とZMO第2バッファ層である。K処理に関しては装置の都合で30cm角基板の処理が行えなかったため、7cm角基板を用いたサブモジュールにおいて実証を行った。その結果、30cm角サブモジュールにおいて19.2%、7cm角サブモジュールにおいて19.8%の変換効率を達成し、要素技術の目標水準をほぼ達成した。図III-2-(イ)-H-6に19.8%の達成結果を、図III-2-(イ)-H-7と表III-2-(イ)-H-3に本事業開始前の記録である

17.5%のサブモジュールと本成果についてデバイス構造と太陽電池特性の比較をそれぞれに示す。本事業開始前より絶対値で2.3%の変換効率の向上に成功した。これはCdフリー小面積セルと同様の重アルカリ金属処理とZMO第2バッファ層による高性能化を集積構造上で実証したものであり、量産モジュールへの技術移転を目指した検討を進めている。一方で最新の23.4%セルの技術、つまりCs処理とCIGSSeへのAg添加効果はまだサブモジュールで実証できていない。これらの効果を実証することができれば21%に迫る変換効率を持つCdフリーサブモジュールが実現可能であると考えられる。



図III-2-(イ)-H-6 19.8%の世界最高変換効率を達成したCdフリーサブモジュールの(a)外観写真と(b)第三者測定機関による太陽電池特性測定結果。



図III-2-(イ)-H-7 本事業開始前の2014年当時の記録サブモジュールと本事業において開発したサブモジュールの構造の比較。

表III-2-(イ)-H-3 各記録サブモジュールの太陽電池特性の比較。

Year	Area (cm ²)	Alkali treatment	1 st buffer	2 nd buffer	η (%)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	$V_{oc} \times J_{sc}$ (mW/cm ²)	FF (%)	Test Center
2014	808	n/a	Zn(O,S,OH) _x	ZnO	17.5	680	35.3	24.0	72.8	AIST
2017	841	n/a	Zn(O,S,OH) _x	(Zn,Mg)O	19.2	686	38.0	26.1	73.7	AIST
2017	24.2	K	Zn(O,S,OH) _x	(Zn,Mg)O	19.8	724	37.1	26.9	73.6	FhG-ISE

(4) 量産モジュールの高性能化と発電コストの低減

前述のように小面積セルにおいて開発された要素技術群はサブモジュールにおける実証を経て量産工場へと移転され、量産モジュールの生産に適用される。量産工場においてはこのほかに生産設備の改良や生産プロセスの微調整を通じた継続したモジュール性能の改善が図られている。これらの取り組みの結果、2017年には以前の製品よりも出力および機能性を大幅に向上させた新型CIS太陽電池モジュール

ル「SFKシリーズ」をリリースした(表Ⅲ-2-(イ)-H-4参照)。モジュール出力は本事業開始前の170Wから15W向上させ、185Wとなっている。その後も継続した高性能化の取り組みによって、量産ラインを用いた試作モジュールにおいて197.2W(モジュール変換効率16.1%)を達成している(表Ⅲ-2-(イ)-H-4参照)。現在量産ラインにおいては190W以上の高出力モジュールの取得率が80%近くに達している。これには本事業において得られた様々な知見を活用することでCIS太陽電池モジュールの高出力化とともに出力分布を狭く安定させることに成功したことが大きく影響しており、製造コストの低減にも貢献している。このほかモジュールを含めた太陽光発電システム全体のコスト低減を進めている。表Ⅲ-2-(イ)-H-5に示すとおり、モジュールの高出力化と市場におけるシステム販売価格の低下により、発電コストは事業開始前の18.4円/kWhから13.3kWhへと約5円/kWhの低減に成功し、最終目標を達成した。このうちモジュール高出力化の直接効果は約2円/kWhとなっており、本事業の成果が大きな貢献をしている。2025年の発電コスト目標7円/kWhの達成に向けてはこれまで同様モジュールの高出力化とシステムコストの低減を推し進めるが、今後出力向上による発電コスト低減への寄与は限定的になると試算されており、システムコストの低減とモジュールの長寿命化による発電年数の向上が重要になると考えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-H-4 本事業開始前と現在の製品モジュール、および試作モジュールの特性値。

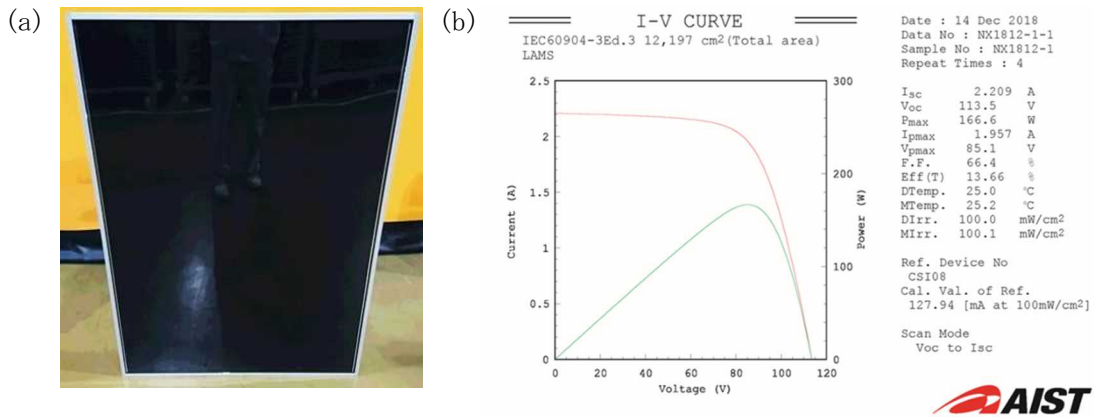
モジュール	P_{max} (W)	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	FF (%)	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)
SF170-S (カタログ値)	170	112	2.20	69.2	87.5	1.95
SFK-185-S (カタログ値)	185	121	2.19	70.0	95.0	1.95
試作モジュール (自社測定値)	197.2	122.7	2.17	74.2	98.8	2.00

表Ⅲ-2-(イ)-H-5 発電コストの達成状況と将来目標。

	2015年 (事業開始前)	2020年 (事業終了時)	2025年 (将来目標)
発電コスト (円/kWh) [2015年からの変化]	18.4	13.3 [-5.1]	7.0 [-11.4]
発電コストの低減分のうち モジュール出力向上による直接効果		-2.1	-3.5
モジュール出力 (W)	170	185	210

(5) 軽量化モジュール技術開発

CIS太陽電池の薄膜太陽電池としての特徴を活かした新分野における将来の多用途展開の可能性を見据えて軽量化モジュールの開発を実施した。目標は試作軽量化モジュールにおいて従来モジュールと比較して重量比で1/3、出力比で80%以上とした。軽量化にあたっては、従来モジュールではガラスを用いているデバイス基板およびモジュール表面材の軽量部材への変更を検討した。具体的にはガラス基板を金属薄板基板に変更したデバイスを開発、試作すると共に、表面材を樹脂フィルムに替えた軽量化モジュールを試作した。なお、軽量化モジュールにおいても金属薄板基板表面を絶縁化処理した上で従来モジュールと同一の集積構造を踏襲している。そのため絶縁処理工程より後のデバイス製造工程は従来モジュールにおけるガラス基板用の工程と同一である。図8aに試作した軽量化モジュールの外観写真を示す。外観は従来モジュールに近いものの、重量を従来モジュール(20kg)の約1/3に相当する6.6kgに軽量化することができた。軽量化に関してはガラス製であった表面材を樹脂フィルムに変更した効果が特に大きい。これはデバイス基板をガラスから金属薄板基板に変更したことで表面材によって強度を確保しなくても基板が割れることがなくなったために変更可能となったものである。図Ⅲ-2-(イ)-H-8bには同モジュールを第三者測定機関において測定した太陽電池モジュール出力特性を示す。出力は現行製品(SFK185-S)の185Wに対して約90%に相当する166.6Wを達成し、目標を達成した。今後さらなる高性能化に取り組むとともに試験設置等を進め、「薄い、軽い、割れない」という本モジュールの特性を活かした幅広い活用の可能性を開拓していく計画である。



図III-2-(イ)-H-8 試作した軽量化モジュールの(a)外観写真と(b)第三者測定機関による出力特性測定結果。

2. 実用化・事業化見通し

出光興産の子会社であるソーラーフロンティアでは NEDO 事業で得られた成果を製造基盤技術として適用し、2006 年 10 月から生産規模を拡大しながら商業生産を行ってきた。これまでの NEDO 事業の成果も含め、開発された要素技術は量産工場への導入検討がなされ、量産検証結果が良好であった技術に関しては順次工場へ展開している。本共同研究期間においてもモジュール出力を 170 W から 185 W (試作モジュールにおいては 197.2 W) へと大幅に向上させることに成功し、発電コストの低減に大きく貢献した。今後、本共同研究開発事業で達成した世界最高変換効率 23.4%の小面積セル要素技術を量産工場へ展開していくことでさらなる高出力化が見込める。一方で、さらなる発電コスト低減に対してはこれ以上の高出力化による寄与は限定的になると試算されていることから、システムコストの低減とモジュール長寿命化による発電年数の向上が重要となる。本共同研究事業で得られた重アルカリ金属処理効果のメカニズムに関する知見はモジュールの長寿命化に対して有用であると考えられ、成果の活用が期待される。他方、CIS 太陽電池は高い発電性能と低い発電コストを両立することができるばかりでなく、薄くて軽い、曲げられる、割れない、様々な形状に加工が可能、などの薄膜太陽電池ならではの特徴を有しており、現在主流の結晶シリコン太陽電池では実現できない将来の新しい用途への展開が期待されている。また、長波長光の発電特性に優れていることから、タンデム型超高効率太陽電池のボトムセルとして適している。今後はモジュールの高出力化と発電コスト低減への努力を進めるとともに、これらのような CIS 太陽電池の特徴を活用して重量制約のある屋根や設置面積に制限のある移動体などの新市場創出へ向けた新技術開発に取り組むことで、太陽電池の設置場所を拡大し太陽光発電の主力電源化への貢献を目指す。

3. 波及効果

本共同研究開発事業の成果によって、CIS 太陽電池は結晶シリコン太陽電池などの他の太陽電池技術と同等の発電コストを実現する優れた太陽電池技術であることが示された。今後、本事業の成果がさらに実用化されていくことによって、さらに低コストで高性能な CIS 太陽電池モジュールが市場に供給され、国内の太陽光発電システムのさらなる発電コスト低減に大きく貢献することが予想される。また、本事業で得られた数々の基礎的な知見は CIS 太陽電池モジュールの高性能化のみならず、非ガラス基板を用いた軽量モジュールやタンデム型太陽電池用ボトムセルの開発にも有用なものであり、本事業の成果の活用により今後の CIS 太陽電池の多用途展開による太陽電池新市場の創出が期待される。

4. 今後の展開

本研究開発事業の成果により、小面積セル変換効率 23.4%とサブモジュール開口部面積効率 19.8%を達成した。また小面積セル、サブモジュール開発における既開発技術の移転や製造プロセスの改善によって出力を大幅に向上させた 185W 新型モジュールをリリースし、最終目標である発電コスト 14 円/kWh を大きく下回る 13.3 円/kWh を達成した。今後もこのような技術移転の流れを踏襲して CIS 太陽電池モジュールの高性能化を進める。まずは、19.8%サブモジュールを実現した技術の工場移転を進めることによって量産モジュールのさらなる高出力化を目指す。並行して得られた基礎的な知見を活用し CIS 太陽電池モジュールの高信頼性化や長寿命化技術開発に取り組み、発電年数の向上による発電コストの低減を目指す。このためには新たに導入するプロセスを開発し、そのコストメリットの検討、大面積薄膜での面内均一性や繰り返し再現性、安定性などの検証を通じて工場での実証実験へと移行する必要がある。また、小面積セルの基礎研究に立ち返り、次世代の高性能化要素技術の開発に注力し、変換効率 25%の達成を目指す。その要素技術を再度サブモジュール、量産モジュールへと移転していくことによって CIS 太陽電池技術全体の高性能化を進めていく。さらに多用途展開による新市場創出を目指し、加重制約のある屋根向けの軽量モジュールの開発や移動体向けタンデム型超高効率太陽電池ボトムセル用の CIS 太陽電池セルの開発に取り組む。これらの取り組みにも本事業で得られた様々な基礎的な知見が活かされる。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	1 (0)	5 (1)	6 (0)	5 (3)	10 (5)	27 (9)
論文	0	1	2	2	1	6
研究発表・講演 (うち国際会議)	8 (5)	9 (7)	7 (7)	4 (2)	13 (6)	41 (27)
新聞・雑誌等への掲載	206	46	157	79	0	488
その他	0	0	0	0	0	0

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日 移行日	状態	名称	発明者
1	ソーラーフロンティア(株)	特願 2015-205591	国内	2015/10/19	放棄 (PCT 出願)	光電変換素子	足立駿介 他 2 名
2	ソーラーフロンティア(株)	特願 2016-091479	国内	2016/4/28	出願	光電変換層の製造方法及び光電変換素子の製造方法	半田篤志 他 3 名
3	ソーラーフロンティア(株)	特願 2016-091509	国内	2016/4/28	出願	光電変換層の製造方法及び光電変換素子の製造方法	廣井誉 他 3 名
4	ソーラーフロンティア(株)	特願 2016-130949	国内	2016/6/30	出願	光電変換モジュール	木島駿介 他 8 名
5	ソーラーフロンティア(株)	特願 2016-130867	国内	2016/6/30	出願	光電変換モジュールの製造方法	木島駿介 他 8 名

6	ソーラーフロンティア(株)	PCT/JP2016/78718	PCT	2016/9/28	放棄 (PCT 移行)	光電変換素子	足立駿介 他 2 名
7	ソーラーフロンティア(株)	特願 2017-178367	国内	2017/9/15	放棄 (PCT 出願)	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
8	出光興産(株)	特願 2017-178368	国内	2017/9/15	出願	光電変換モジュールの製造方法	濱野幹雄 他 5 名
9	出光興産(株)	特願 2017-178369	国内	2017/9/15	出願	光電変換モジュール	米山延孝 他 5 名
10	ソーラーフロンティア(株)	特願 2017-178370	国内	2017/9/15	放棄 (PCT 出願)	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
11	出光興産(株)	特願 2017-207415	国内	2017/10/26	出願	光電変換素子の製造方法	呉志力 他 2 名
12	ソーラーフロンティア(株)	特願 2017-546467	国内	2018/2/6	出願	光電変換素子	足立駿介 他 2 名
13	ソーラーフロンティア(株)	US15/769257	外国	2018/4/18	出願	光電変換素子	足立駿介 他 2 名
14	出光興産(株)	PCT/JP2018/32774	PCT	2018/9/4	放棄 (PCT 移行)	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
15	出光興産(株)	PCT/JP2018/32775	PCT	2018/9/4	放棄 (PCT 移行)	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
16	出光興産(株)	特願 2018-237248	国内	2018/12/19	放棄 (PCT 出願)	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	富田仁 他 1 名
17	出光興産(株)	特願 2018-237264	国内	2018/12/19	出願	光電変換素子	富田仁 他 1 名

18	出光興産(株)	特願 2019-084972	国内	2019/4/26	出願	光電変換素子の製造方法	岩田恭彰 他 2 名
19	出光興産(株)	特願 2019-160289	国内	2019/9/3	出願	微小構造体、微小構造体の製造方法および光電変換素子	加藤拓也 他 2 名
20	出光興産(株)	特願 2019-160442	国内	2019/9/3	出願	薄膜光電変換素子および薄膜光電変換素子の製造方法	加藤拓也 他 2 名
21	出光興産(株)	PCT/JP2019/048683	PCT	2019/12/12	出願	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	富田仁 他 1 名
22	出光興産(株)	特願 2019-542010	国内	2020/1/31	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
23	出光興産(株)	特願 2019-542011	国内	2020/1/31	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
24	出光興産(株)	US16/647160	外国	2020/3/12	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
25	出光興産(株)	US16/646948	外国	2020/3/12	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
26	出光興産(株)	CN201880059780.3	外国	2020/3/13	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名
27	出光興産(株)	CN201880059775.2	外国	2020/3/13	出願	光電変換モジュール及び光電変換モジュールを製造する方法	米山延孝 他 5 名

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
----	-----	----	------	------------	----	------

1	T. Kato	ソーラーフロンティア(株)	CIGS solar cell research in Solar Frontier: progress and current status	Japanese Journal of Applied Physics: Special Issue 56, 04CA02	有	2017年2月
2	K. F. Tai et al.	ソーラーフロンティア(株)	From 20.9% to 22.3% CIGS solar cell: Reduced recombination rate at the heterojunction and the depletion region due to K-treatment	Japanese Journal of Applied Physics: Special Issue 56, 08MC03	有	2017年7月
3	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Enhanced efficiency of Cd-free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ minimodule via (Zn, Mg)O second buffer layer and alkali metal post treatment	IEEE Journal of Photovoltaics 7, 1773	有	2017年9月
4	Q. Han et al.	ソーラーフロンティア(株)	High-performance perovskite/Cu(In, Ga)Se ₂ monolithic tandem solar cells	Science 361, 904	有	2018年8月
5	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Record Efficiency for Thin-Film Polycrystalline Solar Cells Up to 22.9% Achieved by Cs-Treated Cu(In, Ga) (Se, S) ₂	IEEE Journal of Photovoltaics 9, 325	有	2018年12月
6	M. Nakamura et al.	出光興産(株)	Cd-Free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ Thin-Film Solar Cell with Record Efficiency of 23.35%	IEEE Journal of Photovoltaics 9, 1863	有	2019年9月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	H. Sugimoto et al.	ソーラーフロンティア(株)	Achievement of over 18% efficiency on 30x30cm ² -sized Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ Submodules	2015 European Materials Research Society (E-MRS) Spring Meeting	2015年5月
2	R. Kamada et al.	ソーラーフロンティア(株)	Evaluation of “rollover” in Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ thin film solar cells using Suns-Voc measurements	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2015年6月
3	M. Nakamura et al.	ソーラーフロンティア(株)	Current status at Solar Frontier: from fundamental research to industrial mass production of Cd-free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ solar cell	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2015年6月
4	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Capacitance and admittance studies on metastable and sodium-related defects in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ thin film solar cell	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2015年9月

5	K. Kitani et al.	ソーラーフロンティア(株)	Characterization of Na depleted Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ thin-film solar cell	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2015年9月
6	加藤拓也	ソーラーフロンティア(株)	セレン化法によるCIS太陽電池の高効率化	日本学術振興会第175委員会「化合物薄膜太陽電池分科会」第5回研究会	2015年9月
7	杉本広紀	ソーラーフロンティア(株)	大面積CISサブモジュール及びCZTSサブモジュールの高効率化	2015年度応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会	2015年12月
8	杉本広紀	ソーラーフロンティア(株)	次世代カルコパイライト系薄膜太陽電池の現状と展望	立命館グローバル・イノベーション研究機構シンポジウム	2016年2月
9	H. Sugimoto	ソーラーフロンティア(株)	Recent progress in development of Cu(InGa) (SeS) ₂ solar cells in Solar Frontier from R&D to manufacturing	Photovoltaic Technical Conference (PVTC) 2016	2016年5月
10	R. Kamada et al.	ソーラーフロンティア(株)	New world record Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ thin film solar cell efficiency beyond 22%	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2016年6月
11	加藤拓也	ソーラーフロンティア(株)	CIS系太陽電池の現状と展望	第4回 環境・エネルギー・資源シンポジウム	2016年6月
12	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Characterization of the back contact of CIGS solar cell as the origin of “rollover” effect	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2016年6月
13	T. Kato	ソーラーフロンティア(株)	Recent research progress of high-efficiency CIGS solar cell in Solar Frontier	7th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech)	2016年6月
14	杉本広紀	ソーラーフロンティア(株)	Recent progress in development of Cu(InGa) (SeS) ₂ solar cells	第35回 電子材料シンポジウム(EMS35)	2016年7月
15	K. F. Tai et al.	ソーラーフロンティア(株)	Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ solar cell research in Solar Frontier K. K. with 22.3% world-record efficiency	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM) 2016	2016年9月
16	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア(株)	Recombination analysis of CIGS solar cells using temperature and illumination dependent open-circuit voltage measurement	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2016年10月

17	K. F. Tai et al.	ソーラーフ ロンティア 株	From 20.9% to 22.3% CIGS solar cell: reduced recombination rate at the interface and depletion region due to K-treatment	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2016年10月
18	T. Kato	ソーラーフ ロンティア 株	CIGS solar cell research in Solar Frontier: progress and current status	2017 Materials Research Society (MRS) Spring Meeting	2017年4月
19	H. Sugimoto	ソーラーフ ロンティア 株	Challenge for high efficiency CIGS solar cells in Solar Frontier from R&D to manufacturing	8th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech)	2017年5月
20	T. Kato et al.	ソーラーフ ロンティア 株	Enhanced efficiency of Cd-free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ minimodule via (Zn, Mg)O second buffer layer and alkali post treatment	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2017年6月
21	V. Bermudez et al.	ソーラーフ ロンティア 株	Present status of Solar Frontier Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ record efficiencies and overall progress	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2017年9月
22	T. Kato	ソーラーフ ロンティア 株	Progress in high efficiency CIGS solar cell and module research at Solar Frontier	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2017年11月
23	J. -L. Wu et al.	ソーラーフ ロンティア 株	Investigation on alkali-treatment mechanisms for improving energy conversion efficiency of Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2017年11月
24	T. Kato	ソーラーフ ロンティア 株	CIGS development at Solar Frontier: from cell to manufacturing	International Workshop on High Efficiency CIGS solar cells	2017年11月
25	J. -L. Wu et al.	ソーラーフ ロンティア 株	New world record efficiency up to 22.9% for Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ thin-film solar cells	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018年6月
26	T. Aramoto	ソーラーフ ロンティア 株	Solar Frontier: past, present, and future	9th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech)	2018年6月
27	平井義晃	ソーラーフ ロンティア 株	ソーラーフロンティアにおける高性能 CIS 太陽電池の開発	日本学術振興会第175委員会 第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月
28	加藤拓也	昭和シェル 石油株	高効率 CIS 系薄膜太陽電池の研究開発と量産	東京理科大学総合研究院太陽光発電技術研究部門 第9回シンポジウム「太陽電池・発電技術の最新動向」	2019年1月

29	M. Nakamura	昭和シェル石油(株)	New record CIGS _{Se} solar cell with a Zn-based buffer layer	10th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech)	2019年5月
30	M. Nakamura et al.	昭和シェル石油(株)	Cd-free Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ thin-film solar cell with a new world record efficacy of 23.35%	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2019年6月
31	田中良明ほか	出光興産(株)	カルコパイライト半導体薄膜形成過程へのGa比率の影響	日本学術振興会第175委員会 第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019年7月
32	木本祥紀ほか	出光興産(株)	Cdフリーカルコパイライト化合物薄膜太陽電池の高性能化	日本学術振興会第175委員会 第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019年7月
33	加藤拓也	出光興産(株)	カルコパイライト化合物薄膜太陽電池の高性能化と今後の展望	応用物理学会応用電子物性分科会7月研究例会	2019年7月
34	R. Kamada et al.	出光興産(株)	Alternative buffer layer for reducing optical losses in Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ solar cells	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2019年9月
35	杉本広紀	出光興産(株)	高効率薄膜太陽電池の開発と新分野への展開	2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月
36	石内隆鳳ほか	出光興産(株)	Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ 薄膜上における透明導電膜の導電メカニズム	2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月
37	T. Kato	出光興産(株)	Recent progress and future prospects of CIS-based thin-film solar cell technology - high efficiency and new applications	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2019年11月
38	H. Sugimoto et al.	出光興産(株)	High-performance near-stoichiometric Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ solar cells by sub-percent Ag-doping	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC)	2019年11月
39	山口幸士ほか	出光興産(株)	Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ 薄膜太陽電池の光学損失評価	薄膜材料デバイス研究会 第16回研究集会	2019年11月
40	稲留徹ほか	出光興産(株)	Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ 薄膜太陽電池へのアルカリ処理の効果	薄膜材料デバイス研究会 第16回研究集会	2019年11月

41	Y. Hirai et al.	出光興産(株)	Recent progress and future prospects of CIS-based thin-film solar cell technology - high efficiency and new applications	International Workshop on Ternary and Multinary Compounds (IWTMC2019)	2019年11月
----	-----------------	---------	--	---	----------

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	ソーラーフロンティア(株)	高効率、曲がる太陽電池、ソーラーフロンティア、電気変換13%台	日本経済新聞 他	2015/6/22
2	ソーラーフロンティア(株)	開発物語 ソーラーフロンティア「CIS太陽電池」 常識を覆した驚異の変換効率達成	フジサンケイビジネスアイ	2015/9/28
3	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、CIS型太陽電池で効率22.3%を達成	日経テクノロジーオンライン 他	2015/12/8
4	ソーラーフロンティア(株)	CIS太陽電池で効率26%へ、コスト低減では世界を牽引	日経エレクトロニクス	2016/1/13
5	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、コスト20%削減の新型パネル展示	フジサンケイビジネスアイ 他	2016/7/1
6	ソーラーフロンティア(株)	Solar Frontier's CEO Aims for 40-Cents-Per-Watt CIGS Modules	GreenTechMedia 他	2016/9/16
7	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、CIS系薄膜太陽電池サブモジュールで世界最高変換効率19.2%を達成	読売新聞 他	2017/2/27
8	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティアの太陽電池モジュール、環境省による「L2-Tech認証」取得	日経産業新聞 他	2017/4/4
9	ソーラーフロンティア(株)	昭和シェルとソーラーフロンティア、2017年度科学技術分野の文部科学大臣表彰で 科学技術賞（開発部門）を受賞	電波新聞 他	2017/4/12
10	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、高出力の新型CIS薄膜太陽電池「SFKシリーズ」	日本経済新聞 他	2017/6/21
11	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、薄膜太陽電池を改良しエネ変換効率22.9%	日刊工業新聞 他	2018/1/10
12	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティア、累計出荷量5GWを達成	日本経済新聞 他	2018/4/4
13	ソーラーフロンティア(株)	ソーラーフロンティアとNEDO、CIS系薄膜太陽電池セルで世界最高変換効率23.35%を達成	日本経済新聞 他	2019/1/17

【その他】

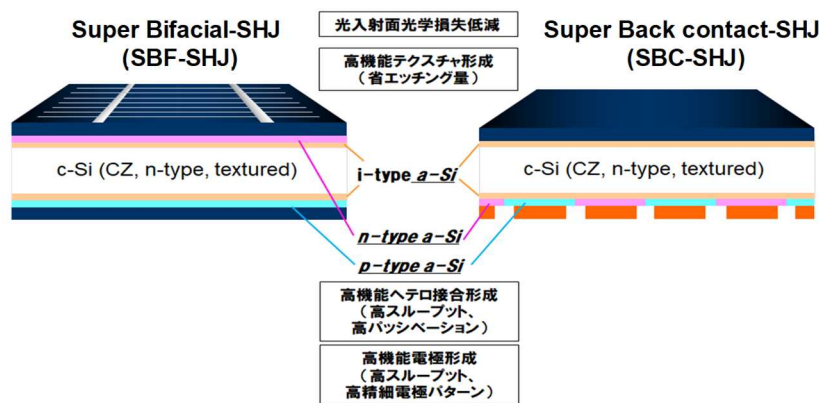
なし

I 低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero-junction (SSHJ) 太陽電池の開発
(パナソニック株式会社)

1. 成果詳細
1.1 まとめ

本共同研究開発の目的は、既に市場投入されている当社太陽電池の量産ラインに本共同研究で創出した開発技術を導入することで、NEDO 太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges) における当該太陽電池の発電コスト 7 円/kWh 達成目標年を 2030 年から 2025 年に大幅に前倒し実現することである。この実現のための数値目標として下記を設定した。ここで、SSHJ は、Super Si Hetero-junction を、SBF-SHJ は Super Bifacial-SHJ、SBC-SHJ は Super Back Contact-SHJ の略称である。これら構造と数値目標を図 III-2-(イ)-I-1 に示す。

- A) 試作モジュールで、発電コスト 7 円/kWh 相当の性能を確認する
モジュール変換効率：20.8% (SBF-SHJ)、22.0% (SBC-SHJ) @6 インチ
セル変換効率：24.0% (SBF-SHJ)、25.0% (SBC-SHJ) @6 インチ
- B) 発電コスト 7 円/kWh@2024 年を実現するための開発計画を提示する
発電コスト 7 円/kWh 実現の前提条件としては量産想定時の自社条件を用いる。



構造	コスト見込み	達成時期	モジュール効率	セル効率
SBF-SHJ	<14 円/KWh	2020年	20.5%	23.7%
SBF-SHJ	<7円/KWh	2024年	20.8%	24.0%
SBC-SHJ	<7円/kWh	2024年	22.0%	25.0%

図 III-2-(イ)-I-1 セル構造と数値目標

これら数値目標を達成するために、SSHJ 太陽電池の構造やプロセス技術について基礎的技術から量産化技術までを網羅した開発項目を設置し、量産を見据えた開発を進めた。基礎的技術の開発では、国立研究開発法人産業技術総合研究所 (AIST) とプラズマ CVD 法を用いた、また国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST) とは Cat-CVD 法を用いた SSHJ 太陽電池の形成技術に関する連携した共同研究を行い、それぞれ高効率化技術の知見を抽出した。さらに、大規模量子分子動力学膜反応計算技術を用いて原子レベルでのヘテロ接合形成過程について検討を行い、結晶 Si の結晶方位面とこの上に形成する a-Si 膜の成膜過程について実験結果と整合する結果を得ると共に、結晶 Si と a-Si 膜の界面の電子状態を詳細に解析することでパッシベーション性能を良化する開発指針を導出し、界面近傍の元素密度の導出に成功している。量産技術では開発した要素技術を効率的に組み合わせ、下記の結果を得ると共に、数値目標を達成した。表 III-2-(イ)-I-1 に成果をまとめる。

- A) モジュール変換効率(セルサイズ：6 インチ)：
21.0% (SBF-SHJ, 自社計算), 22.0% (SBC-SHJ, 自社計算)
セル変換効率(セルサイズ：6 インチ)：
23.9% (SBF-SHJ, AIST 測定), 25.4% (SBC-SHJ, AIST 測定)

B) 開発成果に基づいてシステム価格を試算したところ、2020年にSBF-SHJで14円/kWh、2024年時点でSBF-SHJ、SBC-SHJ共に7円/kWhの発電コストとなることがわかった。

表 III-2-(イ)-I-1 開発成果

構造	コスト見込み	達成時期	モジュール効率	セル効率	達成
SBF-SHJ	<14円/kWh	2020年	20.9%	23.8%	達成
SBF-SHJ	<7円/kWh	2024年			
SBC-SHJ	<7円/kWh	2024年	>22.0%	25.4%	

達成見込み

1.2 詳細

本事業では、SHJ太陽電池の高効率化、低コスト化の要素技術として、①大面積ウェハ対応技術、②高機能テクスチャ技術、③高機能ヘテロ接合技術、④高機能電極形成技術、⑤モジュール試作(要素技術ベストミックス)の開発を実施した。2018年度はこれら要素技術の出力向上効果の検証やプロセス方式の絞り込み、見極め等を中心に実施し、2019年度は①から⑤の各要素技術の組合せ最適化によりSBF-SHJとSBC-SHJの太陽電池セルで高出力を実証した。

図 III-2-(イ)-I-2に、SBF-SHJ太陽電池セル(6インチ)のI-V特性とモジュール外観写真を示す。NEDO開発期間内のセル変換効率としては、自社測定で23.8%を得ており、セル変換効率の目標(23.7%)を達成していた。これに加えて、第三者評価機関であるAISTにてセル変換効率の測定を行い、変換効率23.9%を得ることで、セル変換効率の目標達成を確認した。これは、60セル構成モジュールにおけるモジュール変換効率20.9%に相当し、モジュール変換効率目標(20.5%@2020年、20.8%@2024年)を超えており、2020年に発電コスト14円/kWh、2024年に発電コスト7円/kWhの発電コストが見込めるモジュール変換効率である。図 III-2-(イ)-I-3に、SBC-SHJ太陽電池セル(6インチ)のI-V特性とモジュール外観写真を示す。SBC-SHJセルで変換効率25.4%(AIST測定)を得た。これは60セル構成モジュールにおけるモジュール変換効率22.0%超に相当する。モジュール変換効率の目標(22.0%@2014年)を超えたため、2024年に発電コスト7円/kWhの達成できる見込みがたつた。

SSHJ太陽電池の変換効率のさらなる向上を目的として、③高機能ヘテロ接合技術の開発の枠組みの中で、太陽電池構造やプロセス技術の基礎的技術の開発として国立研究開発法人産業技術総合研究所(AIST)とプラズマCVD法を用いた、また国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学(JAIST)とはCat-CVD

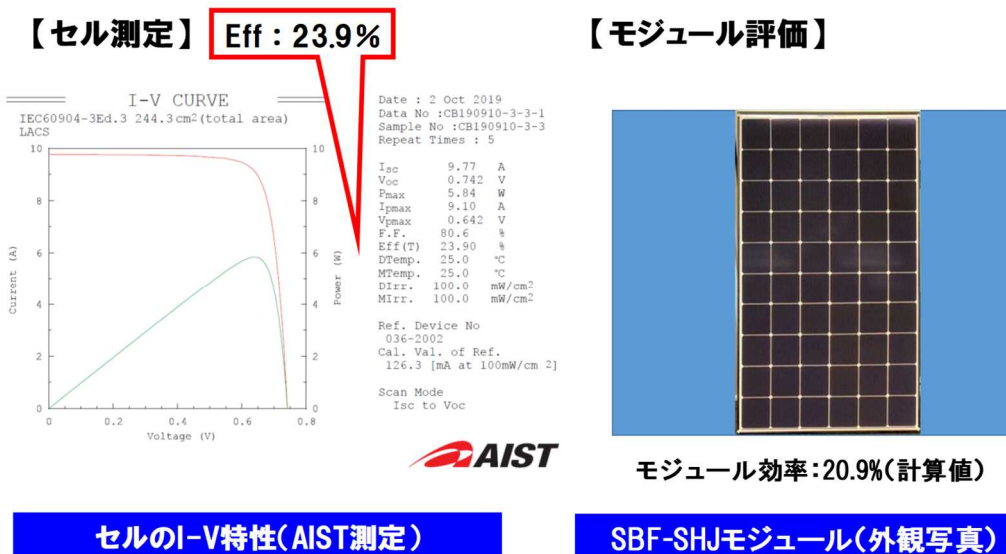
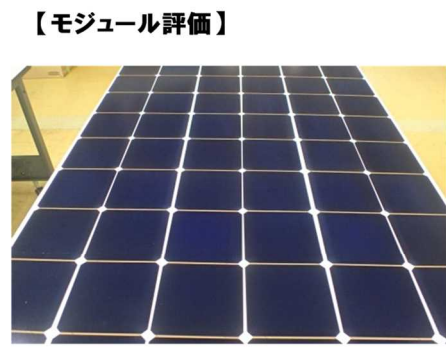
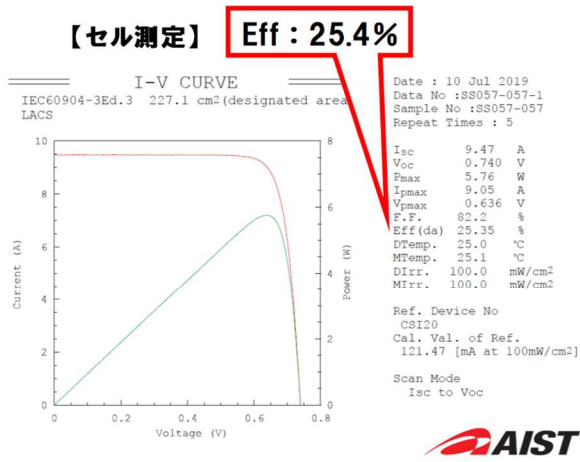


図 III-2-(イ)-I-2 SBF-SHJのセル効率とモジュール外観(開発期間中にセル効率23.8%(自社測定)を得ている)



モジュール効率: 22.0%超
(CTMからの計算値)

セルのI-V特性(AIST測定)

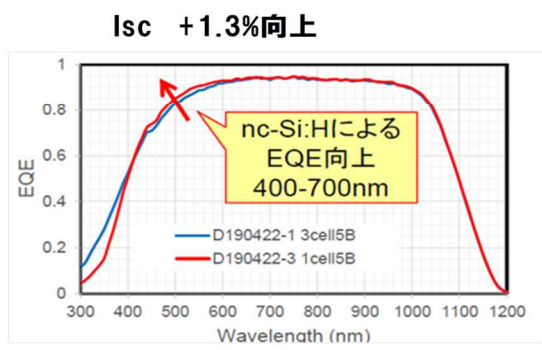
SBC-SHJモジュール(外観写真)

図 III-2-(イ)-I-3 SBC-SHJ のセル効率とモジュール外観

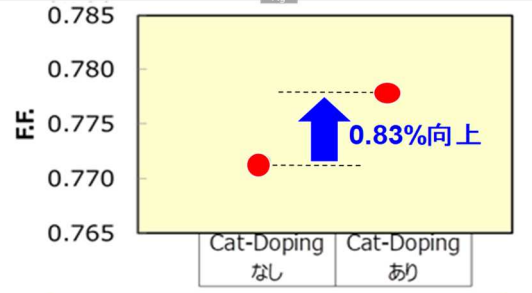
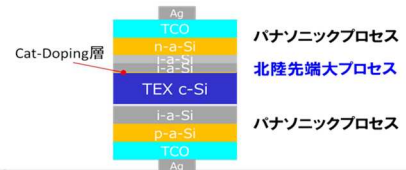
法を用いた SSHJ 太陽電池の形成技術に関する連携した共同研究を行なった。この結果を図 III-2-(イ)-I-4 に示す。AIST ではシリコン系ナノ Si 結晶窓層を用いることで EQE の短波長感度が向上し Isc で +1.3% の向上が、また JAIST の Cat-doping 技術では界面近傍のドーピング効果で FF が +0.83% 向上することがわかった。

・産総研: Si系ナノ結晶(nc-Si:H)窓層
⇒ Isc +1.3%

・JAIST: Cat-doping技術
⇒ FF +0.83%



AIST連携成果



JAIST連携成果

図 III-2-(イ)-I-4 AIST、JAIST との連携共同研究結果

さらに、この枠組みの中では大規模量子分子動力学膜反応計算技術を用いて原子レベルでのヘテロ接合形成過程について検討を行なった。図 III-2-(イ)-I-5 に結果を示す。結晶 Si の結晶方位面とこの上に形成する a-Si 膜の成膜過程について実験結果と整合する結果を得ると共に、結晶 Si と a-Si 膜の界面の電子状態を詳細に解析することでパッシベーション性能を良好化する開発指針を導出した。また、a-Si/c-Si ヘテロ接合の極薄膜領域の結合構造および電子状態の解析が可能であることも確認している。まだ基礎的な段階であり、今後技術改良の余地が残されているが、SHJ 太陽電池のさらなる性能向上に寄与しうる要素技術と考えている。

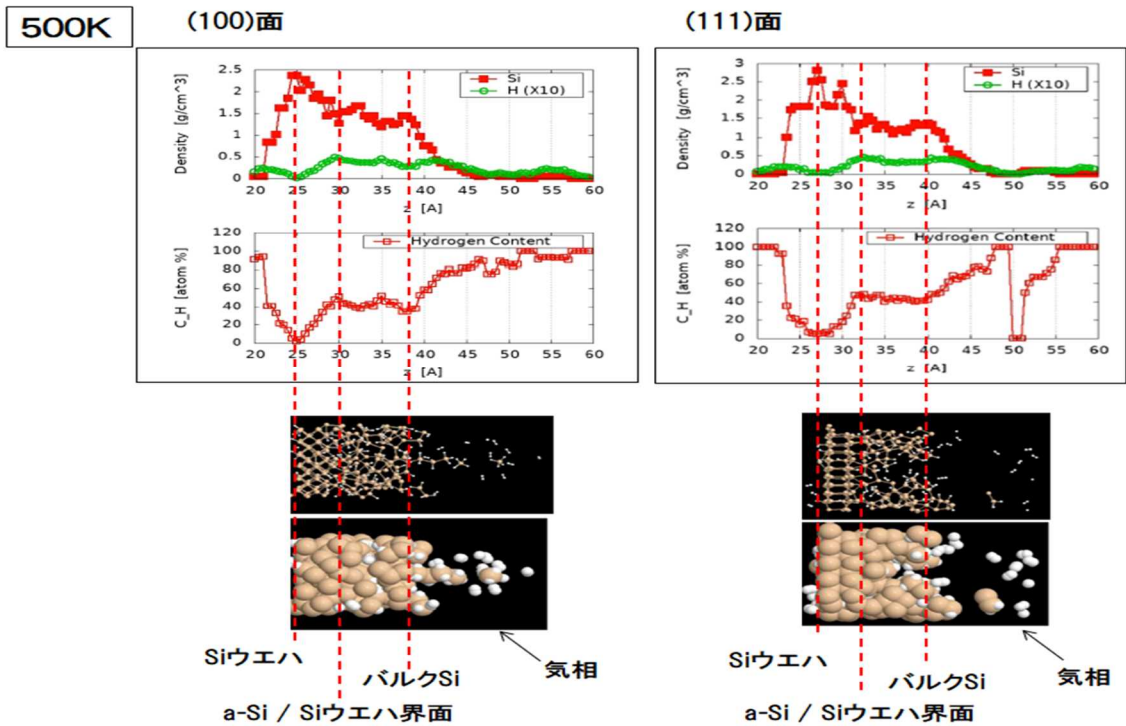


図 III-2-(イ)-I-5 大規模量子分子動力学膜反応計算による成膜過程と膜密度, 水素濃度の計算結果

2. 実用化・事業化見通し

パナソニックでは、太陽光発電システムと HEMS、蓄電池等を組み合わせたエネルギーソリューション事業を継続・強化している。この中で NEDO 技術成果の実用化・事業化計画についても検討を行っている。

3. 波及効果

今回の開発では、基礎的な技術開発の面において AIST、JAIST との連携共同研究の中で、SSHJ のさらなる高効率化の可能性が示されると共に、シミュレーション技術開発では、基礎的ではあるが、これまで可視化困難であったヘテロ接合の形成過程を可視化しその元素密度までを計算することに初めて成功している。太陽電池はその変換効率がシステム全体のコストに大きく影響する性質を持つと共に、SHJ 構造は単セルでの最高の変換効率が得られる構造の一つであることが報告されていることから、世界的な視点で見たときに SHJ 開発の指針となるものと期待している。

4. 今後の展開

太陽電池の変換効率向上技術はモジュール発電効率の向上を通して発電コストの低減に関わる重要な因子であり、太陽光発電システムの中核的な技術である。このことから、パナソニックを含め各企業この効率向上技術開発に先鋭的に取り組んでいる。一方、世界的な潮流を見ると、太陽電池と他の商品、例えば蓄電池や HEMS と組み合わせることで、新たな省電力の提案や CO2 排出削減・環境保護などの環境価値を創造する活動も活発に行われている。パナソニックは、このような国際的な活動が国内外を問わずに今後も活発に行われ、我々の生活にも積極的に取り込まれていくことを認識し、太陽光発電システムと HEMS、蓄電池等を組み合わせたエネルギーソリューション事業を継続・強化している。NEDO で開発した太陽電池の変換効率の向上技術は、数値目標を達成すると共に量産技術としての親和性が極めて高いことから、パナソニックのソリューション事業の継続・強化の重要な技術として十分に活用・展開して、環境価値のさらなる向上を図っていく。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	—	—	—	1 (0)	3 (0)	4 (0)
論文	—	—	—	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	—	—	—	1 (0)	5 (3)	6 (3)
新聞・雑誌等への掲載	—	—	—	0	0	0
その他	—	—	—	0	2	2

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	パナソニック(株)	特願 2019-068620	国内	2019年 3月29日	出願	太陽電池セル	村上洋平
2	パナソニック(株)	特願 2019-178010	国内	2019年 9月27日	出願	太陽電池セル	伊坂隆行 藤嶋大介
3	パナソニック(株)	特願 2019-178305	国内	2019年 9月30日	出願	太陽電池セルおよび太陽電池セル製造方法	松山謙太
4	パナソニック(株)	特願 2019-178308	国内	2019年 9月30日	出願	太陽電池セル	片桐雅之

【論文】

なし

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	村上洋平	パナソニック(株)	Siヘテロ接合型太陽電池の開発と将来への応用展開	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年 7月5日
2	寺川朗	パナソニック(株)	Future of Silicon Heterojunction Solar PVs	Solar Industry Forum & Solar Mobility Forum	2019年 9月10日
3	寺川朗	パナソニック(株)	シリコンヘテロ接合太陽電池のさらなる進化に向けて	第81回応用物理学会秋季学術講演会	2019年 9月19日
4	松本 光弘	パナソニック(株)	High-efficiency technology of silicon heterojunction solar cells	PVSEC-29 (29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference)	2019年 11月7日

5	寺川朗	パナソニック(株)	Progress in Panasonic's Silicon Heterojunction Solar Cells	15th China SoG silicon and PV Power Conference (China Si PV)	2019年 11月23日
6	片山博貴	パナソニック(株)	大規模量子分子動力学シミュレーションを用いた a-Si/c-Si ヘテロ接合界面分析	第67回応用物理学会 春季学術講演会	2020年 3月15日

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

番号	年度	タイトル	名称	種類
1	2019年度	当社の将来技術の一部として発表	EU ゴールドインストラクターセミナー	展示会
2	2019年度	当社の将来技術の一部として発表	SPI (Solar Power International 2019)	展示会

(ロ) 革新的新構造太陽電池の研究開発／超高効率・低コストⅢ-V化合物太陽電池モジュールの研究開発

【A 低コストセル技術開発】(東京大学、シャープ株式会社、産業技術総合研究所、大阪市立大学(再))

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
a1. 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発 (光閉じ込め) 【東京大学】	シャープと連携して量子井戸を含むⅢ-V薄膜3接合セルおよびⅢ-V薄膜2接合+シリコンセルに光閉じ込め構造を実装し、光閉じ込め効果を有効に用いることで変換効率33%の達成に資する。	サブセルの総厚を3.5 μmから1.0 μmまで約7割削減しても、効率は33.2%から30.2%まで約1割しか低下しないことをシミュレーションで示した。 コロイドリソグラフィ+ドライエッチングによる裏面テクスチャ形成を、薄膜2接合セル(InGaP 300nm/GaAs 600nm)に適用。裏面ミラーの場合に比べて主にGaAsの光吸収を増大してJ _{sc} を40%増大。	○	薄膜多接合セルへの光トラッピング適用の成功事例として世界初の成果
a2. 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発 (光閉じ込め) 【シャープ】	化合物太陽電池層の膜厚を従来の1/4に低減した構造で、変換効率33%を達成する。	エピタキシャル最下層への裏面反射構造の導入、サブセルベース厚さの適正化によるエピタキシャル層の薄層化、バッファ層の薄型化を組み合わせ、3接合型セルでエピタキシャル層の厚さを従来比50%減で従来と同等の電気特性を得た。	△	
b1. シリコン上Ⅲ-Vセル(4端子) 【シャープ】	Ⅲ-V族2接合セルとSiセルとの接合を行ったセルで、変換効率33%を達成する。	低コスト化を主眼とした化合物太陽電池とSi太陽電池のスタック型セルについて、各種構造の評価を行い、透明樹脂によるメカニカルスタック構造が最も有効な構造であることを確認した。また本構造で作製した化合物2接合型セル(InGaP/GaAs)とSiセル(バックコンタクト型)の組み合わせで変換効率33%を得た。	○	

<p>b2. シリコン上Ⅲ-Vセル（スマートスタック）</p> <p>【産総研】</p>	<ul style="list-style-type: none"> • GaAs/Si 系で変換効率 30%. • システム価格 125 円/W 実現のためのスタック技術確立の指針獲得. • 大面積化セルの実装技術の確立、素子寿命 30 年以上の高信頼性化技術指針の確立 	<ul style="list-style-type: none"> • InGaP/AlGaAs//TOPCon Si 3 接合電池において 30.8%を実現した。 • Cu 金属、HVPE 法による GaAs 成膜、低倍集光等の適用により、システム価格 125 円/W 実現可能なことを検証した。 • スマートスタック GaAs//Si 多接合太陽電池の信頼性試験を行い、素子寿命 30 年以上および実用的な耐久性を実証した。 • スタンプ転写を用いたスマートスタック実装技術を確立し、GaAs/Si 系 2×2 太陽電池モジュールの試作に初めて成功した。 	○	
<p>b3. シリコン上Ⅲ-Vセル（直接接合）</p> <p>【大阪市大】</p>	<p>ウエハ接合によるシリコン上Ⅲ-V多接合セルにおいて、非集光下でセル効率 33%を実現する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 接合形成条件最適化により、GaAs 基板/Si 基板直接接合界面抵抗を 1.6 mΩcm² まで低減。 • Si ボトムセルのパッシベーション層として IT0 中間層を導入し直列抵抗低減、効率向上を実現。メタルグリッドを介した接合を実現しセルプロセスに適用。 • GaAs 基板再利用の可能性を実証。 	△	

<p>b4. シリコン上 III-Vセル（接 着技術） 【東京農工大】</p>	<p>①高度光利用技術 開発：メカニカル スタック層の光の 伝達効率 94%、光 反射ロス 6% ②大面積低抵抗接 合技術開発：4イ ンチレベルにおい てメカニカルスタ ック層の接合抵抗 率 $0.5 \Omega \text{cm}^2$ ③高効率多接合セ ル用低コスト化ス タック技術開発： 効率 30%セルの実 現とシステムコス ト 125 円/W を見 込むスタック技術 確立</p>	<p>① 高度光利用技術開発： 中間透明接着層両側に 130nm 厚の IGZO 薄膜を形成することにより光伝達効率 95%（光入射角 0 度）を達成した。(2) 光入射角度を 0~60 度に変えた時、実 効的光伝達効率は 95~92%の高い値を 維持することを明らかにした。(3)さ らに中間接着層の屈折率が小さいほど 実効的光伝達効率は大きくなり、屈折 率 1 の場合、100%となることを明らか にした。 ② 大面積低抵抗接合技術開発： スタック基板表面を SF_6 プラズマ処理 し 40nm 程度のラフネスを形成するこ とにより接合抵抗率 $0.12 \Omega \text{cm}^2$ の低抵 抗率を達成した。 ③高効率多接合セル用低コスト化スタ ック技術開発： III-V トップセルとシリコンボトムセ ルを用いた、$20 \times 20 \text{mm}^2$ サイズの 2 接合 メカニカルスタックソーラーセルを作 製した。$V_{oc}=2.91 \text{ V}$, $J_{sc}=12.6 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0.69$, 変換効率=24.9%を得た。目 標の変換効率 30%は達成できなかった</p>	<p>①高度光 利用技術 開発： ◎ ②大面積 低抵抗接 合技術開 発： ◎ ③高効率 多接合セ ル用低コ スト化ス タック技 術開発： △</p>	
---	---	---	--	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【B 低コスト化プロセス技術開発】(産業技術総合研究所、東京農工大学、東京大学、タカノ (再)、シャープ株式会社、豊田工業大学、宮崎大学、大陽日酸株式会社)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
a1. 低コスト実装プロセス：エピ層移載 【東京大学】	4 インチウエハサイズの ELO 技術開発 表面清浄化技術開発、最適化と再利用 10 回以上の達成	ELO 自動制御装置での ELO 条件最適化、20mm/h の速度で 4 インチウエハ全面剥離を達成。(8 月現在：50mm/h 達成) 清浄化処理後ウエハで市販ウエハと同等の平坦性 (RMS=0.2-0.3nm)、および再成長 GaAs セルの効率歩留り 81%を達成。シャープと協力し 10 回の再利用に資する技術レベルであることを確認	○	
a2. 低コスト実装プロセス：エピ層移載 【タカノ】	4 インチウエハサイズの ELO 自動化装置の開発。 4 インチウエハ表面の高速観察 (1 時間以内) 可能な装置の開発	4 インチウエハ用 ELO 自動制御装置を開発。再現性良い 4 インチウエハの全面剥離を実証。 全面観察装置を開発、1 時間以内の 4 インチウエハ非接触スキャン、さらに検出された異常点の分類判定の正答率 98.5%を達成。	○	
a3. 低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用 【シャープ】	基板の再利用可能回数を 10 回まで向上させる。また、新規プロセスを経たセルの試作・評価を行い、発電コスト目標 7 円/kWh の達成に寄与し得るかの見極めを行う。	エピ層剥離装置の開発により安定したエピ剥離が可能、かつ、低コストの技術を確立した。 剥離後基板を低コストで再利用可能にする技術を開発し、開発した技術を用いて基板の再利用が 10 回以上可能であることを実証した。 量産装置の設計および価格見積を行い、開発したプロセスのコスト試算を実施した。	○	
a4. 低コスト実装プロセス：エピ層移載 【豊田工大】	・3 インチウエハサイズ の高速リフトオフ ・10 回以上の再利用 基板上への III-V 化合物セル作製	GaAs、および Si 基板上に層状化合物 GaSe/In ₂ Se ₃ をバッファ層で挿入して GaAs 層をエピ成長し、GaAs エピ層を基板から高速リフトオフする手法を開発した。液体窒素冷却による熱応力を利用し、3 インチ Si 基板から約 10 秒で GaAs エピ層剥離を実現した。	高速リフトオフ： ○ セル作製： △	

<p>b1. 低コストⅢ -V化合物半導 体製膜技術： MOCVD 【大陽日酸】</p>	<p>成長速度 100 μ m/h (GaAs)、20 μ m/h (InGaP)を得る。昇降温 時間各 15 分、搬送速度 15 分達成の為の要素技 術を確立する。さら に、in-situ クリーニン グによる高スループッ ト化手法を構築する。 MOCVD と HVPE の長所を 融合したハイブリッド 装置やその大口径化の 有効性を検証する。</p>	<p>対応基板サイズ 2 インチまたは 3 イン チ径基板 1 枚を処理できる MOCVD 装置 を開発した。基板はサセプタに載置さ れ、薄膜特性の均一化を目的としてサ セプタの自転機能を設けている。 In-Situ クリーニングに対応できる装 置とするとともに、フローチャンネル 構造および、サセプタの形状の設計変 更により、GaAs 成長速度 120 μ m/h を 達成し、InGaP 成長速度についても 30 μ m/h を確認した。</p>	<p>◎</p>	
<p>b2. 低コストⅢ -V化合物半導 体製膜技術： MOCVD 【東京大学】</p>	<p>MOCVDHVPE により成長速 度 100 μ m/h、効率 20%(GaAs)、成長速度 20 μ m/h、効率 12%(InGaP) を得る。</p>	<p>【GaAs セル】 120 μ m/h の成長速度で Voc=1.05V、効率 24.5%を達成 (p on n セル). n on p セルでは高速成長下で の高効率化がより難しいが、リアヘテ ロ構造により Voc=1.05V を達成。 【InGaP セル】 30 μ m/h の成長速度で 効率 15.3%を達成。 【InGaP/GaAs2 接合セル】 これらの成 果を組み合わせた 2 接合セルで効率 22.3% (反射防止膜で効率約 28%見込 み) を達成。</p>	<p>◎</p>	<p>GaAs セ ルの成長 速度と効 率の組み 合わせは 世界記録</p>
<p>b3. 低コストⅢ -V化合物半導 体製膜技術： HVPE 【大陽日酸】</p>	<p>成長速度 100 μ m/h (GaAs)、20 μ m/h (InGaP)を得る。昇降温 時間各 15 分、搬送速度 15 分達成の為の要素技 術を確立する。広い範 囲でドーピング可能な ガス供給システムを実 現する。MOCVD と HVPE の長所を融合したハイ ブリッド装置やその大 口径化の有効性を検証 する。</p>	<p>GaAs 成長速度 170 μ m/h を達成した。 InGaP 成長速度も 141 μ m/h を達成し た。また、Al 供給ラインの追加設計お よびその改造を行い、AlAs 成長を確認 した。スループット向上の為の高温搬 送改造を実施し、従来は反応炉内で 300°Cから 80°Cまでの冷却に 3 時間を 要していた工程を炉外で 20 分で冷却 できることを確認した。</p>	<p>◎</p>	
<p>b4. 低コストⅢ -V化合物半導</p>	<p>・大陽日酸が開発する HVPE 装置に対して、成</p>	<p>・ GaAs セルにおいて、14 μ m/h の成長 速度で変換効率 24.0%、170 μ m/h の成</p>	<p>◎</p>	<p>HVPE に よる ELO</p>

<p>体製膜技術： HVPE</p> <p>【産総研】</p>	<p>膜技術の研究開発を行い、単セル効率24%(GaAs)、12%(InGaP)を達成する。</p> <p>・HVPEを用いたAlAs層の成長により、ELOが可能であることを実証する。更に、トンネル接合形成によるInGaP/GaAs タンデム太陽電池を試作し、2.4 V以上の開放電圧を目標とする。</p>	<p>長速度で変換効率22.4%を実現した。</p> <p>・InGaPセルにおいて24 $\mu\text{m/h}$の成長速度で変換効率13.0%を実現した。成長速度は141 $\mu\text{m/h}$達成。</p> <p>・Al系成膜技術では、AlCl₃を優先的に生成する技術を開発し、AlInGaP、AlAsの成長を実現した。AlAsリリース層を用いたELO技術が可能であることを実証すると共に、GaAs/InGaAsスマートスタック太陽電池の作製に成功した。</p> <p>・高速成長を用いてトンネル接合を作製し、良好なトンネル特性を得た。InGaP/GaAs タンデムセルを試作し、開放電圧2.32V、変換効率21.8%を実現した。</p>		<p>技術の実証、及びスマートスタックセルの作製は世界初。</p>
<p>B5. 低コストIII-V化合物半導体製膜技術： HVPE</p> <p>【東京農工大】</p>	<p>・GaAs:30 $\mu\text{m/hr}$以上、InGaP:10 $\mu\text{m/h}$以上の超高速成長技術を確立する。</p> <p>・高速で基板結晶に格子整合した三元混晶組成の制御</p> <p>・Al元素を含む二元結晶および三元混晶の成長</p>	<p>・本HVPE成長の熱力学解析結果を基に作製した太陽日酸製HVPE装置により、理論解析を用いた成長条件の検討、およびノズル改良により、GaAsおよびInGaPともに成膜成長速度140 $\mu\text{m/h}$以上を達成した。(最終目標達成)</p> <p>・Al元素を含む化合物半導体のHVPE成長の可能性の熱力学解析結果を応用し、AlAsのHVPE成長に世界で初めて成功した。</p>	<p>◎</p>	
<p>c1. シリコン上III-Vエピ成長</p> <p>【豊田工大】</p>	<p>2017年度で終了</p>	<p>Si上のGaAsヘテロエピ成膜において、成膜法の改良により、GaAs層の転位密度を$3 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$に低減した。</p>	<p>2017年度で終了</p>	
<p>c2. シリコン上III-Vエピ成長</p> <p>【宮崎大】</p>	<p>2017年度で終了</p>	<p>・低温成長GaAsへのレーザーアニール</p> <p>Nd-YAGレーザーを用いて200°Cで成長</p>	<p>2017年度で終了</p>	

		<p>した Si 基板上的の GaAs 薄膜をアニール。照射時間、60 秒までは結晶性の向上を確認。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新規 Ge 原料を用いた Ge バッファ層導入 <p>PJE 装置を用いた成長で Ge バッファ層が平坦かつ高品質に成長可能な条件を確認。Ge バッファ層上への GaAs 成長で貫通転位低減、良好な GaAs/Ge 界面を確認。</p>		
--	--	--	--	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【C 低コストモジュール開発】(シャープ株式会社、パナソニック株式会社、宮崎大学、豊田工業大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
a1. 低コストモジュール開発 【シャープ】	開発テーマ「A 低コストセル技術開発」および「B 低コスト化プロセス技術開発」の成果を利用して作製したセルを用い、モジュール変換効率30%以上を達成する。	低倍集光モジュールを作製し、太陽と正対したときの集光倍率1.9倍、屋外測定での許容角約±13°を得た。 テーマB a1～a3の成果を活用したELO法により作製した2接合型セルを用いたモジュールを作製し27.4%(セル面積)の結果を得た。またこのモジュールとSiセルとのスタック構造モジュールで変換効率30.7%(いずれかのセルのある面積)を得た。	○	
a2. 低コストモジュール開発 【豊田工大】	非集光下で効率33%のセルを用い、モジュール効率30%を達成する。	広角集光光学系を開発し、無追尾集光モジュールでモジュール効率32.8%達成(産総研認定)	○	
a3. 低コストモジュール開発 【パナソニック】	以下の性能を有するPICパネルの実現 ・大きさ: 99cm□ ・変換効率: 38%(PICモジュール) ・システムコスト: ≤190円/W ・PICモジュール製造コスト: ≤80円/W ・発電コスト: ≤14円/kWh	・PIC製造プロセスの低コスト化と長期信頼性を確保した構造で1m角パネルを作製し、変換効率32.2%を確認した。 ・モノモジュールにて、変換効率37.5%を確認した。 ・PIC構造にて、システムコスト試算(2030年)119円/W(100MW/年生産)と7円/kWhの実現見通しを得た。	○	
a4. 低コストモジュール開発 【宮崎大学】	モジュール表面コート技術の開発により、非集光下での効率33%セルを使用して、モジュール効率30%を達成する。	反射防止兼防汚コートを施すことで、太陽電池モジュールの発電量が2.52%増加した。シリカベースの反射防止コートは研究協力機関におけるモジュール構造に採用され、変換効率30%を超えるモジュールが開発された。	○	

<p>b1. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価</p> <p>【シャープ】</p>	<p>低コストモジュールのフィールドテストを実施し、発電量や設備稼働率の実測結果から、発電コスト7円/kWhの達成に向けた見通しを得る。実車両に搭載した場合の化合物太陽電池の発電性能の検証を行い、車載用途の実現可能性について見極めを行う。</p>	<p>実用セルサイズの逆積み3接合型モジュール（非集光）試作を実施し、産業技術総合研究所の測定で、31.2%の効率を得た。</p> <p>上記モジュールの屋外発電量評価を実施し、単位面積当たり発電量で、結晶Siモジュール比151%の結果を得た。</p> <p>テーマA b1の成果を活用して作製した、化合物2接合+Siの4端子構造モジュールの屋外評価を実施し、単位面積あたりの発電量で、結晶Siモジュール比128%の結果を得た。</p> <p>屋外測定で得られたデータを宮崎大学および豊田工大で実施の発電量シミュレーションに提供した。</p> <p>屋外測定で得られたデータから発電量試算をおこない、設備稼働率の試算を実施した。</p> <p>開発した3接合型太陽電池の量産性評価を実施し良好な結果を得た。</p> <p>車載用途評価のためのモジュールを作製しプロジェクト外協力機関に提出し、協力機関で車両への実装および公道での実証試験を実施した。</p>	○	
<p>b2. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価</p> <p>【豊田工大】</p>	<p>全国各地での年間発電量を算出することにより、発電コストを求める。</p>	<p>気象条件や大気条件から発電量を予測する手法を開発し、宮崎大学屋外計測データから検証を行った。</p>	○	
<p>b3. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価</p> <p>【宮崎大学】</p>	<p>低コストモジュールの発電量や設備利用率の試算を実施し、7円/kWhの検証に必要なデータを取得する。</p>	<p>非集光III-V族多接合型太陽電池は、屋外動作において30.79%の変換効率を達成し、Si太陽電池モジュールに比べ約2倍の変換効率を示した。非集光III-V族多接合型太陽電池モジュールを含む他接合型太陽電池の屋外での発電動作が、気象条件、特に太陽光スペクトルの影響を強く受けることを、実証データをもとに世界で初めて明らかにした。さらに、宮崎大学に設置している各種太陽電池の実動作データをもとに、発電量シミュレーションモデルを構築し、全国837箇所における各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量予測が可能となった。</p>	○	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【D 超高効率セル開発】(東京大学、埼玉大学(再)、豊田工業大学、九州大学(再)、シャープ株式会社、宮崎大学、産業技術総合研究所、電気通信大学、神戸大学、名古屋大学、名城大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
a1. 多接合希 積窒化物 【東京大学】	希積窒化物サブセルの 高品質化と4接合セル への実装技術を確立 し、変換効率50%を目 指す。	・電流整合を満たす GaInNAs:Sb セルを 開発し、逆積み型 GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb 格子整合系3接 合セルにおいて、非集光効率~30%を達 成。 ・GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セ ルの開発に国内で初めて成功(ウエハ接 合)。また今後の課題を明らかにし、50% 達成に向けた見通しを得た。	○	
a2. 多接合希 積窒化物 【埼玉大学】	GaAs 基板上 GaInNAs ヘテロ接合セルの構造 設計及び試作を行い、 GaAs フィルタ下で短 絡電流密度 14mA/cm ² 以上を得る。	・窒素 δ ドープを利用した 1eV InGaAs:N 超格子の結晶成長条件を確 立。 ・成長条件とアニール条件の最適化で約 300 cm ² /Vs の電子移動度を達成。 ・試作セルで 1eV までのスペクトル感度 を確認。	△	
a3. 多接合希 積窒化物 【豊田工大】	2016 年度で終了	GaInNAs 材料の残留アクセプタの起源が NH 複合欠陥であり、ダブルアクセプタ である可能性を示した。	2016 年度 で終了	
a4. 多接合希 積窒化物 【九州大】	2016 年度で終了	GaAsN 材料の欠陥構造と電子物性の理論 解析から、高品質化のためには N 起因欠 陥の低減が必要であることを示した。	2016 年度 で終了	
a5. 多接合既 存構造 【シャープ】	他機関と共同で4接合 もしくは5接合型太陽 電池を開発し、50% (集光時)の変換効率 を目指す。	サブセルの pn 接合の構造改良で開放電 圧の向上を確認した。いずれも従来比で InGaP: +0.046V, GaAs: +0.044V, 2接 合(InGaP/GaAs): +0.067V を得た。	○	
a6. 多接合量 子構造 【東京大学】	超格子を挿入した4接 合セルにより、集光下 効率50%を目指す。	第3セルの性能目標値をほぼ達成(70 層の量子井戸により、吸収端 1.15eV, Woc=0.35V, 800nm のフィルタ下で開放 電圧 0.77V, 短絡電流 10mA/cm ² , 曲線因 子 0.69)。	○	ウエハ接合 による4接 合実現にリ ソースを集 中。
a7. 多接合ウ エハ接合 【東京大学】	GaAs 系接合と InP 系2 接合から成る4接合セ ルにより、非集光時変 換効率42%、集光下変	逆積みトップ InGaP/GaAs セル(GaAs ウ エハ:シャープ製)とボトム InGaAsP/InGaAs セル(InP ウエハ:東大 製)の表面活性化接合により4接合セル	△	

	換効率 50%を目指す。	の作製に成功。InGaAs ボトムセルは外部発光効率 7.3%と世界最高水準の Voc=0.43V を達成し、表面活性化接合による低抵抗トンネル接合形成に成功するも、目標効率の達成には至らず。		
a8. 多接合動作解析 【宮崎大学】	最適なキャリア回収効率を示す各接合バンドラインナップの設計により、集光下効率 50%以上の他接合セル実現に寄与する。	歪緩和層を挿入した InGaAs/GaAsP 超格子太陽電池におけるキャリア緩和過程を 3 つの非破壊評価法で解析し、光吸収によって超格子内に励起された電子の 4 つの緩和過程の寿命を算出した。全温度領域で非発光損失が支配的であるが、温度上昇で熱脱出やトンネリング脱出が短くなることを見出した。	○	
b1. 量子ドットマルチバンド 【東京大学】	タイプ II 超格子セル、及び低電流・高電圧型低倍集光セルにより、効率 45%を目指す。	・低電流・高電圧型量子ドットセルにおいて効率 32.1% (225 sun) を達成。 ・2 段階光吸収の設計指針解明と室温動作、集光での電圧向上効果を確認した。	○	最適化により効率向上が見込まれる成果を得ている
b2. 量子ドットマルチバンド (ナローギャップ) 【東京大学】	プラズモン金属ナノ粒子層を組込んだ PbS QD/ZnO NW 太陽電池の NIR 領域 (0.9 μm 以上) で、η=4%以上を達成し、接合層を実装した多接合を実現する。	・0.87 μm 以上で、PCE=2.44%を達成。 ・金属ナノ粒子の導入により、EQE 及び PCE 向上、1.4 μm で光吸収の増強確認。 ・溶液プロセスで作製できるボトムセルを使った分光多接合で 30%超を実証。	△	
b3. 量子ドットマルチバンド 【産総研】	東大グループとの共同により集光下での変換効率 45%以上を目指す。	・InGaP 系ワイドギャップ半導体中にタイプ II 型 InP 量子ドットを作製し、長キャリア寿命 (30 ナノ秒以上) を達成。 ・タイプ II 量子ドットの高品質化により太陽電池特性向上。 ・東大と共同で、スマートスタック型高電圧低電流量子ドットセルにおいて、5 倍集光で効率 31%を達成。	2018 年度で終了	
b4. 量子ドットマルチバンド・高密度量子ドット成長技術	東大グループとの共同により集光下での変換効率 45%以上を目指す。	・面内密度 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の超高密度 InAs QD の成長技術の確立。 ・面内超高密度 QD における 3 次元量子閉じ込め効果及び面内ミニバンド化の検	△	

【電通大】		証、Type-II型で蛍光寿命 10ns 以上を確認。 ・集光下における FF 低下の抑制および変換効率向上の確認。		
b5. 量子ドットマルチバンド・キャリア取り出し 【神戸大学】	・室温におけるキャリア寿命として 100ns を超える長寿命化。 ・キャリア取出し効率は 80%以上に引き上げ。	ラチェット機構を量子ドットで実現し、100ns を超えるキャリア寿命を実現するとともに、それによって 2 段階光励起過程で生成されたキャリアの 80%の引き出しに成功した。	○	
c1. 窒化物セル 【名古屋大】	2017 年度で終了	・シミュレーションにより、非極性面上 30% In 組成 300nm 吸収層を用い、 7 mA/cm ² の電流が得られることを明らかにした。 ・In 組成 20%程度の 180nm 膜厚の InGaN 成長し、優れた表面モフォロジーと PV 特性を得た。	2017 年度で終了	
c2. 窒化物セル 【名城大】	2017 年度で終了	窒化物半導体 InGaN セルと 3 接合太陽電池をメカニカルスタックによって接合し、開放電圧の向上を確認した。	2017 年度で終了	
c3. 窒化物セル 【東京大学】	2017 年度で終了	・PSD 装置改造により、InGaN 膜の成長速度 1.2 μm/h に高速化 ・格子整合 ScAlMgO ₃ (0001) 基板上へ InGaN エピタキシャル成長 ・PSD 高速成膜条件において膜厚 1 μm の In _{0.3} Ga _{0.4} N 成長を実現 ・トンネル接合用の高電子濃度 n 型 GaN 層作製プロセスの開発	2017 年度で終了	

* 1 達成度

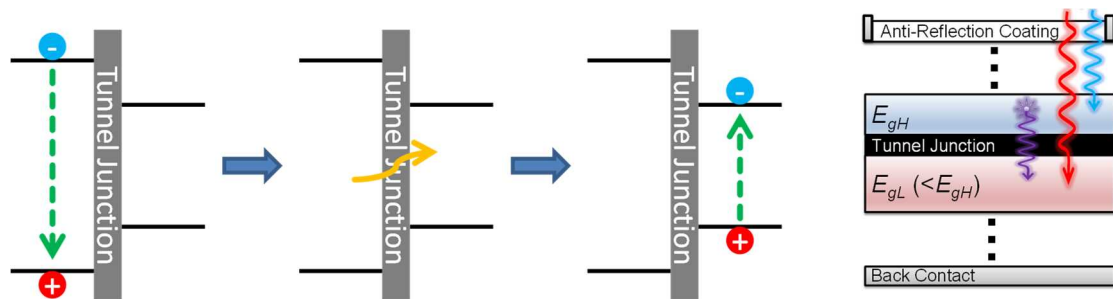
◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

A 低コストセル技術開発（東京大学、シャープ株式会社、産業技術総合研究所、大阪市立大学（再））

1. 成果詳細

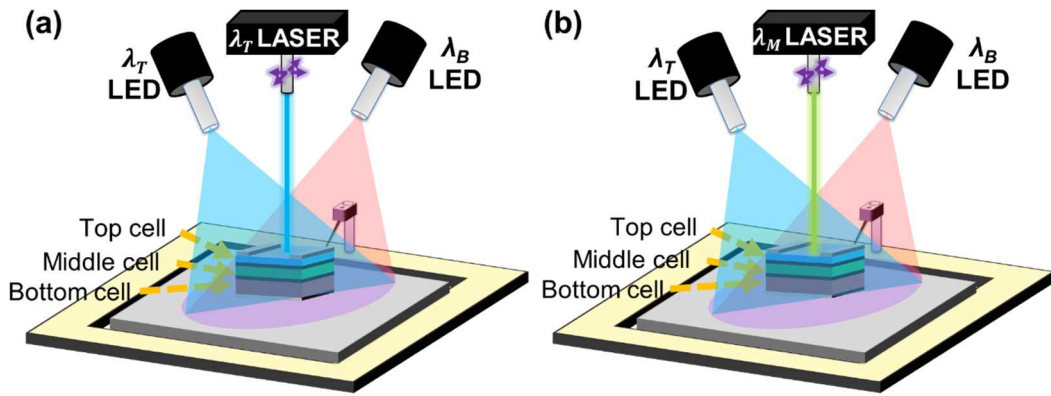
Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1. 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発（光閉じ込め）【東京大学】

多接合太陽電池において直列接続したダイオード間の電流整合条件により、太陽光スペクトルとのミスマッチが生じると電流不整合となり、最も小さなサブセル電流で外部回路への出力電流が律速される。最大変換効率及び実環境下での出力変動に大きな影響を及ぼすこの電流律速を、サブセル間の“ルミネッセンスカップリング(LC)”効果により緩和することができる。ルミネッセンスカップリングは、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-1に示すようにセル上部のワイドバンドギャップ(E_{gH})サブセルに生成した電子正孔対が発光再結合し、セル下部のナローバンドギャップ($E_{gL} < E_{gH}$)サブセルで再吸収される現象である。例として InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池の場合、AM1.5 の基準太陽光スペクトル下では GaAs ミドルセルが電流律速サブセルとなる。InGaP トップセルから GaAs ミドルセルへのルミネッセンスカップリングにより、InGaP トップセルに生じた余剰キャリアが GaAs ミドルセルの電流生成に寄与することとなり、効率向上及び電流律速による出力変動を緩和することができると期待される。



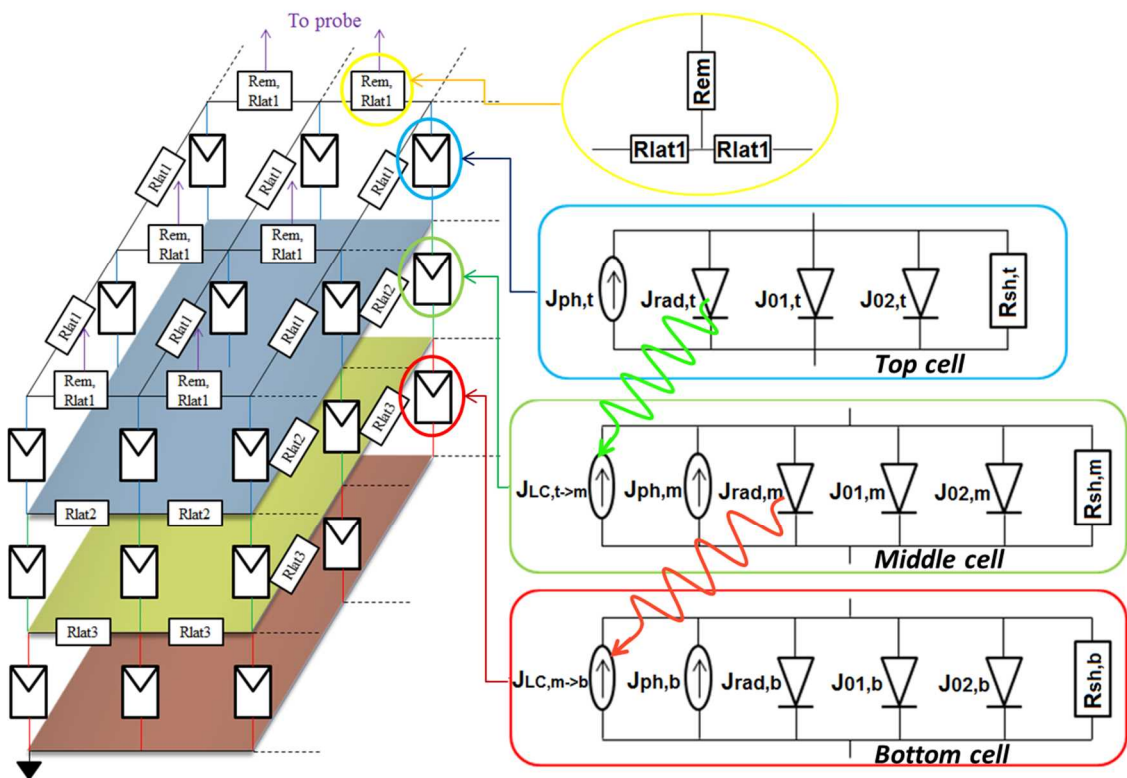
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-1 ルミネッセンスカップリングの模式図

ルミネッセンスカップリングによって生じる電流（LC 電流）を計測するために、レーザー誘起光電流（LBIC）マッピングを用いた。LBIC 測定結果の解析のために、三次元デバイス回路シミュレーションを行った。LBIC は図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-2 に示すように、レーザー光を太陽電池セル上でスキャンすることで光電流分布を測定する手法である。多接合太陽電池において、レーザー光の波長を電流律速サブセルが吸収する波長(λ_m)に設定すると、サブセル直接励起による光電流分布を測定することができる。一方で、レーザー光の波長を電流律速サブセルよりワイドギャップのサブセルが吸収する波長(λ_r)に設定すると、電流律速サブセルを直接励起する外部光源は無い場合、ルミネッセンスカップリングによって電流律速サブセルに生じた LC 電流分布を測定することが可能となる。



図III-2-(ロ)-A-1-a1-2 多接合太陽電池におけるLBIC測定の様式図 (a) LC電流分布 (b) 直接励起電流分布

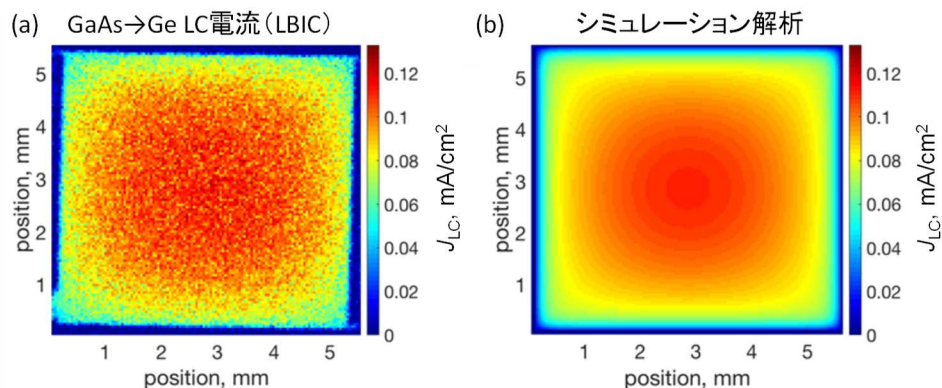
LBIC測定を解析し、LC電流の面内分布やLC効率を定量的に評価するために、三次元デバイス回路シミュレーションを行った。図III-2-(ロ)-A-1-a1-3に構築したモデル図を示す。各サブセルにおいてダイオードが面内配列して抵抗を介して接続している。ルミネッセンスカップリングは上部サブセルにおけるダイオードの発光再結合成分のうち、下部サブセルの光電流生成に寄与するものとして定義される。このモデルをSPICE回路シミュレータで解くことにより、LBIC測定結果の解析を行った。



図III-2-(ロ)-A-1-a1-3 三次元デバイス回路シミュレーションモデルの様式図

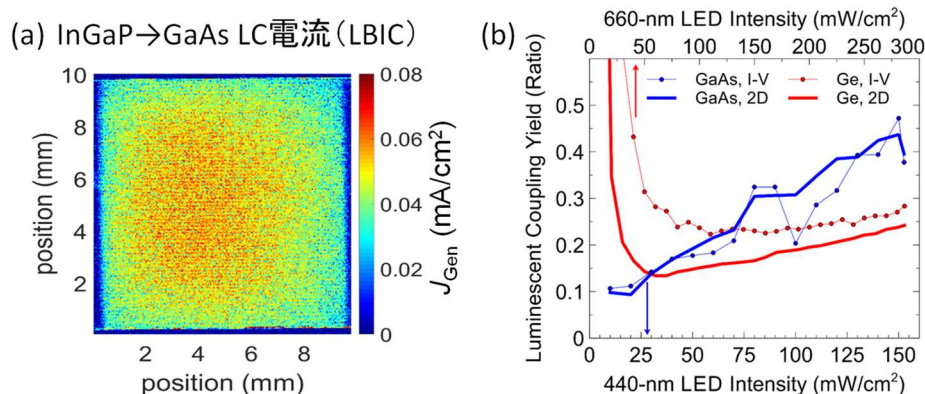
InGaP/GaAs/Ge 3接合太陽電池において、LBICにより測定したGaAs/Geサブセル間のLC電流の面内分布と、ルミネッセンスカップリングを考慮した三次元シミュレーション解析結果を比較した。図III-2-(ロ)-A-1-a1-4に示すように、LBICで測定したLC電流はセル中央付近にかけて大きく、この面内不均一性を三次元シミュレーション解析によって再現することができた。また、LC効果の面内不均一性を

改善することにより、セル変換効率が 0.36%増大する見積もりを得た。



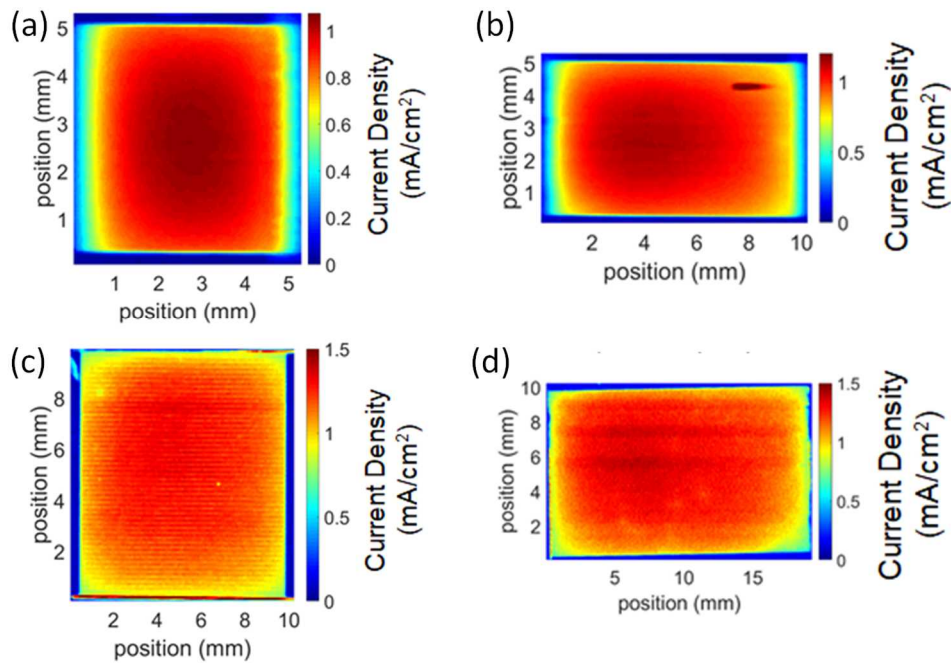
図III-2-(口)-A-1-a1-4 InGaP/GaAs/Ge 3 接合セルにおける (a) LBIC マッピング (b) 三次元シミュレーション解析

InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池において、AM1.5 照射下で電流律速となる GaAs サブセルに対して、InGaP/GaAs サブセル間のルミネッセンスカップリングによる LC 電流増大を評価した。図III-2-(口)-A-1-a1-5 に示すように、図III-2-(口)-A-1-a1-4 に示した GaAs/Ge サブセル間の LC 電流分布と同様に、面内不均一であることを明らかにした。InGaP/GaAs サブセル間の LC 効率は、GaAs/Ge サブセル間に比べて低バイアス光強度でもリークが少ない良好な結果が得られた。InGaP/GaAs サブセル間 LC 効率は約 10% と見積もられ、GaAs サブセルの電流律速を緩和して変換効率が增大することが期待される結果を得た。

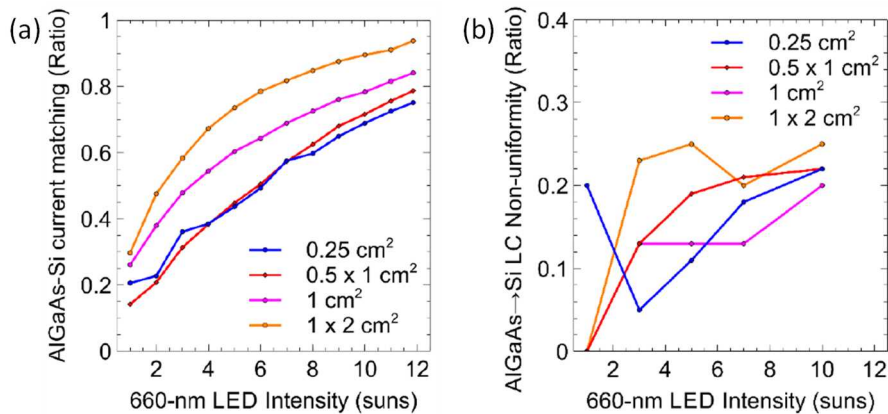


図III-2-(口)-A-1-a1-5 (a) InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流分布 (b) LC 効率の LED バイアス光強度依存性

表面活性化接合(SAB)を用いて InGaP/AlGaAs 2 接合セルと Si セルを接合した InGaP/AlGaAs//Si 3 接合太陽電池において、ルミネッセンスカップリングによる LC 電流増大のセル面積依存性を評価した(図III-2-(口)-A-1-a1-6)。解析結果の図III-2-(口)-A-1-a1-7 に示すように、AlGaAs//Si サブセル間の LC 電流はセル面積が大きいほど増大し、また面内不均一性も大きいことを確認した。すなわち、1 cm²以上のセル面積では LC 電流により電流不整合が緩和され、ルミネッセンスカップリングによる効率向上が期待される。

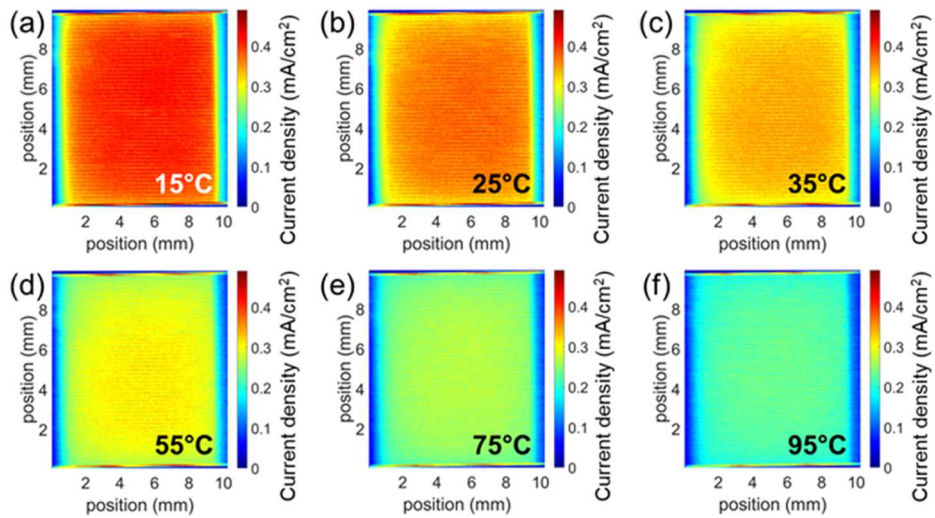


図III-2-(ロ)-A-1-a1-6 InGaP/AlGaAs//Si 3 接合セルの LC 電流分布 (a) 0.25 cm^2 (b) $0.5 \times 1 \text{ cm}^2$ (c) 1 cm^2 (d) $1 \times 2 \text{ cm}^2$

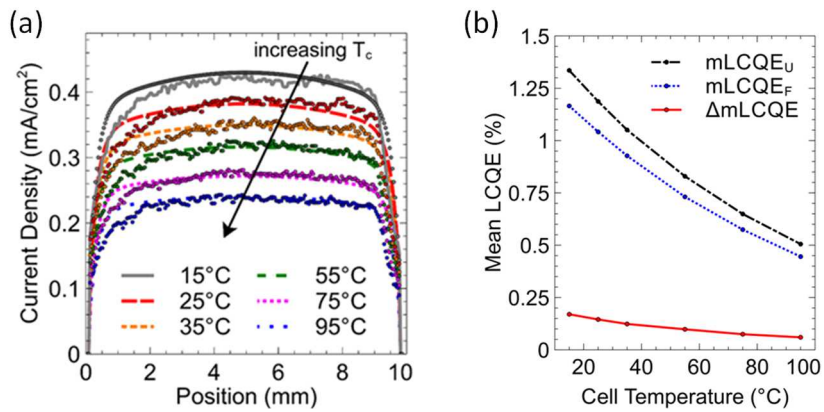


図III-2-(ロ)-A-1-a1-7 AlGaAs//Si サブセル間の (a) LC 電流による電流整合 (b) LC 電流の面内不均一性

InGaP/AlGaAs//Si 3 接合太陽電池において、ルミネッセンスカップリングの動作温度依存性を評価した。図III-2-(ロ)-A-1-a1-8 に LBIC で各温度において測定した AlGaAs//Si サブセル間の LC 電流分布、図III-2-(ロ)-A-1-a1-9 に LC 電流の面内不均一性及び LC 電流から見積もられた外部量子効率の増大分 (mLCQE) をプロットした。LC 電流の面内不均一性は温度が高いほど小さくなり、EQE 増大分も温度が高いほど小さくなった。また図III-2-(ロ)-A-1-a1-9(b)のように、面内不均一性が改善された場合と比較した EQE 増大分 (ΔmLCQE) も同様の温度依存性を示した。

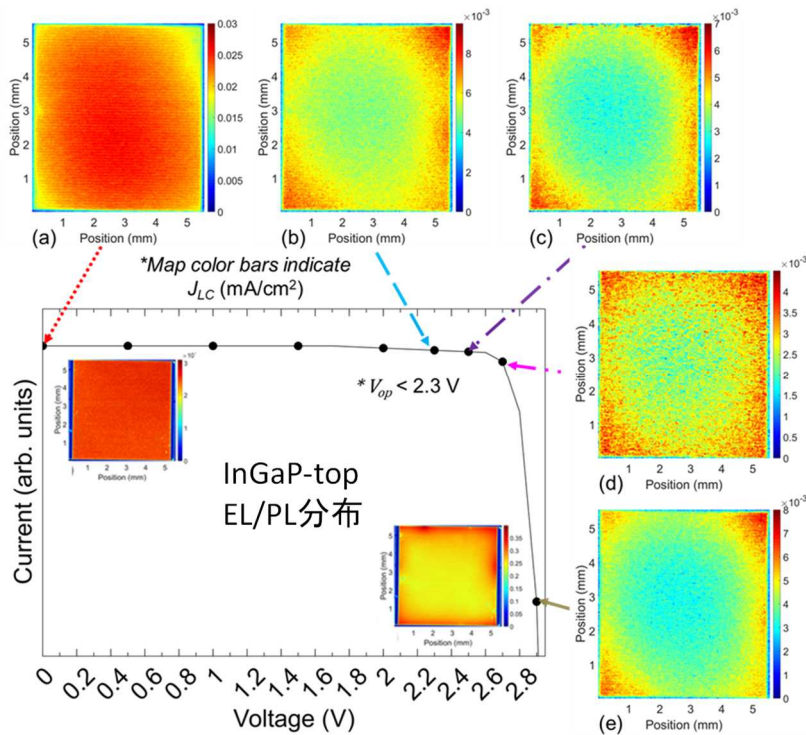


図III-2-(口)-A-1-a1-8 LC 電流のセル動作温度依存性 (a) 15°C (b) 25°C (c) 35°C (d) 55°C (e) 75°C (f) 95°C



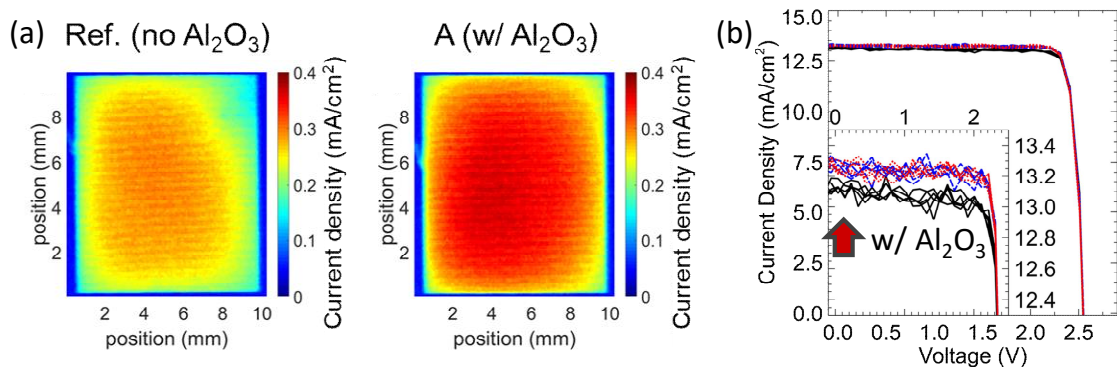
図III-2-(口)-A-1-a1-9 AlGaAs//Si サブセル間 LC 電流の温度依存性 (a) 面内不均一性 (b) EQE 増大分

多接合太陽電池における LC 電流の面内不均一性の起源を解明するため、InGaP/GaAs/Ge 3 接合セルにおける InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流分布のバイアス電圧依存性と InGaP トップセルにおける EL/PL 面内分布との比較を行った。図III-2-(口)-A-1-a1-10 に結果のまとめを示す。動作点より高電圧側ではエッジ付近での LC 電流が多く、EL/PL 分布で見た InGaP の発光再結合速度分布と定性的に一致した。



図III-2-(ロ)-A-1-a1-10 InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流分布と InGaP の EL/PL 分布のバイアス電圧依存性

LC 電流分布の不均一性改善に向けて、後処理による多接合太陽電池の端面パッシベーションを検討した。InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池において、原子層堆積(ALD)法を用いてセル端面に Al₂O₃ パッシベーション膜を形成した。図III-2-(ロ)-A-1-a1-11 に示すように、Al₂O₃ の有無により InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流面内分布の不均一性が改善され、電流電圧特性においても光電流が増大し改善が見られた。



図III-2-(ロ)-A-1-a1-11 端面 Al₂O₃ ALD 膜による (a) InGaP/GaAs サブセル間の LC 電流分布 (b) 電流電圧特性

以上、III-V 族多接合太陽電池におけるサブセル間ルミネッセンスカップリングによって生じる、LC 電流の面内不均一性についての評価・解析から、LC 電流の面内不均一性を改善することで得られる高効率化とスペクトル変動による出力変動の抑制に向けた指針を解明することができた。

低コスト化に有効なエピタキシャル結晶層厚削減のポテンシャルを理論的に明確化するため、有限厚

さのサブセル材料による光吸収を考慮したサブセル間電流整合条件を検討した。シャープ楕による IMM 3 接合の薄膜化検討では、従来構造では 37%であった効率が、厚さ 1/2 で 35%、低コスト化目標達成に必要な厚さ 1/4 では効率が 28%まで低下してしまうという実験結果を得た。ただし、これは裏面をミラー電極とした場合であり、裏面テクスチャにより入射光を背面で散乱、表面での全反射を利用して光閉じ込めを行うことで実効的なセル厚さを確保して厚さ 1/4 でも効率を 30%以上に維持できる可能性がある。薄膜 GaAs やアモルファス Si など単セルでの光閉じ込めは、単に実効的な光路長を延長するだけで効率が向上するので単純である。一方、薄膜多接合セルの場合には、各セルで吸収波長帯が異なるため波長によって光路長の延長効果が大きく変化すること、さらにサブセル間で吸収する光子数を合わせて電流整合をとる必要があることから、理論計算を用いて最適な層厚の組み合わせを求める必要がある。

そこで、従来構造の IMM 3 接合の分光量子効率データにモデル計算をフィッティングして得られた InGaP, GaAs, InGaAs 各サブセル材料の光吸収係数をもとに、薄膜化した 3 接合セル内部において、各サブセルでの光吸収（層厚が小さいので、吸収帯域の波長であつても入射光の一部しか吸収しない）と表面・裏面での光多重反射を考慮に入れたサブセル電流出力を計算した。計算モデルの概略を図 III-2-(ロ)-A-1-a1-12 に示す。

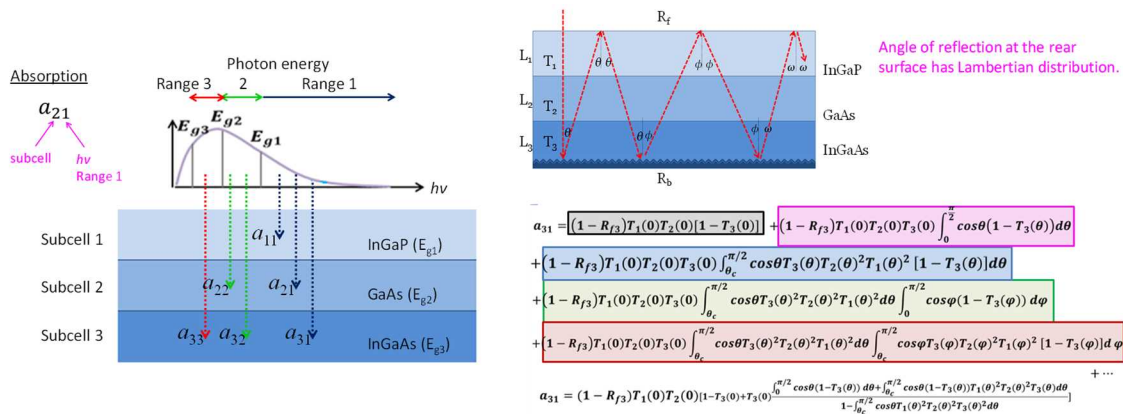


図 III-2-(ロ)-A-1-a1-12 薄膜多接合セル内部での各波長の光の吸収、散乱を計算し、各セルの光吸収を求めるモデル

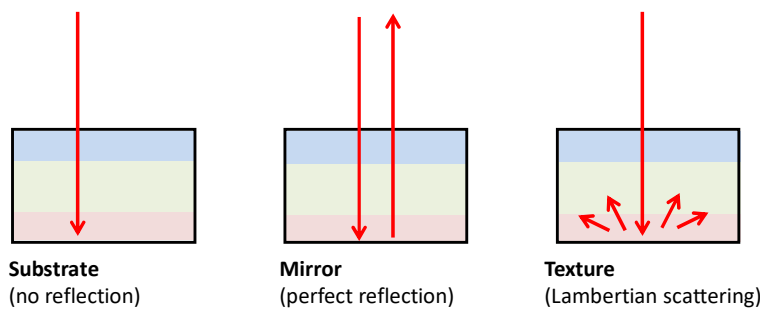
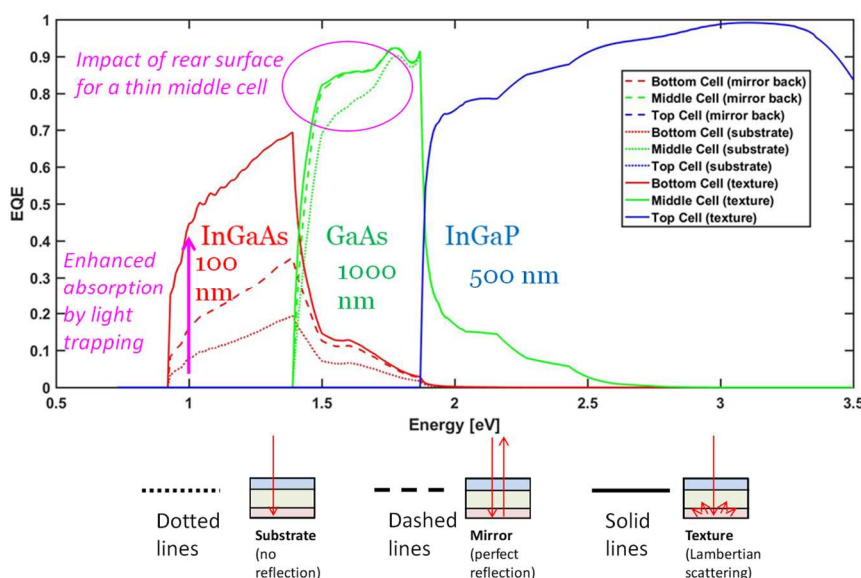


図 III-2-(ロ)-A-1-a1-13 セル裏面のモデル

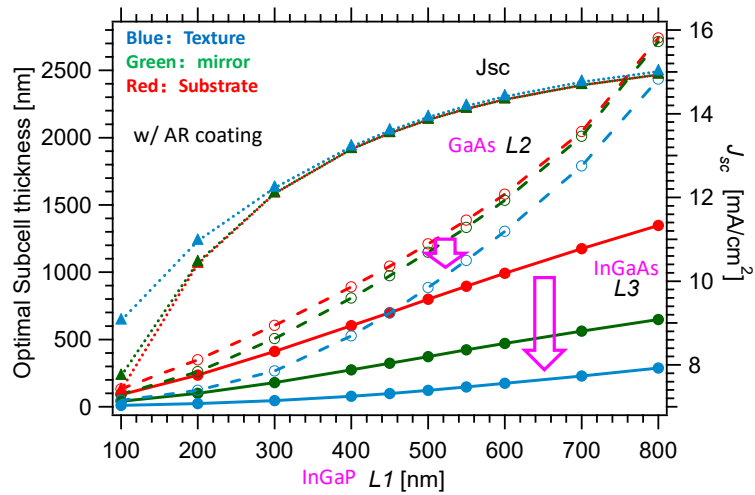
3 接合の光入射に対する裏面構造としては、完全光吸収の基板、平面状の完全鏡面（現状 IMM セルの理想状態）、Lambertian 散乱構造（理想的な光閉じ込めテクスチャ構造）の 3 種類を仮定した（図 III-2-(ロ)-A-1-a1-13）。散乱構造のみが、入射した光の反射方向を cosine 則に従って変化させることができ、この際に反射光の表面への入射角度が全反射条件を満たす場合に図 III-2-(ロ)-A-1-a1-12 に示すような全反射が起きる（図では裏面散乱の度に光の角度が変わっていることに注目されたい）。

このような計算の結果、AM1.5 入射光による各サブセルでの光吸収が計算され、図III-2-(ロ)-A-1-a1-14 に例示するような分光外部量子効率を得られる（表面の無反射コーティングを仮定している）。GaAs と InGaAs サブセルの間に存在するメタモルフィックバッファーによる光吸収は今回の計算では考慮されていない。各サブセルともに光の完全吸収に必要な厚さを大幅に下回っているため、サブセルの吸収波長域であっても量子効率は1にならずに、各サブセル材料での吸収係数が低下する長波長側に向けて低下する。その分、下に存在するサブセルの量子効率が上昇する形となる。ここで注目するのは、裏面テクスチャの効果である。InGaAs ボトムセルの吸収波長域はトップ 2 セルでは吸収されないため、裏面散乱による多重反射の効果は非常に大きい。図中の破線は垂直反射で光路長が2倍になった場合の結果であるが、これよりもはるかに大きい量子効率が裏面テクスチャの場合に得られている。すなわち、多重反射の効果がボトムセルの光吸収には顕著に現れる。一方で、ミドルセルでは破線の垂直反射と実線の多重反射の差はほとんどない。すなわち、図III-2-(ロ)-A-1-a1-14 に示したサブセル厚の組み合わせでは、裏面テクスチャの効果は InGaAs ボトムセルに限定される。ミドルセル、ボトムセルの厚さがさらに小さい場合には、ミドルセルの光吸収にも裏面テクスチャの効果の効果が現れる。



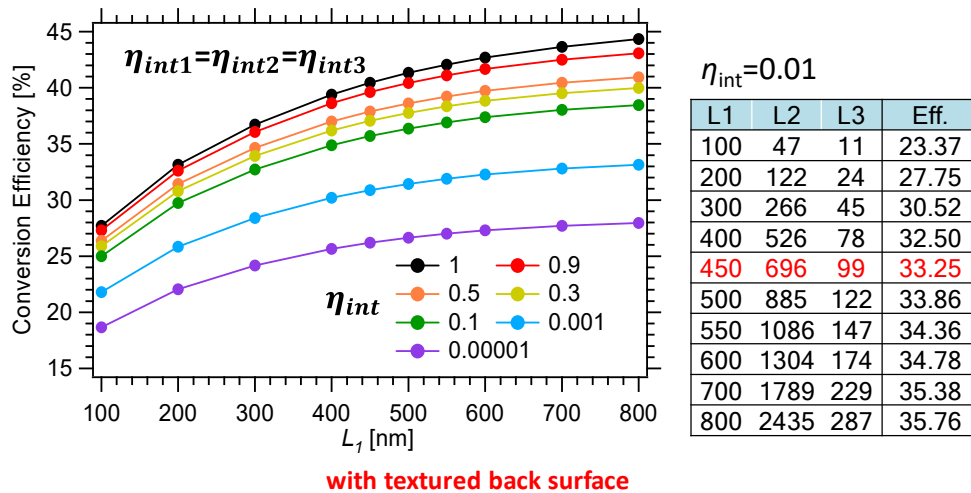
図III-2-(ロ)-A-1-a1-14 薄膜3接合セルの分光量子効率の計算結果例

このような計算により、電流整合を満たす薄膜3接合セルの各サブセル厚さを求めた結果を、図III-2-(ロ)-A-1-a1-15 に示す。InGaP トップセルの厚さの関数として計算している。セル裏面は、図III-2-(ロ)-A-1-a1-13 に示す3種を仮定している。裏面が吸収体（高ドープ基板）、垂直反射のミラー、散乱テクスチャの順で、電流整合に必要なサブセルの厚さが低減される。実際には、IMM 構造では裏面はミラーになるため、図の緑線と青線の差分が重要である。InGaAs ボトムセルの厚さは裏面ミラーを散乱テクスチャに変更すると約半分に低減される。GaAs ボトムセルの厚さに対する裏面テクスチャの効果はボトムセルほど大きくはないが、とくにセル全体が薄くなる（InGaP トップセルの厚さが小さくなる）と、裏面テクスチャによりミドルセルの厚さを2/3程度に低減できる。もちろん、セル全体が薄くなると光吸収が低下し、短絡電流が減少する。



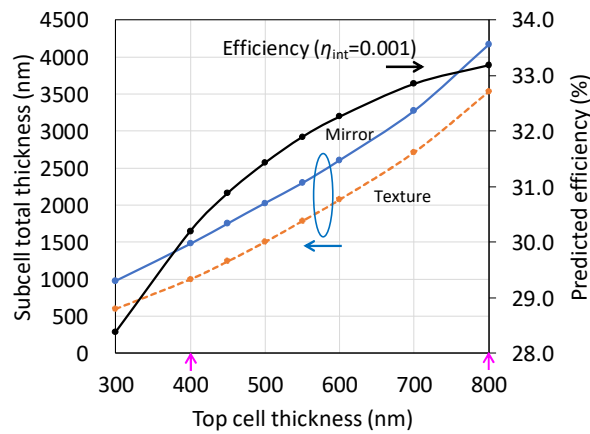
図III-2-(口)-A-1-a1-15 電流整合を満たす薄膜3接合セルの各サブセル厚さ。InGaP トップセルの厚さの関数として計算した値。セル裏面は、図III-2-(口)-A-1-a1-13 示す3種を仮定している

このような光吸収をベースに、サブセル材料の発光再結合効率 η_{int} を考慮した拡張詳細平衡理論による3接合セルの効率を計算した結果を図III-2-(口)-A-1-a1-16に示す。今回考慮した材料に関する典型的な値としては、 $\eta_{int}=0.01$ が目安となる。裏面 Lambertian 散乱構造を用いることで、3セルの厚さ合計が $1.2 \mu\text{m}$ 程度でも効率33%が達成可能という結果を得た。



図III-2-(口)-A-1-a1-16 裏面テクスチャを形成した電流整合条件を満たす3接合セルについて、サブセル材料の発光再結合効率 η_{int} を考慮した拡張詳細平衡理論による3接合セルの効率計算。 $\eta_{int}=0.01$ の場合に電流整合するサブセル厚さ (L1がInGaPトップでL3がInGaAsボトム) 及び変換効率

さらに低コスト化に有効なエピタキシャル薄膜の膜厚削減の可能性を明確化するため、サブセル間のルミネッセンスカップリングの効果をも考慮した効率予測を行った。裏面ミラーと裏面散乱体の2ケースについて、InGaP トップセルの厚さを変数として、その条件で電流整合をとるGaAs、InGaAsサブセルの厚さを計算で求め、サブセル材料の発光再結合効率 $\eta_{int}=0.001$ を仮定した拡張詳細平衡理論による3接合セルの効率計算を行った(図III-2-(口)-A-1-a1-17)。その結果、理想的な裏面テクスチャが実現した場合、3つのサブセルの総厚を $3.5 \mu\text{m}$ から $1.0 \mu\text{m}$ まで約7割削減しても、効率は33.2%から30.2%まで約1割しか低下しないことが示された。これは低コスト化に向けて有望な値と考えられる。



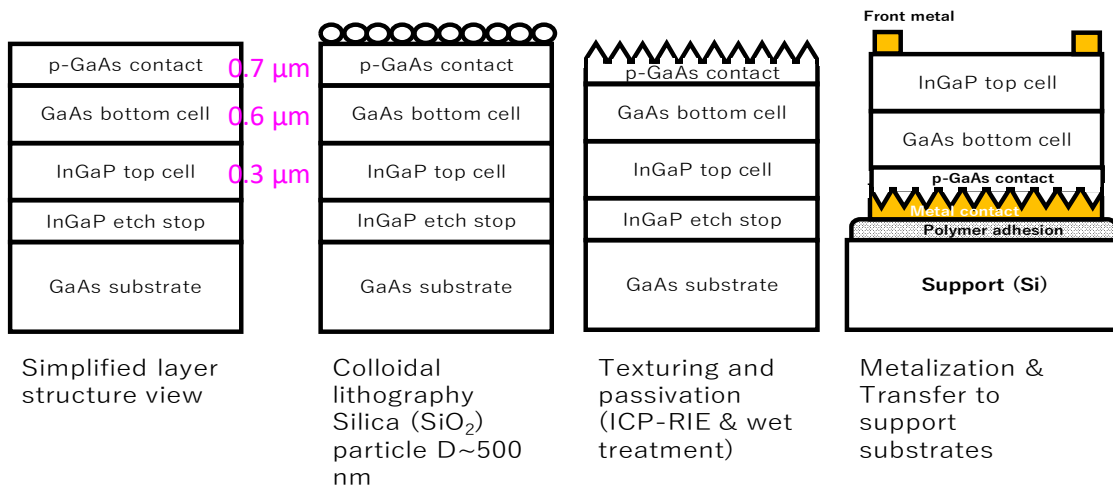
~70% reduction in thickness

Total thickness (nm)	Mirror	4165	1478
	Texture	3534	1001
Efficiency (%)		33.2	30.2

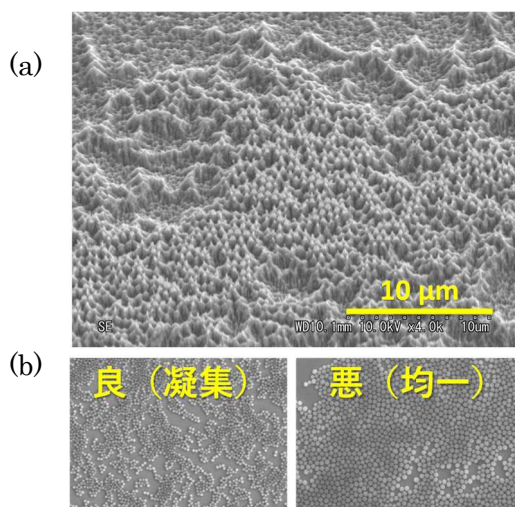
only 10% reduction in efficiency

図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-17 裏面ミラーと散乱テクスチャを有する電流整合条件を満たす3接合セルについて、InGaP トップセルの厚さとセルの総厚（メタモルフィックバッファを除く）と発光再結合効率 $\eta_{\text{int}}=0.001$ を仮定した拡張詳細平衡理論による効率を計算した結果

以上のように、裏面散乱体を薄膜3接合セルに適用する効果は絶大であると計算されたので、実際にIMMセルに適用可能な裏面散乱体の実装法を検討した。モデル構造として、まずはInGaP/GaAs 2接合セルを対象とし、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-18に示すように、表面にテクスチャ形成用の厚いGaAsコンタクト層 ($0.7 \mu\text{m}$) を付加した逆積みエピタキシャル層構造を用意した。テクスチャ構造を形成するために、まず直径 $0.5 \mu\text{m}$ のシリカ粒子懸濁液をスピコート・乾燥し、GaAs表面に粒子を配列した。その後、シリカ粒子マスクを用いて Cl_2 を用いたドライエッチングを行い、HF溶液でシリカ粒子を除去すると、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-19に示すようなテクスチャ表面を得た。シリカ粒子をスピコートする前のGaAs表面の親水性が粒子の配列状況に大きく影響するため、 H_2O_2 溶液によりGaAs表面を酸化した。そのプロセス時間により表面親水化の度合いが異なり、粒子の凝集状態が変化して形成されるテクスチャに影響した。親水化処理時間が長いGaAs表面にはシリカ粒子が均一に配列してサブミクロンサイズの突起がほぼ均一に形成されたのに対し、親水化処理時間が短いGaAs表面ではシリカ粒子が凝集した部分と粒子のない空隙がまだら模様形成された。その結果、形成したテクスチャにはサブミクロンサイズと数ミクロンサイズの構造が共存する形となった。

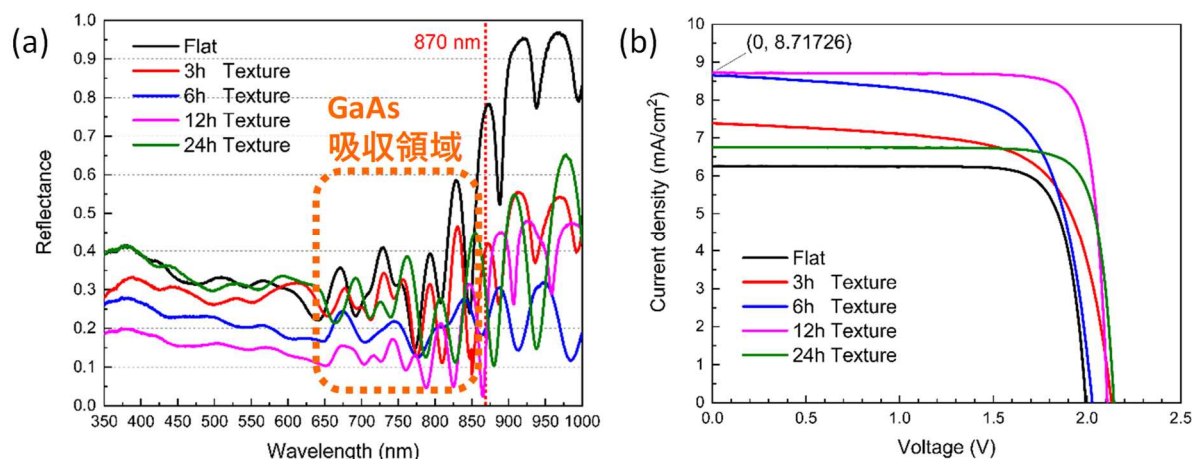


図III-2-(ロ)-A-1-a1-18 裏面散乱テクスチャを有する InGaP/GaAs 2 接合セルの作製プロセスフロー



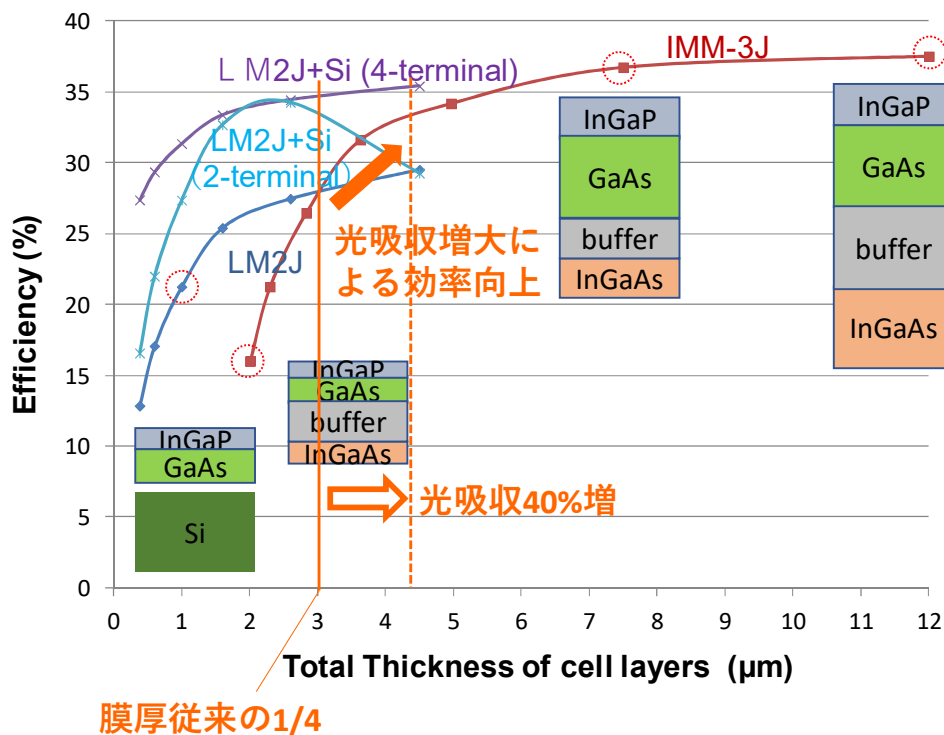
図III-2-(ロ)-A-1-a1-19 (a)シリカ粒子のコロイダルリソグラフィーとドライエッチングにより形成した GaAs の表面テクスチャの SEM 鳥瞰図 (b)親水化時間の異なる GaAs 表面にスピコートして配列させたシリカ粒子の表面 SEM 像

これらの裏面テクスチャを有する InGaP/GaAs 薄膜 2 接合セルの特性を評価した。InGaP サブセルと GaAs サブセルの厚さは、それぞれ $0.3 \mu\text{m}$ と $0.6 \mu\text{m}$ とした。まず、光閉じ込め性能を垂直方向の表面反射率により評価した。光吸収層が十分厚い太陽電池では、セルの吸収波長帯域では 0.3 程度の表面反射率をとる（無反射コーティングを施さない場合）。しかし、セルが薄く光吸収が不十分な場合、裏面がミラーになっていれば、一旦セルに取り込まれた光が再び表面から放出されるので、反射率は 0.3 よりも大きくなる。実際に、図III-2-(ロ)-A-1-a1-20(a)に示した反射率スペクトルでは、GaAs の吸収波長域でも反射率が 0.3 よりも大きくなっている。GaAs 親水化時間が異なる裏面テクスチャでは、表面反射率が異なっており光閉じ込めの効果が異なることを示している。12 時間親水化したテクスチャが最も低い反射率を呈しており、このテクスチャが最も高い光閉じ込め効率を有するといえる。反射率の低下と同時に、セルの表面と裏面が作る光共振器による波長方向の干渉の山谷比が小さくなって（干渉が弱くなって）いる。これは、裏面テクスチャが垂直方向以外に光を散乱することで、干渉のコヒーレンスが低下しているためであり、これも光閉じ込め効果の増大を示している。



図III-2-(口)-A-1-a1-20 GaAs 表面の親水化処理時間を変化させて形成した裏面テクスチャを有する InGaP/GaAs 2 接合セルの (a) 垂直方向の分光反射率 (b) セルの電流電圧特性

裏面テクスチャを有する薄膜 2 接合セルの電流電圧特性を図 III-2-(口)-A-1-a1-20 (b) に示す。支持基板 (シリコン) への転写とウエットエッチングによる基板除去のプロセスの過程でコンタクト抵抗が増大したりシャントしたり、あるいは結晶層にダメージが入ったりするため、セルによっては V_{oc} の低下や曲線因子の低下がみられる。しかし、 J_{sc} に注目すると、反射率測定からもっとも光閉じ込め効果が大いといと推測された 12 時間親水化したテクスチャを裏面に有するセルがもっとも J_{sc} が大きいという整合した結果を得た。裏面が平坦ミラーのセルに比べて約 40% の J_{sc} 増大を得ることができた。冒頭で述べた、低コスト化目標達成に必要な厚さ 1/4 では効率が 28% まで低下してしまうというシャープ(株)による実験結果に関して、約 40% の J_{sc} 増大をセルの層厚が等価的に 40% 増大したものと近似的に解釈すると、セルの層厚は現状の 1/3 に増大したと近似でき、目標とする効率 33% が視野に入る (図 III-2-(口)-A-1-a1-21)。もちろん、前半で述べたシミュレーションをもとにさらに詳細な見積もりと実験による実証が必要となるが、現実に実装可能な裏面テクスチャを用いて薄膜 3 接合セルの厚さを現状の 1/4 にして効率 33% を達成する可能性を示すことができた。

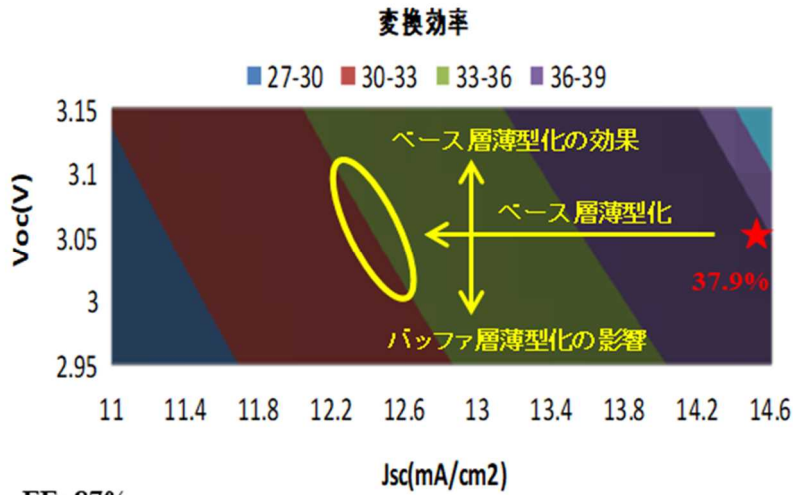


図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1-21 シャープ(株)による IMM 接合セル効率の膜厚依存性プロットに、コスト低減上の目標である層厚 1/4 の状態と、そこから光吸収が 40%増大した際の効率予測を示す

Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a2. 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発 (光閉じ込め)【シャープ】

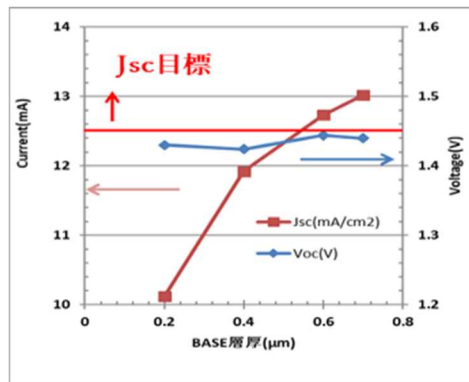
本テーマは、2010 年度から 2014 年度に受託して推進した「革新的太陽光発電技術研究開発 (革新型太陽電池国際研究拠点整備事業) ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発 (エピタキシャル成長技術)」に於いて、変換効率 37.9%を得た GaAs 基板上の逆積み 3 接合セル (逆積み InGaP/GaAs/InGaAs セル) の構造をベースとして低コスト化の取り組みを行った。この太陽電池はエピタキシャル層が 12 μm 以上あり、MOCVD を用いた製造に大きなコストがかかる。ある程度の高効率を維持したまま薄膜化することで低コスト化の取り組みを行った。前プロジェクトで得られた変換効率はチャンピオンデータであるので、大面積化、量産への適用性を鑑み変換効率の目標値は 33%とした。

前プロジェクトで開発した逆積み 3 接合セルの層厚は約 12 μm であり、そのうち大きな割合占める、各サブセルのベース層、および、バッファ層について薄層化の検討を行った。サブセルのベース層は各々のサブセルの発電電流に大きく影響を与え単純に薄層化すると短絡電流が下がる結果となるので、セル最下層に光反射層を加える検討も併せて行った。図 2 に、変換効率 33%を満たすための短絡電流(J_{sc})/解放電圧(V_{oc})の目標、および、薄層化による電気特性への影響の可能性を図示した。

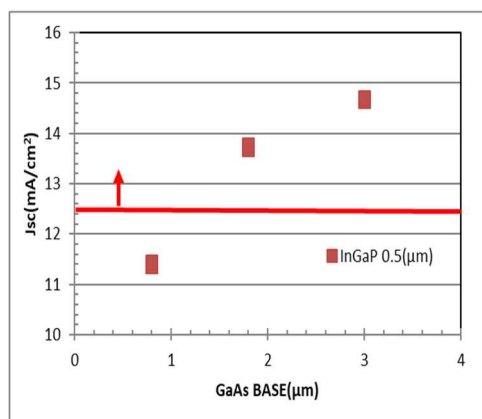


図III-2-(ロ)-A-1-a2-1 セル変換効率 33%を達成のための J_{sc} / V_{oc} 目標

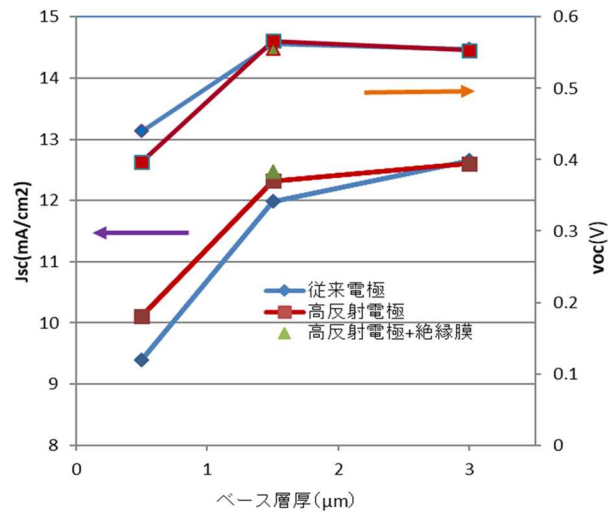
目標とする J_{sc} (12.5 mA/cm^2) が得られる各サブセルのベース層厚を、サブセル単体および 2 接合、3 接合セルで評価を行い決定した。最下段の InGaAs セルについては、裏面構造の改良により裏面反射を活用しより薄型化できる構造とした。その結果それぞれ従来比で InGaP=2/3, GaAs=1/2, InGaAs=1/3 で所望の J_{sc} が得られる結果を得た。



図III-2-(ロ)-A-1-a2-2 InGaP セルのベース層厚と V_{oc} 、 J_{sc} の関係

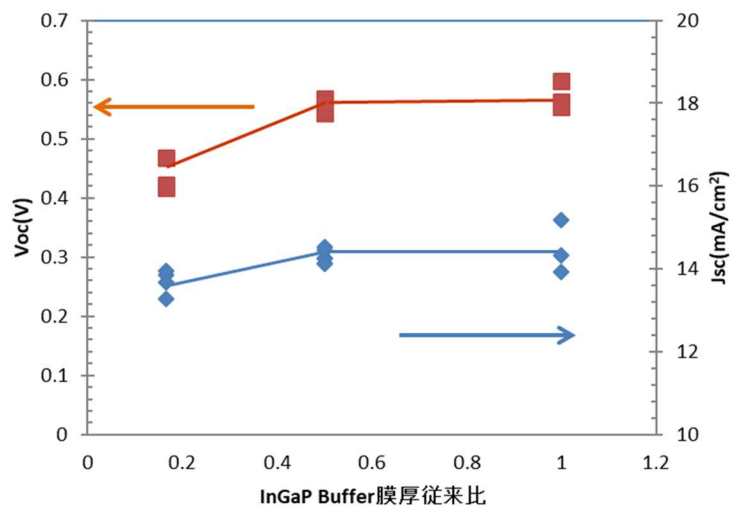


図III-2-(ロ)-A-1-a2-3 InGaP セル下の GaAs セルベース層厚と J_{sc} の関係



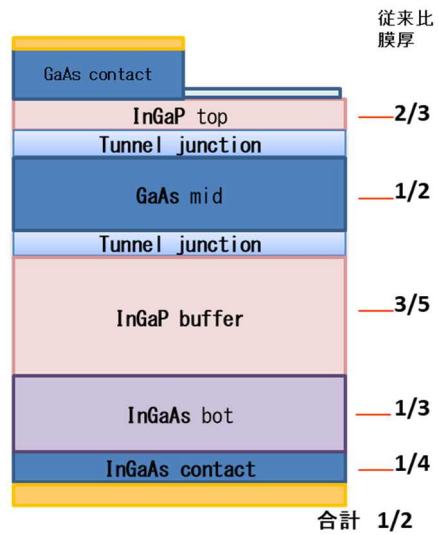
図III-2-(口)-A-1-a2-4 ボトムセルのベース層厚および裏面構造による電気特性への影響

GaAs セルと InGaAs セル間のバッファ層については、従来比 1/6 までは目標とする J_{sc} (12.5mA/cm²) 得ることが確認できたが、 V_{oc} は従来比 1/2 までは所望の値が得られた。

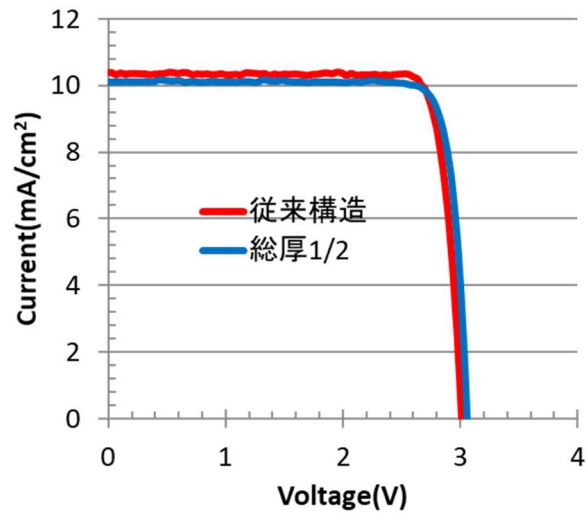


図III-2-(口)-A-1-a2-5 バッファ層厚とボトムセルの電気特性

上記検討結果を取り込んだ逆積み 3 接合型では、エピ層全体の厚さが従来比 1/2 でセル変換効率 26.39% (反射防止膜なし) を得ることが出来た。これは、反射防止膜付きの推定値で 33%以上となる特性となり目標の 33%以上を確認した。一方、目標の従来比 1/4 の厚さについては、期待した結果が得られなかった。目標となる総厚 1/4 の達成は厳しいとの判断で、各セルの高効率化による低コスト化に専念することにした。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a2-6 薄型逆積み3接合セル構造 (従来比 1/2 厚さ)



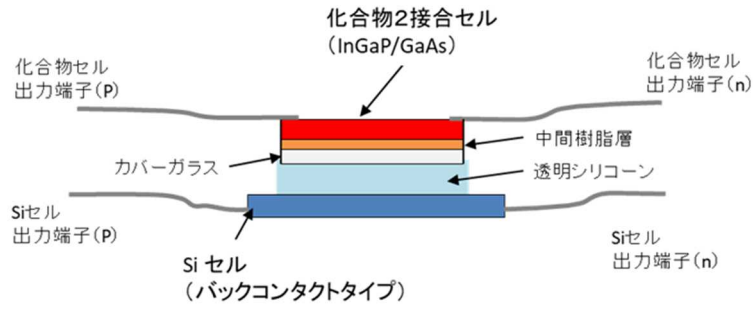
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a2-7 逆積み3接合型セル電気特性

Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b1. シリコン上Ⅲ-Vセル (4端子)【シャープ】

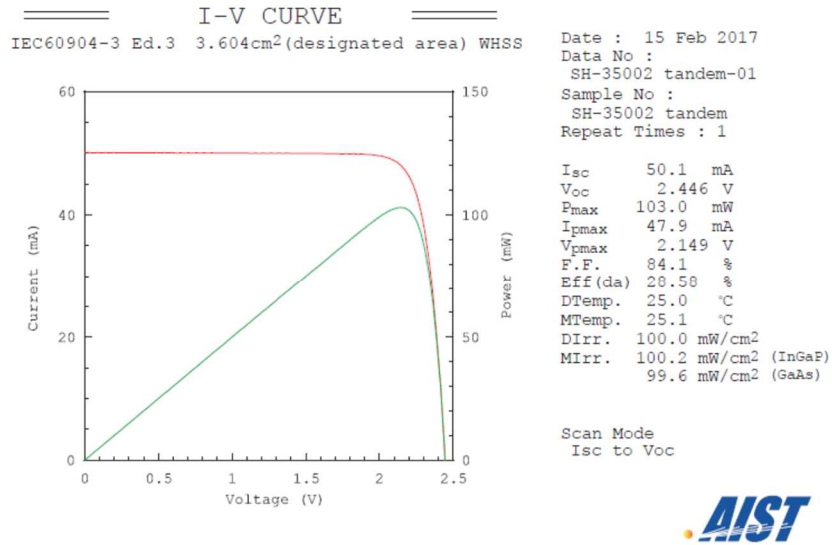
本テーマは低コスト化に資するために2接合型のⅢ-V族化合物太陽電池(InGaP/GaAs)とSi太陽電池のスタック構造による3接合太陽電池の開発に取り組んだ。Siセル表面への化合物セルの機械的接合(メカニカルスタック)技術、およびMOCVDを用いたSi基板上へのⅢ-V層へテロ成長によるセル形成技術の開発に取り組み、そのうち非導電性接着剤でのメカニカルスタック法で有望な結果を得た。本構造で小サイズのセル(化合物2接合セルとSiセルそれぞれから電極が外部に取り出した4端子構造)を作製し、目標としたセル変換効率33%の結果を得た。本委託業務のテーマCでは、本構造を用いたモジュールを作製し、屋外発電量測定を実施して、結果から発電量予測を行った。

表 Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b1-1 各種構造の評価結果等

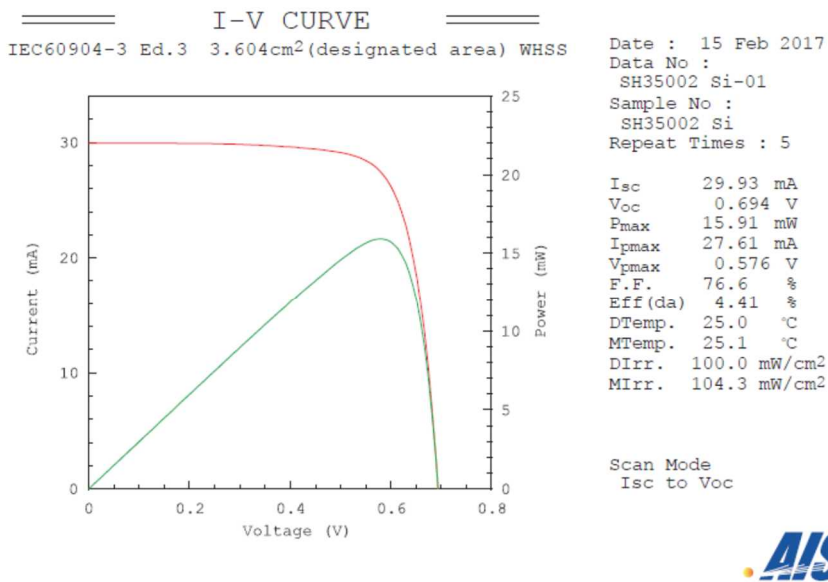
	構造	特長・結果	判定
A	表面活性化接合 (メカニカルスタック)	【特長】 ・接着剤レスのため高信頼性が期待できる ・2端子取出し 【結果】 ・接合可能であることを確認した。 ・Siセル表面の平坦度、清浄度が重要であることを確認した。(低コスト化に適さないと判断)	検討 中止
B	導電性接着剤接合 (メカニカルスタック)	【特長】 ・簡便な工法で接着可能(真空プロセスが必要ない) ・2端子取出し 【結果】 ・接合可能であるが、接合部が高抵抗となる ・導電物質含有の影響で接着剤層の透過率が低い	検討 中止
C	非導電性接着剤接合 (メカニカルスタック)	【特長】 ・簡便な工法で接着可能(真空プロセスが必要ない) ・4端子取出し 【結果】 ・所望の電気特性が得られた ・製作プロセス上の大きな課題は確認できなかった	検討 継続
D	Si上へテロ成長 (MOCVD)	【特長】 ・高価なGaAs基板の使用が不要 ・他の手法と比較してセルプロセスが簡便 ・2端子取出し 【結果】 ・所望の結晶性を持つ層が得られなかった。	検討 中止



図III-2-(ロ)-A-1-b1-1 非導電性接着剤を使用して作製した3接合型セルの断面模式図



図III-2-(ロ)-A-1-b1-2 電気特性測定結果 (化合物2接合部分)



図III-2-(ロ)-A-1-b1-3 電気特性測定結果 (Si部分)

III-2-(ロ)-A-1-b2. シリコン上III-Vセル (スマートスタック) 【産総研】

本テーマにおいては、金属ナノ粒子配列を利用したスマートスタック技術により、モジュール発電効率 30%以上を有しかつコストミニマムなセル構造および実用化技術を検討した。以下の二項目について、本事業で得られた研究開発成果の詳細を記す。

① 低コストハイブリッド多接合技術開発

汎用性の高い結晶 Si 系セルをスマートスタック多接合セルのボトムセルとして用いることにより、高効率化と低コスト化の両立を検討した。結晶 Si セルは各種作製手法 (構造・特徴による分類) があるが、はじめに最も古典的な構造である Al-Back Surface Field (BSF) 型を用いた結晶 Si セルでの検討を行った。

図 III-2-(ロ)-A-1-b2-1 は作製した InGaP/GaAs//Al-BSF Si スマートスタック 3 接合セルの構造模式図、界面の Pd ナノ粒子配列 SEM 像、接合界面 TEM 像である。この組み合わせにおける各種要素セルの EQE 特性を測定したところ、結晶 Si ボトムセルにおいて短絡電流密度値が律速されていることが確認された (図 III-2-(ロ)-A-1-b2-2)。実際、変換効率としては 25.1% という値に止まり、短絡電流向上のためには光マネジメント技術やより精密な構造設計 (膜厚・材料組成設計) の導入が必要であることが示唆された。

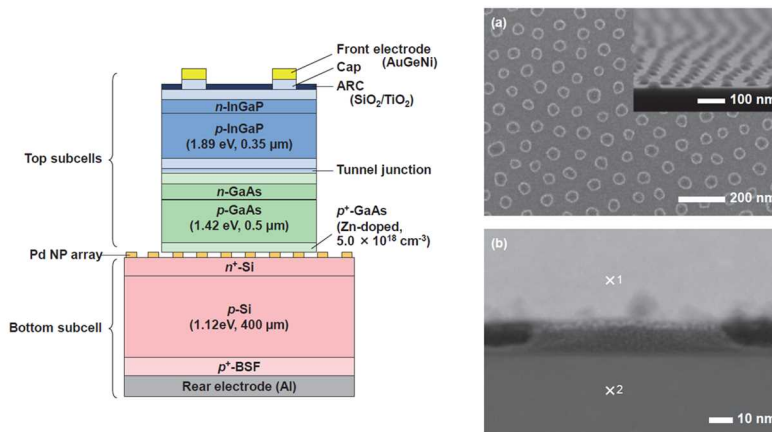
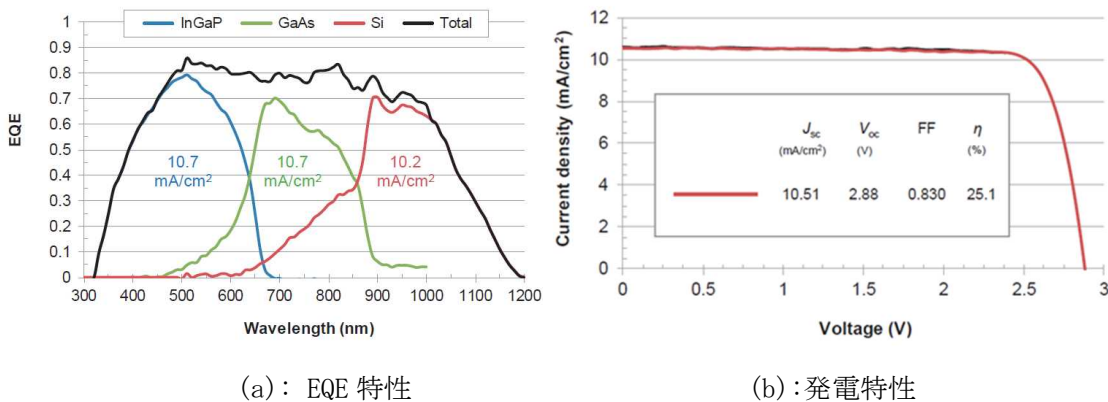


図 III-2-(ロ)-A-1-b2-1 InGaP/GaAs//Al-BSF 型 Si 3 接合セルの構造図、Pd ナノ粒子 SEM 像およびスマートスタック接合界面 TEM 像



(a): EQE 特性

(b): 発電特性

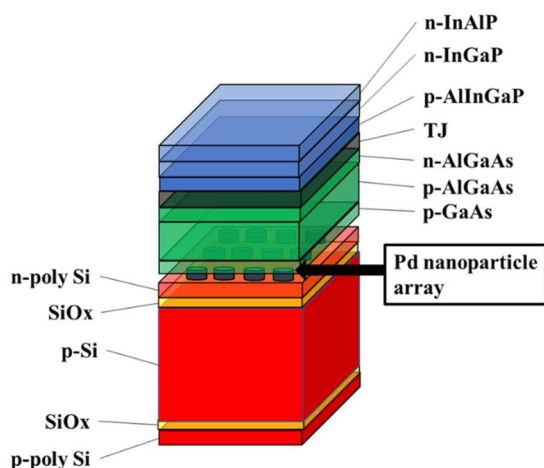
図 III-2-(ロ)-A-1-b2-2 InGaP/GaAs//Al-BSF 型 Si 3 接合セルの特性

Al-BSF 型という最も製造コストが低いタイプの結晶 Si セルを用いた場合において 25% 超の効率を得

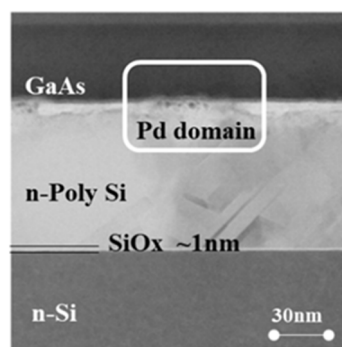
ることができたが、更なる向上 (30%以上) 達成に向け、ボトムセルとして高効率 Si である Tunnel Oxide Passivated contact (TOPCon) Si の適用を検討した。図 III-2-(ロ)-A-1-b2-3(a)には、試作した GaAs//Si 系 3 接合太陽電池の構造を示す。TOPCon Si は、極薄膜酸化層 (SiO) および多結晶 Si 層からなるコンタクト層が特徴で、これにより損失なく電極から電流を取り出し、電圧および電流の増加が可能である。素子構造は、トップセルが InGaP/Al_{0.06}Ga_{0.94}As の 2 接合構造、ボトムセルが TOPCon Si からなり、スマートスタック法により接合し 3 接合構造とした。高効率化のための構造の工夫は、以下の 2 点である。

- ① ミドルセルを GaAs から Al_{0.06}Ga_{0.94}As (以下 AlGaAs) に変更
- ② ボトムセルを Al-BSF Si から高効率 TOPCon Si を適用

ここで、①による効果は、ミドルセルをバンドギャップエネルギーの大きな AlGaAs にすることにより、吸収波長を短波長側にシフトすることにある。これにより、電流律速となっていたボトム Si での光電流発生を増加させることが可能で、かつ開放電圧増加にも寄与する。また、②による効果は、TOPCon Si 適用により、従来の Al-BSF Si に比較し電流および電圧が増大する。以上により、高効率な発電特性が可能となる。図 III-2-(ロ)-A-1-b2-3(b)には、透過電子顕微鏡 (TEM) により、GaAs/TOPCon Si の接合界面を観察したものである。多結晶 n-Si およびトップセル側の最下層であるコンタクト GaAs 層が、Pd ナノドメインを介し接合している様子が、観測されている。実際には、TOPCon Si の多結晶 n-Si 表面には酸化層が存在しており、酸化膜除去を行うことによりデバイス性能が達成された。



(a) 素子構造図

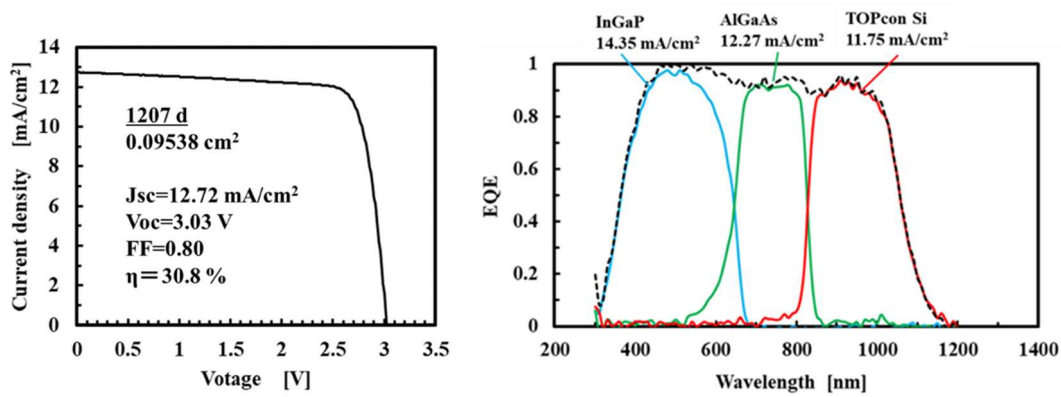


(b) TEM による接合界面観察

図 III-2-(ロ)-A-1-b2-3 InGaP/AlGaAs//TOPCon Si 3 接合太陽電池

図 III-2-(ロ)-A-1-b2-4(a)には、発電特性を示す。素子は TiO₂/SiO₂ の反射防止層を表面に形成しており、これにより短絡電流 12.27mA/cm²、開放電圧 3.03V、曲線因子 0.80、発電効率 30.8%が得られた。電流および電圧の増大により、従来の GaAs/Si 多接合電池に比較して高い効率が達成された。図 III-2-(ロ)-A-1-b2-4(b)には、構成セルの EQE 特性を示す。GaAs セルが 14.35mA/cm²、AlGaAs セルが 12.27mA/cm²、TOPCon Si セルが 11.75mA/cm² であり、ボトム Si セルが電流律速と考えられるが、ほぼ電流整合に近い性能が確認された。

以上、GaAs/AlGaAs//TOPCon Si 3 接合太陽電池において、非集光時の発電効率 30.8%、プロジェクト目標値 (効率 30%以上) を超える良好な性能が達成された。なお、本実験はドイツの Fraunhofer ISE との共同研究により行ったものである。

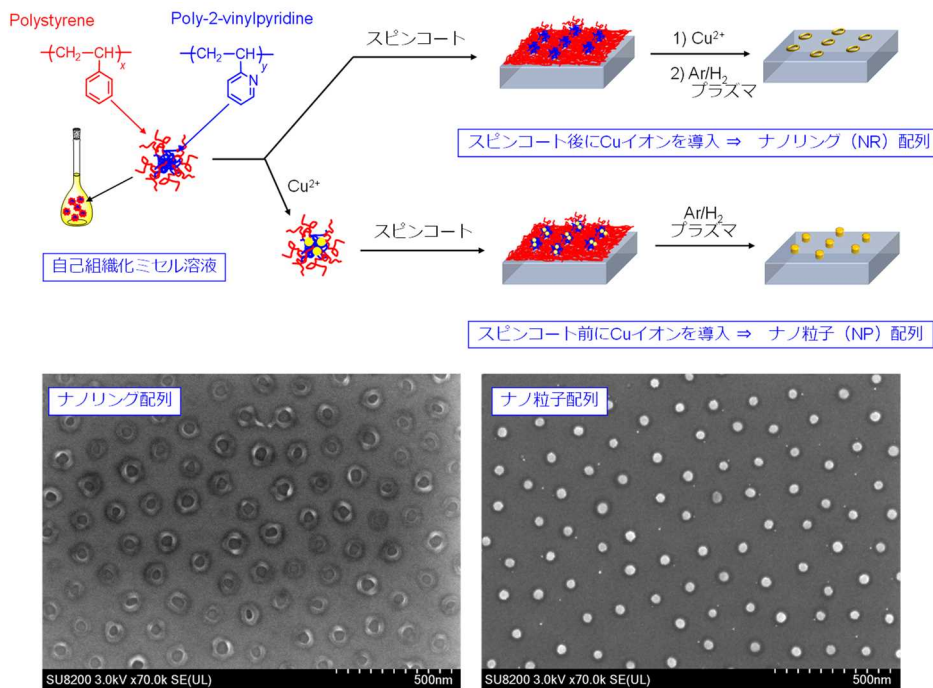


(a) 発電特性

(b) EQE 特性

図III-2-(ロ)-A-1-b2-4 InGaP/AlGaAs//TOPCon Si 3 接合太陽電池の特性

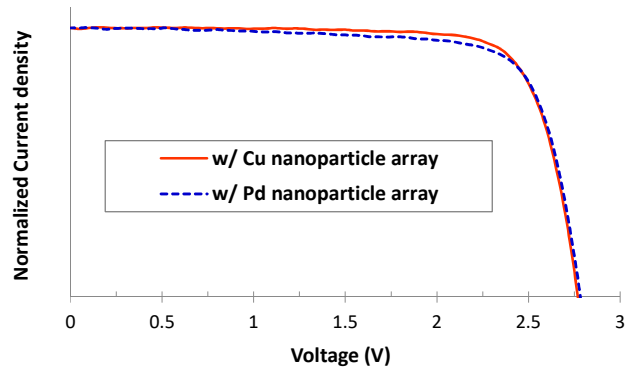
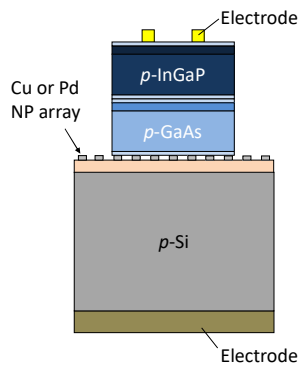
これまでのスマートスタックでは、金属ナノ粒子の素材として Pd を用いてきたが、そのコストは高いため、より安価な金属でも同様の機能が果たせることが好ましい。そこで Cu を用いたスマートスタックを検討した。初めに Pd 同様にブロック共重合体の自己組織化薄膜を利用した手法を適用したところ、Pd の際に得られたような金属ナノ粒子構造を得ることができなかった（ナノリング構造となった）が、薄膜化前の自己組織化ミセルに予め Cu イオンを搭載させた手法を用いることにより Pd と類似した Cu ナノ粒子配列を得ることが確認できた（図III-2-(ロ)-A-1-b2-5）。



図III-2-(ロ)-A-1-b2-5 Cu ナノ構造作製プロセスおよび Cu ナノ粒子配列の SEM 像

得られた Cu ナノ粒子配列を用いたスマートスタックセルを作製し、Pd ナノ粒子配列を用いた場合との比較を行ったところ、遜色ないデバイス特性が得られることを確認した（図III-2-(ロ)-A-1-b2-6）。また、Cu を用いたスマートスタックセルの信頼性を確かめるために温度サイクル試験（-40℃⇄85℃、200 サイクル）およびダンプヒート試験（温度 85℃、湿度 85%、1000 時間）を実施したところ、両テストに

においても顕著な劣化が起こらないことを確認した。こうして、高価なパラジウムに代わり安価な銅を用いることでもスマートスタックとしての機能が得られることが確認できた。



(a): 基本素子構造図

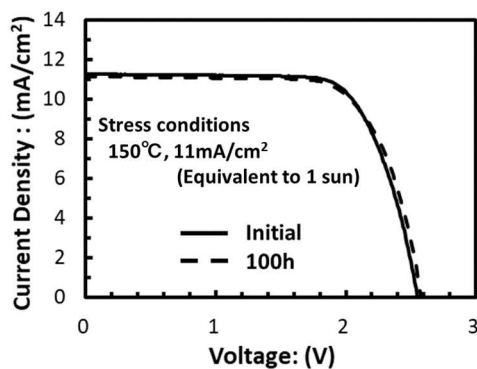
(b): 発電特性比較

図III-2-(ロ)-A-1-b2-6 CuまたはPd ナノ粒子配列によるスマートスタックセルの特性比較

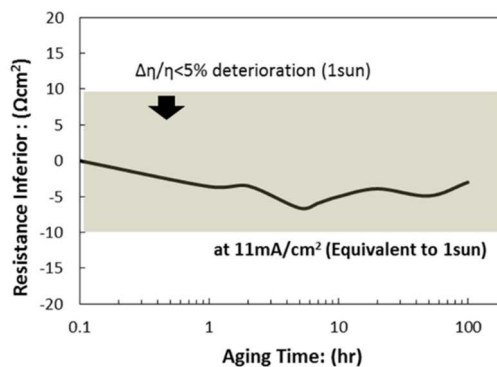
②実用化技術開発

スマートスタック法による GaAs//Si 系多接合太陽電池の実用性を判断するために、初期的な信頼性試験を行った。試験内容は、①加速劣化試験、②温度サイクル試験、③ダンプヒート試験である。試験に適用したサンプルは、GaAs 系トップセル (InGaP/GaAs 2 接合セル) と Al-BSF Si セルからなるスマートスタック 3 接合構造である。

加速劣化試験は、試験温度を 150°C、試験時間を 100 時間として行った。試験最中には、順方向に電流 11mA/cm² (非集光時の発生光電流に相当) を負荷しており、定時毎に降温し I-V 評価を行い経時変化を追った。図III-2-(ロ)-A-1-b2-7(a)には、加速劣化試験を行ったサンプルの試験前後の発電特性を示すが、顕著な劣化は観測されていない。同図(b)には、素子抵抗を追跡した結果を示す。素子抵抗は、開放電圧付近の微分抵抗より求めたもので、特に接合抵抗を主に反映していると考えられる。これより、抵抗変化量は 100 時間経過後も発電効率劣化率 5% を保証する ±10 Ω cm² 以内に十分維持されており、加速劣化試験において接合抵抗等の顕著な劣化が生じていないことを示唆している。加速劣化試験では、劣化の活性化エネルギーが既知である場合に、アレニウス法による素子寿命が推測可能である。本実験において、劣化の活性化エネルギーをボトムセルである Si のバンドギャップ相当 (~1eV) と仮定すると、60°C において推定素子寿命 ~17 万時間以上が予測される。これは実年稼働 ~30 年以上に相当する。



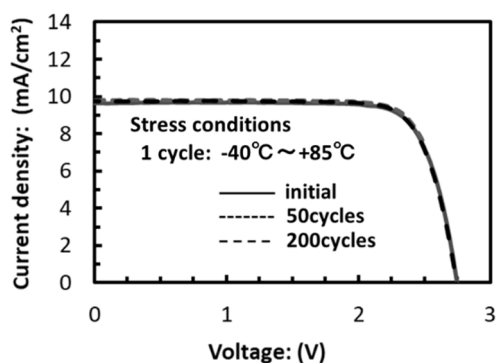
(a) 試験前後の発電特性比較



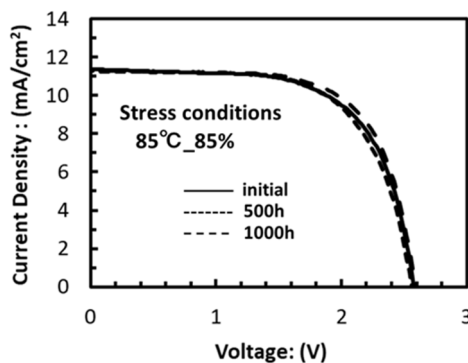
(b) デバイス抵抗の経時変化

図III-2-(ロ)-A-1-b2-7 GaAs//Si 多接合太陽電池の加速劣化試験の結果

温度サイクル試験は、 -40°C から $+85^{\circ}\text{C}$ を1サイクルとして、200サイクル負荷した。図III-2-(ロ)-A-1-b2-8(a)には試験素子の発電特性の推移を示す。これより、劣化は観測されず、発電効率の劣化も1%以内であった。また、トップセルの剥離、クラック等の発生も観測されていない。ダンプヒート試験は、温度 85°C 、湿度85%、試験時間を1000時間、大気暴露雰囲気にて行った。同図(b)に試験素子の発電特性の推移を示す。これより、発電効率は若干増加し(3%)、かつトップセルの物理的な損傷は観測されていない。これらの実験からも、スマートスタック技術を用いたGaAs//Si接合界面は、厳しい環境にも耐久性を有していることが示された。



(a) 温度サイクル試験_発電特性比較

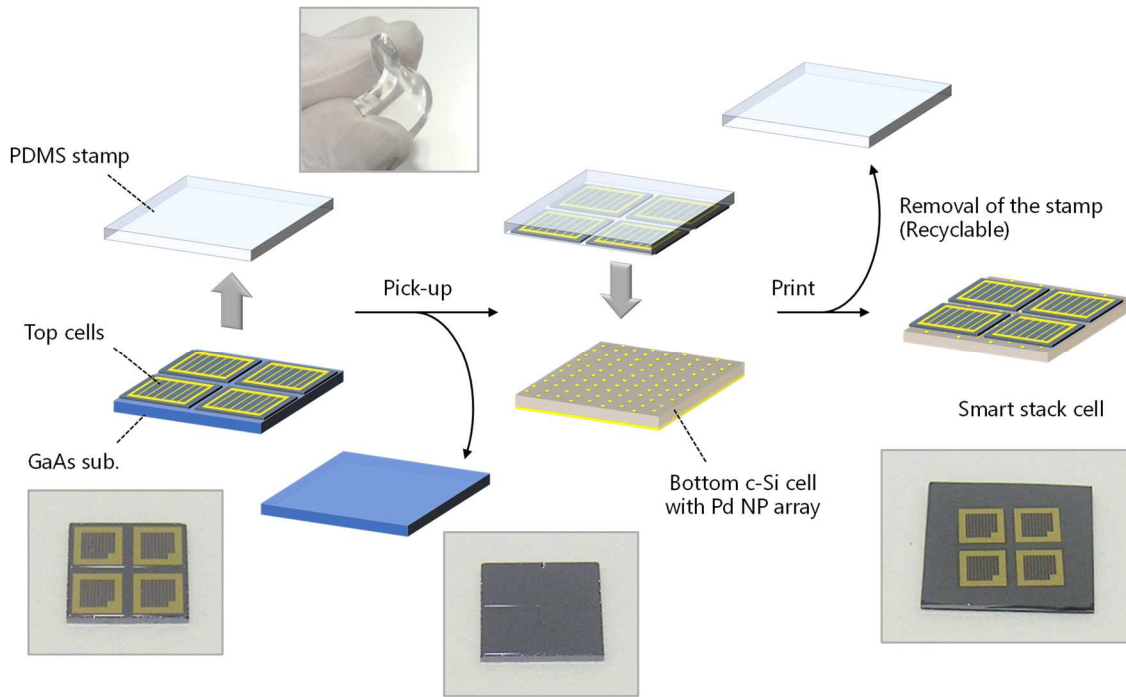


(b) ダンプヒート試験_発電特性比較

図III-2-(ロ)-A-1-b2-8 スマートスタックセルの耐久性試験結果

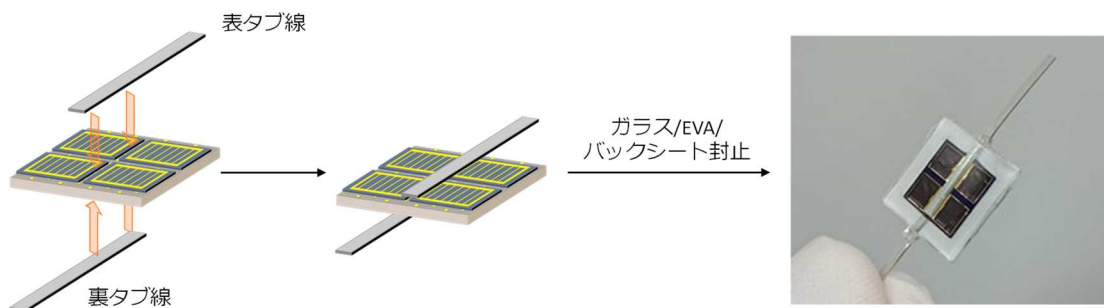
以上より、スマートスタック法により作製されたGaAs//Si系多接合太陽電池は、初期的ではあるが実用的な信頼性を有することが検証された。

スマートスタック技術の実用化に向けては、セル作製プロセスのスループットを高めることも課題であった。そこで新たなスマートスタックプロセスの開発に着手した。スタンプ転写スマートスタックプロセスとは、従来のスマートスタックにおけるトップセルのELO(成長基板からの剥離)⇒ボトムセルへの接合という一連の処理をシリコーン樹脂(ポリジメチルシロキサン:PDMS)のスタンプを用いて複数枚同時に行うための技術である。図III-2-(ロ)-A-1-b2-9にその実証例を示した。4枚のGaAsセルをフッ酸処理によりELO(犠牲層除去)したのち、PDMSスタンプを用いて成長基板から一括で剥離する。その後、Pdナノ粒子配列で表面が修飾されたボトム結晶Siセル上に移動し押し付ける。GaAsセルとPdナノ粒子間で接合が進行したのち、PDMSスタンプを除去することにより一括転写が完了する。こうして得られるスマートスタックセルの太陽電池特性は、従来プロセスと遜色ないことを確認した。なお、転写完了後のPDMSスタンプは再利用可能であり、プロセスコストの観点からも有用と考えられる技術である。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b2-9 スタンプ転写スマートスタックプロセス

スタンプ転写プロセスの開発をベースとし、スマートスタックセルのモジュール化にも取り組んだ。例として、一括転写法により作製した GaAs//Si 4セルスマートスタックセルのモジュール化を示す(図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b2-10)。初期状態では、4枚の分離された GaAs セル(各セルは 4 mm 角)が1枚の結晶 Si セル(約 10 mm 角)に接合した構造となっている。4枚のトップセルそれぞれのグリッド電極をタブ線により接続することにより、分離されていたトップセルを統合(一体化)し全体として2端子構造のモジュール化が可能である。さらに、結晶 Si セルにおけるモジュール作製で用いられている各種材料(表面ガラス、EVA 充填剤、裏面バックシート)、機器(ラミネーター)と同様のものを使用し、封止構造を作製することにも成功した。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b2-10 GaAs//Si 4セルモジュール

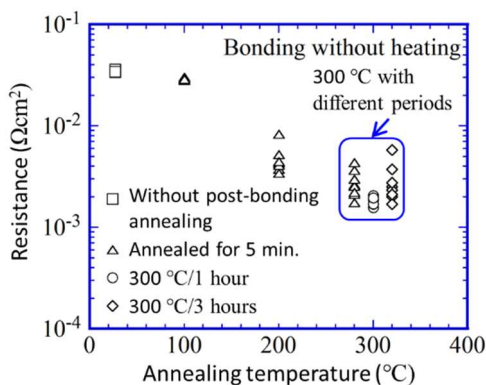
こうして得られたスマートスタックモジュールの信頼性試験(温度サイクル試験)を実施した。初期検討においては、試験中の温度変化に伴う封止材(EVA)の熱膨張・収縮に起因すると思われる接合界面の剥離が観測され、50サイクル程度でも劣化が確認された。そこで、タブ線の取り付け方法を工夫することにより(グリッド電極から引き出したリード電極にタブ線を取り付ける)、50サイクルにおいても

顕著な劣化なく太陽電池特性が維持できることを確認した。しかしながら 100 サイクル後は特性劣化が観測されており、より高い信頼性獲得のためには更なるモジュール構造の検討が必要である。

III-2-(ロ)-A-1-b3. シリコン上III-Vセル（直接接合）【大阪市大】

表面活性化接合（Surface Activated Bonding=SAB）法を用いた直接接合セルプロセスの研究開発を行った。SAB 法においては、接合に先立ち試料表面に中性原子ビームを照射し半導体表面の自然酸化膜を除去する。直後の接合により強固な接合界面が形成される。他方でビーム照射により半導体表面に表面準位が形成され、空乏層の形成、界面抵抗の増加、少数キャリア寿命の低下が懸念される。これらの課題の解決による高効率化を目指した。

n^+ -GaAs/ n^+ -Si 接合の電気抵抗の熱処理温度依存性（熱処理時間を 5 min. に固定）、熱処理時間依存性（熱処理温度を 300 °C に固定）を系統的に調査することにより、低温かつ長時間の熱処理により界面抵抗が低減することを示し、300 °C/1 h の熱処理により最も低い界面抵抗値 $1.6 \text{ m}\Omega \text{cm}^2$ を得た（図III-2-(ロ)-A-1-b3-1）。

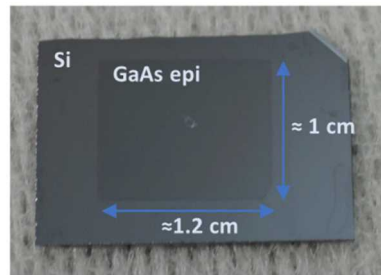


図III-2-(ロ)-A-1-b3-1. n^+ -GaAs/ n^+ -Si 接合の界面抵抗の熱処理条件（温度、時間）依存性。

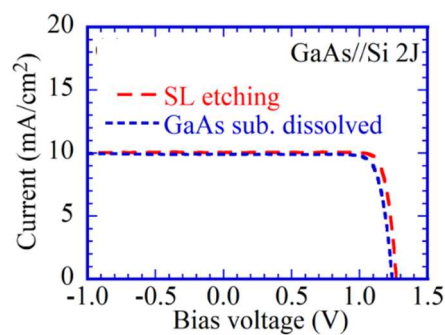
放射光を用いた解析及び断面 TEM 観察により、熱処理の結果接合界面における酸化層の薄層化、結晶性の改善を実証し（Si のアモルファス層再結晶化、GaAs のストイキオメトリの回復）、その結果電気特性が改善することを明らかにした。

Si ボトムセルに対するダメージ抑制、界面抵抗の更なる低減を目指し、パッシベーション層としての ITO 中間層を介した接合、パッシベーション層を伴う metal grid を介した接合の検討を行った。ITO 中間層を介した多接合セルが GaAs//Si 接合を用いた多接合セルと比較して低直列抵抗、高効率であることを実証した。SiO₂ と金属層からなる metal grid (metal 層被覆率 25.2%) を用いた GaAs//metal grid/Si 接合において低界面抵抗 ($2 \text{ m}\Omega \text{cm}^2$) を得た。metal grid/Si 基板上に InGaP/GaAs 2J セルを作製し、metal grid 接合が多接合セルプロセスに適用可能であることを示した。直接接合セルプロセスのプロセスコスト低減のために、GaAs 基板の再利用を可能とするプロセス開発を行った。ウエハ接合後の HF 系エッチャントを使用した犠牲層エッチングにより GaAs 基板を分離し露出面上にエミッタ電極を形成し GaAs/Si 2J セルを作製した。その過程で、低温かつ長時間の熱処理により接合界面が長時間（～10 h）の犠牲層エッチングへの耐性を備えること（図III-2-(ロ)-A-1-b3-2）、分離された GaAs 基板表面は未使用基板と同程度の凹凸であること、フッ化物残差は XPS の検出限界以下であることを実証した。作製し

た 2J セルは従来手法（接合後に GaAs 基板を研磨薄層化し溶解）による 2J セルと同等の特性を示した（図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-3）。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-2. 300 °C/1 h 熱処理と犠牲層エッチングで作製された GaAs エピ層 /Si 接合。

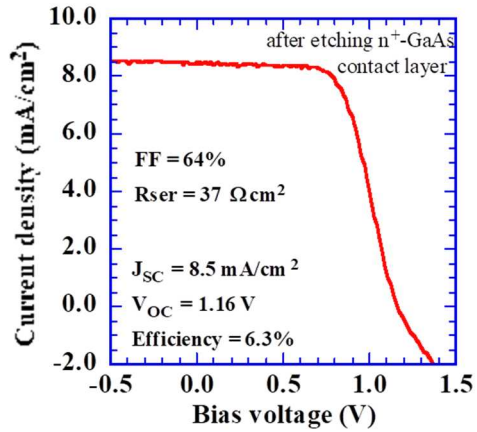


図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-3. 接合形成後に犠牲層エッチングを用いた GaAs 基板の分離を経て作製された GaAs/Si 2J セルの I-V 特性。接合後に GaAs 基板を研磨・エッチングを経て作製された 2J セルの特性もあわせて示す。

並行してフレキシブル基板 (PET フィルム) 上に転写された GaAs 1J サブセル層と Si のウエハ接合の形成（図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-4）、並びに GaAs/Si 2J セルを作製、多接合動作を実証した（図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-5）。これらの検討により、Ⅲ-V/Si ウエハ接合セル作製にあたって表面活性化接合と GaAs 基板再利用の両立が可能となることを示した。大面積化にあたってフレキシブル基板上試料のクラック抑制、平坦化が今後の課題であることを明らかにした。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-4. ELO法によりPETフィルム上に転写されたGaAs 1J層とSiの接合。



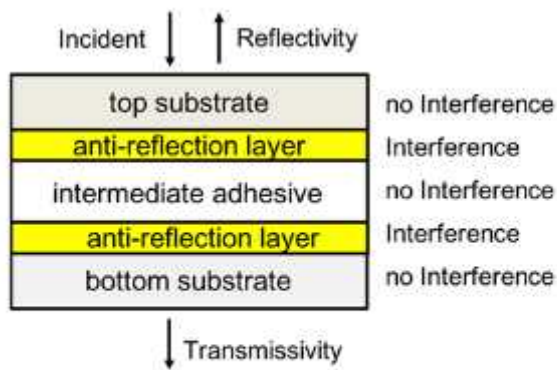
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b3-5. PETフィルム上に転写されたGaAs 1J層とSiの接合から作製したGaAs/Si 2JセルのI-V特性。

Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4. シリコン上Ⅲ-Vセル (接着技術) 【東京農工大】

1-1 高度光利用技術開発

1-1-1 反射ロス評価用数値解析プログラム開発 (基本プログラム)

半導体トップセルとボトムセルをメカニカルスタックしたときの光反射ロス低減評価のための数値解析プログラムを開発した。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-1に基本構造を示す。air/半導体基板/無反射層/接着層/無反射層/半導体基板/airである。光がゼロ度正入射したときの反射率及び透過率を計算するプログラムを作成した。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-1 光反射ロス数値解析用試料構造モデル

①GaAs, Si, GaP, IGZO, エポキシ材料等の屈折率データベースを作成した。②材料は各層に任意に指定でき、膜厚を入力できるようにした。③各層において多重反射を計算する構成とした。④無反射層には光干渉効果入れた。⑤無反射層は伝導層であるとし、移動度とキャリア濃度を入力できるようにした。⑥光反射ロスの低減とボトム層への実効的光伝達率を評価するために、以下の式を用いて実効的光伝達率 A_{eff} を算出した。

$$A_{eff} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (100 - R_{sample}) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (100 - R_{top}) d\lambda} \quad (\text{III-2-(ロ)-A-1})$$

ここで、 λ_1 と λ_2 は計算対象波長端 ($\lambda_1 < \lambda_2$) であり、 R_{top} は上トップ部基板表面の計算上の反射率であり、 R_{sample} は図 III-2-(ロ)-A-1-b4-1 に示す構造において計算された反射率である。 $1 - R_{top}$ が実効的光入射率である。トップ基板を通過した光が 100% ボトム基板に入射して吸収される理想の場合には $R_{top} = R_{sample}$ となるから、 A_{eff} は 1 となる。 A_{eff} 値を用いて中間層反射ロス低減を評価できるようにした。

1-1-2 反射ロス評価用数値解析プログラム開発 (角度変化)

光反射ロス評価用数値解析プログラム開発：半導体トップセルとボトムセルをメカニカルスタックしたときの光反射ロス低減評価のための数値解析プログラムを開発した。既に開発した air/非干渉半導体基板/多層干渉無反射層/非干渉半接着層/多層干渉無反射層/非干渉半導体基板/air 構造の計算プログラムに光入射角度効果を導入したプログラム開発を行った。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-2 に光をゼロ度正入射と 50 度入射したときの GaP/102 nm IGZO/adhesive/102 nm IGZO/Si 構造の試料の光反射スペクトルを示す。入射角度変化により無反射干渉効果に変化して反射率が僅かに変化することを確認した。本プログラムにより、入射角度を有する光のトップ基板透明、ボトム基板不透明の波長領域における、実効的光伝達率 A_{eff} の算出が可能になった。

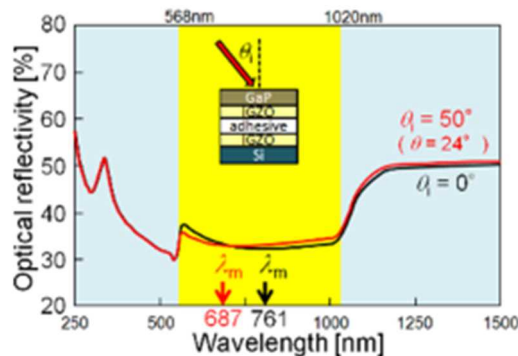


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-2 ゼロ度正入射と 50 度入射時の GaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Si 構造の光スペクトル

1-1-3 無反射透明導電膜成膜開発

3 インチ GaAs 基板 (バンドギャップ 1.43eV) と Si 基板 (バンドギャップ 1.12eV) のスタックを検討した。プラズマスパッタ法を用いて屈折率 1.85 の 130nm IGZO 薄膜を GaAs 及び Si 表面に形成した。そして 20 μ m サイズの ITO 粒子を 6wt% 分散したエポキシ接着剤を用いて IGZO 薄膜面を貼りあわせた。比較のために IGZO を形成しない試料も作製した。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-3 に分光光度計を用いて 3 インチ試料の中心点を測定した反射率スペクトルを示す。さらに 1-1 で開発したプログラムにより計算した計算反射スペクトルも併せて示す。波長 890~1040nm が、GaAs が透明でありシリコンに吸収される波長帯である (図黄色帯)。IGZO を用いないとき GaAs ボトム界面及び Si トップ界面からの反射光戻りがあるために実験、計算とも反射率が大きくなった (青色カーブ)。即ち大きな反射ロスが生じた。これに対し IGZO 膜を形成した場合、黄色帯域の反射率は大きく低

下し、黄色帯左外側端の反射率（GaAs トップ表面のみの反射率）に近い値になった。これは IGZO 薄膜の無反射光干渉効果により GaAs ボトム界面及び Si トップ界面の光反射が低下して反射ロスが抑えられ、効率よく光が Si に吸収されたことを示している。表Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-1 に実効的光伝達率 A_{eff} の解析結果を示す。IGZO を用いないとき A_{eff} は 0.79 に止まった。即ち中間接着界面において 21%の反射光ロスが生じた。これに対し IGZO 膜を形成した場合 A_{eff} は 0.93 に向上した。中間層の反射光ロスは 7%に低減し、理論値に近い高い実効的光伝達率が得られた。光反射率スペクトルを 3 インチ試料全面に渡って測定し、試料面の A_{eff} 分布を解析した。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-4 に示すように、 A_{eff} は 0.91~0.95 の高い値を示した。即ち IGZO 無反射効果を用いることにより大面積に渡って光反射ロスを低減可能であることが明らかになった。これに対し IGZO 膜を形成した場合 A_{eff} は 0.93 に向上した。中間層の反射光ロスは 7%に低減し、理論値に近い高い実効的光伝達率が得られた。光反射率スペクトルを 3 インチ試料全面に渡って測定し、試料面の A_{eff} 分布を解析した。

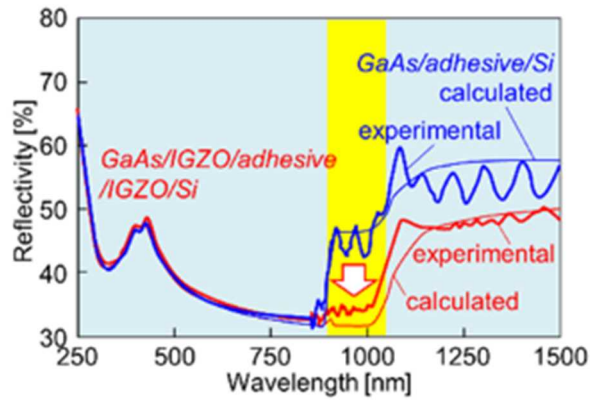


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-3

GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si と
GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si 試料の光反射率
測定および解析スペクトル

表 III-2-(ロ)-A-1-b4-1

GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si と
GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si 試料の
 A_{eff} 実験および理論値

	GaAs/adhesive/Si	GaAs/IGZO/ adhesive/IGZO/Si
Calculated A_{eff}	0.77	0.97
Experimental A_{eff}	0.79	0.93

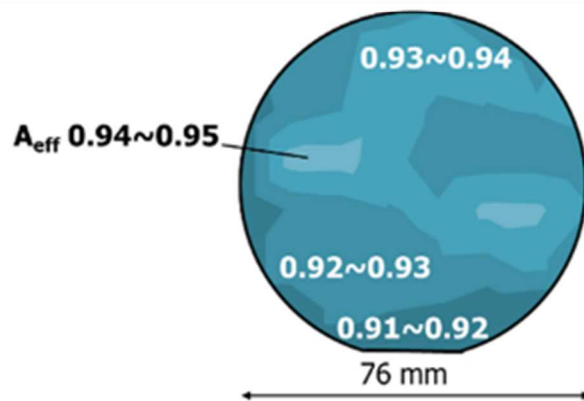


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-4 3 インチ
GaAs/IGZO/adhesive/IGZO/Si 試料の
 A_{eff} 面内分布

1-1-4 無反射透明導電膜成膜最適化と光入射角度変化

3 インチ GaAs 基板と 4 インチ Si 基板のスタック及び 2 インチ GaP 基板と 4 インチ Si 基板のスタックを検討した。プラズマスパッタ法を用いて屈折率 1.85 の IGZO 薄膜を GaAs 及び Si 表面に 130 nm、GaP

及び Si 表面に 102 nm の厚さ形成した。そして IGZO 面にエポキシ接着剤を塗り 20 μm サイズ ITO 粒子を 6 Wt% 分散して IGZO 薄膜面を貼りあわせて、GaAs/130 nm IGZO/adhesive/130 nm IGZO/Si と GaP/102 nm IGZO/adhesive/102 nm IGZO/Si の試料を作製した。比較のために IGZO を形成しない試料も作製した。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-5 に分光光度計を用いて 5 度正入射測定した反射率スペクトルを示す。波長 902~1020 nm の光が GaAs に透明であり、且つシリコンに吸収される波長帯であり (図 III-2-(ロ)-A-1-b4-5(a) 黄色帯)、568~1020 nm の光が GaP に透明であり、且つシリコンに吸収される波長帯である (図 III-2-(ロ)-A-1-b4-5(b) 黄色帯)。IGZO 膜を形成した場合、黄色帯域の反射率は大きく低下し、黄色帯左外側端の反射率 (トップ基板のみの反射率) に近い値になった。これは IGZO 薄膜の無反射光干渉効果により接着層名面の光反射が低下して反射ロスが抑えられ、効率よく光が Si に吸収されたことを示している。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-6 に IGZO 膜厚を変化したときの実効的光伝達率 A_{eff} の計算結果と実験結果を示す。シリコンに光が吸収される波長帯において最適 IGZO 膜厚を選ぶことにより、高い A_{eff} を得られることがわかった。実験結果は計算のピーク値に近い値を示しており、GaAs/130 nm IGZO/adhesive/130 nm IGZO/Si において A_{eff} は 0.94、GaP/102 nm IGZO/adhesive/102 nm IGZO/Si において A_{eff} は 0.93 と高い値となった。

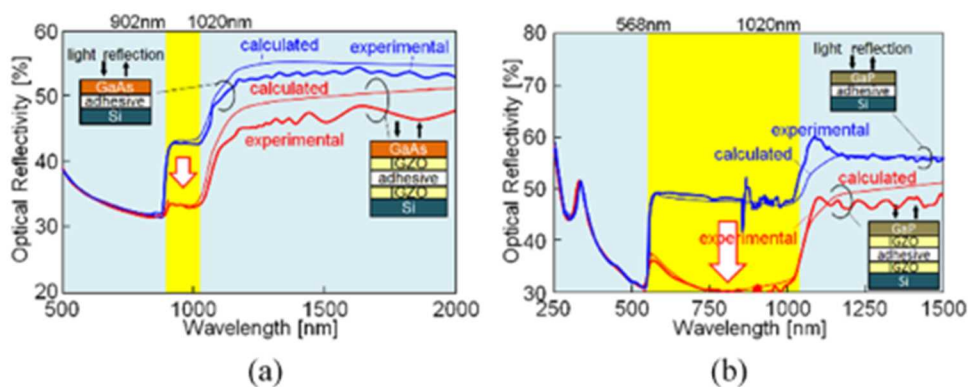


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-5 5 度正入射光反射率スペクトル (a) GaAs/130 nm IGZO/adhesive/130 nm IGZO/Si, (b) GaP/102 nm IGZO/adhesive/102 nm IGZO/Si

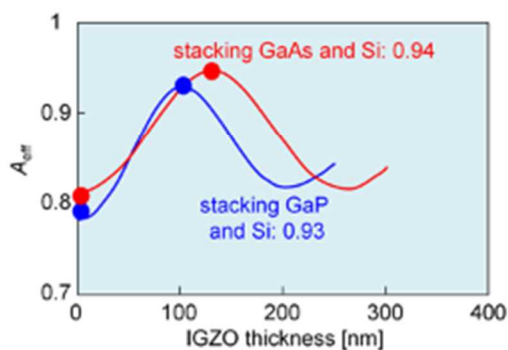


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-6 IGZO 膜厚を変化したときの実効的光伝達率 A_{eff} の計算結果と実験結果 (●)

1-1-5 入射角度可変反射率スペクトル測定システム

図 III-2-(ロ)-A-1-b4-7 に示す光入射角度可変反射率スペクトル測定システムを自作した。本装置を用い

て GaAs/130nm IGZO/adhesive/130 nm IGZO/Si 基板の反射率スペクトルの測定を行った。そして GaAs 最表面の反射率を基準として、902~1020nm 範囲の実効的光伝達効率 A_{eff} を算出した。その結果、図 III-2-(ロ)-A-1-b4-8 に示すように、IGZO 無反射層を形成した試料は入射角度 0~60 度に渡り $A_{eff} = 0.95 \sim 0.92$ と高い値を示した。無反射層が広入射角範囲で光伝達効率を上げることが明らかになった。

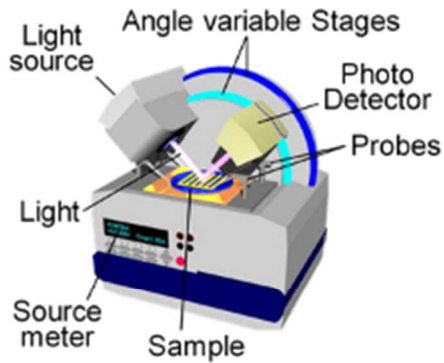


図 III-2-(ロ)-A-1-b4-7 入射角度可変
反射率スペクトル測定システム

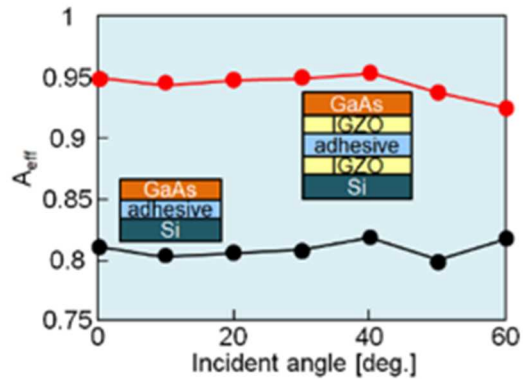
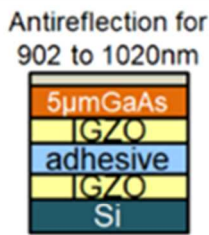


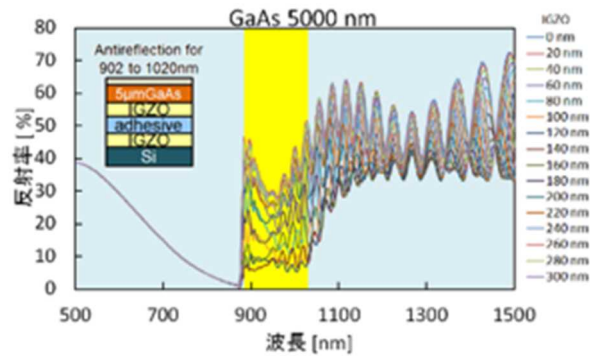
図 III-2-(ロ)-A-1-b4-8 902~1020nm
範囲の実効的光伝達
効率の A_{eff} の光入射角度依存性。
赤は IGZO 無反射膜付き、黒は IGZO 無し

1-1-6 表面無反射層検討

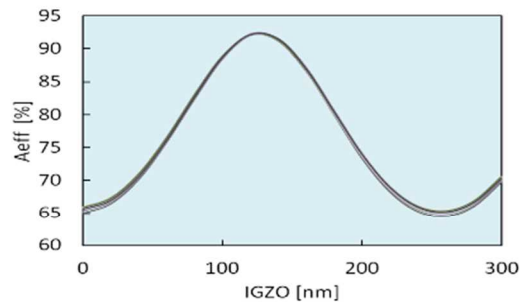
図 III-2-(ロ)-A-1-b4-9 に示すように表面に無反射層を有する構造の GaAs/Si スタックセルの A_{eff} を計算する数値解析プログラムを開発した。トップセルは薄膜であり可干渉を仮定した。中間 IGZO 層も可干渉でありトップ GaAs セルと干渉する。GaAs セルの厚さを $5 \mu\text{m}$ としたとき、大きな A_{eff} を得る IGZO 膜厚条件を調査した。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-10 に屈折率 1.47 のエポキシ接着層の両側に IGZO を 0 から 300nm まで変化させて計算した反射率スペクトルを示す。902~1020 nm の範囲が、GaAs が透明であり且つシリコン基板が光を吸収する波長領域である。902 nm 以上の波長領域で反射率は光干渉のために複雑な変化を示した。そして IGZO が無い場合よりも反射率の低下が認められた。GaAs の厚さを 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 nm とし計算を行い、902~1020nm 範囲の反射率を積分して平均反射率%を求めた。100%から平均反射率%を引くことにより A_{eff} を算出した。その結果、図 III-2-(ロ)-A-1-b4-11 に示すように、全ての GaAs 膜厚において同様の結果となり、IGZO 無反射層を厚くするにつれて A_{eff} は増大し IGZO が 120~140nm のとき $A_{eff} = 0.92$ と高い値を示した。さらに IGZO 膜厚を増大させると A_{eff} は低下し、典型的な干渉特性を示した。図 III-2-(ロ)-A-1-b4-11 の結果は既に得られたバルク GaAs/Si の A_{eff} の結果と同様であり、IGZO 膜が薄膜 III-V とシリコンのスタックセルの A_{eff} 向上に有効であることが分かった。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-9 表面に無反射層を有する構造の GaAs/Si スタックセル



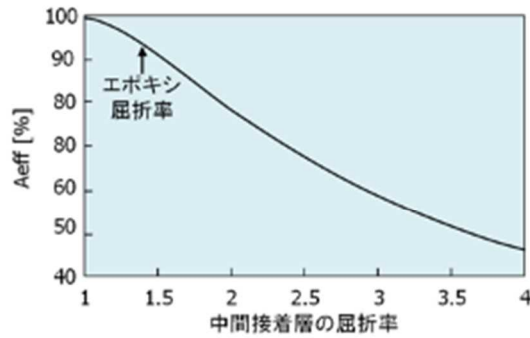
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-10 面に無反射層を有する構造において屈折率 1.47 のエポキシ接着層の両側に IGZO を 0 から 300nm まで変化させて計算した反射率スペクトル



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-11 GaAs の厚さが 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 nm の時の A_{eff} の IGZO 膜厚による変化

1-1-7 中間層屈折率検討

中間接着層の屈折率は現在 1.47 であり、屈折率の最適化により A_{eff} を向上できる可能性がある。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-12 に上記計算プログラムを用いて非干渉中間接着層の屈折率を変えたときの A_{eff} の変化を示す。接着層の屈折率が 1 の時、即ちエアギャップの時 A_{eff} はほぼ 100% になることがわかった。これは半導体と IGZO とエア間のオプティカルマッチングによるものである。そして屈折率が大きくなると A_{eff} は小さくなった。

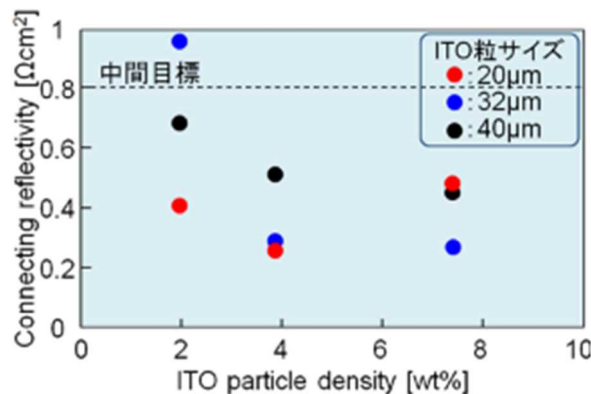


図III-2-(口)-A-1-b4-12 非干渉中間接着層の屈折率を変えたときの A_{eff} の変化

1-2 大面積低抵抗接合技術開発

1-2-1 低抵抗化検討

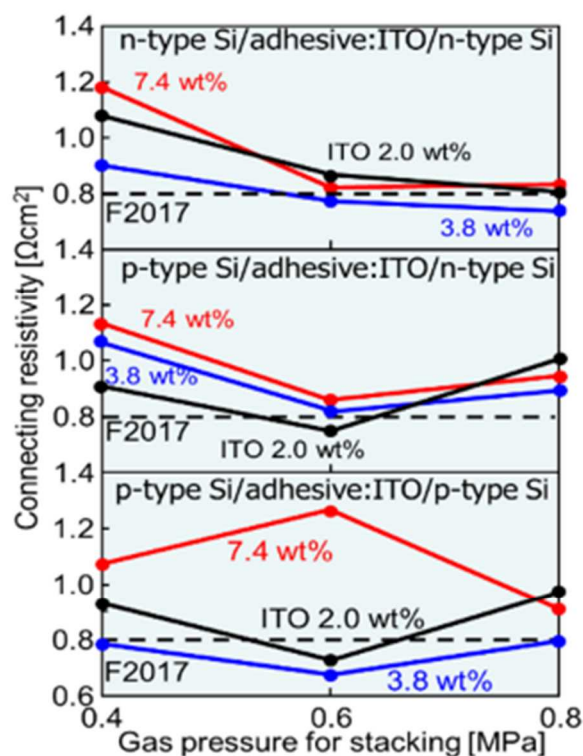
1) n型及びp型低抵抗シリコン基板を用いて低抵抗スタック化最適条件を調査した。エポキシ接着剤への粒径 $20\mu\text{m}$ ITO 導電粒子の含有量を 2.0, 3.8, 7.4 wt%とし、エポキシ接着剤接着時のガス圧力を 0.4, 0.6, 0.8 MPa として 44cm^2 の基板を貼りあわせて試料を作製し、トップ-ボトム基板間の電流電圧特性を測定した。全ての試料は良好なオーミック電流電圧特性を示した。電流電圧特性から接合抵抗率を算出した。図III-2-(口)-A-1-b4-13 に n型 Si-n型 Si, p型 Si-n型 Si, p型 Si-p型 Si 試料の接合抵抗率測定結果を示す。n型 Si-n型 Si 貼り合わせの場合接着時のガス圧力が高いほど接合抵抗率が低下し、ITO 3.8wt%、ガス圧力 0.8MPa のとき、 $0.74\Omega\text{cm}^2$ となった。p型 Si-n型 Si 貼り合わせの場合、ITO 2.0wt%、ガス圧力 0.6MPa のとき、 $0.75\Omega\text{cm}^2$ となった。p型 Si-p型 Si 貼り合わせの場合、ITO 3.8wt%、ガス圧力 0.6MPa のとき、 $0.68\Omega\text{cm}^2$ となった。この度の検討により仕事関数の異なる n型及びp型シリコン基板の貼りあわせにおいて全て $1\Omega\text{cm}^2$ を下回る低接合抵抗率が得られた。現時点での最適条件は、ITO 2.0~3.8wt%、ガス圧力 0.6~0.8MPa にあると思われる。



図III-2-(口)-A-1-b4-13 接合抵抗率と ITO 重量比の関係

2) 低抵抗シリコン基板を用いて低抵抗スタック化最適条件を調査した。エポキシ接着剤を塗布した基板と ITO 導電粒子を散布した基板を貼り合わせることで低抵抗化を試みた。また ITO サイズ 20, 32, 40 μm を調査した。図III-2-(口)-A-1-b4-14 に貼りあわせガス圧力 0.8MPa のときの接合抵抗率と ITO 重量

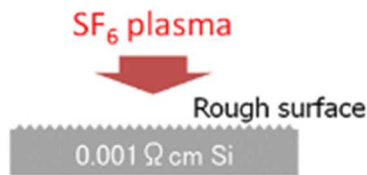
比の関係を示す。ITO 3.8~7.4wt%のとき、接合抵抗率 $0.3 \Omega \text{cm}^2$ の低い値が得られた。ITO 粒子は分級しているが、粒子サイズと接合抵抗率との明確な相関は観測されなかった。



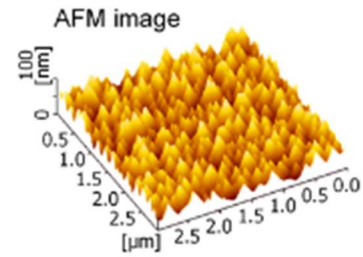
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-14 n-Si/adhesive/n-Si, p-si/adhesive/n-Si, p-Si/adhesive/p-Si 各試料の接合抵抗率の ITO 含有率及び貼合せ圧力による変化。

1-2-2 大面積表面処理

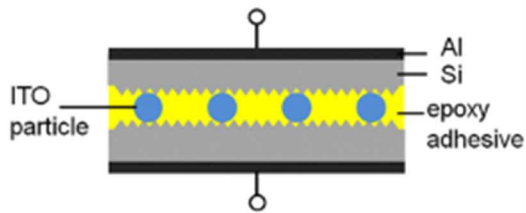
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-15 のイメージ図に示すように、エッチングガスである SF_6 プラズマを用いてシリコン表面にラフネスを形成することにより ITO とシリコン間の接触抵抗を低減して接合抵抗の低減を試みた。その結果、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-16 の AFM 測定に示すように、 SF_6 プラズマにより数十ナノメートルのラフネス形成に成功した。本技術を用いて図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-17 に示すようにサイズ 20cm^2 の試料にラフネス構造を施し、ラフネス面の貼合わせ試料を作製した。その結果、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-18 に示すようラフネスが大きくなるにつれて接合抵抗率の大幅な低減が得られた。そして最低接合抵抗値 $0.12 \Omega \text{cm}^2$ を得た。さらにラフ面貼り合わせと鏡面貼り合わせ試料を湿度 50%の常温下に置き、接合抵抗率の時間変化を測定した。その結果、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-19 に示すようにラフ面貼り合わせ試料は約 2000 時間の長時間にわたり初期の低抵抗値を維持することが分かった。基板表面に僅かなラフネスを導入することによって、接合抵抗率の 2019 年度最終目標値 $0.5 \Omega \text{cm}^2$ を容易に達成できることが明らかになった。さらに、基板ラフネスの導入は長時間にわたり低抵抗値を維持する上でも有用である。一方で、プラズマ照射に伴う Si セル特性への影響については今後、検討を進める必要がある。



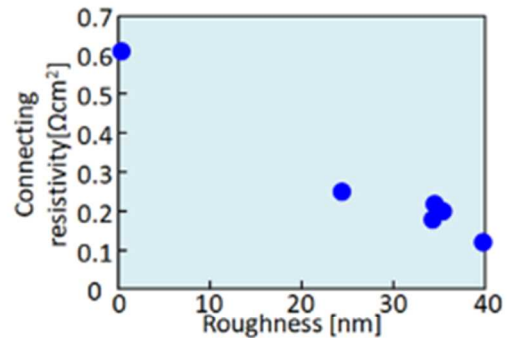
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-15 SF₆プラズマによるシリコン表面ラフネス形成イメージ図



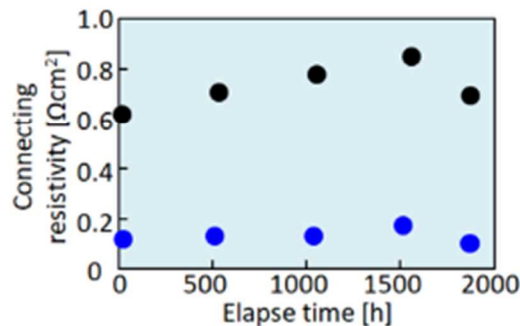
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-16 SF₆プラズマによるシリコン表面ラフネス形成イメージ図



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-17 ラフネス面の貼合わせたメカニカルスタック試料の断面図



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-18 表面ラフネスによる接合抵抗率の変化



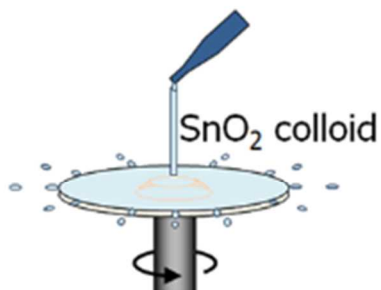
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-19 接合抵抗率の時間経過変化。
青はラフネス貼り合わせ、黒は鏡面貼り合わせ試料

1-3 高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発

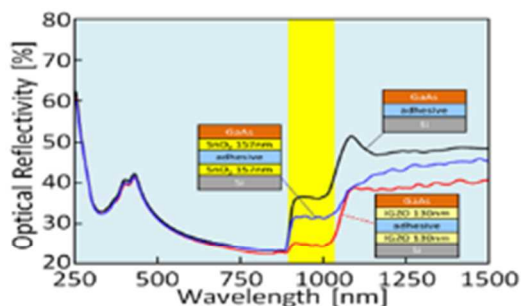
1-3-1 非真空系無反射薄膜形成技術開発

低コスト製造技術開発を目指して図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-20 の概念図のように SnO₂ 導電透明コロイドをスピコートした無反射薄膜形成を試みた。スピコーティングの条件の最適化を行い、4 インチサイズレベルの基板に均一成膜を達成した。そして GaAs と Si 基板に SnO₂ をコーティングして無反射効果を調べた。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-21 の反射率スペクトルに示すように、902~1020nm の波長範囲において SnO₂ なしの場合よりも反射率が低減し、無反射効果を確認した。しかし、屈折率が 1.57 と低かったために IGZO レベルの反射低減は得られなかった。2019 年度最終目標として掲げるシステムコスト 125 円/W を見込む低コスト化スタック技術を確立するためには、各要素技術の低コスト化を積み重ねる必要がある、

安価な塗布法による無反射膜の形成技術の確立は有用と考える。今後、無反射膜材料、塗布剤の選択、無反射膜成膜条件の検討等を進めることにより、より高い実効的光伝達効率 A_{eff} の実現と低コスト化の両立を図る。



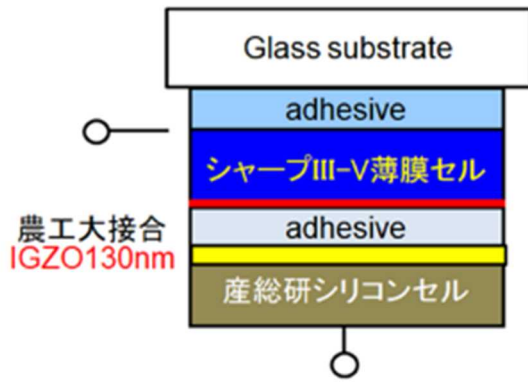
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-20 SnO₂
無反射膜スピコート概念図



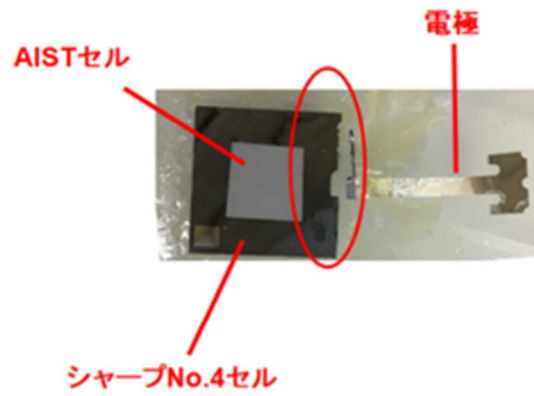
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-21 IGZO 無反射膜
(赤)、SnO₂ 無反射膜 (青)、無反射膜なし (黒)
の GaAs/Si メカニカルスタック試料の
光反射率スペクトル

1-3-2 低コスト対応高効率ソーラーセル実証

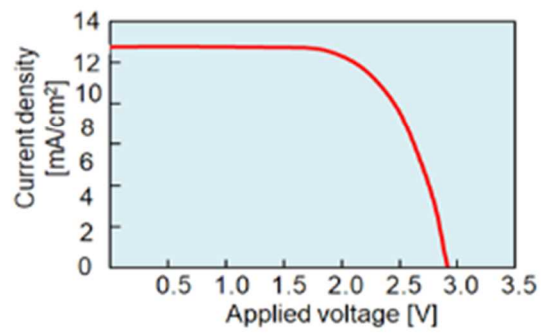
シャープ、産総研セルを用いたスタックセル開発：ガラス基板上に貼り付け、引き出し電極を形成した薄膜Ⅲ-Vセルをシャープ社から、バルクシリコンセルを産総研から提供を受け、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-22 に示すようにスタックセル作製を試みた。シャープセルは良好なオーミックコンタクトを実現するために接着面に P+層を導入して貰った。そして産総研セルには表面に IGZO 膜 130nm を形成した。ITO 分散エポキシ接着剤により良好な貼合わせが行われ、スタックセルが作製できた。しかし残念ながら図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-23 に示すように、引き出し電極が破損しセル特性が測定不能となった。そこで試料をカットし、Ⅲ-Vセルをガラス基板から剥がし、Ⅲ-Vセル上の細かい電極に直接プロービングすることによりスタックセルの特性測定を試みた。その結果、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-b4-24 に示すように、 V_{oc} 2.91V, J_{sc} 12.6mA/cm², FF0.69, 変換効率 24.9%が得られた。目標の 30%効率は達成できなかった。



図III-2-(ロ)-A-1-b4-22 産総研及び
 シャープ Gp との
 共同施策多接合ソーラーセルの構造



図III-2-(ロ)-A-1-b4-23 スタック
 セル写真



図III-2-(ロ)-A-1-b4-24 シャープトップ
 セル、産総研ボトムセル
 多接合ソーラーセル特性

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトで得られた研究開発の成果は、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化への貢献が期待される。具体的な製品として、宇宙用に逆積3接合（IMM3J）セル、成層圏飛行体用に IMM3J セルおよび両面採光型2接合セル、車載用には透過型2接合セルとシリコン（もしくは CIS）セルをスタックした4端子型セルを予定する。

テーマ A で得られた成果は以下に示す内容にて、それぞれの事業分野での活用が期待される。

研究開発成果	事業分野	貢献・活用
3 接合型セルでエピタキシャル層の厚さを従来比 50%減で従来と同等の電気特性を得た。	宇宙用 成層圏飛行体用	エピタキシャル層の厚さを半減できるため、エピタキシャル成長に関わる材料コストを半減できる
化合物 2 接合型セル（InGaP/GaAs）と Si セル（バックコンタクト型）の組み合わせで変換効率 33%を得た	成層圏飛行体用 車載用	透過型2接合セルは成層圏での両面採光による高出力化が期待される。 4端子型は高効率化低コスト化の両立が期待できるため、将来の車載用として開発を継続する。

さらに、今回開発した薄膜Ⅲ-V族多接合セル用の裏面テクスチャ形成による光閉じ込め技術や、光学測定によるルミネッセンスカップリング効果の定量化技術をもとにセル構造の最適設計を進めることで、目標としていたエピタキシャル層の厚さ 75%減で従来と同等の電気特性を得ることが可能となり、宇宙用、成層圏飛行体用、車載用すべての用途に対して一層の低コスト化が可能になる。

3. 波及効果

シリコンボトムセルとのメカニカルスタック4端子型用に開発した化合物2接合トップセル（光透過型）は、裏面からの光でも発電が可能であるため、裏面からの光入射が期待できる成層圏での発電向けとして、両面採光型2接合セルの新規製品化が期待できる。また、宇宙用、成層圏飛行体用、車載用用途に向けて低コスト化が進んだ後には、建材一体型太陽光発電モジュールへの応用が期待できる。本用途では発電可能面積が限られるという制約が宇宙用、成層圏飛行体用、車載用と共通であり、建物の形状と意匠にフィットするモジュール技術を発展させることができれば、車載用よりもさらに大きな市場を狙うことができる。

今回開発されたウエハ接合技術、接着技術に関しては、太陽電池セルモジュール以外にも、電子デバイス・光デバイスにおける多機能・異種材料集積、実装技術に広く応用される可能性を持つ。

ウエハ直接接合に関しては、本事業を通じて「接合界面の低抵抗性」がウエハ直接接合技術の強みであること、加えて、プロセス耐性向上、低界面抵抗の実現が課題であることが明確になった。本検討の知見をⅢ-V//Si 以外の多接合セル用低抵抗接合界面設計、プロセス最適化にフィードバックすることで、各種デバイスへの応用が拓けると考えられる。

一方、導電性接着剤を用いたメカニカルスタック技術は、高屈折率導電材料である IGZO 薄膜の最適

条件を見出し、高い実効的光伝達効率を達成したこと、基板の表面ラフネス制御による低コンタクト抵抗率を達成したことから、光電子デバイスの実装技術として展開が期待される。

4. 今後の展開

本研究開発の成果を活用し、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化へに向けた開発を推進する予定である。とくに移動体用の多接合太陽電池に関しては、2020年度よりNEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の新市場創造技術開発／移動体用太陽電池の研究開発」プロジェクトにおいて更なる高効率化、低コスト化技術開発を進めることになっている。

太陽電池に限定されない光電子デバイス用途のウエハ接合技術については、以下のような展開が考えられる。

(ウエハ直接接合技術)

大面積 GaAs 基板の再利用を可能とするために、フレキシブル基板上III-Vエピ層のクラックレス化、反りの抑制が必要となる(下表)。また、Si上III-V多接合においてはボトムセルにヘテロ接合を導入する等のシリコンセル開発との密な連携、電流整合を満足するためのIII-V層構成検討、接合界面への波長変換材料(アップコンバージョン)等の中間層導入検討が必要である。これらにより、ウエハ直接接合の強みである低界面抵抗を活かした高性能他接合セル開発が可能になる他、各種デバイスへの応用可能性が高まる。

III-2-(ロ)-A-4-1 GaAs 基板再利用のためのウエハ直接接合比較

直接接合のバリエーション	プロセスフロー	大面積化	GaAs基板再利用	到達点/評価
(A) 従来手法: I ⁺ 基板//Si基板接合+GaAs基板エッチング		可能	不可	<ul style="list-style-type: none"> セル動作実現 シンプル
(B) I ⁺ 基板//Si基板接合+犠牲層エッチングによるGaAs基板分離		困難	可能	<ul style="list-style-type: none"> セル動作実現 大面積化困難
(C) フレキシブル基板(PETフィルム)によるELO+I ⁺ 層//Si基板接合+PETフィルム剥離によるI ⁺ 層転写		可能(要開発)	可能(要開発)	<ul style="list-style-type: none"> セル動作実現 大面積化にはクラック、反りの解決必要。

(導電性接着剤を用いた接合)

本プロジェクトで開発したメカニカルスタック技術①IGZO干渉導電膜の導入、②ITO導電粒子混合エポキシ接着剤を用いたスタック技術開発、③基板の表面ラフネス制御を高度化して、低コストで高効率のメカニカルスタック多接合ソーラーセル製造技術の確立が視野にはいる他、各種デバイスの実装技術への展開が期待される。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願	1	0	1	2	1	5
(うち外国出願)	(1)	0	0	0	(1)	(2)
論文	3	10	12	21	10	56
研究発表・講演	27	29	41	25	20	142
(うち国際会議)	(10)	(21)	(31)	(17)	(14)	(93)
新聞・雑誌等への掲載	2	2	2	1	1	8
その他	2	4	1	1	0	8

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	産業技術総合研究所	特願 2018-124445	国内	2018/06/29	取下	多接合光電変換素子及び多接合太陽電池並びに多接合光電変換素子の製造方法	太野垣健、 牧田紀久夫、 菅谷武芳
2	産業技術総合研究所	特願 2019-056782	国内	2019/3/25	出願	太陽電池およびその製造方法	上川由紀子、 牧田紀久夫、 水野英範、 菅谷武芳
3	産業技術総合研究所	特願 2019-216602	PCT	2019/11/29	出願	半導体装置およびその製造方法	牧田紀久夫、 水野英範、 上川由紀子、 菅谷武芳

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	E. E. Tamayo R., T. Hoshii, R. Tamaki, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada, and K. Miyano	東京大学	Maskless fabrication of broadband antireflection nanostructures on glass surfaces	Journal of Optics Vol. 18, 064008, 2016	有	2016年5月
2	B. M. F. Yu Jeco, T. Sogabe, R. Tamaki, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Impact of optically nonuniform luminescence coupling effect to the limiting cell conversion efficiency in InGaP/GaAs/Ge triple junction solar cell	Journal of Photonics for Energy Vol. 7, 35501, 2017	有	2017年8月
3	N. Shigekawa, T. Hara,	大阪市立大学、	GaAs/Indium Tin Oxide/Si Bonding Junctions for III-V-	IEEE Journal of Photovoltaics	有	2018年4月

	T. Ogawa, J. Liang, T. Kamioka, K. Araki, and M. Yamaguchi	豊田工業大 学	on-Si Hybrid Multijunction Cells With Low Series Resistance	Vol. 8, 879, 2018		
4	B. M. F. Yu Jeco, T. Sogabe, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Temperature dependence of luminescence coupling effect in InGaP/GaAs/Ge triple junction solar cells	Journal of Photonics for Energy Vol. 8, 22602, 2018	有	2018年5 月
5	A. Paszuk, O. Supplie, B. Kim, S. Brückner, M. Nandy, A. Heinisch, P. Kleinschmidt Y. Nakano, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	GaAsP/Si tandem solar cells: In situ study on GaP/Si:As virtual substrate preparation	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 180, 343- 349, 2018	有	2018年6 月
6	B. Kim, K. Toprasertpong, A. Paszuk, O. Supplie, Y. Nakano, T. Hannappel, and M. Sugiyama	東京大学、 Tech. Univ. Ilmenau	GaAsP/Si tandem solar cells: Realistic prediction of efficiency gain by applying strain-balanced multiple quantum wells	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 180, 303- 310, 2018	有	2018年7 月
7	J. P. L. G. Barrios, J. R. Cortez, G. M. Herman, A. Larroder, B. M. Yu Jeco, K. Watanabe and Y. Okada	Philippine Science High School Western Visayas Campus、 東京大学	The Use of Convex Lens as Primary Concentrator for Multi-junction Solar Cells	Emergent Scientist Vol. 2, 5, 2018	有	2018年11 月
8	A. Paszuk, O. Supplie, M. Nandy, S. Brückner, A. Dobrich, P. Kleinschmidt B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	Double-layer stepped Si(1 0 0) surfaces prepared in As- rich CVD ambience	Applied Surface Science Vol. 462, 1002-1007, 2018	有	2018年12 月
9	B. M. F. Yu Jeco, E. Veinberg- Vidal, L. Vauche, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学、 CEA-LETI	Temperature dependence of wafer-bonded III-V on silicon multijunction solar cells with luminescent coupling effect	Journal of Photonics for Energy Vol. 9, 015503, 2019	有	2019年3 月
10	B. M. F. Yu Jeco, E. Veinberg-Vidal, L. Vauche, K. Yoshida,	東京大学、 CEA-LETI	Luminescent coupling effect in wafer-bonded III-V on silicon multijunction solar cells	Journal of Photonics for Energy Vol. 9, 015504, 2019	有	2019年3 月

	R. Tamaki, N. Ahsan, and Y. Okada					
11	水野英範, 牧田紀久夫, 菅谷武芳, 大島隆治, 穂積康雄, 高遠秀尚, 松原浩司	産業技術総 合研究所	Palladium Nanoparticle Array-Mediated Semiconductor Bonding That Enables High- Efficiency Multi-Junction Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physics. vol. 55, 025001, (2016)	有	2016/01
12	S. Kosar, Y. Pihosh, T. Ivan, K. Mawatari, J. Uemura, Y. Kazoe, 牧田紀久夫, 菅谷武芳, 松井卓也, D. Fujita, M. Tosa, Y. M. Struk, 近藤道雄, T. Kitamori	Chernivtsy National Univ.、 東京大学、 産業技術総 合研究所、 物材機構	Tandem photovoltaic- photoelectrochemical GaAs/InGaAsP-WO3/BiVO4 device for solar hydrogen generation	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 04ES01, (2016)	有	2016/02
13	川北史朗、 今泉充、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 西永滋郎、 柴田肇、 佐藤真一郎、 大島武	JAXA、 産業技術総 合研究所、 量子科学技 術研究開発 機構	High Efficiency and Radiation Resistant InGaP/GaAs//CIGS Stacked Solar Cells for Space Applications	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference pp. 2574- 2577	無	2016/06
14	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 高遠秀尚、 菅谷武芳、 H. Mehrvarz、 M. Green、 A. Ho-Baillie	産業技術総 合研究所、 UNSW	A "Smart Stack" Triple- Junction Cell Consisting of InGaP/GaAs and Crystalline Si	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference	無	2016/06
15	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 木田康博、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Al-Back Surface Field-Type Crystalline Si-Based Smart Stack Triple-Junction (InGaP/GaAs/Si) Cells	Proceeding of EUPVSEC, pp. 73 ~75	無	2016/07
16	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 西永滋郎、 柴田肇、 馬場将亮、 山田昇、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	Low Concentration GaAs/CuInGaSe and GaAs/Si Multi-junction Solar Cells with Smart Stack Technology	Proceeding of EUPVSEC 2016, pp. 1390~1392	無	2016/07

17	大島隆治、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Enhanced open circuit voltage in inverted thin film solar cells lattice- matched to InP	Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialist Conference pp. 2354-2357	無	2016/11
18	馬場将亮、 牧田紀久夫、 水野英範、 高遠秀尚、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	Feasibility study of two- terminal tandem solar cells integrated with smart stack, areal current matching, and low concentration	Progress in Photovoltaics: Research and Applications vol. 25, p. 255 (2016)	有	2016/12
19	菅谷武芳、 長門優喜、 岡野好伸、 大島隆治、 太野垣健、 牧田紀久夫、 松原浩司	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Growth of InGaAsP solar cells and their application to triple-junction top cells used in smart stack multijunction solar cell	Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 35, No. 2 02B103, (2017)	有	2017/03
20	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Investigation of the open- circuit voltage in mechanically stacked InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs solar cells	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 08MC01, (2017)	有	2017/06
21	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	High-efficiency III-V//Si tandem solar cells enabled by the Pd nanoparticle array-mediated “smart stack” approach	Applied Physics Express vol. 10, No. 7, 072301 (2017)	有	2017/07
22	大島隆治、 長門優喜、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Effects of substrate miscut on the properties of InGaP solar cells grown on GaAs (001) by solid-source molecular beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 08MC08 (2017)	有	2017/07
23	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Investigation of the properties of semiconductor wafer bonding in multijunction solar cells via metal-nanoparticle arrays	Journal of Applied Physics, vol. 122, 023101 (2017)	有	2017/07
24	馬場将亮、 牧田紀久夫、 水野英範、 高遠秀尚、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、産 業技術総合 研究所	Optical design for 2- terminal III-V/Si SMAC module	Proceedings of IEEE photovoltaics specialist conference 44	無	2017/09
25	大島隆治、牧田 紀久夫、太野垣 健、菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Enhancement of open circuit voltage in InGaAsP- inverted thin-film solar cells grown by solid-source molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth, 477, pp. 267- 271 (2017)	有	2017/10
26	馬場将亮、 牧田紀久夫、 水野英範、	長岡科学技 術大学、 産業技術総	Reduction of bonding resistance of two-terminal III-V/Si tandem solar cells	Japanese Journal of Applied	有	2017/11

	高遠秀尚、菅谷武芳、山田昇	合研究所	fabricated using smart stack technology	Physics, vol. 56, 122302 (2017)		
27	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、馬場将亮、山田昇、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所、長岡科学技術大学	High Reliable Low Concentration InGaP/GaAs/Si 3-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology	Proceeding EUPVSEC 2017, pp. 27-29.	無	2017/11
28	馬場将亮、牧田紀久夫、水野英範、高遠秀尚、菅谷武芳、山田昇	長岡科学技術大学、産業技術総合研究所	Effect of Series Resistances on Conversion Efficiency of GaAs/Si Tandem Solar Cells with Areal Current-Matching Technique	IEEE Journal of Photovoltaics, 8, 654 (2018)	有	2018/01
29	菅谷武芳、太野垣健、相原健人、牧田紀久夫、大島隆治、水野英範、長門優喜、中元嵩、岡野好伸	産業技術総合研究所、東京都市大学	Dual-junction GaAs solar cells and their application to smart stacked III-V//Si multijunction solar cells	Applied Physics Express, vo. 11, No. 5, 052301 (2018)	有	2018/04
30	大島隆治、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Enhancement of open-circuit voltage in InGaP solar cells grown by solid source molecular beam epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, 08RD07 (2018).	有	2018/07
31	中元嵩、牧田紀久夫、大島隆治、太野垣健、相原健人、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	High-efficiency and Low-cost Multi-junction Solar Cells with GaAs Multi-stacked Structure	GRAND RENEWABLE ENERGY 2018 Proceedings, P-Pv-2-4 [a90166]	無	2018/10
32	太野垣健、S. Reichmuth、H. Helmers、G. Siefer	産業技術総合研究所、PhISE	Transient analysis of luminescent coupling effects in multi-junction solar cells	Journal of Applied Physics, vol. 124, 183103 (2018).	有	2018/11
33	C. Yi、F. Ma、水野英範、牧田紀久夫、菅谷武芳、高遠秀尚、H. Mehrvarz、S. Bremner、A. Ho-Baillie	産業技術総合研究所、UNSW	Broadband Reflectance Reduction for Wafer Bonded III-V//Si Tandem Cell Using Polydimethylsiloxane - Replicated Surface Texturing	Proceedings of WCPEC-7, pp. 271-274	無	2018/11
34	菅谷武芳、太野垣健、相原健人、牧田紀久夫、大島隆治、水野英範、	産業技術総合研究所、東京都市大学	Smart stacked InGaP/GaAs/GaAs//Si quadruple-junction solar cells	Proceedings of WCPEC-7, pp. 257-260	無	2018/11

	長門優喜、 中元嵩、 岡野好伸					
35	牧田紀久夫、 水野英範、 馬場将亮、 大島隆治、 太野垣健、 相原健人、 中元嵩、山 田昇、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学、東 京都市大学	Nearly 30% High Efficiency Low Concentration InGaP/GaAs//Si 3-Junction Solar Cells Using Smart Stack Technology	Proceeding of EU PVSEC 2018, pp. 20-22	無	2018/11
36	太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 水野英範、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Analysis of luminescence coupling effect in three- terminal tandem solar cells	Journal of Photonics for Energy, vol. 8, No. 4, 045503 (2018)	有	2018/12
37	太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 水野英範、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Impact of nanometer air gaps on photon recycling in mechanically stacked multi- junction solar cells	Optics Express, vol. 27, No. 4, pp. A1-A10 (2019).	有	2019/01
38	太野垣健、 荒木建次、 山口真史、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 豊田工業大 学	Impact of non-planar panels on photovoltaic power generation in the case of vehicles	IEEE Journal of Photovoltaics, 9, 1721 (2019)	有	2019/09
39	大島隆治、 石塚優希、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Growth of InGaAs solar cells on InP(001) miscut Substrates using solid- source molecular beam epitaxy	Phys. Status Solidi A 217, 1900512 (2020)	有	2019/09
40	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Spectral response measurements of each subcell in monolithic triple- junction GaAs photovoltaic devices	Applied Physics Express, 12, 102015 (2019)	有	2019/09
41	牧田紀久夫、 水野英範、 太野垣健、 相原健人、 大島隆治、 庄司靖、齋均、 高遠秀尚、 R. Müller、 P. Beutel、 D. Lackner、 J. Benick、 M. Hermle、 F. Dimroth、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 FHISE	III-V//Si multijunction solar cells with 30% efficiency using smart stack technology with Pd nanoparticle array	Progress in Photovoltaics, 28, 16 (2020)	有	2020/01
42	C. Yi、F. Ma、 水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 高遠秀尚、 H. Mehrvarz、	産業技術総 合研究所、 UNSW	Application of Polydimethylsiloxane Surface Texturing on III-V//Si Tandem Achieving More Than 2% Absolute Efficiency Improvement	Optics Express, vol. 28, 3895 (2020)	有	2020/01

	S. Bremner, A. Ho-Baillie					
43	太野垣健、 牧田紀久夫、 立花福久、 水野英範、 大島隆治、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Three-terminal tandem solar cells with a back-contact- type bottom cell bonded using conductive metal nanoparticle arrays	IEEE Journal of Photovoltaics, 10, 358 (2020)	有	2020/03
44	水野英範、 牧田紀久夫、 望月敏光、 太野垣健、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Cu Nanoparticle Array- Mediated III-V/Si Integration: Application in Series-Connected Tandem Solar Cells	ACS Applied Energy Materials, pp. 3445~ 3453	有	2020/03
45	庄司靖、 牧田紀久夫、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Multiple epitaxial lift-off of stacked GaAs solar cells for low-cost photovoltaic applications	Japanese Journal of Applied Physics, 59, 052003 (2020)	有	2020/04
46	N. Shigekawa ¹ , R. Kozono ¹ , S. Yoon ¹ , T. Hara ¹ , J. Liang ¹ and A. Yasui ²	¹ 大阪市大、 ² JASRI	Effects of post bonding annealing on GaAs//Si bonding interfaces and its application for sacrificial- layer-etching based multijunction solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 210, 110501, 2020	有	2020年3 月 (online)
47	T. Hishida, J. Liang, and N. Shigekawa	大阪市大	Low-resistance semiconductor/ semiconductor junctions with intermediate metal grids for III-V-on- Si multijunction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 59, SBBB04, 2020	有	2019年11 月 (online)
48	S. Yamajo ¹ , S. Yoon ¹ , J. Liang ¹ , H. Sodabanlu ² , K. Watanabe ² , M. Sugiyama ² , A. Yasui ³ , E. Ikenaga ³ , and N. Shigekawa ¹	¹ 大阪市大、 ² 東大、 ³ JASRI	Hard X-ray photoelectron spectroscopy investigation of annealing effects on buried oxide in GaAs/Si junctions by surface- activated bonding	Applied Surface Science Vol. 473, 627, 2019	有	2018年12 月 (online)
49	T. Hara ¹ , T. Ogawa ¹ , J. Liang ¹ , K. Araki ² , T. Kamioka ² , and N. Shigekawa ¹	¹ 大阪市大、 ² 豊田工大	Electrical properties of GaAs//indium tin oxide/Si junctions for III-V-on-Si hybrid multijunction cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RD05, 2018	有	2018年7 月
50	N. Shigekawa ¹ , T. Hara ¹ , T. Ogawa ¹ , J. Liang ¹ , T. Kamioka ² , K. Araki ² , and M. Yamaguchi ²	¹ 大阪市大、 ² 豊田工大	GaAs/Indium Tin Oxide/Si Bonding Junctions for III-V- on-Si Hybrid Multijunction Cells With Low Series Resistance	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 8, 879, 2018	有	2018年4 月
51	Jianbo Liang ¹ , Tomoki Ogawa ¹ ,	¹ 大阪市大、 ² 豊田工大	Electrical conduction of Si/indium tin oxide/Si	Japanese Journal of	有	2018年1 月

	Tomoya Hara ¹ , Kenji Araki ² , Takefumi Kamioka ² , and Naoteru Shigekawa ¹		junctions fabricated by surface activated bonding	Applied Physics, 57 , 02BE03 (2018).		
52	Yutaka Ohno ¹ , Hideto Yoshida ² , Seiji Takeda ² , Jianbo Liang ³ and Naoteru Shigekawa ³	¹ 東北大、 ² 阪大、 ³ 大阪市大	Intrinsic microstructure of Si/GaAs heterointerfaces fabricated by surface- activated bonding at room temperature	Japanese Journal of Applied Physics, 57 , 02BA01 (2018).	有	2017年11 月
53	L. Chai, J. Liang, and N. Shigekawa	大阪市大	Effects of annealing on the electrical characteristics of GaAs/GaAs junctions by surface activated bonding	Japanese Journal of Applied Physics, 55 , 068002 (2016).	有	2016年5 月
54	S. Yoshidomi, S. Kimura, M. Hasumi, and T. Sameshima	国立大学法 人東京農工 大学	Indium-gallium-zinc-oxide layer used to increase light transmittance efficiency of adhesive layer for stacked- type multijunction solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 54 (2015) 112301.	有	2015/10/1
55	T. Sameshima, T. Nimura, T. Sugawara, Y. Ogawa, S. Yoshidomi, S. Kimura, M. Hasumi	国立大学法 人東京農工 大学	Indium gallium zinc oxide layer used to decrease optical reflection loss at intermediate	Jpn. J. Appl. Phys. 56 (2017) 012602.	有	2016/12/6
56	M. Hasumi, Y. Ogawa, K. Oshinari, J. Shirakashi, W. Kubo, T. Sameshima	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction in connecting resistivity and optical reflection loss at intermediate layer for mechanically stacked multijunction solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) 102301.	有	2018/9/5

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	M. Mori, A. Ogura, K. Yoshida, T. Sogabe, and Y. Okada	東京大学	Device simulation of thin film solar cell characteristics considering Fabry-Perot cavity effect	International Nano- Optoelectronics Workshop, Tokyo	2015年8月
2	K. Watanabe, T. Inoue, H. Sodabanlu, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Self-Organized Texture of GaAs by Wet Etching for Light Trapping in MQW Solar Cell	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
3	N. Vandamme, J. Goffard, B. Behaghel, A. Cattoni,	東京大学, LPN, IRDEP CNRS	Ultrathin GaAs Solar Cells with a Nanostructured Silver Mirror	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and	2015年9月

	A. Lemaître, S. Collin, A. Delamarre, M. Sugiyama and J.F. Guillemoles			Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	
4	森瑞希、 小倉暁雄、 曾我部東馬、 岡田至崇	東京大学	光干渉効果を考慮した薄膜太陽電池のデバイスシミュレーション	第76回応用物理学 会秋季学術講演会	2015年9月
5	A. Ogura, M. Mori, K. Yoshida, and T. Sogabe	東京大学	Device simulation of thin-film intermediate-band solar cell using drift-diffusion model and FDTD method	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016年2月
6	長岡恵里奈、 井上智之、 トープラサートポ ン カシディット 山下大之、 渡辺健太郎、 杉山正和、 中野義昭	東京大学	GaAs/Si 太陽電池における変換効率・発電コストの GaAs 層厚依存性	第63回応用物理学 会春季学術講演会	2016年3月
7	B. M. Yu Jeco, T. Sogabe, A. Ogura, N. Miyashita, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	Laser Beam Induced Current (LBIC) Mapping of InGaP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells with Luminescence Coupling	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6月
8	K. Watanabe, T. Inoue, K. Toprasertpong A. Delamarre, H. Sodabanlu, J.-F. Guillemoles M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Optical analysis of the photon recycling effect in InGaAs/GaAsP multiple quantum well solar cell with light trapping structure	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6月
9	A. Cattoni, Hung-Ling Chen, N. Vandamme, J. Goffard, A. Lemaître, A. Delamarre, B. Behaghel, K. Watanabe, M. Sugiyama, J.-F. Guillemoles S. Collin	LPN, 東京大学	200nm-thick GaAs solar cells with a nanostructured silver mirror	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6月
10	B. M. Yu Jeco	東京大学	Spatial Distribution of Temperature Dependent luminescence coupling Current in InGaP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
11	B. Mae YU JECO, R. Vergil Doma, M. Anthony	東京大学、 University of Santo	Acquisition and Analysis of Electrocardiogram Waveforms with Diagnosis Transmission	IEEE TENCON 2016, Singapore	2016年11月

	Morales, E. Grace Tarroza, M. Fatima Villaflores, A. dela Cruz, E. Guevara, R. Rhay Vicerra, M. Luisa Asilo	Tomas	through Short Message Service Communication System		
12	B. Kim, O. Supplie, T. Watanabe, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学, Tech. Univ. Ilmenau	Double-layer step formation on Si (100) surfaces by moderate-temperature annealing coupled with TBA exposure	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
13	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau, 東京大学	In-situ control over dimer orientation on Si(100) surfaces in arsenic ambient and its impact on the sublattice orientation of subsequently grown GaP	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
14	K. Watanabe, E. Nagaoka, D. Yamashita, K. Toprasertpong Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Development of GaAs//Si current-balanced dual junction solar cell integrated by surface- activated bonding	5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB- 3D 2017), Tokyo	2017年5月
15	B. Kim, K. Toprasertpong O. Supplie, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学, Tech. Univ. Ilmenau	Efficiency of GaAsP/Si Two- junction Solar Cells with Multi-Quantum Wells: a Realistic Modeling with Carrier Collection Efficiency	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
16	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau, 東京大学	In situ control over the sublattice orientation of heteroepitaxially grown single-domain GaP/Si:As virtual substrates for tandem absorbers	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
17	L. Zhu, A. Reddy, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, and H. Akiyama	東京大学	Design of InGaP/GaAs/InGaAs multi-junction cells with reduced layer thicknesses using light-trapping rear texture	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月

18	Y. Shoji, K. Watanabe, A. Ogura, and Y. Okada	東京大学	50-layer stacked InGaAs/GaAs quantum dot solar cell with light scattering structure	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017年9月
19	B. M. F. Yu Jeco, K. Yoshida, R. Tamaki, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Analysis of Current Generation in InGaP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells with Optically Non-Uniform Luminescence Coupling Effect	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017年9月
20	A. G. Reddy, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, L. Zhu, and H. Akiyama	東京大学	Feasibility of Thin-Film InGaP/GaAs/InGaAs Multi- Junction Solar Cells Using Light Trapping for Low-Cost and High-Efficiency Applications	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017年9月
21	T. Sogabe, M. Mori, K. Sakamoto, K. Yamaguchi, and Y. Okada	電気通信大 学、 東京大学	Light Interference Integrated Device Simulation in Thin Film InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
22	K. Watanabe, M. Sugiyama, H. Sodabanlu, K. Toprasertpong and Y. Nakano	東京大学	Current-matched design of GaAs//Si dual junction solar cells integrated by surface activated wafer bonding	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
23	B. Kim, O. Supplie, A. Pasazuk, T. Hannappel, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 Tech. Univ. Ilmenau	MOVPE preparation of GaP template on Si(100) with in-situ reflectance anisotropy monitoring: impact of reactor contamination	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
24	L. Zhu, A. Reddy, M. Sugiyama, K. Watanabe, Y. Nakano, and H. Akiyama	東京大学	Reduced-layer-thickness design of InGaP/GaAs/InGaAs solar cells using light- trapping texture mirror	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
25	M. Giteau, S. Collin, Z. Jehl, D. Suchet, J.-F. Guillemoles and Y. Okada	東京大学、 IPVF CNRS	Advanced Light Trapping for Hot-Carrier Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月

26	B. M. F Yu Jeco, R. Tamaki, T. Nakamura, M. Imaizumi, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Spatial evaluation of luminescent coupling effect in a current-limiting subcell of In GaP/GaAs/Ge triple junction solar cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
27	O. Supplie, A. Heinisch, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	Optical in situ quantification of the Arsenic content in GaAsP graded buffer layers for III -V-on-Si tandem absorbers during MOVPE growth	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
28	A. Paszuk, O. Supplie, M. Nandy, S. Brückner, A. Dobrich, P. Kleinschmidt, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	As-modified Si(100) Surfaces for III-V-on-Si Tandem Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
29	M. Giteau, K. Watanabe, N. Miyashita, H. Sodabanlu, J. Goffard, A. Delamarre, D. Suchet, R. Tamaki, Z. Jehl, L. Lombez, M. Sugiyama, A. Cattoni, S. Collin, J-F. Guillemoles and Y. Okada	東京大学、 IPVF CNRS	Light Absorption Enhancement in Ultra-Thin Layers for Hot-Carrier Solar Cells	SPIE Photonics West 2019, San Francisco, USA	2019年2月
30	B. M. Yu Jeco, A. Chikhalkar, M. Giteau, R. Tamaki, N. Ahsan, R. King, and Y. Okada,	東京大学、 Arizona State University	The influence of Al2O3 passivation of III-V on Ge multijunction solar cells to the spatial distribution of luminescent coupling effect	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC46), Chicago, USA	2019年6月
31	O. Supplie, A. Heinisch, A. Paszuk, A. Tummaliéh, M. Sugiyama, and T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau、 東京大学	Optical in situ Quantification of the As versus P Content during GaAsP Graded Layer Growth for III-V-on-Si Tandems	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Marseille, France	2019年9月
32	Shengjiang Quan, Ziqi Zhang, K. Watanabe, H. Sodabanlu, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Light trapping enhanced InGaP/GaAs two-junction solar cell based on colloidal lithography	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020年3月

33	高本達也	シャープ(株)	III-V族系超高効率太陽電池の高効率化技術	学振 175 委員会 「化合物薄膜太陽電池分科会」第5回研究会 “夏の学校 2015”	2015/9
34	高本達也	シャープ(株)	III-V多接合型太陽電池の技術動向	東京理科大学太陽光発電技術研究部門シンポジウム 「太陽電池・発電技術の現状と課題」(東京理科大学)	2016/1
35	高本達也	シャープ(株)	III-V族多接合型太陽電池の動向について	2016年第63回応用物理学会春季学術講演会(東京工業大学)	2016/3
36	高本達也	シャープ(株)	III-V PV Activities at SHARP	PV Industry WS 2016 (Korea)	2016/9
37	高本達也	シャープ(株)	IMM Triple-junction Solar Cells and Modules optimized for Space and Terrestrial Conditions.	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (ワシントン DC)	2017/6
38	野中翔一郎, 古川昭雄, 牧田紀久夫, 水野英範, 菅谷武芳, 仁木栄	東京理科大学、 産業技術総合研究所	スマートスタック構造における接合界面の詳細分析 II	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
39	望月透、菅谷武芳、 太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 松原浩司、 岡野好伸	東京都市大学、 産業技術総合研究所	スマートスタック多接合太陽電池に向けた MBE による InGaAsP セカンドセルの作製	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
40	山田昇、 牧田紀久夫、 馬場将亮、 平井大貴、 菅谷武芳	長岡科学技術大学、 産業技術総合研究所	Fabrication of low concentration multi-junction solar cells with smart stacking and areal current matching technique	31st European Photovoltaics Solar Energy Conference	2015/09
41	川北史朗、 今泉充、舩分宏昌、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 西永慈郎、 佐藤真一郎、 大島武	JAXA、 産業技術総合研究所、 量子科学技術研究開発機構	Radiation Resistance in High-Efficiency III-V/CIGS Mechanical Stacking Solar Cells	31st European Photovoltaics Solar Energy Conference	2015/09
42	菅谷武芳	産業技術総合研究所	III-V族化合物半導体を用いた革新的太陽電池開発の進展	学振光エレクトロニクス第130委員会	2015/10
43	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、齋均、 野中翔一郎、 古川昭雄、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 東京理科大学	Development of Smart Stacking Technology for Multi-junction Solar Cells	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11

44	馬場将亮、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	Light management for mechanically stacked dual- junction solar cells with areal current matching techniques	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11
45	菅谷武芳、望月透、 太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 松原浩司、 岡野好伸	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Fabrication of InGaAsP (1.65eV) second cells for smart stack multijunction solar cells grown using solid-source MBE	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11
46	野中翔一郎、 古川昭雄、 牧田紀久夫、 水野英範、 菅谷武芳、 仁木栄	東京理科大 学、 産業技術総 合研究所	スマートスタック技術による 多接合太陽電池の接合界面の 評価	電子情報通信学会 研究会	2015/11
47	菅谷武芳、 牧田紀久夫、 水野英範、望月透、 大島隆治、 西永慈郎、 岡野好伸、 松原浩司	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Smart stacked heterogeneous multijunction solar cells fabricated by advanced bonding using metal nanoparticle arrays	The 2015 International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology	2015/12
48	菅谷武芳、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健	産業技術総 合研究所	スマートスタック異種多接合 太陽電池	第 63 会応用物理学 会春季学術講演会 (招待講演)	2016/03
49	大島隆治、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	逆積み 1.0 eV 帯 GaInAsP 薄膜 太陽電池における暗電流の低 減	第 63 会応用物理学 会春季学術講演会	2016/03
50	水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 太野垣健、 望月敏光、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	ボトムに単結晶 Si を用いたス マートスタック多接合セル	第 63 会応用物理学 会春季学術講演会	2016/03
51	水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 大島隆治、 高遠秀尚、 松原浩司、 仁木栄	産業技術総 合研究所	スマートスタック技術：金属 ナノ粒子配列を用いた高効率 多接合太陽電池の開発	日本化学会 第 96 春季年会	2016/03
52	馬場将亮、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	スマートスタック/面積電流整 合/低倍率集光を組み合わせた 多接合太陽電池 (SMAC モジュ ール) の設計試作	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/05
53	菅谷武芳、望月透、 長門優喜、 太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 松原浩司、 岡野好伸	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	MBE による InGaAsP (1.65eV) 太陽電池とスマートスタック 用 3 接合トップセルの試作	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/05

54	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 高遠秀尚、 菅谷武芳、 H. Mehrvarz、 M. Green、 A. Ho-Baillie	産業技術総 合研究所、 UNSW	A "Smart Stack" Triple- Junction Cell Consisting of InGaP/GaAs and Crystalline Si	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
55	大島隆治、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Enhanced open circuit voltage in inverted thin film solar cells lattice- matched to InP	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
56	川北史朗、今泉充、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 西永滋郎、柴田肇、 佐藤真一郎、 大島武	JAXA、 産業技術総 合研究所、 量子科学技 術研究開発 機構	High Efficiency and Radiation Resistant InGaP/GaAs//CIGS Stacked Solar Cells for Space Applications	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
57	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 望月敏光、 木田康博、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Al-Back Surface Field-Type Crystalline Si-Based Smart Stack Triple-Junction (InGaP/GaAs/Si) Cells	32nd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2016/06
58	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 西永滋郎、柴田肇、 馬場将亮、山田昇、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	Low Concentration GaAs/CuInGaSe and GaAs/Si Multijunction Solar Cells with Smart Stack Technology	32nd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2016/06
59	大島隆治、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Enhancement of open circuit voltage in InGaAsP inverted thin-film solar cells grown by solid-source molecular beam epitaxy	19th international Conference on Molecular Beam Epitaxy	2016/09
60	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタック技術を用い た低倍集光異種接合型多接合 太陽電池の検討	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/09
61	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタック InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs 4 接合太陽電池の光学特性評価	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/09
62	長門優喜、 菅谷武芳、 大島隆治、 岡野好伸	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	MBE 法を用いた InGaP 太陽電池 における基板オフ角度の検討	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/09
63	菅谷武芳、望月透、 長門優喜、 太野垣健、	産業技術総 合研究所、 東京都市大	Growth of InGaAsP (1.65eV) Solar Cells and its Application to 3-Junction	32nd North American Conference on	2016/09

	牧田紀久夫、 大島隆治、 松原浩司、 岡野好伸	学	Top Cells for Smart Stack Multijunction Solar Cells	Molecular Beam Epitaxy	
64	馬場将亮、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	Relative Properties of SMAC solar cell	11th Asian Thermophysical Properties Conference	2016/10
65	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 馬場将亮、 山田昇、高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	Low Concentration InGaP/GaAs/Si 3-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
66	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Optical characterisation of smart stack four junction InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
67	大島隆治、 長門優喜、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	The role of substrate miscut on the properties of InGaP solar cells grown on GaAs(001) by solid source molecular beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
68	太野垣健、 牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Optical characterisation of smart stack four junction InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
69	水野英範、 牧田紀久夫、 太野垣健、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Progress of Smart Stack Technology towards Practical Applications	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/03
70	馬場将亮、 牧田紀久夫、 水野英範、 高遠秀尚、 菅谷武芳、山田昇	長岡科学技 術大学、 産業技術総 合研究所	Optical design for 2- terminal III-V/Si SMAC module	IEEE photovoltaics specialist conference 44	2017/06
71	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 馬場将亮、山田昇、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	スマートスタック GaAs//Si 系 多接合太陽電池の実用化技術 開発	第 14 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2017/07
72	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタック技術を用い た異種接合型多接合太陽電池 の検討	第 78 回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/09

73	今泉充、高本達也、大島武、菅谷武芳	JAXA、シャープ(株)、量子科学技術研究開発機構、産業技術総合研究所	多元化合物半導体を材料とした宇宙用太陽電池の研究開発	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/09
74	長門優喜、菅谷武芳、大島隆治、岡野好伸	東京都市大学、産業技術総合研究所	MBE法を用いたInGaP太陽電池の成長温度、成長速度の検討	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/09
75	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所	Next-generation High Efficiency and Low Cost GaAs/Si Multijunction Solar Cells with Smart Stack Technology	Int. Conf. on Solid State Devices & Materials 2017, C-3-01 (招待講演)	2017/09
76	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、馬場将亮、山田昇、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所、長岡科学技術大学	High Reliable Low Concentration InGaP/GaAs/Si 3-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology	33rd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2017/09
77	長門優喜、大島隆治、岡野好伸、菅谷武芳	東京都市大学、産業技術総合研究所	Enhancement of open-circuit voltage in InGaP solar cells grown by solid source molecular beam epitaxy	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
78	菅谷武芳、太野垣健、牧田紀久夫、大島隆治	産業技術総合研究所	Dual-junction GaAs PV cells for smart stacked multijunction solar cells	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
79	菅谷武芳、大島隆治、水野英範、牧田紀久夫、望月敏光、太野垣健	産業技術総合研究所	High-efficiency heterogeneous multijunction solar cells fabricated by smart stack technology using metal nanoparticle arrays	2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS)	2017/11
80	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所	スマートスタック技術によるGaAs/Si多接合太陽電池の開発(基本検証および実用化に向けて)	学振175委員会次世代シリコン太陽電池分科会、超高効率太陽電池分科会	2017/12
81	菅谷武芳	産業技術総合研究所	Smart stacked heterogeneous multijunction solar cells fabricated by advanced bonding using metal nanoparticle arrays	10 th Int. Symp. on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2018) (招待講演)	2018/03

82	中元嵩、 牧田紀久夫、 大島隆治、 太野垣健、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	GaAs/GaAs 多重化構造を有する 多接合太陽電池の検討	第 65 回応用物理学 会春季学術講演会	2018/03
83	長門優喜、 大島隆治、 菅谷武芳、 岡野好伸	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	MBE 法を用いた InGaP/GaAs 2 接合太陽電池の高性能化	第 65 回応用物理学 会春季学術講演会	2018/03
84	牧田紀久夫、 水野英範、 大島隆治、 太野垣健、 西永慈郎、 柴田肇、高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Heterogeneous Multi- junction Solar Cells using Smart Stack Technology for Practical Use	2018 MRS Spring meeting	2018/04
85	Chuqi Yi、 Fa-Jun Ma、 水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 高遠秀尚、 Hamid Mehrvarz、 Stephen Bremner Anita Ho-Baillie	UNSW、 産業技術総 合研究所	Broadband Reflectance Reduction for Wafer Bonded III-V//Si Tandem Cell Using Polydimethylsiloxane - Replicated Surface Texturing	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
86	菅谷武芳、 太野垣健、 相原健人、 牧田紀久夫、 大島隆治、 水野英範、 中元嵩、岡野好伸	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Smart stacked InGaP/GaAs/GaAs//Si quadruple-junction solar cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
87	大島隆治、 長門優喜、 牧田紀久夫、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Atomic ordering effect on the cell performance of InGaP/GaAs dual-junction solar cells grown by solid- source MBE	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
88	中元嵩、 牧田紀久夫、 大島隆治、 太野垣健、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	High-efficiency and Low- cost Multi-junction Solar Cells with GaAs Multi- stacked Structure	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
89	牧田紀久夫、 水野英範、 馬場将亮、 大島隆治、 太野垣健、中元嵩、 山田昇、高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学学、 東京都市大 学	スマートスタック GaAs//Si 低 倍集光太陽電池における接合 抵抗削減の検討	第 15 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/07
90	太野垣健、 水野英範、 牧田紀久夫、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタック多接合太陽 電池における光学特性の検討	第 15 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/07

91	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 大島隆治、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 東京都市大学	GaAs 多重構造を有する多接合太陽電池の検討	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
92	太野垣健、 水野英範、 牧田紀久夫、 大島隆治、 菅谷武芳	産業技術総合研究所	Impact of Nanometer Air Gap on Photon Recycling in Mechanically Stacked Multijunction Solar Cells	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018)	2018/09
93	太野垣健、 牧田紀久夫、 大島隆治、 水野英範、 馬場将亮、山田昇、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 長岡科学技術大学	三端子型スマートスタック多接合太陽電池の作製と特性評価	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/09
94	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 大島隆治、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	東京都市大学、 産業技術総合研究所	多接合太陽電池における GaAs 多重化構造の検討	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018/09
95	牧田紀久夫、 水野英範、 馬場将亮、 大島隆治、 太野垣健、 相原健人、中元嵩、 山田昇、高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 長岡科学技術大学	Nearly 30% High Efficiency Low Concentration InGaP/GaAs//Si 3-Junction Solar Cells Using Smart Stack Technology	35th European Photovoltaics Solar Energy Conference	2018/09
96	菅谷武芳、中元嵩、 牧田紀久夫、 相原健人、 太野垣健、 大島隆治、 水野英範、 岡野好伸	産業技術総合研究所、 東京都市大学	Smart Stacked InGaP/GaAs/GaAs//Si Quadruple-Junction Solar Cells Grown using Molecular Beam Epitaxy	34th North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2018)	2018/10
97	水野英範、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総合研究所	接合媒体に銅ナノ粒子配列を用いたスマートスタックセル	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/03
98	牧田紀久夫、 太野垣健、 水野英範、 馬場将亮、 中西明日香、 高遠秀尚、山田昇、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 長岡科学技術大学	GaAs//Si 系三端子型スマートスタック多接合太陽電池の検討	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/03
99	中西明日可、 馬場将亮、 太野垣健、 牧田紀久夫、 菅谷武芳、山田昇	長岡科学技術大学、 産業技術総合研究所	三端子スマートスタック多接合太陽電池におけるサブセル面積比の影響	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/03

100	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Photovoltaic properties of triple-junction GaAs solar cells and their application to laser power converters	Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference 2019	2019/04
101	庄司靖、菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Study on epitaxial lift-off of stacked GaAs solar cells for low-cost photovoltaic application	Compound Semiconductor Week 2019	2019/05
102	石塚優希、 大島隆治、 菅谷武芳、 岡野好伸	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	Growth of InGaAs solar cells on InP(001) miscut substrates using solid- source molecular beam epitaxy	Compound Semiconductor Week 2019	2019/05
103	相原健人、 牧田紀久夫、 水野英範、齋均、 大島隆治、中元嵩、 庄司靖、太野垣健、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	InGaP/GaAs//Si 多接合太陽電 池におけるメサ構造の検討	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/07
104	牧田紀久夫、 太野垣健、 水野英範、 立花福久、 馬場将亮、 中西明日香、 高遠秀尚、山田昇、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 長岡科学技 術大学	GaAs//Si 系三端子型スマート スタック多接合太陽電池	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/07
105	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 大島隆治、 相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 東京都市大 学	GaAs 多重化構造を用いた多接 合太陽電池の試作・検討	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/07
106	牧田紀久夫、 水野英範、 太野垣健、 相原健人、 大島隆治、 庄司靖、 高遠秀尚、 R. Muller、 P. Beutel、 D. Lackner、 J. Benick、 M. Hermle、 F. Dimroth、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 FhISE	プレナリー講演：III-V//Si three-junction solar cells reaching 30% efficiency using smart stack technology	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2019/09
107	石塚優希、 大島隆治、 岡野好伸、 菅谷武芳	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	MBE法を用いた InP(001)微傾 斜基板上の InGaAs 太陽電池の 作製	第80回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/09
108	中元嵩、 牧田紀久夫、 太野垣健、 大島隆治、	東京都市大 学、 産業技術総 合研究所	GaAs/GaAs/GaAs//Si スマート スタック4接合太陽電池の作 製	第80回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/09

	相原健人、 岡野好伸、 菅谷武芳				
109	太野垣健、 牧田紀久夫、 立花福久、 水野英範、 大島隆治、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	Demonstration of Three- Terminal GaAs//Si Tandem Solar Cells with a Back- Contact-Type Bottom Cell	The 29th International PV Science and Engineering Conference	2019/11
110	水野英範、 牧田紀久夫、 望月敏光、 太野垣健、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	Fabrication of III-V//Si Tandem Solar Cells by the Copper Nanoparticle Array- Mediated Smart Stack Approach	The 29th International PV Science and Engineering Conference	2019/11
111	水野英範、 牧田紀久夫、齋均、 松井卓矢、 宮寺哲彦、 太野垣健、 望月敏光、 大島隆治、 菅谷武芳、 高遠秀尚	産業技術総 合研究所	招待講演：Smart Stack Technology for Si-Based Tandem Solar Cells	2019 MRS Fall Meeting and Exhibition	2019/12
112	太野垣健、 牧田紀久夫、 立花福久、 水野英範、 大島隆治、 高遠秀尚、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所	バックコンタクト型三端子タ ンデム太陽電池の作製と評価	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/03
113	R. Kozono ¹ , J. Liang ¹ , K. Watanabe ² , M. Sugiyama ² and N. Shigekawa ¹	¹ 大阪市大 ² 東大	GaAs//Si Hybrid Double Junction Cells Fabricated by Direct Bonding of Epitaxially Lifted-Off GaAs Subcell Layers on PET Films	The 29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering (PVSEC-29), Xi'an, China,	2019年11月
114	R. Kozono, S. Yoon, J. Liang and N. Shigekawa	大阪市大	GaAs/Si Double-Junction Cells Fabricated by Sacrificial Layer Etching of Directly-Bonded III-V/Si Junctions	2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Chicago, IL, USA	2019年6月
115	T. Hishida, J. Liang, and N. Shigekawa	大阪市大	Electrical properties of p+-GaAs//patterned metal layer/n+-Si junctions	2019 6th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB- 3D 2019), Kanazawa	2019年5月
116	Y. Ohno ¹ , H. Yoshida ² , S. Takeda ² , J. Liang ³ , and N. Shigekawa ³	¹ 東北大 ² 阪大 ³ 大阪市大	Atomistic Structure of Low- Resistance Si/GaAs Heterointerfaces Fabricated by Surface-Activated Bonding at Room Temperature	Americas International Meeting on Electrochemistry and Solid State	2018年9月

				Science (AIMES2018), Cancun, Mexico	
117	Naoteru Shigekawa	大阪市大	Hybrid heterostructures and heterostructure devices fabricated by surface activated bonding technologies (invited)	The 42nd Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits (WOCSDICE 2018), Bucharest, Romania	2018年5月
118	Naoteru Shigekawa	大阪市大	Application of surface-activated bonding technologies for III-V-on-Si hybrid multijunction cells (invited)	EMN Singapore Meeting 2018	2018年1月
119	重川直輝	大阪市大	表面活性化接合法によるIII-V-on-Si タンデム太陽電池(招待)	学振第175委員会次世代シリコン太陽電池分科会 超高効率太陽電池分科会	2017年12月
120	Tomoya Hara ¹ , Tomoki Ogawa ^{1, 1} , Jianbo Liang ¹ , Kenji Araki ² , Takefumi Kamioka ² , Naoteru Shigekawa ¹	¹ 大阪市大 ² 豊田工大	Annealing effects on GaAs/ITO/Si junctions fabricated by surface-activated bonding	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017年11月
121	Sanji Yoon, Jianbo Liang, Naoteru Shigekawa	大阪市大	GaAs single junction cells on Si substrates fabricated by surface activated bonding and etching of sacrificial layers	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14
122	Naoteru Shigekawa, Jianbo Liang	大阪市大	Measurements of Potentials at Tap Contacts and Estimation of Resistance across Bonding Interfaces in InGaP/GaAs/Si Hybrid Triple-Junction Cells	2017 IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017年6月
123	Naoteru Shigekawa ¹ , Tomoya Hara ¹ , Tomoki Ogawa ¹ , Jianbo Liang ¹ , Takafumi Kamioka ² , Kenji Araki ² , Masafumi Yamaguchi ²	¹ 大阪市大 ² 豊田工大	InGaP/GaAs/ITO/Si Hybrid Triple-Junction Cells with GaAs/ITO Bonding Interfaces	2017 IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017年6月
124	Jianbo Liang ¹ , Tomoki Ogawa ¹ , Kenji Araki ² , Takefumi Kamioka ² , Naoteru	¹ 大阪市大 ² 豊田工大	Electrical Conduction of Si/ITO/Si Junctions Fabricated by Surface Activated Bonding	2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration	2017年5月

	Shigekawa ¹				
125	Naoteru Shigekawa, Jianbo Liang	大阪市大	Impacts of Bonding-Layer Resistance of Si Bottom Cells on Interface Resistance in InGaP/GaAs/Si Hybrid Triple-Junction Cells	2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration	2017年5月
126	Yutaka Ohno ¹ , Hideto Yoshida ² , Seiji Takeda ² , Liang Jianbo ³ , Naoteru Shigekawa ³	¹ 東北大 ² 阪大 ³ 大阪市大	Plane-View Transmission Electron Microscopy of Si/GaAs Interfaces Fabricated by Surface-Activated Bonding at Room Temperature	2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration	2017年5月
127	Naoteru Shigekawa, Jianbo Liang	大阪市大	Surface-activated Bonding of III-V Compound Semiconductors and Si for Fabricating Hybrid Tandem Solar Cells (invited)	2018 International Conference on Electronics Packaging	2017年4月
128	Naoteru Shigekawa and Jianbo Liang	大阪市大	Electrical Characterisation of Coupling Properties in InGaP/GaAs/Si Triple-Junction Cells	PVSEC-26	2016年10月
129	Shunsuke Kimura, Shinya Yoshidomi, Masahiko Hasumi, and Toshiyuki Sameshima	国立大学法人東京農工大学	Reduction in Optical Reflection Loss at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	The 22nd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices	2015/7/2
130	Masahiko Hasumi, Toshiyuki Sameshima, Takayuki Motoki, Tomohiko Nakamura and Tomohisa Mizuno	国立大学法人東京農工大学	Annihilation Properties of Photo-Induced Carrier in Silicon PN Junction	The 22nd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices	2015/7/2
131	木村駿介、吉富真也、蓮見真彦、鮫島俊之	国立大学法人東京農工大学	メカニカルスタック型多接合ソーラーセルの中間層における光反射ロス低減	薄膜材料デバイス研究会第12回研究集会	2015/10/31
132	T. Sugawara, S. Kimura, S. Yoshidomi, S. Saito, M. Hasumi, T. Sameshima	国立大学法人東京農工大学	Low Optical Reflection at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/19
133	T. Sameshima, S. Kimura, S. Yoshidomi, T. Sugawara, S. Saito, M. Hasumi	国立大学法人東京農工大学	Low Optical Reflection at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	PhotoVoltaic Technical Conference 2016	2016/5/9
134	T. Sameshima, S. Kimura, S. Yoshidomi, T. Sugawara, M. Hasumi	国立大学法人東京農工大学	REDUCTION IN OPTICAL REFLECTION AT INTERMEDIATE ADHESIVE LAYER FOR MECHANICALLY STACKED MULTI-JUNCTION SOLAR CELLS	32nd International European Conference on Surface Science	2016/9/1

135	鮫島俊之、 荷村毅、菅原崇、 小川喜洋、 吉富真也、 木村俊介、 蓮見真彦	国立大学法 人東京農工 大学	メカニカルスタック型多接合 ソーラーセル作製のためのイ ンジウムガリウムジंकオキ サイドを用いた中間接着層に おける光反射ロスの低減	薄膜材料デバイス 研究会第13回研究 集会	2016/10/22
136	Y. Ogawa, M. Hasumi, T. Mizuno, T. Sameshima	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction of Optical Reflection Loss at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	第64回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
137	T. Sameshima, Y. Ogawa and M. Hasumi	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction in optical reflection at intermediate adhesive layer for mechanically stacked multi junction solar cells	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/5/23
138	M. Hasumi, Y. Ogawa, K. Oshinari, T. Sameshima	国立大学法 人東京農工 大学	International Conference on Solid State Devices and Materials	Photovoltaic Technical Conference	2017/9/21
139	Yoshihiro Ogawa, Kosuke Oshinari, Masahiko Hasumi, Toshiyuki Sameshima, Tomohisa Mizuno	国立大学法 人東京農工 大学	Transparent and Conductive layers used for Reducing Optical Reflection Loss for Fabricating Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	第65回応用物理学 会春季学術講演会	2018/3/19
140	Kosuke Oshinari, Masaki Kondo, Mamiko Yagi, Masahiko Hasumi, Wakana Kubo, Junichi Shirakashi, Toshiyuki Sameshima, Mohamed Amara	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction in Connecting Resistivity of Intermediate Adhesive Layer by SF ₆ Plasma Treatment for Mechanical Stacking Multi Junction Solar Cells	第65回応用物理学 会春季学術講演会	2018/3/20
141	T. Sameshima, K. Oshinari, G. Kojitani, M. Hino, T. Watanabe, M. Kondo, M. Yagi, M. Hasumi, W. Kubo, J. Shirakashi, M. Amara	国立大学法 人東京農工 大学	Reduction in connecting resistivity of intermediate adhesive layer for mechanically stacked multi- junction solar cells	Grand Renewable Energy	2018/6/21
142	M. Hasumi, Y. Ogawa, K. Oshinari, G. Kojitani, M. Hino, T. Watanabe, T. Sameshima, T. Mizuno	国立大学法 人東京農工 大学	Transparent and conductive layers used for reducing optical reflection loss for fabricating mechanically stacked multi-junction solar cells	Grand Renewable Energy	2018/6/21

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産業技術総合研究所	貼り合せで限界を超える	日経エレクトロニクス 2015年12月号, p. 56	2015/12
2	産業技術総合研究所	スマートスタック技術	ケミカルエンジニアリング 2016年5月号	2016/05
3	産業技術総合研究所	吸収波長域の異なるセルからなる多接合型太陽電池の「スマートスタック技術」による展開	月刊 Material Stage 9月号	2016/09
4	産業技術総合研究所	スマートスタック技術による異種材料高効率多接合太陽電池	応用物理, vol. 86, No. 7, pp. 552-557 (2017)	2017/07
5	産業技術総合研究所	スマートスタック技術による異種接合型多接合太陽電池の開発	(株)技術情報協会書籍: 異種材料の接着・接合技術とマルチマテリアル化	2017/10
6	産業技術総合研究所	スマートスタック技術による多接合型太陽電池の研究開発	次世代の太陽電池・太陽光発電ーその発電効率向上、用途と市場の可能性ー、技術情報協会, pp. 273-281.	2018/04
7	産業技術総合研究所	MBE of III-V Semiconductors for Solar Cells	Molecular Beam Epitaxy -Materials and Applications for Electronics and Optoelectronics- Wiley Vol. 3, No. 16, pp. 265~278	2019/04
1	大阪市大	「貼り合わせで限界を超える」	日経エレクトロニクス	2015年12月

【その他】

番号	年度	タイトル	名称	内容
1	2015	スマートスタックによる次世代多接合太陽電池の研究開発	第10回再生可能エネルギー世界展示会	パネル展示
2	2016	異種材料を自在に組み合わせた スマートスタック次世代多接合太陽電池	第11回再生可能エネルギー世界展示会	パネル展示
3	2016	次世代スマートスタック多接合太陽電池	Nano tech 2017 第16回 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議	パネル展示
1	2018	イノベーションジャパン 2018 大学展示 「未来の低炭素社会につながるエネルギー研究」		
2	2017	日本学術振興会 第131委員会講演「表面活性化による異種半導体接合技術とその応用」		

1	2016	JST 関西公立 3 大学新技術説明会「室温異種材料接合で作る革新的グリーンデバイス」		
2	2016	イノベーションジャパン「室温異種材料接合による革新的グリーンデバイスの開発」		
3	2015	大阪府立大学・大阪市立大学ニューテックフェア 2015「異なる半導体の貼り合わせで作る高効率太陽電池」		

B 低コスト化プロセス技術開発（産業技術総合研究所、東京農工大学、東京大学、タカノ（再）、シャープ株式会社、豊田工業大学、宮崎大学（再）、大陽日酸株式会社）

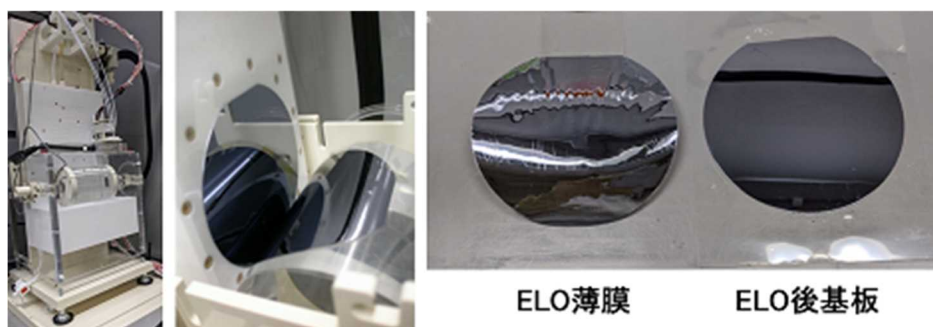
1. 成果詳細

Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1, a2. 低コスト実装プロセス：エピ層移載【東京大学、タカノ（再委託）】

・4インチウエハサイズの ELO 技術開発

ウエハスケールの ELO が達成されている手法として、浸漬法、ウェイト支援法、シリンダー支援法、表面張力支援法といった方式が報告されている。本開発では、自動制御化および大面積化の面で有利であるシリンダー支援法を基礎コンセプトとして採用し、タカノ株式会社（以下、タカノ(株)）と連携し装置開発を実施した。タカノ(株)が ELO 自動装置の製作を、東大は主に装置を用いた ELO 実験を担当した。

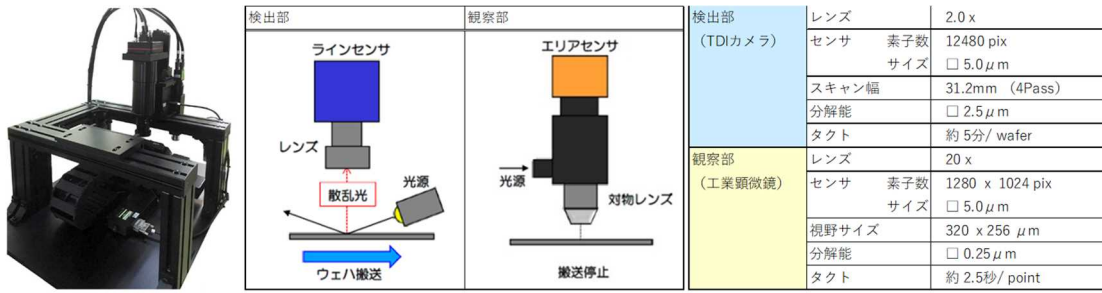
開発当初は小面積チップを用いた基礎実験により再現性良く ELO 薄膜を分離するための諸要素（薄膜支持材、リリース層構造、エッチャント濃度、曲げ半径等）の最適化を行い、シリンダー支援法のコンセプト検討を進めた。装置改良を重ね、プロジェクト終了時点では4インチウエハを用い20mm/hの速度での全面剥離を達成した。さらに各種条件の最適化を進め、2020年8月現在4インチウエハで50mm/hを達成した。（図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1-1）



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1-1 （左）開発した ELO 自動装置（6号機）、（中央）剥離中の様子（速度20mm/h）、（右）50mm/hで剥離した薄膜と基板の外観。

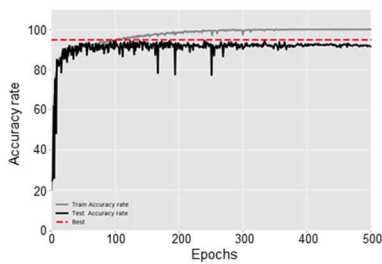
・基板表面の高速全面観察装置開発

Ⅲ-V化合物太陽電池に使用する GaAs ウエハの再利用を実現する上で再利用可否の判断を行う必要があるが、従来既存の装置では解析評価が十分行えないことから、本研究ではタカノ(株)と共同で ELO 後分離された GaAs ウエハの表面観察技術開発、さらに評価用装置の製作にも取り組んだ。本技術開発ではウエハの再利用を目的とし、非接触に、短時間で表面の異物を検出するためのシステムを構築した。開発した装置の検出部の概要を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1-2に示す。具体的には、初めにウエハ表面に発生した異常点を全面にわたって高速に検出する検出部、そして、検出した異常点の位置情報を基に、個別の顕微鏡画像を取得する観察部の2つの光学系を備えた構成とした。



図III-2-(ロ)-B-1-a1-2 評価用装置の光学系の概要

全面観察によって検出された異常点の情報（形状・種類、分布、等）をELO工程にフィードバックするために、製造工程に起因する異常点の種類（クラス）を策定し、機械学習による自動分類判定の実現性について評価を実施した。形状・サイズ・凹凸（高さ）の特徴を基に、「1.ピンホール」、「2.クラック」、「3.膜残り」、「4.付着異物」の4種類に、自動判定を収束させるための「5.不明」分類を加えた計5種類のクラスを定義した。分類にはコンボリューションニューラルネットワーク（CNN）を用い、観察部で取得できる顕微鏡画像に対して判定を行う事とした。その上でELO後GaAsウエハ21枚の異常点検出、及び9063枚の顕微鏡画像の収集を行った。内訳は1.ピンホール⇒2632枚、2.クラック⇒1222枚、3.膜残り⇒1662枚、4.付着異物⇒1710枚、5.不明⇒1837枚である。ここで、学習の際の不均一をなくす目的で学習用のデータ数を各クラス1000枚に統一し、ランダムにピックアップしたうえで学習モデルの構築を行った。また、残りの画像から各クラス100枚ピックアップした上で、正答率の評価を実施した結果、93~95%の高い正答率が得られる事を確認した。図III-2-(ロ)-B-1-a1-3に学習の推移と分類ごとの正答率を示す。誤判定に着目すると、ピンホールとクラックの間で多くの誤判定が生じていた。ピンホールとクラックは共にウエハ表面に対して凹んだ状態となっており、人の判断でも線引きが難しいものが存在する。また、サイズが小さい場合についても誤判定しやすく、不明に判定されるケースもあり、正答率を100%に近づけるための阻害要因となっている。



	判定					正解数	
	1.ピンホール	2.クラック	3.膜残り	4.付着異物	5.不明		
正解	1.ピンホール	97	2	0	0	1	97 / 100
	2.クラック	6	92	2	0	0	92 / 100
	3.膜残り	0	0	96	1	3	96 / 100
	4.付着異物	4	0	1	91	4	91 / 100
						376 / 400	

図III-2-(ロ)-B-1-a1-3 (a)学習の推移 (b)正答率評価用画像に対する分類の評価結果（正解率 94.0%）の一例

本開発テーマで検討したELO方式で処理したウエハによる評価を重ねたところ、「3.膜残り」がウエハ周辺で生じ易く、総検出数に対して大きな割合を占める事が判明した。この膜残りについてはフォトルミネンス（PL）情報を用いることで他のクラスの異常点とは明確に異なる特徴を画像化により区別できる事を突き止めた。そこで第一段階の検出部に使用する光源と撮像側のフィルタ条件、および散乱光

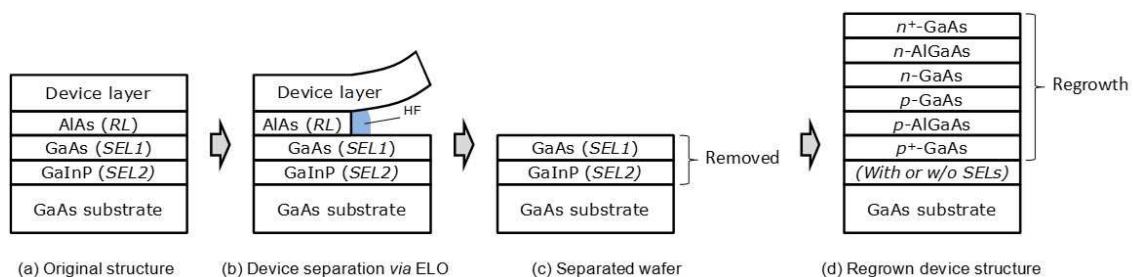
(異常点検出目的)とPL(膜残り特定目的)の強度バランスの最適化を図ることで、第一段階での「3.膜残り」の判定を可能とした。その上でCNNを用いた機械学習による膜残り特定を検討した所、誤判定率0.5%以下という非常に高い判定精度を実現できた。ここでは、画像から明らかに膜残りとして判断できる物を特定する形とし、判断が難しい膜残りとその他の異常点を一つのクラスにまとめる事で誤判定の抑制を図っている。これにより大きな割合を占める膜残りを第一段階の検出部で特定し、それ以外(一部の膜残り含む)の異常点を第二段階の観察部で分類するという枠組みが完成した。

ELO後GaAsウエハサンプルを使用した分類評価を実施した結果、全体的な判定の正答率として98.5%(総数883個)を達成した。付帯効果として個別に取得する顕微鏡画像数と観察時間を大きく軽減でき、最終目標であった「1時間以内の全面観察技術開発」ともに、マッピング描画によるウエハ再利用のためのアウトプットの実現に至った。

・表面清浄化技術開発

ELO法では、試料構造中に予め挿入されたリリース層(AlAs等)の横方向選択性エッチングを行うことにより、半導体基板からデバイス層を分離することができる。その際ウエハが化学溶液に長時間晒されることになるため、通常剥離後の基板表面には化学反応による副生成物が残留してしまう。再成長を行うためにはこの残留物を除去し、清浄かつ平坦な基板表面に再生することが必要である。一般的に広く使われている化学機械研磨(CMP)処理の場合、清浄な再成長基板表面を得るために基板を数十ミクロン程度研磨する必要があり、その結果、基板の再利用全回数は5回程度に制限されるだけでなく、基板の厚みが減少することで高温での太陽電池薄膜の製膜時に基板の反り具合が変化することなどが影響し、その都度成膜条件の調整が必要とされる。本開発項目では、10回以上の再成長に向けて、従来型のCMPで生じるような削り代(厚さ損)を可能な限り抑えるため、化学エッチングをベースとした再生手法を検討した。

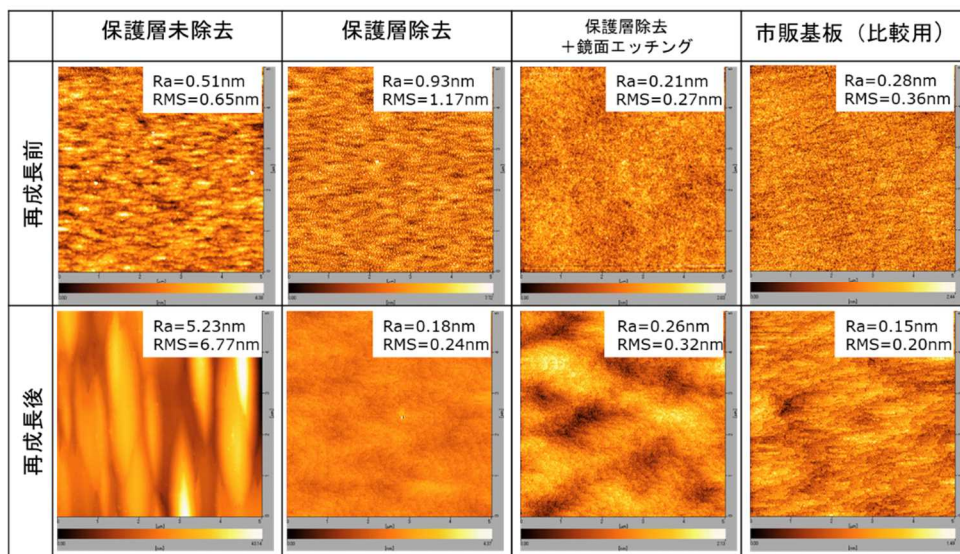
図III-2-(ロ)-B-1-a1-4に示すように、ELO後の基板表面を保護する目的で、リリース層(RL)とGaAs基板の間に選択エッチング層(SEL1, SEL2)を挿入した構造を採用した。ELO工程を経て、SEL1表面には残渣(副生成物)が堆積するが、再成長前にSEL1およびSEL2の層を選択エッチングにより除去することにより清浄なGaAs基板表面を露出させることができる。ELO後の基板表面に対しXPSおよびGD-PES分析を行ったところ、F元素が検出され、HF溶液に関連した副生成物が付着していたと考えられる。しかし、保護層(SEL1, SEL2)除去後にはF元素が観測されなくなったことから、ELO工程に起因した残渣の低減・除去に効果があることが示唆された。



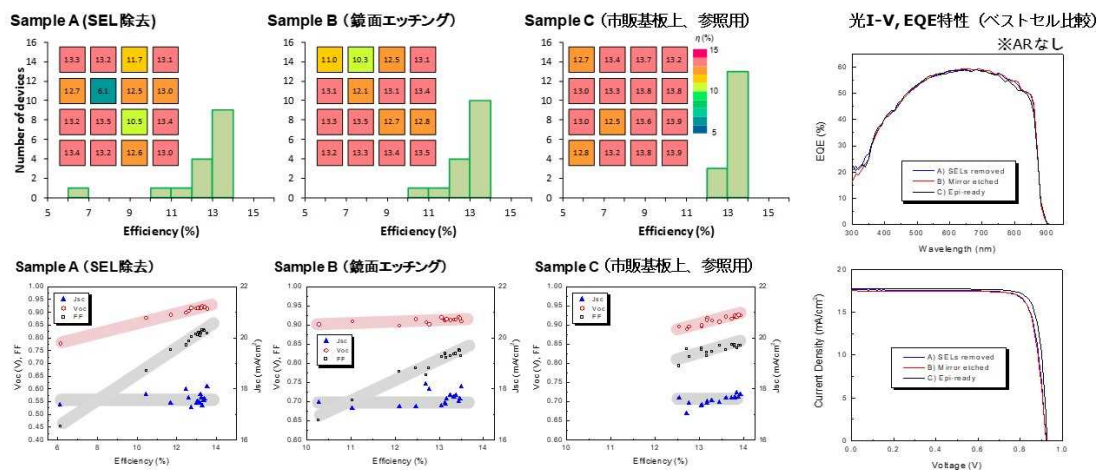
図III-2-(ロ)-B-1-a1-4 本研究項目における基板再利用に向けた清浄化手法および再成長の概要

上記結果を基に ELO 後の基板上への GaAs 単結晶薄膜層の再成長を行い AFM による表面モフォロジー

の観察 (図III-2-(ロ)-B-1-a1-5)、および再成長 GaAs セル (一回再利用) の特性と変換効率分布 (図III-2-(ロ)-B-1-a1-6) を調べた。ELO 後試料の表面状態は ELO の進行状況の揺らぎによって差異が生じやすく、保護層未除去試料のように比較的平坦な場合であっても製膜時に異常成長を来すケースが見られた。保護層除去後では、微小粒子 (XPS 分析から As や Ga 酸化物が示唆) の堆積は観られたものの、再成長時に行う一般的な熱クリーニング工程により除去され平坦な再成長表面を得ることが可能であり、再生長後においても平坦な表面を得ることができた。しかし、再成長デバイスの性能分布 (図III-2-(ロ)-B-1-a1-6 の Sample A) においては特性の低いものが存在していることから、保護層除去後に硫酸系の鏡面エッチング工程を取り入れた。これにより、基板の削り代を数ミクロン/回程度に抑えつつ、市販基板と同等の表面平坦性を得ることができた。複数回再利用に向けて工程の最適化の余地はあるが、デバイス性能 (図III-2-(ロ)-B-1-a1-6 の Sample B) の劣化の抑制、効率の歩留まりを改善させる見通しを立てた。(市販基板上の場合に対して歩留まり~81%)



図III-2-(ロ)-B-1-a1-5 ELO 後基板上への再生長前後における表面 AFM 観察



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a1-6 ELO 後基板上へ再成長した各 GaAs セル (16 個) の特性分布と、
ベストセル間の特性比較

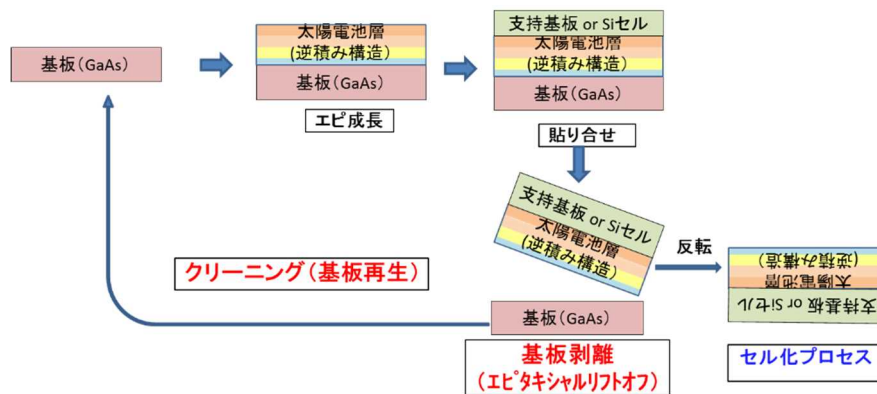
Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a3. 低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用【シャープ㈱】

本研究において、高効率化合物太陽電池の低コスト化プロセス技術として、基板再利用技術のエピタキシャルリフトオフ法（以下 ELO 法）について検討を行った。高効率化合物太陽電池は、主に GaAs や Ge 基板の上に形成されるが、GaAs や Ge ウエハは非常に高価であるため、低コスト化の阻害要因になっている。基板再利用技術を確立することで、太陽電池層と基板を分離することができ、基板は太陽電池層製膜のための下地基板として再利用できるので、化合物太陽電池の低コスト化が図れる。

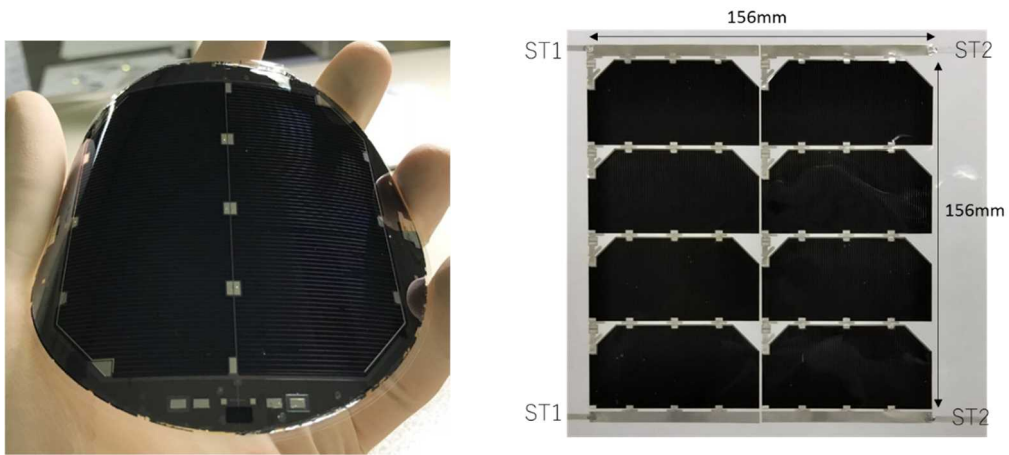
基板再利用を実現するためには、3つの要素技術の確立が必要である。1つ目は ELO プロセス（剥離技術）、2つ目は、基板再生技術、3つ目は、剥離した太陽電池層のセル化技術である。エピ層剥離技術では、独自の剥離方法を開発し、剥離速度 15mm/h で、割れなしで安定的に剥離する技術を開発した。また、量産装置の検討においてはフットプリントの縮小、多枚同時処理をコンセプトに検討を行い、実現可能性を得た。基板再生技術では、エピタキシャル成長、ELO、基板再生を繰り返し実施しても、基板の表面粗さやモフォロジーが維持できる独自の再生方法を開発した。この構造を適用することで、基板利用回数 10 回で IV 特性の保存率 95%以上、歩留り 80%以上が得られた。セル化技術では、太陽電池層のセル化を行い、正常 IV 特性を得ることができた。

コスト試算では、10MW～生産時、基板利用回数 20 回を想定した時の基板再生コストが、市販基板の約 10 分の 1 となる結果が得られた。

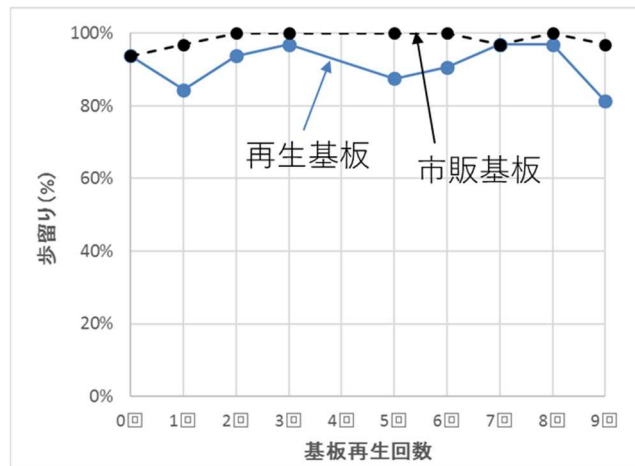
これらの結果から、目標として設定していた「基板再利用回数 10 回」と「基板コスト 6 分の 1」を、概ね達成する結果が得られた。



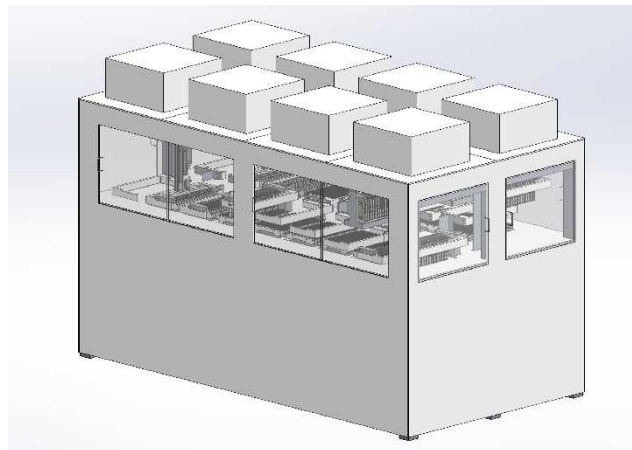
図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-a3-1 基板再利用技術の概要



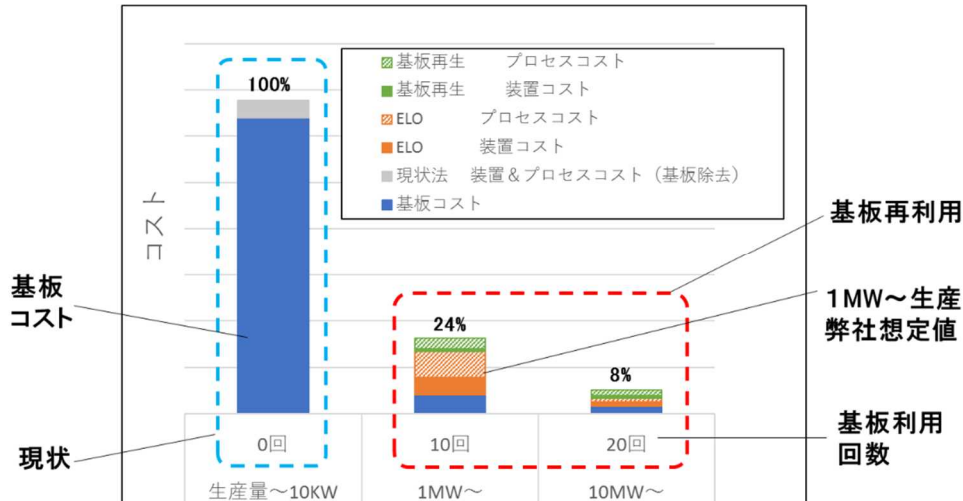
図III-2-(口)-B-1-a3-2 基板再生技術で作製したセルおよびモジュール



図III-2-(口)-B-1-a3-3 基板再生回数とセル歩留りの相関



図III-2-(口)-B-1-a3-4 ELO 量産機概略 (イメージ)



図III-2-(ロ)-B-1-a3-5 現状法および基板再利用時のコスト試算

III-2-(ロ)-B-1-a4. 低コスト実装プロセス：エピ層移載【豊田工業大学】

本研究は、GaAs、またはSi基板上に二次元層状化合物バッファ層を挿入してIII-Vセルをエピ成長し、層状化合物の劈開性を利用してIII-Vセル層を基板から高速リフトオフし、安価な支持基板上に移載することを目指して研究開発を行った。本手法はHF等の化学エッチング不要で、高速なリフトオフが可能であり、基板は繰り返し再利用できるため、従来のリフトオフ法と比較して大幅な低コスト化が期待できる。ここで用いる二次元層状化合物は、Si上でエピタキシャル成長が可能であり、さらに成膜した二次元層状化合物上でGaAsを高品質でエピタキシャル成長できることが必要である。

そこで本研究では、GaAsと類似の結晶構造を有するIII-VI族化合物の In_2Se_3 、およびGaSeを二次元層状化合物バッファ層として用いた。MBE法による成膜条件の最適化により、Si(111)基板上でGaSe/ In_2Se_3 ダブルバッファ構造のエピタキシャル成長を可能とした。GaSeはGaAsの成膜温度で安定な熱耐性を有する層状化合物として必要であり、 In_2Se_3 はSi基板上でGaSeをステップフロー成長させるために必要であった。GaSe上のGaAsエピタキシャル成長では、50nm厚GaSe上でほぼ双晶がないGaAs膜のエピ成長を達成し(1%以下)、剥離に必要な200nm厚GaSe上GaAs膜で双晶割合12%を得た。双晶割合1%以下のGaAs膜にて、PL寿命として約128psを得た。図III-2-(ロ)-B-1-a4-1に、GaSe上のGaAsエピ膜の断面TEM像を示す。GaAs層には転位が見られ、転位密度低減が課題である。

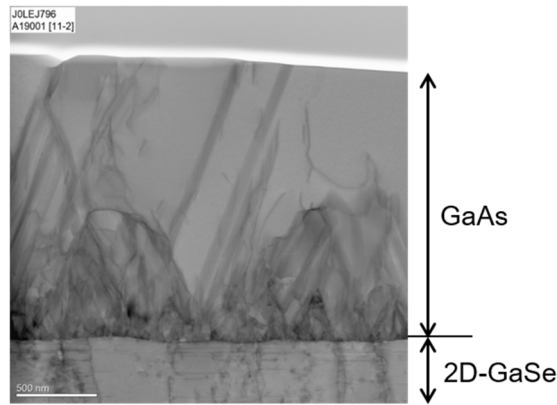


図 III-2-(ロ)-B-1-a4-1 2D-GaSe/ In₂Se₃/Si (111) 上 GaAs の断面 TEM 像

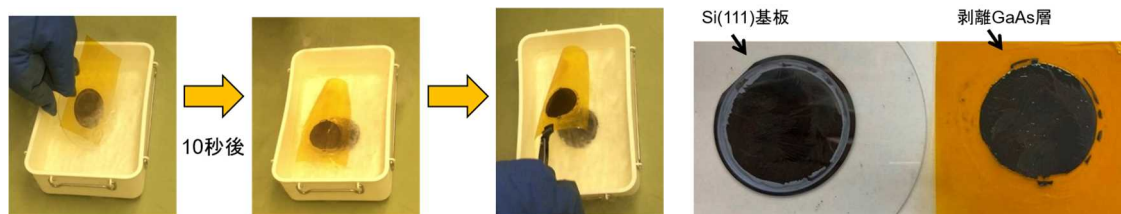


図 III-2-(ロ)-B-1-a4-2 液体窒素浸漬による GaAs エピ膜のポリイミドフィルムへの移載 (左) と、移載後の GaAs 膜と Si 基板 (右)

成膜した GaAs エピ層の剥離は、均一な応力をエピタキシャル層と基板の間に印加するため、試料の膜面を支持基板（アクリル板やポリイミドフィルム）に貼り付けた状態で、液体窒素に浸漬して、均一な熱応力を試料に印加した。その結果、GaSe/In₂Se₃ダブルバッファ構造を用いた試料において、液体窒素に浸漬後約 10 秒程度で、2 インチ、3 インチサイズの Si 基板から GaAs エピ層を剥離することに成功した（図 III-2-(ロ)-B-1-a4-2）。（最終目標：3 インチウエハサイズの高速リフトオフ、達成）

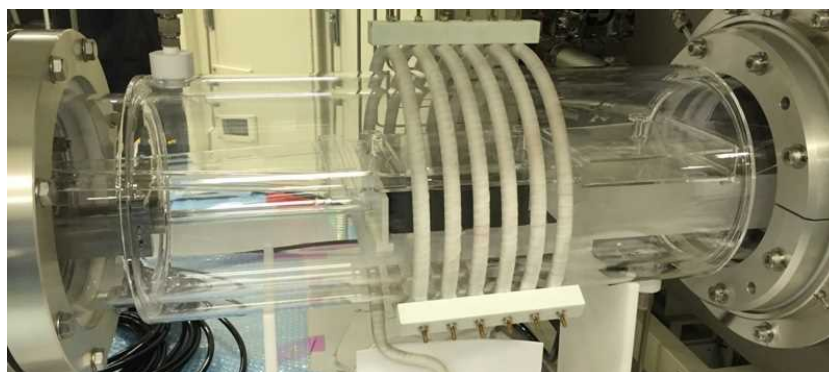
二次元層状化合物の劈開性を利用した III-V エピ層の高速リフトオフ技術は、本プロジェクトの独自技術であり、①安価な Si 基板が利用できる、②従来法と比べて剥離時間を大幅に短縮できる、といったメリットにより、III-V セルの低コスト化に大きく貢献できる可能性がある。

一方、本研究期間内においては、上記の層状化合物バッファ上 GaAs エピ膜の品質向上の研究開発に注力したことから、GaAs セルの試作には至らなかった。（最終目標：10 回以上の再利用基板上への III-V 化合物セル作製、未達）

III-2-(ロ)-B-1-b1. 低コスト III-V 化合物半導体制膜技術：MOCVD 【大陽日酸㈱】

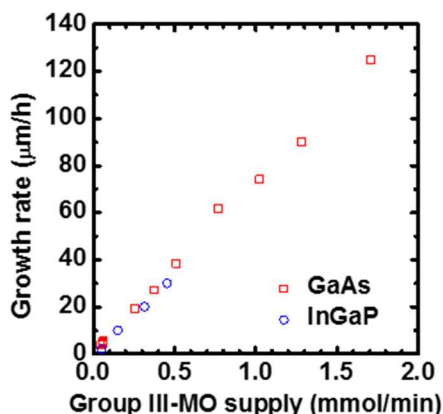
GaAs、InGaP の高速成長に適した MOCVD 装置を開発した。対応基板サイズ 2 インチまたは 3 インチ径基板 1 枚を処理できる装置として設計を行った。基板はサセプタに載置され、薄膜特性の均一化を目的としてサセプタの自転機能を設けている。石英反応管の中に収められた基板を載置したサセプタを高周波誘導加熱により加熱する装置である。石英反応管の中には、石英製のフローチャンネルを設け、原料ガスをサセプタまで供給するとともに、排気を誘導する役割を持たせている。特に、本装置においては、

原料利用効率の向上を目的としてフローチャンネル構造を従来とは異なる設計としており、さらに、フローチャンネルの交換を容易にできるようにすることで開発を効率的に進めることが出来るよう新規設計要素を盛り込んでいる。開発装置の反応炉および加熱コイルを図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1 に示す。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1 開発した MOCVD 装置の反応炉および加熱コイル

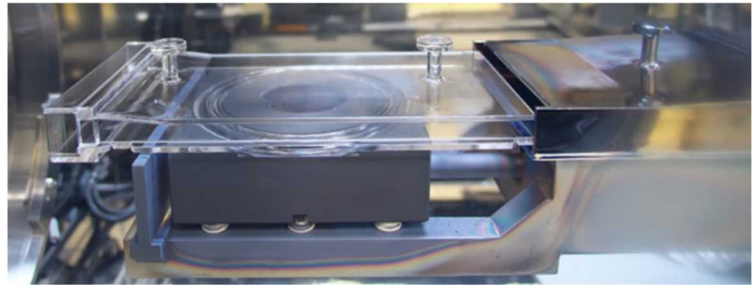
成膜速度の高速化を目的として、ガス導入部であるフローチャンネル構造および、基板保持用のサセプタ形状の設計変更を行った後の、成長結果を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2 に示す。GaAs に関しては、 $120\ \mu\text{m/h}$ に到達することができた。同様に、InGaP についても、 $30\ \mu\text{m/h}$ を得ることができた。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2 開発した MOCVD 装置による GaAs、InGaP の成長速度

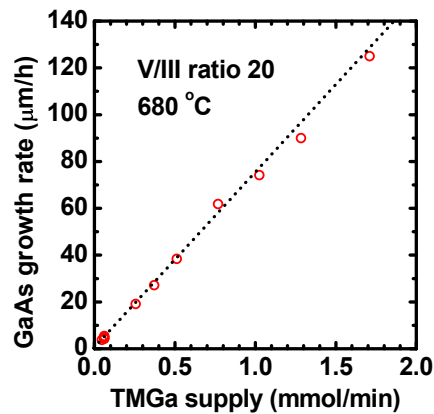
Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2. 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：MOCVD【東京大学】

大陽日酸と協力して、高速成長に対応した2インチ1枚用の横型MOCVD装置を開発し、産総研に設置した(図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2-1)。本装置は、大陽日酸が開発してきた高速かつ原料利用効率の高い窒化物半導体用のMOCVD装置をベースに、GaAsおよびInP用のMOCVD装置の主にフローライナーを改良したものである。従来の設計に比べて、フローライナーが数分の1まで薄くなっている。これにより、基板に垂直な方向の原料の物質移動境界層(発達した層流のもとではライナーの厚さのおよそ1/3になることが理論的に示される)を薄くして、従来と同じ原料分圧のもとでもウエハ表面に到達する原料(あるいは製膜前駆体)のフラックスを増大することを狙っている。

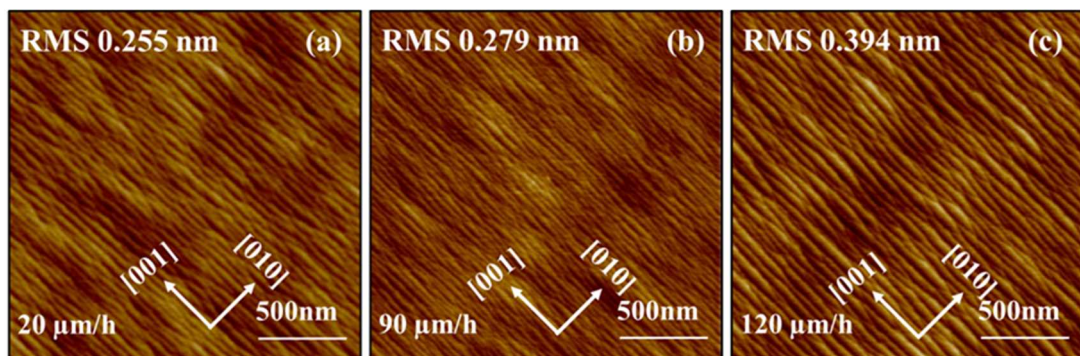


図III-2-(ロ)-B-1-b2-1 高速成長用MOCVD装置の外観と、新設計のフローライナー

本装置を用いて、まず GaAs の高速成長を試みた。図III-2-(ロ)-B-1-b2-2 に示すように、原料である TMGa および AsH₃ の比を V/III =20 に保ったままリアクタへの供給量を増やすにつれて、比例して GaAs の成長速度は増大し、120 μm/h 以上にまで達した。このような高速成長であっても、表面凹凸は低く抑えられている。ただし、原子層ステップではなく、ステップバンチングが起こっている。ここで用いた基板は、〈110〉方向に2度オフした(001)基板である。オフ角のない just 基板を用いると、高速成長のもとでは表面モフォロジーが悪化する傾向がみられた。また、成長温度 680°C は AsH₃ を用いた GaAs の典型的な成長温度よりも数十度高い。このように、微傾斜基板の利用と高めの成長温度は、高速成長下でも平坦かつ規則的な表面モフォロジーを得るために重要である。



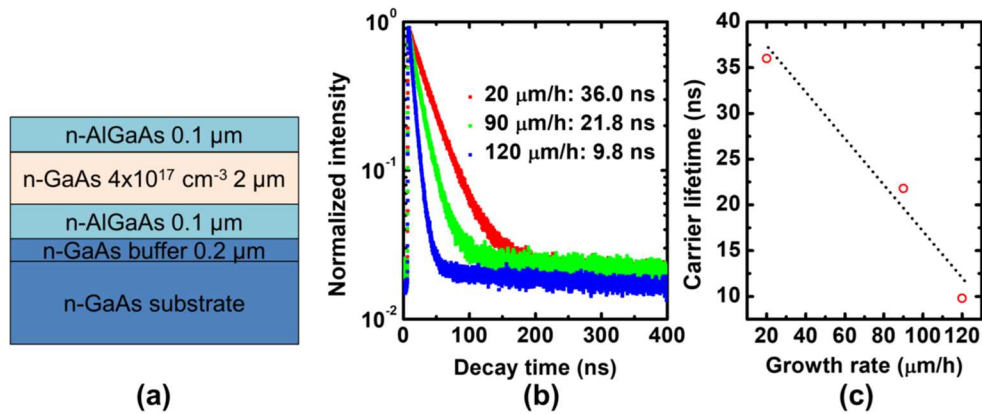
図III-2-(ロ)-B-1-b2-2 GaAs 原料供給量と成長速度の相関



図III-2-(ロ)-B-1-b2-3 20, 90, 120 μm/h の速度で成長した GaAs の AFM 表面モフォロジー像

次に、高速成長が結晶品位に与える影響を、フォトルミネッセンス寿命により調査した。図III-2-(ロ)-B-1-b2-4 (a) に示すダブルヘテロ構造の n-GaAs コアのみを異なる成長速度で形成した。成長速度によ

りバックグラウンドの p 型ドーピング濃度が異なるので、Si ドーピング条件を成長速度ごとに調整して $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の n 型ドーピング濃度を實現している。(b)および(c)に示すように、成長速度が増大するとフォトルミネッセンス寿命は低下した。これは、高速成長によりアンチサイトなどの欠陥が増加し、非発光再結合寿命が低下したためであると考えられる。このような結晶品位の低下が太陽電池特性に与える影響を評価し、変換効率が維持される範囲での高速成長の可能性を追究すべきである。

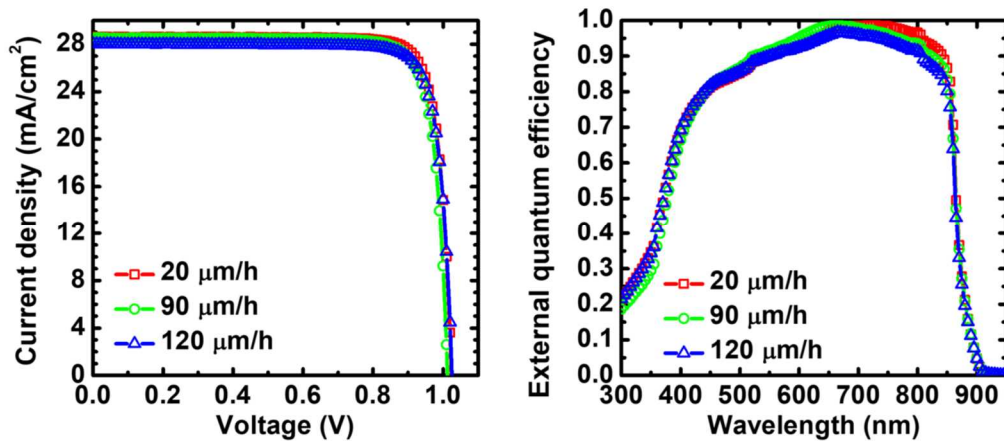


図III-2-(ロ)-B-1-b2-4 20, 90, 120 μm/h の速度で成長した GaAs のフォトルミネッセンス寿命。(a) に示したダブルヘテロ構造を試験に用いた。

そこで、20、90、120 μm/h の成長速度で形成した n-GaAs ベース層を有する p-on-n 型 GaAs 単セルを形成し、変換特性を評価した (図III-2-(ロ)-B-1-b2-5)。シンプルに比較するために、ベース層以外の成長条件はすべて同一にした。ベース層の成長速度を増やすと、変換効率は若干低下したが、その程度は非常に小さかった (表III-2-(ロ)-B-1-b2-1)。高成長速度による効率低下の原因としては、図III-2-(ロ)-B-1-b2-5 において長波長領域の量子効率が低下していることから示唆される、ベース層における少数キャリア拡散長の低下である。すなわち、フォトルミネッセンス寿命から示唆された高速成長によるキャリア寿命の低下が、ベース層の少数キャリア拡散長を劣化させたが、120 μm/h の成長速度まではその劣化は非常に小さいことが結論できた。

以上の知見をもとに高効率 GaAs 単セルを作製し、産総研において認証測定を行った。その結果、AM1.5 のもとで変換効率 24.48%を得た (図III-2-(ロ)-B-1-b2-6)。100 μm/h 以上の成長速度で作製した GaAs 太陽電池の変換効率としては、世界最高記録である。

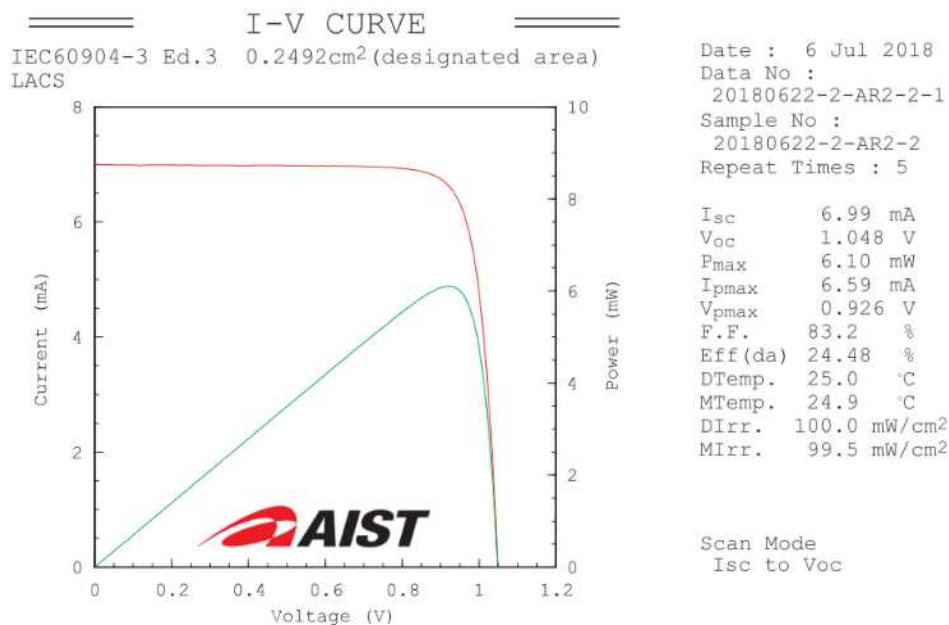
Layer	GR. (μm/h)	V/III	T _g (°C)	P _g (kPa)
p-GaAs contact $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 0.05 μm	5	20	600	6
p-InGaP window $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 0.025 μm	1.9	100	600	6
p-GaAs emitter $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 0.2 μm	20	20	680	6
n-GaAs base $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 2 μm	20/90/120	20	680	6
n-AlGaAs BSF $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 0.05 μm	5	40	680	6
n-GaAs substrate $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	5	20	680	6



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2-5 20, 90, 120 μm/h の速度で成長した GaAs をベース層に用いた p-on-n 型 GaAs 単セルの構造と特性

表Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2-1 20, 90, 120 μm/h の速度で成長した GaAs をベース層に用いた p-on-n 型 GaAs 単セルの特性

GR. (μm/h)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF	η (%)
20	28.38	1.023	0.84	24.51
90	28.37	1.013	0.84	24.05
120	27.59	1.023	0.84	23.77



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2-6 120 μm/h の速度で成長した p-on-n 型 GaAs 単セルの認証測定結果

一方、p-GaAs をベース層に用いる n-on-p セルに関しては、V_{oc} が 1V を超えず、少数キャリアである電子の拡散長が p-GaAs ベース (V_{oc}=1.05 V を達成している) に比べて短いことが問題となった。これは、

高速成長によって導入される結晶欠陥が、伝導帯側により多く分布していることを示唆している。一方で、Ge 基板をボトムセルに用いる 3 接合セルでは n-on-p 構造が必須となるため、この構造でも高速成長下で高効率を達成する戦略が必要である。そこで、図 III-2-(ロ)-B-1-b2-7 に示すリア接合、およびリアヘテロ接合構造により高効率化を図った。リア（ヘテロ）接合構造では、光吸収層が p-on-n 構造と同様に n 型になる。作製したセルの電流電圧特性（図 III-2-(ロ)-B-1-b2-8 (a)）を見ると、リア（ヘテロ）接合構造では、p-on-n 構造と同様に $V_{oc}=1.05$ V を達成してしている。(b)の暗電流を見ると、リア（ヘテロ）接合構造では従来構造に比べて非発光再結合電流が低減されており、これが $V_{oc}=1.05$ V を可能にするメカニズムであると考えられる。これらの結果より、光吸収層が n 型であることが高速成長下でも高 V_{oc} を達成するために必要であることがわかる。ただし、pn 接合界面の再結合を抑制してさらに高効率を可能にすると考えられているリアヘテロ構造に関しては、リア接合構造に対して V_{oc} の改善がない一方、(c)に示すように全波長域で量子効率の劣化を招いている。この原因は、リアヘテロ構造が光励起キャリアの回収を妨げているものと考えられ、pn 接合界面付近のドーピング濃度が設計通りになっていない可能性がある。この点は今後の改善が必要なものの、無反射コーティングなしで変換効率 16.6%が達成されており、無反射コーティングを形成すれば 21%以上の効率が見込まれる。このように、成長速度 $120 \mu\text{m/h}$ で形成した GaAs 太陽電池は、p-on-n、n-on-p いずれの構造でも効率 20%以上を達成できることが示された。

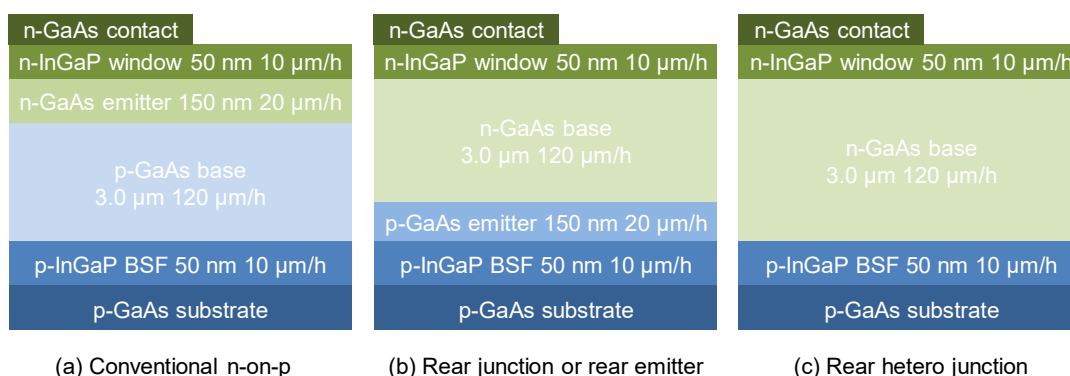
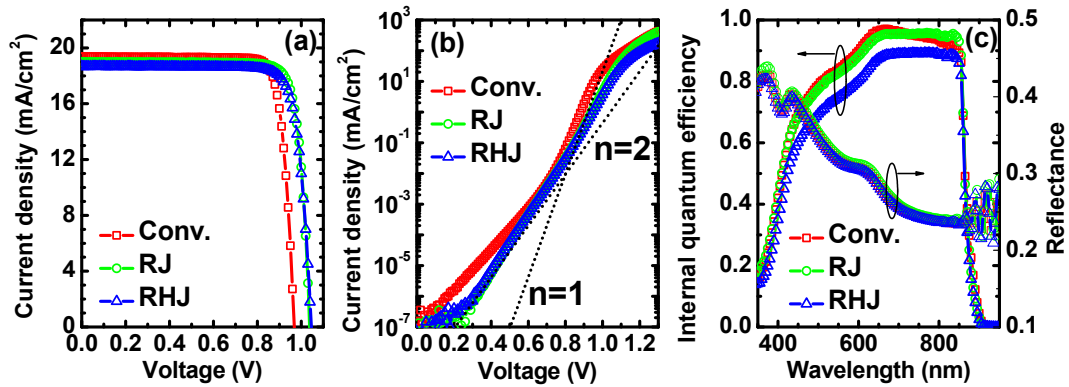


図 III-2-(ロ)-B-1-b2-7 $120 \mu\text{m/h}$ の速度で成長した n-on-p 型 GaAs 単セルの構造

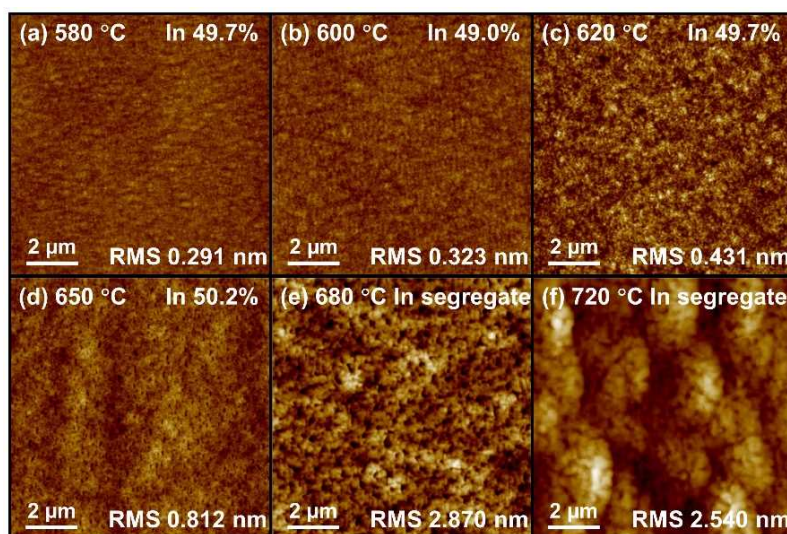
表 III-2-(ロ)-B-1-b2-2 $120 \mu\text{m/h}$ の速度で成長した n-on-p 型 GaAs 単セルの構造

Structure	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Conventional	0.97	19.38	0.84	15.81
RJ	1.04	19.00	0.84	16.64
RHJ	1.05	18.68	0.83	16.18

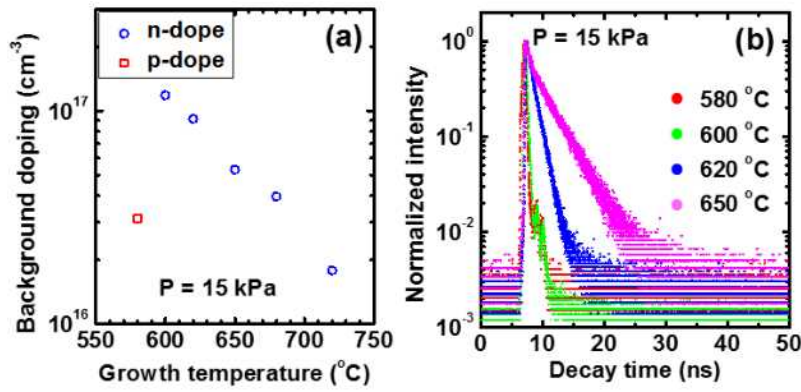


図III-2-(口)-B-1-b2-8 120 $\mu\text{m/h}$ の速度で成長した n-on-p 型 GaAs 単セルの諸特性

InGaP に関しては、これまで述べた GaAs 成長に用いた反応器そのままだと、気相の寄生反応などの影響により高速成長が難しかった。しかし、ガス導入口付近の装置形状を改良することで、30 $\mu\text{m/h}$ までの高速成長が可能になった。InGaP の表面モフォロジーには成長温度が大きく影響することが知られており、本 MOCVD 装置を用いた成長においても成長温度の効果を検討した。用いた基板は、 $\langle 110 \rangle$ 方向に 2 度オフした GaAs (001) 基板である。成長速度は 10 $\mu\text{m/h}$ とした。以下の InGaP 成長で、V/III 比はすべて 100 としている。その結果、成長温度の増加につれて表面が凹凸化することが明らかになった (図 III-2-(口)-B-1-b2-9)。一方、バックグラウンドドーピング濃度は成長温度が低いほど低減され、ダブルヘテロ構造を形成して評価したフォトルミネッセンス寿命も、成長温度が高い方が長いという結果を得た (図 III-2-(口)-B-1-b2-10)。ダブルヘテロ構造のコアである InGaP はノンドープであり、バックグラウンドドーピング濃度により発光再結合寿命は異なる。しかし、(a) で示されたキャリア濃度から計算される発光再結合寿命は、(b) で観察されたフォトルミネッセンス寿命よりもはるかに長い。すなわち、観察されたフォトルミネッセンス寿命は非発光再結合に支配されているといえる。これらの結果から、成長温度が高い方が結晶品位の高い InGaP が得られると結論できる。ただし、680~720°C での成長は表面モフォロジーが劣悪であったので、結晶品位の評価対象からは外した。

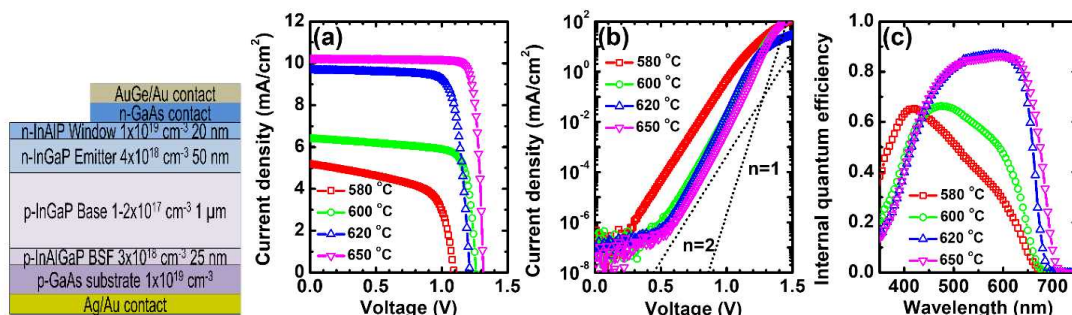


図III-2-(口)-B-1-b2-9 10 $\mu\text{m/h}$ で成長した 1 μm 厚 InGaP の表面 AFM 像

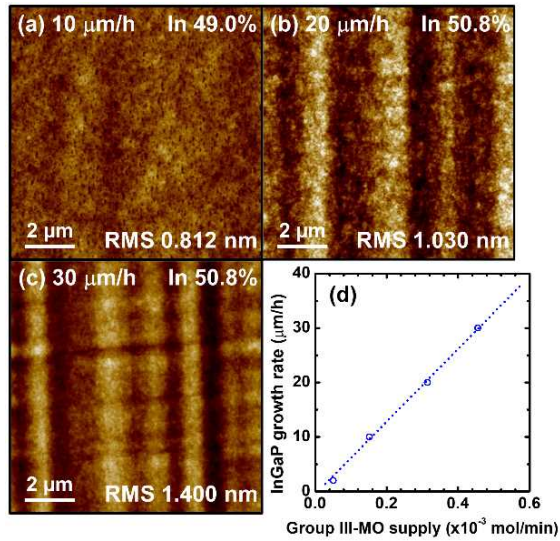


図III-2-(ロ)-B-1-b2-10 10 $\mu\text{m/h}$ で成長した 1 μm 厚 InGaP のバックグラウンドドーピング濃度とフォトルミネッセンス寿命

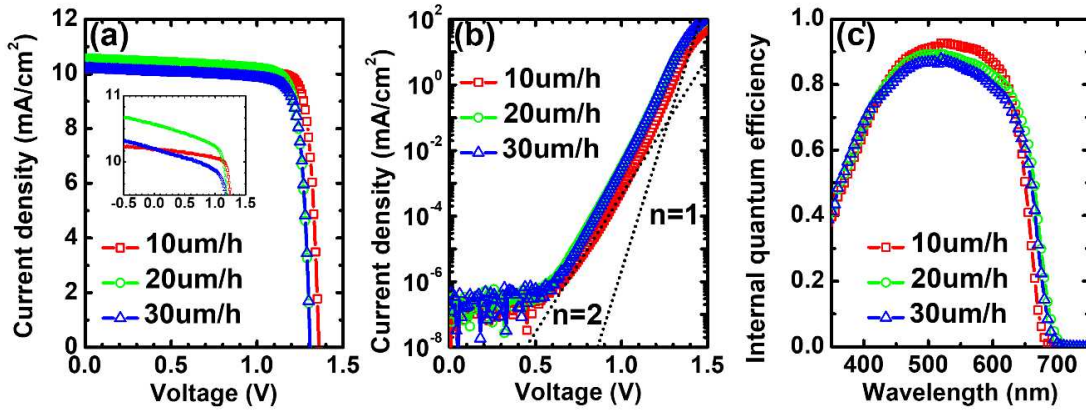
10 $\mu\text{m/h}$ でベース層を形成した InGaP 単セルを作製し、光電変換特性を評価した (図III-2-(ロ)-B-1-b2-11)。(a)の電流電圧特性においては、成長温度が低いほど V_{oc} も J_{sc} も低下した。 J_{sc} の低下は、(c)に示した量子効率の低下と整合している。成長温度が低い InGaP は、フォトルミネッセンス寿命からも明らかのように非発光再結合中心の密度が多く、これが V_{oc} の低下と少数キャリア拡散長の劣化を招いていると考えられる。結晶品位が最良となる 650°C を最適成長温度として、成長速度を 30 $\mu\text{m/h}$ まで増大させた。表面モフォロジーは成長速度につれて悪化するものの、セルの作製には十分な平坦性を得た (図III-2-(ロ)-B-1-b2-12)。これをもとに、10~30 $\mu\text{m/h}$ で成長した p 型ベース層を有する n-on-p InGaP 単セルを作製し、特性を評価した (図III-2-(ロ)-B-1-b2-13 および表III-2-(ロ)-B-1-b2-3)。30 $\mu\text{m/h}$ での高速成長による V_{oc} や変換効率の低下は非常に小さく、無反射コーティングを施したセルの変換効率 15.3% を得た。ここまでに得られた InGaP、GaAs 単セルの高速成長技術を用い、さらにトンネル接合形成のためのドーピング条件などを求め、30 $\mu\text{m/h}$ の InGaP 成長と 120 $\mu\text{m/h}$ の GaAs 成長を組み合わせた InGaP/GaAs 2 接合セルを作製することに成功した (図III-2-(ロ)-B-1-b2-14)。現在の変換効率は 22.3% であるが、今後 InGaP セルの構造と成長条件を改善して、25% 以上の効率を達成できる見込みである。



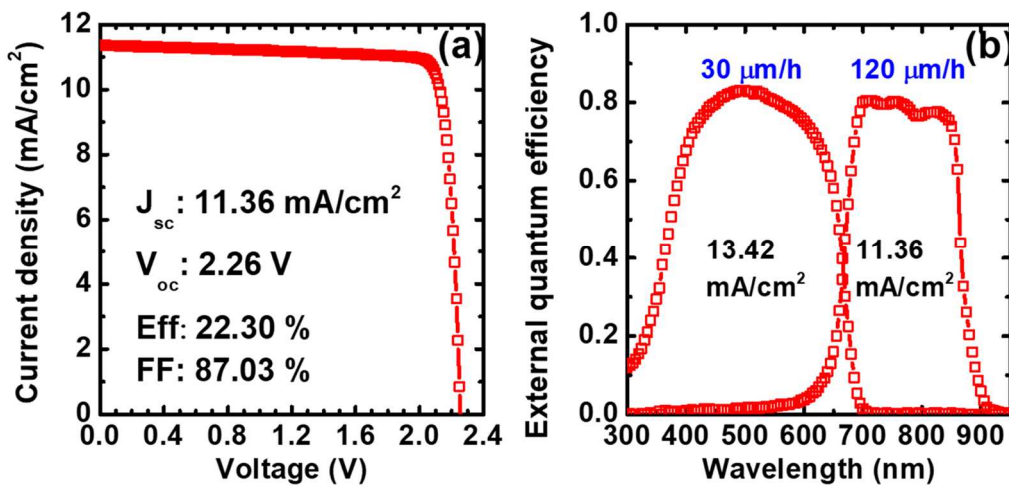
図III-2-(ロ)-B-1-b2-11 10 $\mu\text{m/h}$ で成長した 1 μm 厚ベース層を有する InGaP 単セルの特性



図III-2-(口)-B-1-b2-12 10~30 $\mu\text{m/h}$ で成長した InGaP の表面 AFM 像



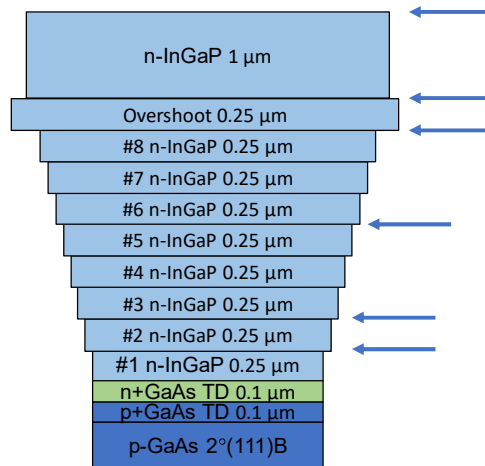
図III-2-(口)-B-1-b2-13 10~30 $\mu\text{m/h}$ で成長した p 型ベース層を有する n-on-p InGaP セル特性



図III-2-(口)-B-1-b2-14 MOCVD 高速成長による InGaP/GaAs₂ 接合セルの特性

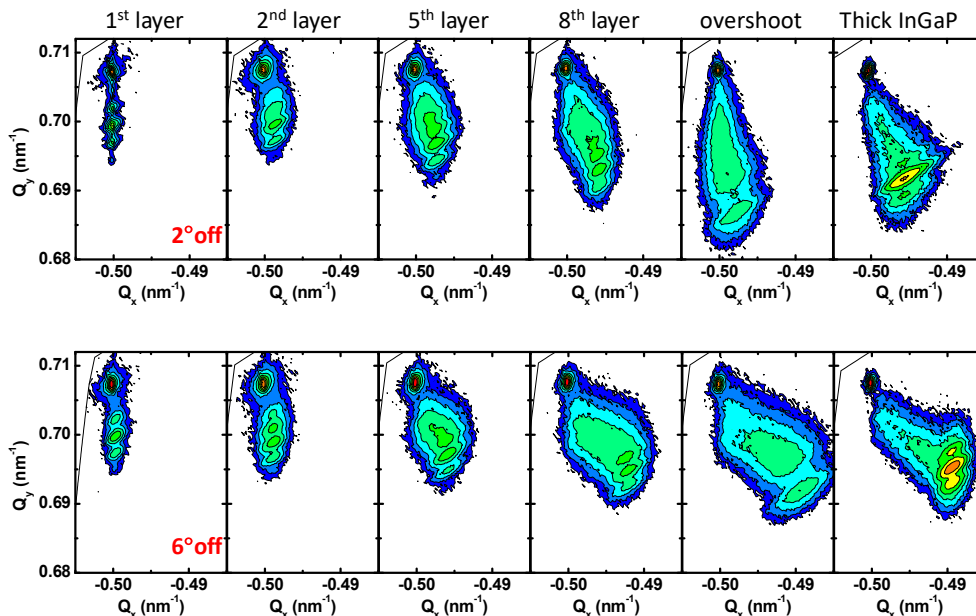
さらに、将来 IMM3 接合セルを高速 MOCVD で成長するための基礎検討として、GaAs ミドルセルと InGaAs ボトムセルの間に挿入されるメタモルフィックバッファを高速で成長することを試みた。図III-2-

(ロ)-B-1-b2-15 に示す層構造を、2 度および 6 度オフした GaAs (001) 基板の上に成長温度 580°C、成長速度 22~24 $\mu\text{m}/\text{h}$ で成長した。途中、矢印の位置で成長を止めたサンプルを用意し、X 線回折逆格子マッピングおよび表面 AFM 観察を行った。従来成長速度と同様に高速成長においても、格子不整合な InGaP 層は、不整合度が増えても最初の数層の間は GaAs 基板に擬格子整合し、3 層以上成長して初めて顕著な格子緩和が起こる傾向が見られた。興味深いのは基板のオフ角が大きい方が格子緩和しやすいことである。逆に、2 度オフの基板ではメタモルフィックバッファーに期待される格子緩和が十分に起きていない。結果として、最後に成長する InGaP 層の格子緩和度が基板のオフ角により異なった。成長速度がこの格子緩和度の違いにどのように影響するかは、今後の調査課題である。



- p-GaAs (001) 2° (111)B and 6° (111)B substrates
- Growth rate ~22-24 $\mu\text{m}/\text{h}$ at 580 °C, 15kPa
- Stop at several interface → (-2-24)RSM and AFM

図III-2-(ロ)-B-1-b2-15 MOCVD 高速成長により形成した InGaP メタモルフィックバッファー



図III-2-(ロ)-B-1-b2-16 前図矢印の位置で成長を止めたサンプルの X 線回折逆格子マッピング

III-2-(ロ)-B-1-b3. 低コストIII-V化合物半導体製膜技術：HVPE【大陽日酸株】

GaAs、InGaP 成長に適した HVPE 装置を開発した。対応基板サイズ 2 インチ径基板 1 枚を処理できる装置として設計を行った。基板はサセプタに載置され、薄膜特性の均一化を目的としてサセプタの自転機能を設けている。二種の異なる層を連続的に成長する手段として、同一の炉内に二式のガス導入ノズルを平行に構成する方法を採用した。

原料の基板への到達を促進する構造とするように反応炉内の原料部の構造およびノズル構造に関する設計を実施した。この結果を図 III-2-(ロ)-B-1-b3-1 に示す。GaAs に関しては、 $140 \mu\text{m/h}$ に到達することができた。同様に、InGaP についても、 $141 \mu\text{m/h}$ を得ることができた。

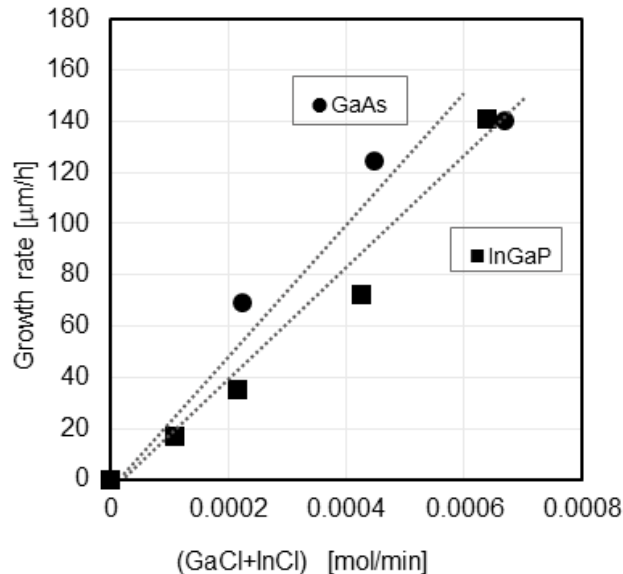
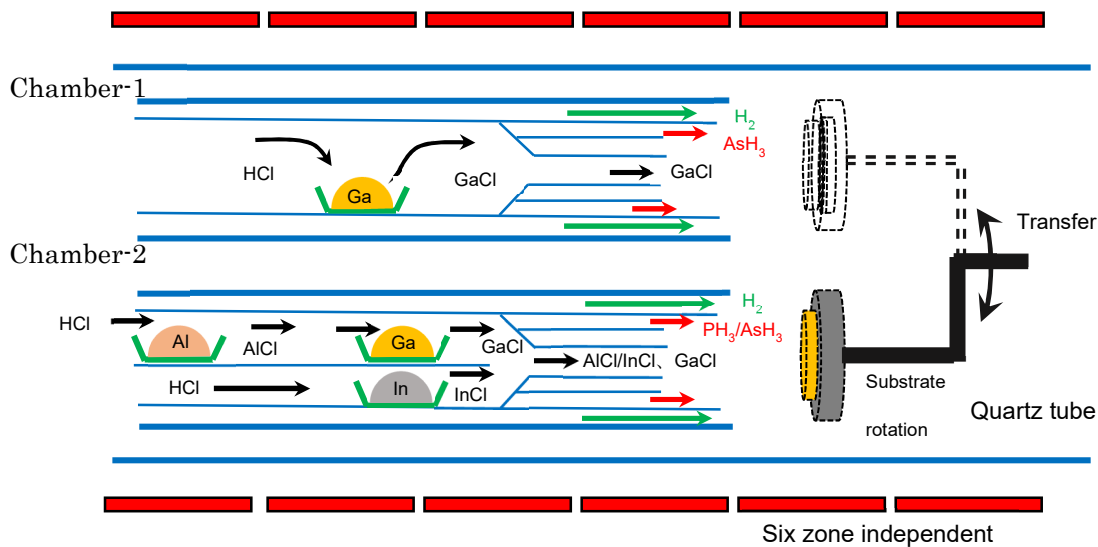


図 III-2-(ロ)-B-1-b3-1 開発した HVPE 装置による GaAs、InGaP の成長速度

HVPE 装置における、AlAs 成膜用の Al 原料部の追加を実施した。図 III-2-(ロ)-B-1-b3-2 に Al ボートを追加した HVPE の概略図を示す。Chamber-2 の中を 2 層式にし、下段を In 金属用ボートにしてある。上段には Ga 金属用ボートと Al 金属用ボートを設置した。塩化 Al は比較的低温で反応生成できるので Ga 用ボートの上流部に配置した。

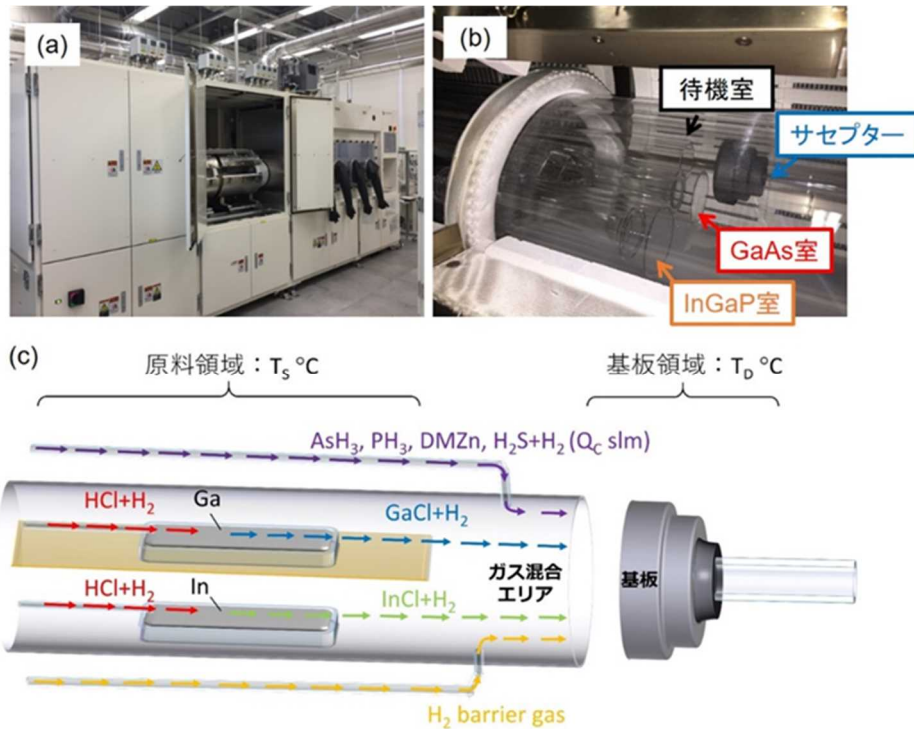


図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b3-2 Al原料を供給可能としたHVPE装置

Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4. 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE【産業技術総合研究所】

大陽日酸（株）、東京農工大と共同でⅢ-V族化合物セルを作製するためのHVPE試作機（大陽日酸（株）、H260型）を開発した（図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-1）。反応炉は、2インチウエハ1枚が導入できる水平置き縦型のホットウォール炉であり、原料領域と基板領域により構成された非真空（大気圧）かつシンプルな装置構成である。Ⅲ族原料ガスには塩化水素（HCl）、V族原料には水素化物のアルシン（AsH₃）、ホスフィン（PH₃）、ドーパント原料には硫化水素（H₂S）、ジメチル亜鉛（DMZn）が用いられ、原料はH₂キャリアによって輸送される。原料領域にはGa、Inが充填された石英ボートが設置されている。原料領域、および基板領域は、それぞれ約800℃、660℃に加熱されている。同図(c)の反応炉を例として成長原理を説明すると、①原料領域でのGa、InとHClガスの反応による金属塩化物（GaCl、InCl）の生成、②基板領域でのⅢ族塩化物とV族原料との反応、の2つの化学反応を経由してGaAsなどの結晶が成長する。InGaPなどの混晶系では、Ga、Inに導入するHCl流量に差をつけることによりⅢ族組成比を容易に制御できる

HVPE法は、炉内における複数の化学反応を経由した結晶成長であることから、原料ガスの制御のみで成長雰囲気を瞬時に切り替えることができない。我々は、この課題に対して3室マルチチャンバーの反応炉を開発した（同図(b)）。マルチチャンバー化することでガス種の異なる成膜室を予め用意することができる。その後、基板が適切なタイミングで成膜室間を移動することでヘテロ成長を行うことが可能となる。



図III-2-(ロ)-B-1-b4-1 開発したHVPE装置の(a)外観、および(b)反応炉内部の写真。(c)はInGaP室の概要図である。

HVPE 成長では、供給するV族原料の熱分解が成長速度に大きく影響する。GaAs 成長では、AsH₃の熱分解温度は約400℃とHVPE反応炉に対して十分に低い。従って、一般的な成長条件下では、AsH₃は基板到達前にAs₄に熱分解され、次の反応式に従ってGaAsが成長される。



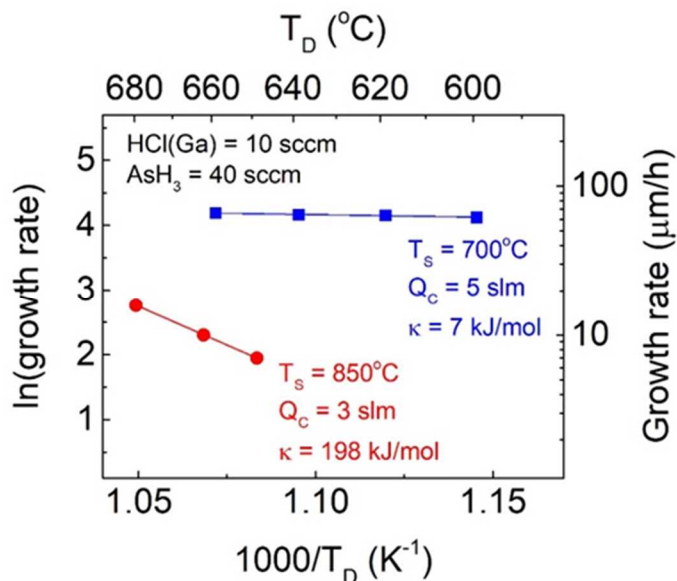
一方で、低圧HVPE法では平均自由行程が長くなることでV族原料の熱分解が抑制されることが報告されていた。その場合、次の反応式に従ってGaAsが成長される。



式(III-2-(ロ)-B-1)の反応障壁(κ)は200 kJ/molと大きく、表面反応律速により高速成長を得るのが困難である。一方で、式(III-2-(ロ)-B-2)のようにAsH₃を熱分解せずに供給することで反応障壁を10 kJ/molと大幅に低減できる。この反応過程は、原料供給律速で成長が進行できるために高速化に適している。しかし、本研究で開発したHVPE装置は大気圧下での成長であり、低圧HVPE法とは異なるアプローチでAsH₃の熱分解を抑制しなければならない。そこで、図III-2-(ロ)-B-1-b4-1(c)の原料領域温度(T_s)とガス流速を制御するためのH₂キャリア流量(Q_c)によってAsH₃の熱分解を制御した。

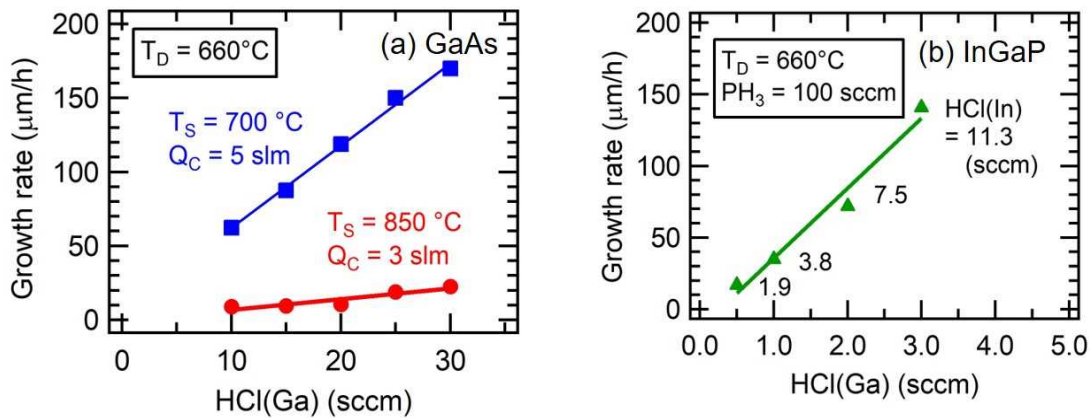
図III-2-(ロ)-B-1-b4-2は、異なる2つの条件下でのGaAs成長速度の基板領域温度(T_D)依存性のアレニウスプロットである。T_s = 850℃、Q_c = 3 slmの条件ではκ = 198 kJ/molであり、式(III-2-(ロ)-B-1)に従ったAsH₃原料がAs₄に熱分解された場合のGaAs成長と考えられる。一方で、T_s = 700℃、Q_c = 5 slmの条件ではκ = 7 kJ/molであり、式(III-2-(ロ)-B-2)に従ったAsH₃原料が直接寄与したGaAs成長

を実現した。この結果は、常圧 HVPE 法では AsH_3 原料の流路の温度、ガス流速の組み合わせによって AsH_3 の分解率が制御できることを示している。



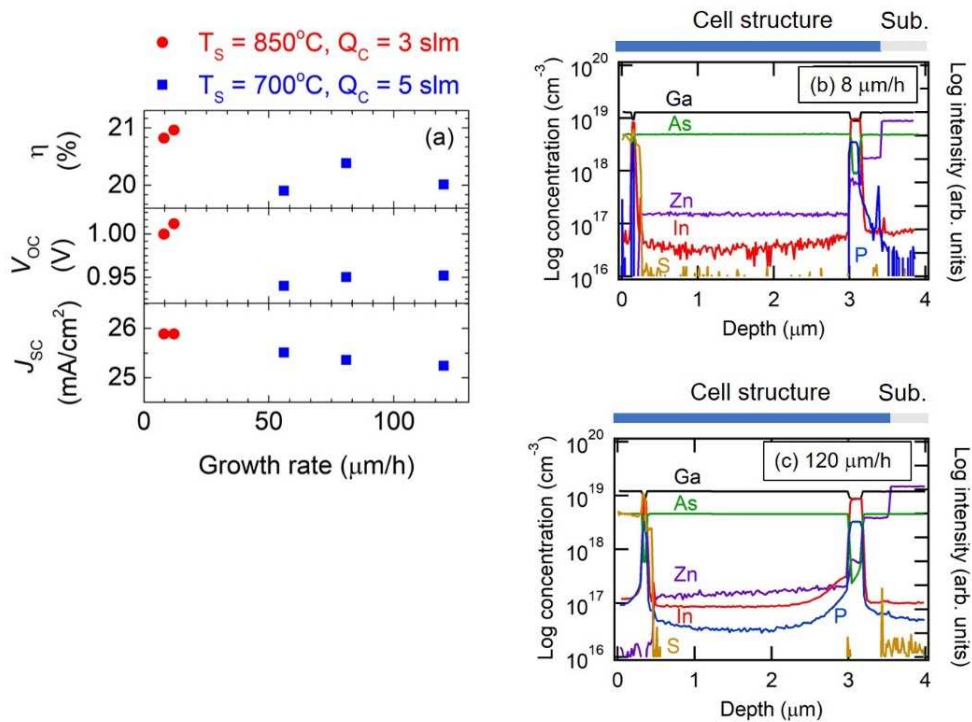
図III-2-(ロ)-B-1-b4-2 GaAs 成長速度の基板部温度 (T_D) 依存性のアレニウスプロット

図III-2-(ロ)-B-1-b4-3(a)は、上記の2つの異なる T_s 、 Q_c 条件下での GaAs 成長速度の Ga ボートに導入する HCl 流量 ($\text{HCl}(\text{Ga})$) 依存性である。 T_D は 660°C で固定した。 $T_s = 850^\circ\text{C}$ 、 $Q_c = 3 \text{ slm}$ の条件では、表面反応律速に起因して HCl (Ga) 流量に対する成長速度の増分は小さい。一方で $T_s = 700^\circ\text{C}$ 、 $Q_c = 5 \text{ slm}$ の条件では原料供給量に比例して成長速度が高速化し、 $170 \mu\text{m/h}$ までの高速化を実現した。本開発で得られた $170 \mu\text{m/h}$ の成長速度は、HCl (Ga) を制御するマスフローコントローラー (MFC) の最大流量下で得られた値であり、原理的な限界速度ではない。今後、更に装置改良を進めることにより更なる高速性が実現できると考えられる。同図(b)は InGaP の成長速度の HCl (Ga) 供給量依存性であり、同様に III 族原料の導入量を増やすことで $140 \mu\text{m/h}$ までの高速化が達成された。図中の数値は、各点での GaAs に格子整合する InGaP 結晶を得るために必要な In ボートに導入する HCl 流量 ($\text{HCl}(\text{In})$) である。InGaP 成長の V 族原料に用いる PH_3 の熱分解温度は約 700°C 以上と AsH_3 と比べて高いことから、InGaP における高速成長も未分解の PH_3 が起因していると考えられる。また、図III-2-(ロ)-B-1-b4-3 (a)、(b)の勾配から原料利用効率を見積もることができ、GaAs 成長、InGaP 成長ともに約 60%の高い原料利用効率であることが分かった。以上、開発した HVPE 装置により原料の供給条件を精密に制御することで、高い原料利用効率で従来技術の 10 倍以上の超高速成長を実現した。



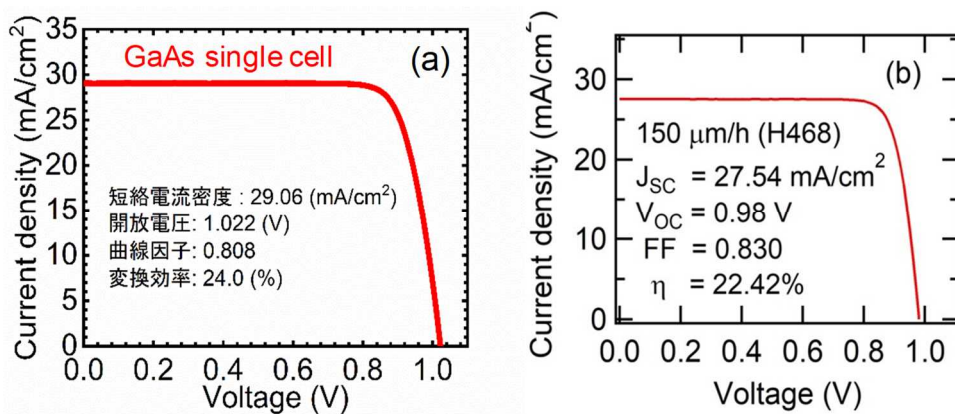
図III-2-(口)-B-1-b4-3 (a) GaAs 成長、(b) InGaP 成長における成長速度の HCl(Ga) 流量依存性

次に、成長速度が GaAs セル特性に与える影響を評価した。GaAs ベース層の成長速度は、図III-2-(口)-B-1-b4-3 (a)の条件を用いて $8\mu\text{m/h}$ から $120\mu\text{m/h}$ の間で変化させた。 $8, 12\mu\text{m/h}$ の成長速度は $T_S = 850^\circ\text{C}$ 、 $Q_C = 3 \text{ slm}$ の表面反応律速、 $56, 81, 120\mu\text{m/h}$ の成長速度は $T_S = 700^\circ\text{C}$ 、 $Q_C = 5 \text{ slm}$ の原料供給律速の成長条件を用いた。図III-2-(口)-B-1-b4-4(a)は GaAs セルのセル特性の成長速度依存性である。 $8\mu\text{m/h}$ で作製した GaAs セルでは 20.8%の変換効率が得られたが、 $120\mu\text{m/h}$ では 20.0%でありわずかに低下した。MOVPE により高速成長で作製された GaAs セルでは、成長速度を速めるに従って EL2 欠陥が単調に増大し、セル特性が低下する傾向が報告されている。しかし、本研究の HVPE 法を用いた高速 GaAs セルの変換効率、 J_{sc} 、 V_{oc} は成長速度の増大によって単調に低下する傾向ではなく、律速条件の違いに依存した傾向を示している。しかし、GaAs バルクの特性は、成長速度や成長律速条件により変化は生じなかった。両セルの特性が異なる要因を調べるために、 $8\mu\text{m/h}$ (反応律速条件下)、 $120\mu\text{m/h}$ (原料供給律速条件下) で作製した GaAs セルについて二次イオン質量分析法 (SIMS) を用いた元素分析を行った。ドーパント元素 (Zn、S) は定量分析、構成元素 (Ga、In、As、P) は定性分析を行った。図III-2-(口)-B-1-b4-4(b)の $8\mu\text{m/h}$ の GaAs セルでは、急峻なヘテロ界面、および GaAs ベース層において深さ方向に $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の濃度で均一に Zn ドーピングされていることが分かる。一方で、同図(c)の $120\mu\text{m/h}$ の GaAs セルでは、GaAs ベース層の Zn ドーピングが $1.3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ から $2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の間で傾斜していることが分かった。更に、GaAs ベース層と InGaP BSF 層の界面において In、P 元素が GaAs ベース層で検出された。これらから、 $120\mu\text{m/h}$ の GaAs セル作製ではヘテロ界面での原料ガスパーズが不十分であったと考えられる。図III-2-(口)-B-1-b4-4 で作製した全ての GaAs セルでは、 PH_3 供給で 6 秒間の成長中断を適用していた。本成長中断が $8\mu\text{m/h}$ の GaAs セルで有効であることは SIMS 測定から明らかであるが、 $120\mu\text{m/h}$ の GaAs セルの結果からは、6 秒の中断時間ではウエハ表面に原料ガスが微量に残存していることが示唆される。特に、原料供給律速条件を用いた高速 GaAs 成長では反応速度が速いため、残留した原料ガスが効率よく取り込まれたと考えられる。以上より、高速 GaAs セルの成長では更に十分なパーズ時間を設けるシーケンスの改良が必要であることが分かった。



図III-2-(ロ)-B-1-b4-4 (a)GaAsセルのセル特性 (AM1.5G、1sun) の成長速度依存性、(b) 8μm/h、(c) 120μm/h で作製した GaAs セルの SIMS 分析結果

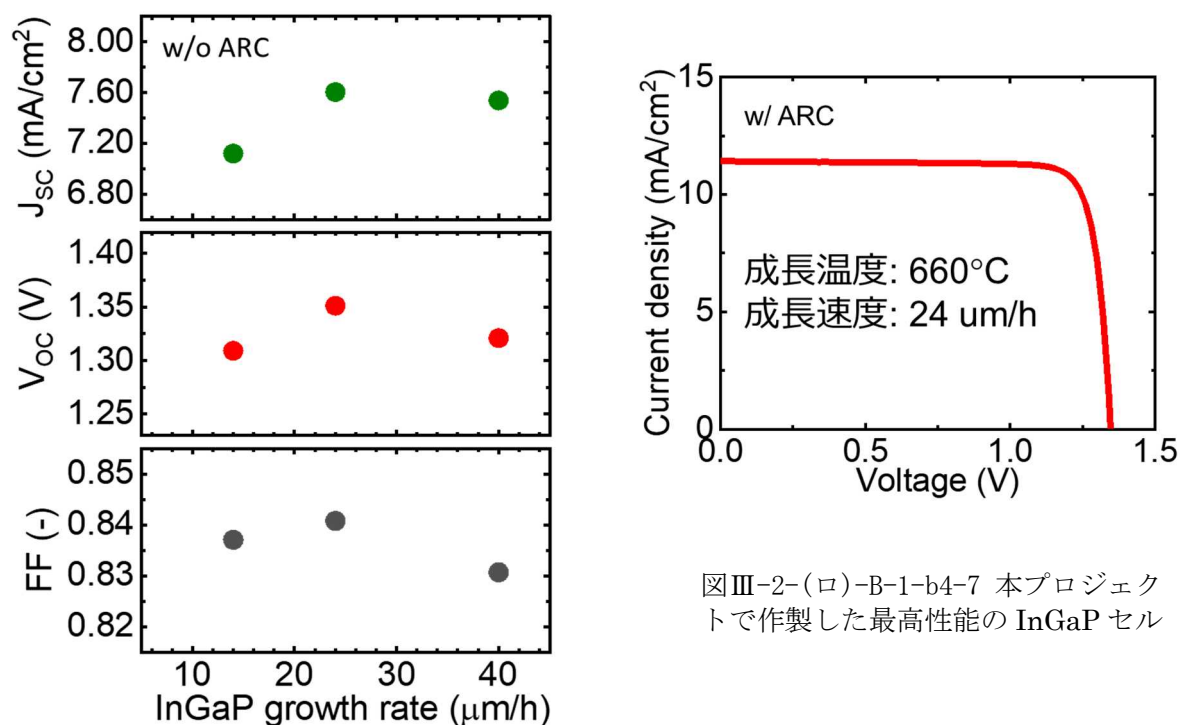
得られた知見を基にして、成長シーケンスの改善を行うことで得られた本プロジェクトの最高性能の 14μm/h、150μm/h の GaAs セルの I-V カーブを図III-2-(ロ)-B-1-b4-5 に示す。14μm/h の GaAs セルでは、24.0%の変換効率が得られ、プロジェクトの GaAs セルにおける最終目標値を達成した。一方で、150μm/h の GaAs セルでは 22.42%の変換効率が得られており、14μm/h の GaAs セルと比較すると若干の低下が生じた。ヘテロ界面の最適化など今後の課題は残されているが超高速成長で作製した GaAs セルとして高性能なセル特性を実証した。



図III-2-(ロ)-B-1-b4-5 本プロジェクトにおいて得られた最高性能の(a) 14μm/h、(b) 150μm/h の GaAs セルの I-V カーブセル (AM1.5G、1sun)

同様に InGaP セルについても成長条件の最適化を行った。図III-2-(ロ)-B-1-b4-6 は、14、24、40μm/h の異なる成長速度で作製した InGaP セルのセル特性を調べた結果である。MOVPE 法では InGaP の高品質

な高速成長には課題が多く、高速 InGaP セルにおいて V_{oc} が低下する問題が生じていた。一方で、HVPE 法で作製した高速 InGaP セルでは、高速成長時においても特性の大幅な劣化は見られず高い性能を維持している。これらの結果は、混晶系の高速成長は HVPE 法が有利であることが示唆され、インパクトの大きい成果である。図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-7 は、本プロジェクトで得られた最高性能の InGaP セルの I-V 特性である。 J_{sc} 、 V_{oc} 、FF、 η はそれぞれ 11.32 mA/cm²、1.35V、0.85、13.0% であり、プロジェクト最終目標値である 12% を上回る成果が得られた。一方で、当該セルは表面のパッシベーションが不十分のため、表面再結合による損失が大きい課題が残っている。今後の HVPE 装置開発の進展により高品質 Al 系材料の成長が実現された後には、AlIn(Ga)P 窓層の導入が可能となり J_{sc} が大幅に改善することが期待できる。STR 社の PVcell ソフトウェアを用いて、開発した InGaP セルに AlIn(Ga)P 窓層を導入したときの外部量子効率 (EQE) スペクトルをシミュレーションした結果、AlIn(Ga)P 窓層を導入により J_{sc} が 14~15 mA/cm² に向上できる可能性が示され、多接合セルのトップセルとして十分な性能が得られることが分かった。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-6 InGaP セル性能におけるの成長速度の影響

図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-7 本プロジェクトで作製した最高性能の InGaP セル

次に、HVPE では世界初となる Al 系材料の太陽電池応用について述べる。Al 系の成長に関してはⅢ-V 族太陽電池の高性能化と低コスト化の両面において重要な要素である。Al を用いることによる主な利点としては、①バンドギャップのワイド化、②エッチングの選択性の拡大が挙げられる。InGaP セルの高性能化には、これまでの議論の通りワイドギャップのパッシベーション層（窓層、BSF 層）の導入が必要であり、一般に AlIn(Ga)P が用いられる。一方、エッチングの選択性を高める理由として、ELO による基板再利用技術を構築することが挙げられる。典型的な ELO 技術では、基板と太陽電池構造の間にリリース層を設け、エッチングの選択比を利用してリリース層のみを除去する。Ⅲ-V 族化合物セルの材料構成を考慮した場合、エッチャントに HF、リリース層に Al 組成の高い Al(Ga)As 層を用いることで

太陽電池にほぼダメージを与えずに ELO を実施することが可能となる。以上から、HVPE 法を用いた III-V 族化合物セル開発において Al 系材料の成長は必須であるが、これまでに窒化物半導体以外の Al 系材料の HVPE 成長は実現されていなかった。本節では、HVPE 法による AlInGaP および AlAs 成長に関する研究成果について述べる。

HVPE 法における Al 系材料の成長では、前駆体の制御が重要である。前述の GaAs、InGaP の高速成長およびセル作製では、III 族材料の前駆体として一塩化金属である GaCl や InCl を利用してきた。一方で、AlCl は HVPE 装置の石英リアクタを還元するため、意図しない不純物の混入やリアクタの損傷を招く。AlGaIn などの窒化物半導体の HVPE 成長では、三塩化金属の AlCl₃ を用いることでこの問題を解決している。そこで、我々の HVPE 装置で AlCl₃ を生成するための条件検討を行った。図 III-2-(ロ)-B-1-b4-8 は Al に 1 sccm の HCl ガスを導入したときの各種塩化ガスの分圧の反応温度依存性について HEpiGaNS を用いて計算した結果である。反応温度が 700°C 以上の場合、AlCl が優先的に生成され、一方で 500°C 以下の低温反応では AlCl₃ が優先的に生成されることが分かる。以上から、開発した HVPE 装置で AlCl₃ を生成するためには、従来の In、Ga の反応領域 (860°C) と異なる低温の原料領域を用意し、Al と HCl ガスを低温で反応させる工夫が必要である。本事業において AlInGaP の成長室の改造を行い、Ga や In の反応温度 (860°C) を維持しながら、Al の反応温度として適した 500°C の領域を設けることで AlCl₃ を効率よく生成するようにした。

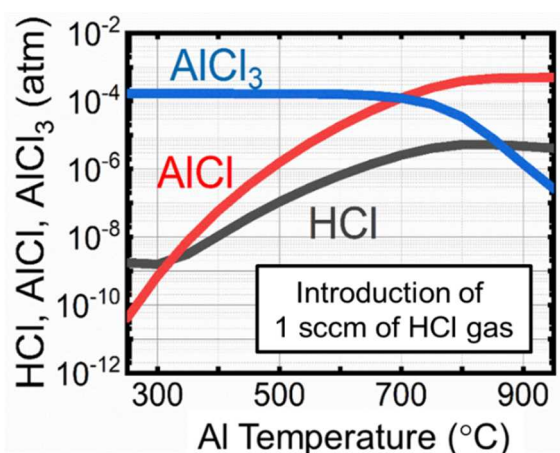
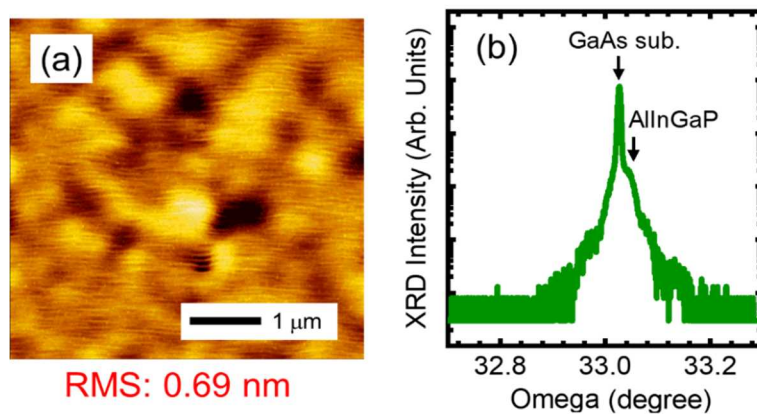
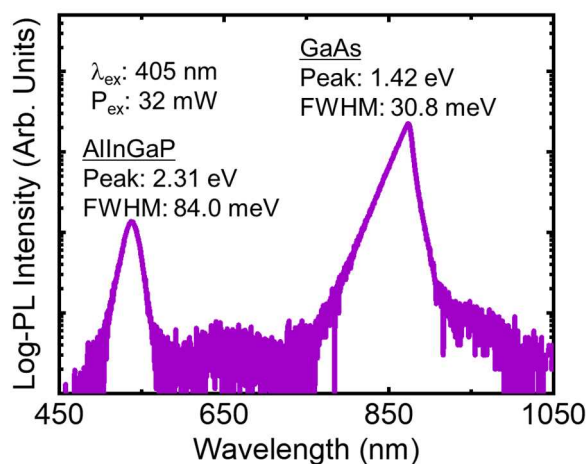


図 III-2-(ロ)-B-1-b4-8 Al 原料に HCl を導入したときの各塩化ガス分圧の反応温度依存性

図 III-2-(ロ)-B-1-b4-9 (a) は H₂ キャリアガスの全流量を 11000sccm として成長したときの AlInGaP の表面モフォロジーを示している。成長時の HCl (Al)、HCl (Ga)、HCl (In)、PH₃ 流量はそれぞれ 2、0.5、20、30sccm となっている。このとき、表面粗さは 0.69nm であり、InGaP と同程度の平坦性が得られている。同図 (b) は、同試料の XRD スペクトルであり AlInGaP が GaAs に格子整合していることが確認できる。また、電子線マイクロアナライザを用いた組成分析では、本試料の AlInGaP 結晶の Al 組成が 29.12% であることがわかった。図 III-2-(ロ)-B-1-b4-10 は、室温で測定した PL スペクトルを示しており、波長 537 nm 付近において AlInGaP からの発光が確認された。これらの結果は、結晶性の高い AlInGaP が HVPE 法で成長できたことを示している。

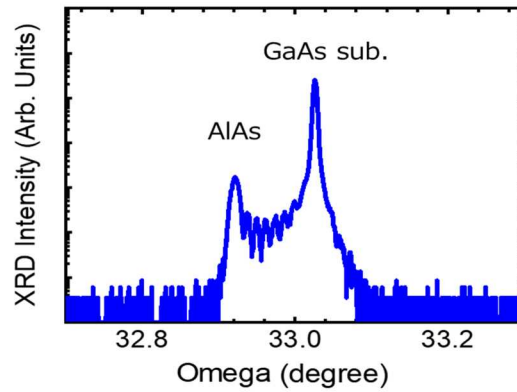


図III-2-(ロ)-B-1-b4-9 AlInGaP 薄膜の(a)表面モフォロジーと(b)高分解 XRD スペクトル

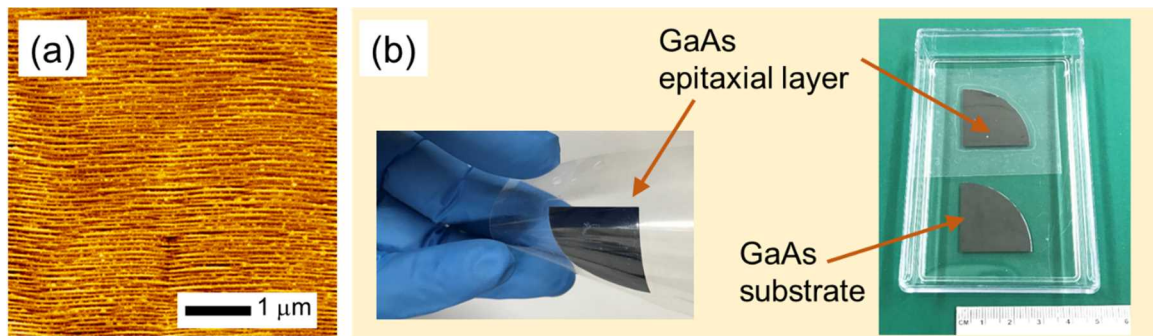


図III-2-(ロ)-B-1-b4-10 AlInGaP 薄膜の室温 PL スペクトル

前述の AlInGaP と同様に、AlAs 成長も $AlCl_3$ を用いた成長技術を開発した。図III-2-(ロ)-B-1-b4-11 は HVPE 法により GaAs 基板上に AlAs を 400nm 成長したときの高分解能 XRD スペクトルを示している。同図から、GaAs 基板のピークに対して低角側に AlAs に起因したピークが明瞭に確認でき、HVPE 法による AlAs 単結晶の成長を実現した。図III-2-(ロ)-B-1-b4-12(a)は、GaAs 基板上に 50nm 厚の AlAs リリース層を成長した後、2000nm 厚の GaAs を成長した際の表面 AFM 像である。同図から AlAs 上にステップ構造を有する高品質 GaAs 薄膜が成長できていることが確認できる。RMS ラフネス値は 0.54nm であり、原子レベルで平坦性に優れた薄膜が得られている。同図(b)は、HF を用いて ELO を実施した後の GaAs のエピタキシャル膜と基板を示している。エピタキシャル膜はフレキシブルフィルムにダメージなく転写できており、HVPE 法を用いた III-V 族化合物セルの ELO 技術の展開が可能であることが世界で初めて実証された。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-11 400 nm厚のAlAsを成膜した試料の高分解XRDスペクトル



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4-12 (a) 50nm厚のAlAs上に2μm厚のGaAsを成長した薄膜の表面AFM像、(b) ELO実施後のフレキシブルフィルムに転写されたエピタキシャル層とGaAs基板

Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5. 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE【東京農工大学】

①熱力学解析と気相成長

気相として原料成分を供給する気相成長法によりⅢ-V族化合物半導体結晶を成長する場合、あらかじめ成長の可能性や成長反応に関する知見を得ておくことは大変有益である。さらに、多くのガス制御系を必要とする気相成長装置において、前もってガス流量などの最適な条件を明らかにしておくことは、装置設計の上からも大きな指針となり得る。

熱力学解析は、まさに、この要請に応えてくれるもので、エピタキシャル成長の現象を理論的に理解し、成長の可能性や析出組成を具体的に計算する手段を与えてくれる。具体的には、熱力学解析により、ある成長条件下におけるⅢ-V族化合物半導体のエピタキシャル成長の可能性、成長の駆動力の大きさ、最大成長量、混晶組成、不純物ドーパ量などを計算することができる。さらに、計算においては、論文やデータ集などにより広く知られている物理的な定数である生成の自由エネルギー変化量のみを用い、装置構造に依存するパラメータなどを一切用いないために、計算手法に依存しない普遍的な計算結果を得ることができる。

気相成長は原料成分の蒸気圧を原料として供給されるために、適度な蒸気圧を持つ原料物質が必要となる。適度な蒸気圧を持たせるためには、その元素の有機化合物にする、あるいはハロゲン化合物にすることが一般的である。このため、Ⅲ-V族化合物半導体の気相成長法は、供給される原料成分により

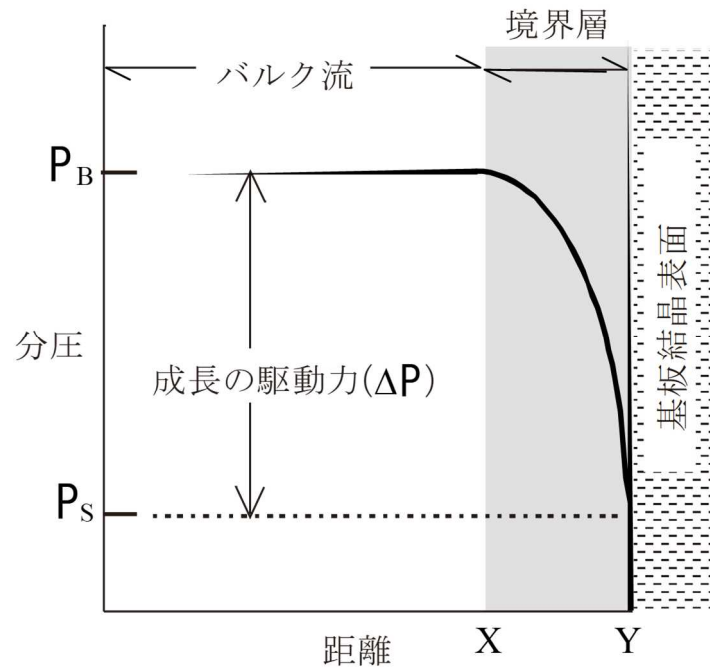
(1) 有機金属を原料とするMOVPE、および(2) ハロゲン化合物を原料とするHVPEに大別できる。なお、元素のそのものの蒸気圧を利用するMBEもあるが、ここでは割愛する。熱力学解析はこれらの成長の種類を問わず、また、どんな結晶にも適用できる。

ところで、実際に行われる結晶成長の過程を完全に解明するためには、成長表面でのダイナミックな動力的過程と自由エネルギー変化を扱う熱力学の両面から考察しなければならない。しかし、気相成長のように、高品質結晶を制御性よく得る必要性から、希薄な原料濃度で物質輸送が律速となる条件が用いられる、つまり、全体の成長過程の中でダイナミックな過程（反応速度）は速く、動力的な影響は無視できるため、熱力学解析が有用になる。

一般に、気相成長法(MOVPE、HVPE)においては、高品質な結晶が得られる気相成長の温度範囲は物質輸送に支配される領域(Mass transport limited region)で成長が行われている。図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-1に気相成長法の物質輸送モデルを示す。縦軸は、原料成分の気相分圧を示し、横軸は成長が起こる基板結晶最表面からの距離を示す。原料成分はバルク流として成長部に輸送され、図中の右側に示す基板表面へは境界層を通して供給される。物質輸送律速領域であるので反応速度の影響を考慮する必要はない。いま、成長成分のバルク流中の分圧（原料供給分圧に等しい）を P_B 、析出した結晶と化学平衡にある成長最表面上の分圧（平衡分圧）を P_S とすると、この領域での成長速度 G は次式(Ⅲ-2-(ロ)-B-3)で表される。

$$G = K_g \cdot (P_B - P_S) = K_g \cdot \Delta P \quad (\text{Ⅲ-2-(ロ)-B-3})$$

ここで、 K_g は物質移動係数を示す。 ΔP は成長成分の分圧の差($P_B - P_S$)を示し、成長の駆動力の大きさを表している。したがって、反応速度の影響のない、通常の高品質結晶の得られる物質輸送が律速の条件では、熱力学解析で図中の P_S を求めることにより成長の駆動力の大きさを求めることができる。なお、式(Ⅲ-2-(ロ)-B-3)において ΔP が負の値を持つ場合には、成長は起こらずエッチングが起こる。また、混晶(A_xB_{1-x})の成長では、成分 A および成分 B 各々の成長成分の分圧の差(ΔP_A および ΔP_B)を求めることにより、成長の駆動力の大きさおよび混晶組成を求めることができる。気相成長の熱力学解析により図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-1の P_S を求めることは、エピタキシャル成長の可能性や混晶組成の予測など、エピタキシャル成長を行うにあたって有益な多くの指針を与えてくれる。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-1 気相成長における物質輸送のモデル図

②低コスト成長を目指した HVPE 成長の熱力学解析

化合物半導体多接合太陽電池のトップセルとして用いられる InGaP を、HVPE により成膜する技術を開発する。InGaP 系の高速成膜技術は NREL においても検討段階と思われ、早急に開発する必要がある。重要な点は高速成長を維持しながらヘテロ界面を制御する技術であり、As/P 系ヘテロ界面制御技術の確立が必須である。

特に、InGaP 三元混晶の場合、基板結晶(GaAs)と格子整合した結晶成長のためには成長結晶の組成制御が必要条件となる。具体的には、成長温度、原料濃度、送入V/Ⅲ比などの各々の成長条件と成長組成の関係を前もって明らかにしておくことが必要となる。この目的のために、GaAs および InGaP の HVPE 成長の熱力学解析を行い、各成長条件と成長の駆動力の関係および成長組成の関係を明らかにし、これらの結果を装置の設計に応用し、大陽日酸における装置作成を行った。

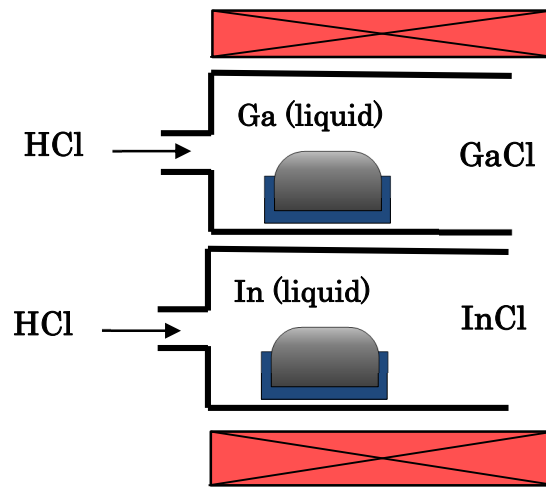
以下、ここでは三元混晶である InGaP の熱力学解析について述べる。

②-1 原料部 (構造および反応)

InGaP の HVPE 成長では、800℃以上に保たれた温度石英ボートに満たされた金属 Ga および In 原料上に水素ガスをキャリアガスとして HCl を送入することにより、反応式(Ⅲ-2-(ロ)-B-4)および(Ⅲ-2-(ロ)-B-5)により生成された GaCl および InCl をⅢ族原料分子とする。図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-2 に原料部の模式図を示す。



(Ⅲ-2-(ロ)-B-4)および(Ⅲ-2-(ロ)-B-5)の反応は、熱力学解析の結果、550℃以上で100%反応が進行することが明らかになった。実際の成長装置での原料部温度は850℃程度に保たれるため、原料部に送入されたHClはⅢ族原料と完全に反応し、GaClおよびInClとして成長部に輸送される。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-2 InGaPのHVPE成長におけるⅢ族原料部の模式図

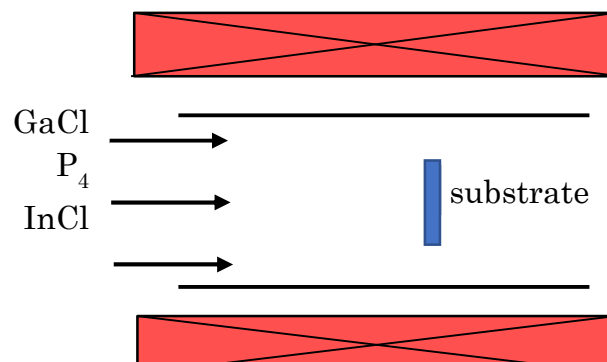
②-2 成長部 (構造および反応)

InGaPの析出部の模式図を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-3に、InGaP三元混晶を構成するGaPおよびInPの二元化合物の析出反応を(Ⅲ-2-(ロ)-B-6)および(Ⅲ-2-(ロ)-B-7)に示す。



なお、V族原料として用いるPH₃は、4PH₃ → P₄ + 6H₂ 反応により不可逆的にP₄に分解される。

図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b3-3に示されたように、析出部に供給される原料分子は、原料部で生成されたGaCl、InClおよびPH₃原料が熱分解され生成したP₄である。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5-3 InGaPのH-VPE成長装置の析出部の模式図

②-3 熱力学解析

以下、InGaP の HVPE 成長における熱力学解析について述べる。

(1) 原料部

原料部では、個別に下記反応により、送入した HCl は全て Ga (In) と反応し、各々 GaCl および InCl とし、析出部に輸送される。



(2) 成長部

析出部での、ガス気相種は

GaCl, InCl, GaCl₃, InCl₃, HCl, P₄, P₂, N₂, H₂ の 9 種とする。

気相分子種は以下の反応により結ばれる。



(III-2-(口)-B-10)～(III-2-(口)-B-14)に質量作用の法則を適用し、

$$K_1 = a_{\text{GaP}}^2 P_{\text{HCl}}^2 / P_{\text{GaCl}}^2 / P_{\text{P}_4}^{1/2} / P_{\text{H}_2} \quad (\text{III-2-(口)-B-15})$$

$$K_2 = a_{\text{InP}}^2 P_{\text{HCl}}^2 / P_{\text{InCl}}^2 / P_{\text{P}_4}^{1/2} / P_{\text{H}_2} \quad (\text{III-2-(口)-B-16})$$

$$K_3 = P_{\text{GaCl}_3} P_{\text{H}_2} / P_{\text{GaCl}} / P_{\text{HCl}}^2 \quad (\text{III-2-(口)-B-17})$$

$$K_4 = P_{\text{InCl}_3} P_{\text{H}_2} / P_{\text{InCl}} / P_{\text{HCl}}^2 \quad (\text{III-2-(口)-B-18})$$

$$K_5 = P_{\text{P}_2}^2 / P_{\text{P}_4} \quad (\text{III-2-(口)-B-19})$$

が得られる。

反応系を通じて一定に保たれるパラメータは、

(Cl 濃度)

$$A = n_{Cl2} / (n_{N2} + n_{H2}) = [1/2(P_{GaCl} + P_{InCl} + P_{HCl}) + 3/2(P_{GaCl3} + P_{InCl3})] / (1/2P_{HCl} + P_{H2} + P_{N2}) \quad (III-2-(口)-B-20)$$

(キャリアガス中の水素濃度)

$$F = n_{H2} / (n_{N2} + n_{H2}) = (1/2P_{HCl} + P_{H2}) / (1/2P_{HCl} + P_{H2} + P_{N2}) \quad (III-2-(口)-B-21)$$

(供給Ⅲ族原料とV族原料の関係)

$$U = P_{III}^0 - P_V^0 = (P_{GaCl} + P_{InCl}) - (4P_{P4} + 2P_{P2}) \quad (III-2-(口)-B-22)$$

(全圧 = 1atm)

$$1 = P_{GaCl} + P_{InCl} + P_{HCl} + P_{GaCl3} + P_{InCl3} + P_{P4} + P_{P2} + P_{H2} + P_{N2} \quad (III-2-(口)-B-23)$$

の4種のパラメータが存在する。

(III-2-(口)-B-15)-(III-2-(口)-B-23)式から、気相分子種9種が求められる。

なお、InGaP三元混晶中のGaPおよびInPの活量は、式(III-2-(口)-B-22)および(III-2-(口)-B-23)に示した正則溶液モデルから求めた。

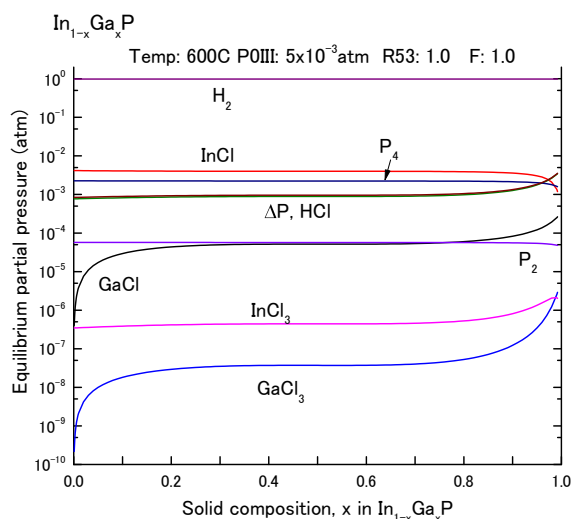
$$a_{GaP} = x * EXP((1 - x) * (1 - x) * \Omega_{GaP-InP} / RT) \quad (III-2-(口)-B-24)$$

$$a_{InP} = (1 - x) * EXP(x * x * \Omega_{GaP-InP} / RT) \quad (III-2-(口)-B-25)$$

ここで、相互作用パラメータ $\Omega_{GaP-InP} = 3500 \text{ Kcal/mol}$ とした。

上述の熱力学解析により求めた結果を以下に示す。

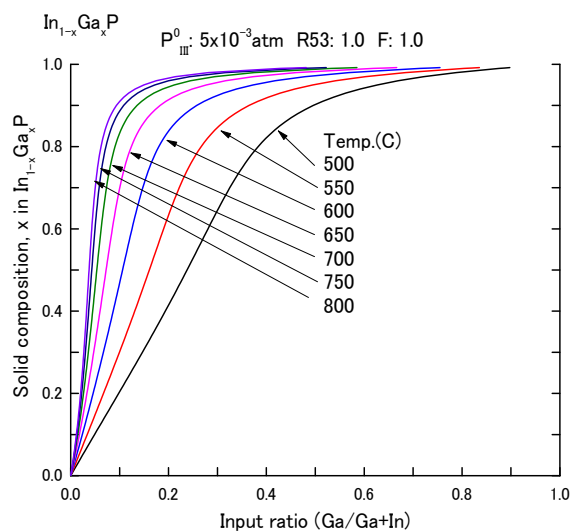
図III-2-(口)-B-1-b5-4は熱力学解析により求めた、成長結晶組成とその組成と平衡にある各々の分圧の関係を示す。解析は、成長温度: 600°C、Ⅲ族原料濃度: $5 \times 10^{-3} \text{ atm}$ 、原料送入V/Ⅲ比: 1.0で行った。図からⅢ族の主成分は、InClおよびGaClであることがわかる。一方、V族の主成分はP₄である。混晶中のGaP組成の増加とともに、GaClは増加し、InClは減少している。InCl分圧はGaCl分圧に比較して2桁程度大きな値になっている。このことは、InPはGaPに比較して固相として析出しにくいことを示している。



図III-2-(口)-B-1-b5-4 InGaP H-VPE
成長装置の析出部の模式図

図III-2-(口)-B-1-b5-5 は原料供給比 $[Ga/(Ga+In)]$ と析出組成の関係を示す。図から、Ga 原料の増加により、固相中のGaP成分が急激に増加することが予想される。さらに、成長温度の増加とともに急激に増加していることから、高温領域では組成制御が難しくなることが示唆される。

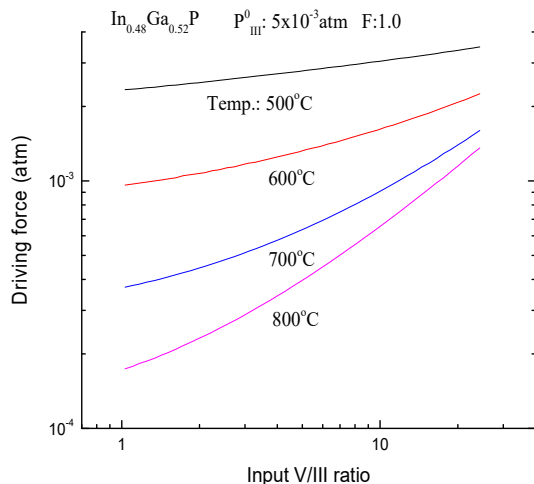
上記に示したように、InGaPのHVPE成長における熱力学解析により、GaCl-InCl-PH₃系により全組成のInGaP混晶の成長の可能性が示された。一方、In_{0.48}Ga_{0.52}P三元混晶は、GaAs基板結晶と格子整合することが知られている。以下、GaAs基板結晶と格子整合するIn_{0.48}Ga_{0.52}P混晶の熱力学解析により明らかにされた送入V/Ⅲ比および原料送入分圧と成長速度および成長組成に及ぼす影響について示す。



図III-2-(口)-B-1-b5-5 原料供給比 $[Ga/(Ga+In)]$ と
析出組成の関係

図III-2-(口)-B-1-b5-6 に送入V/Ⅲ比と成長の駆動力の関係を示す。一般に、成長速度は、 $GR = K_g \cdot \Delta P$ で示される。ここで、 K_g は定数、 ΔP は成長の駆動力を示す。したがって、成長速度は成長の駆動力の値に比例すると考えられる。図III-2-(口)-B-1-b5-6 から、成長温度の減少に伴って成長速

度は増加し、送入V/Ⅲ比の増加によっても成長の駆動力が増加することがわかる。

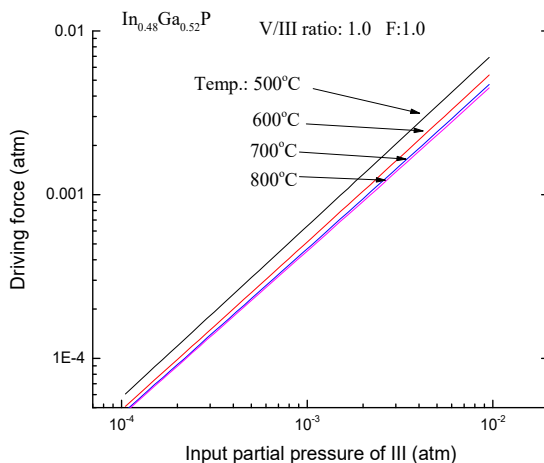


図Ⅲ-2-(口)-B-1-b5-6 送入V/Ⅲ比
と成長の駆動力の関係

図Ⅲ-2-(口)-B-1-b5-7に原料送入分圧と成長の駆動力の関係を示す。図から、原料分圧の増加とともに成長速度は直線的に増加することが示唆される。

以上、送入V/Ⅲ比および原料分圧が成長速度に与える影響が明らかにされた。

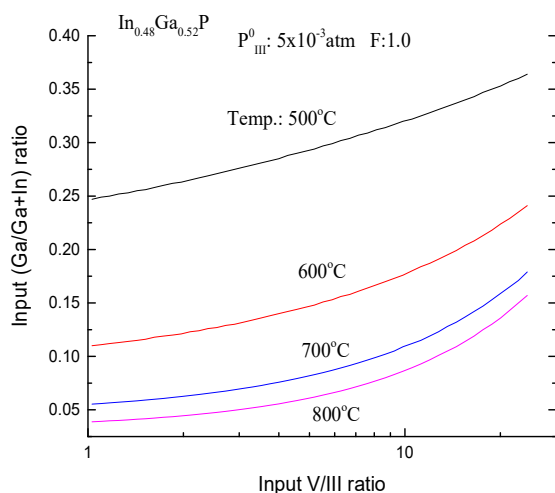
一方、GaAs 基板結晶と格子整合する $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ 混晶の成長のためには、送入V/Ⅲ比および原料分圧と原料送入比を明らかにする必要がある。以下、GaAs 基板結晶と格子整合する場合の原料送入比の関係を示す。



図Ⅲ-2-(口)-B-1-b5-7 原料送入分圧
と成長の駆動力の関係

図Ⅲ-2-(口)-B-1-b5-8は、 $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ を成長するために必要な原料送入比と送入V/Ⅲ比の関係を示す。送入V/Ⅲ比の増加とともに、原料送入比は増加する。このことは、送入V/Ⅲ比の増加により、InPの析出率が増加することを示している。特に、高温領域では組成制御の観点からも高V/Ⅲ比の利用が

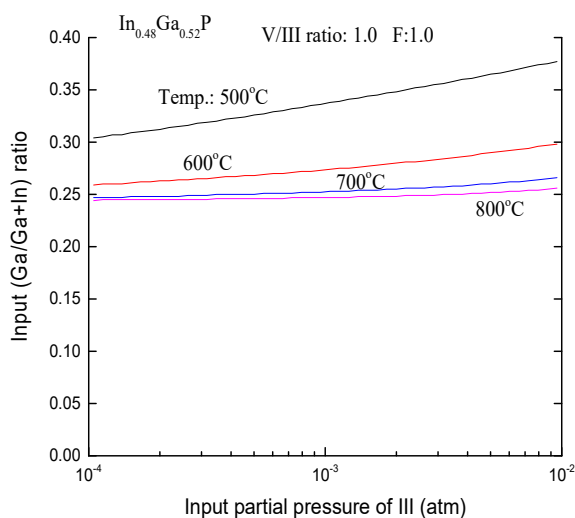
望ましいと考えられる。



図III-2-(ロ)-B-1-b5-8

送入V/III比と原料送入比の関係

図III-2-(ロ)-B-1-b5-9は、GaAs基板と格子整合した $\text{In}_{0.48}\text{Ga}_{0.52}\text{P}$ 混晶の成長のための原料送入比と原料分圧の関係を示す。図から、原料送入比は原料分圧に大きく影響されないことが明らかになった。上記の熱力学解析結果により、実際のInGaP HVPE装置の設計上の大きな指針を与えることができた。

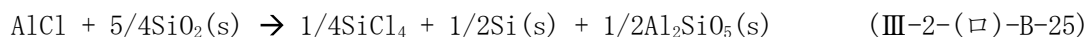


図III-2-(ロ)-B-1-b5-9 原料分圧と原料送入比の関係

③AlAs 成長の熱力学解析、装置設計支援

従来、Al系化合物半導体結晶のHVPE成長は不可能であると言われてきた。それは、HVPE成長におけるAl原料成分であるAlClと反応容器である石英との間で反応が起こり、石英が破損してしまうためで

ある。この場合の反応は、

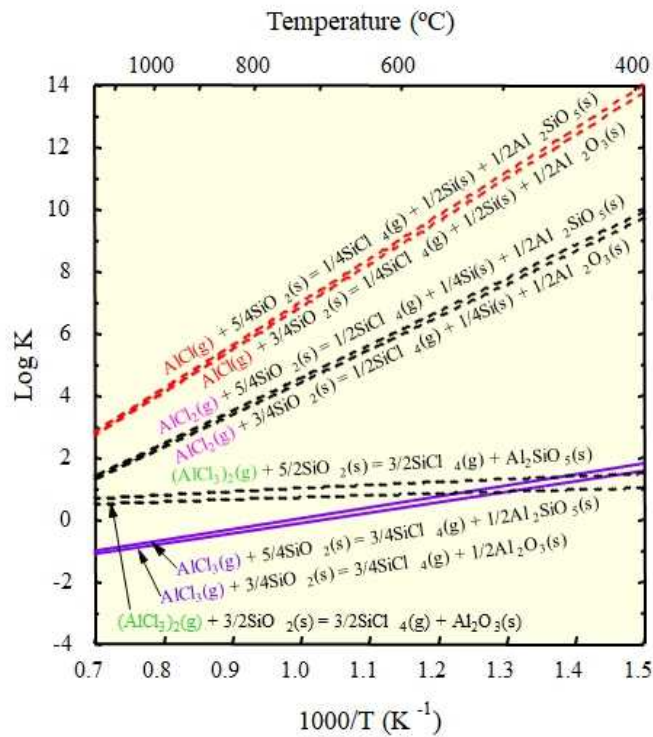


で示され、石英(SiO_2)が反応によりガスである SiCl_4 および固体 Si に分解される。

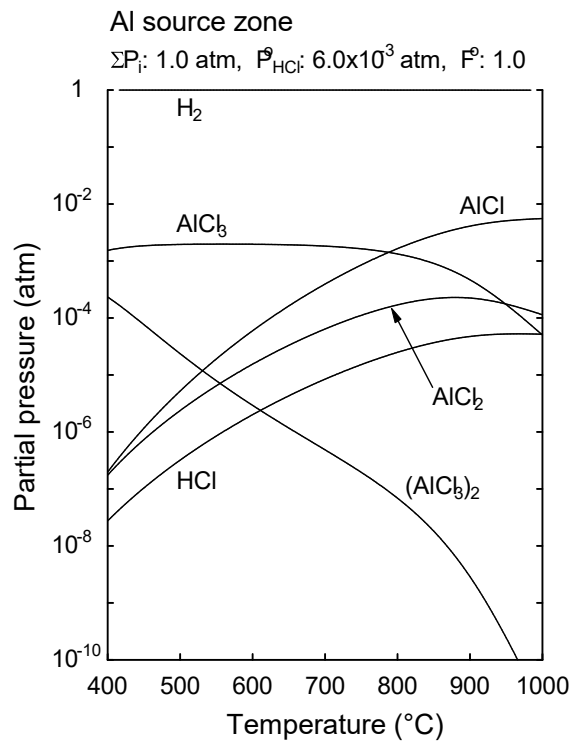
そのため Al 系化合物半導体の HVPE 成長法を可能にするためには、AlCl に代わる石英と反応しない原料分子種を用いる必要がある。本研究では、Al の各種塩化物と石英との反応の自由エネルギー変化を、第一原理計算を用いて精密に計算を行った。その結果を用いて精密な熱力学解析を行うことにより、多くの Al の塩化物 (AlCl , AlCl_2 , AlCl_3) と石英との反応性を調べた。その結果を図 III-2-(口)-B-1-b5-10 に示す。縦軸は AlCl_n と石英との反応の平衡定数の値が対数で示されており、この値が高いほど反応が進行することを示している。図から明らかなように、AlCl および AlCl_2 と石英との反応の平衡定数の値が大きく、反応性が高い。このため、AlCl および AlCl_2 を原料分子とした成長は、不可能であると結論付けられる。一方、 AlCl_3 を Al 原料分子とした場合、その石英との反応の平衡定数の値は小さく、長期にわたり石英と反応することなく、AlAs HVPE 成長が可能になることが明らかになった。

続いて、Al と HCl との反応が起こる原料部での反応の結果生成される各分子種の平衡分圧と温度の関係を図 III-2-(口)-B-1-b5-11 に示す。低温領域では、Al 分子種の主成分は AlCl_3 であり、反応温度の増加とともに AlCl および AlCl_2 の分圧が増加する。安全な観点からは、より低温での原料生成が望ましいが、一方、完全な反応 (反応速度) の観点からより高温での反応が望ましい。十分な反応速度が得られ、安全な原料分子である AlCl_3 を安定的に得られる条件を図 III-2-(口)-B-1-b5-11 から探索すると、 600°C から 700°C の反応温度が最適であることが明らかである。

以上の Al 系の熱力学解析により、(1) Al 原料分子を AlCl_3 とすることにより、反応容器である石英と反応することなく Al 系化合物半導体の HVPE 成長が可能であること、および (2) 原料部の反応を 600°C から 700°C に制御することにより、安全に AlCl_3 のみを供給することが可能であることが明らかになった。



図III-2-(□)-B-1-b5-10 各種 Al 塩化物 (AlCl, AlCl₂, AlCl₃) と石英との反応の平衡定数の温度変化



図III-2-(□)-B-1-b5-11 Al (metal)-HCl-H₂ 反応系の温度と平衡分圧の関係

III-2-(ロ)-B-1-c1. シリコン上III-Vエピ成長【豊田工業大学】

Si 基板上 GaAs 成膜層の欠陥密度低減の技術開発を行った。Si と GaAs の熱膨張係数差により生じる応力を低減するためには、GaAs 成膜温度の低温化が有効である。しかし、成膜温度を低温化しただけでは、過剰 As などの点欠陥を多く含む低品質な GaAs 膜になってしまう。そこで、GaAs 成膜の際、Ga 原料を断続的に供給して、基板に到達した原子の表面マイグレーションを促進するマイグレーション・エンハンスド・エピタキシー (MEE) 法と、成膜中のアニール処理を組み合わせることで、GaAs 膜の高品質化をはかった。表III-2-(ロ)-B-1-c1-1 に、エッチピット法により評価した各試料の転位密度、および X 線回折のロッキングカーブ測定 (GaAs (004) 回折ピーク) の半値幅をまとめる。初期成長層に低温 280°C で MEE 層を挿入した後アニールし、570°C で通常の MBE 法で成膜した GaAs 膜で転位密度 $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ を得て、中間目標 10^6 cm^{-2} 以下を達成した。初期成長層に低温 280°C で MEE 層を挿入した後アニールし、その後、低温 300°C で全て MEE 成膜した GaAs 膜では、さらに低い転位密度 $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ を得たが、ロッキングカーブの半値幅は増大し、結晶品質は低下した。以上の結果から、初期成長層にのみ低温 MEE 法を導入した 2 段階成長法が欠陥密度低減に有効であることが、本研究により示された。

実施計画見直しにより、本開発項目は 2017 年度で終了となったが、その後の自主研究として行った MBE-XRD 装置 (SPring8 ビームライン 11XU) での結晶成長中の逆格子マッピングその場測定の結果、初期成長層における MEE 法と通常 MBE 法での歪緩和過程の違いが、成膜後の降温過程での欠陥導入にも影響を与えていることが示され、GaAs 層の欠陥密度低減のための重要な知見が得られた。

表 III-2-(ロ)-B-1-c1-1 GaAs 成長膜の転位密度の比較

手法	転位密度 (cm^{-2}) (エッチピット法)	X 線回折測定
		GaAs (004) ロッキングカーブの半値幅 (arcsec)
低温成長 (280°C)	5×10^7	2603
2 段階成長 (標準試料) (600°C/230°C)	2.2×10^8	565
低温 MEE 初期層挿入 (570°C (2.1 μm)/280°C-MEE (70nm))	3×10^5 (中間目標達成)	268
全低温 MEE 成長 (300°C-MEE (1.5 μm)/280°C-MEE (70nm))	1×10^4	605

III-2-(ロ)-B-1-c2. シリコン上III-Vエピ成長【宮崎大学】

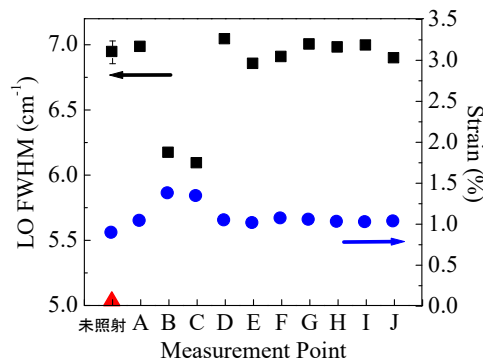
① レーザー光照射による低温エピ GaAs 薄膜の高品質化

III-V on Si の作製においては、基板と成長層の熱膨張係数差により発生する欠陥が問題となる。この問題の解決策として、成長温度を下げることで室温との温度差を小さくし熱的不整合の影響を少なくする方法があるが、一般に低温成長では原子の拡散エネルギーが不足し結晶性が悪くなる。そこで、低温作製した GaAs 薄膜にパルスレーザー光を照射し、成長層のみにアニール処理を施す手法を試みた。

分子線エピタキシー (MBE) 法を用いて、Si (001) 基板上に GaAs 薄膜を成長させた。成長温度はエピタキ

シャル成長が可能な低温成長である300℃と、多結晶成長する200℃を選択した。成長後のGaAs薄膜に波長266 nm、強度1.1 mJのレーザー光を照射面積2.54 mm²の範囲に35、45、60秒間照射した。レーザーアニール後の表面形状を評価するため、走査型電子顕微鏡(SEM)、結晶性を評価するためにラマン分光法を用いた。ラマン測定より得られたスペクトルより、結晶性はLOピークの半値幅(FWHM)より評価し、ピーク位置よりGaAs中の歪み量を見積もった。一度のレーザー照射痕内部において、同じ照射痕内に場所依存性が見られたため、場所依存性を評価するために、同一照射痕内部を分割しA~Jの10箇所にてラマン測定を行った。

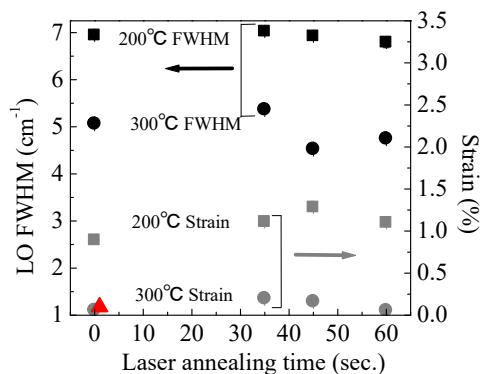
レーザー照射前と、照射後の同一照射痕内の各位置での歪み量を見積もった結果を図III-2-(ロ)-B-1-c2-1に示す。全てで引張歪みを受けている。レーザー照射前の歪みは0.892%であった。一方、GaAsとSiの熱膨張係数差による歪みは、200℃で成長の場合0.0623%である。これはラマン分光法によって求めた歪み量よりはるかに小さい。2軸性の応力と仮定していたが、200℃では多結晶成長していることから応力は不均一であり、多結晶特有の歪みが生じたと考えられる。次にレーザー照射後の歪み量と比較を行う。各測定箇所でもレーザー照射前よりも引張歪みが大きくなっている。レーザー照射により表面温度が上昇し、室温との温度差が大きくなることで引張応力が生じたと考えられる。他の場所と比較してB、Cで特に引張歪みが大きく、この領域の温度上昇が、他の部分より大きい事が示唆される。B、Cで特に強くなった理由は現在検討中であるが、レーザー光自体の面内不均一が影響した可能性が考えられる。



図III-2-(ロ)-B-1-c2-1 成長温度 200℃、60 秒照射の GaAs における各測定箇所での LO 半値幅および歪み量

次に温度依存性と照射時間依存性を議論する。図III-2-(ロ)-B-1-c2-2 に各成長温度、照射時間における LO 半値幅および歪み量を示す。まず、照射前の歪み量を考える。300℃成長の GaAs 層の歪み量は 0.0585%であった。300℃成長における熱膨張係数差から予想される歪み量は 0.0983%であり、ラマンシフトから求めた歪み量より大きい。300℃では GaAs はエピタキシャル成長していることから、成長過程で生じた圧縮歪みが残留した可能性が考えられる。また、300℃の半値幅は 200℃と比較して小さい。200℃は多結晶のため方位がランダムであり、原子間距離も乱れているためであると考えられる。エピタキシャル成長している 300℃では方位が揃っており、200℃と比較して原子間距離の乱れが少なく、半値幅が小さいと考えられる。

レーザー照射後はいずれの成長温度の結果に置いても、引張歪みが増大したが、照射時間60秒で減少した。これは長時間の照射により熱が照射領域外へ放出したため、室温との温度差が減少した可能性が考えられる。一方、結晶性は単調に向上した。照射時間60秒で歪みが減少するとともに結晶性の改善がみられ、レーザー照射が、熱歪みの影響を抑えながら結晶性の向上に有効である可能性が示された。



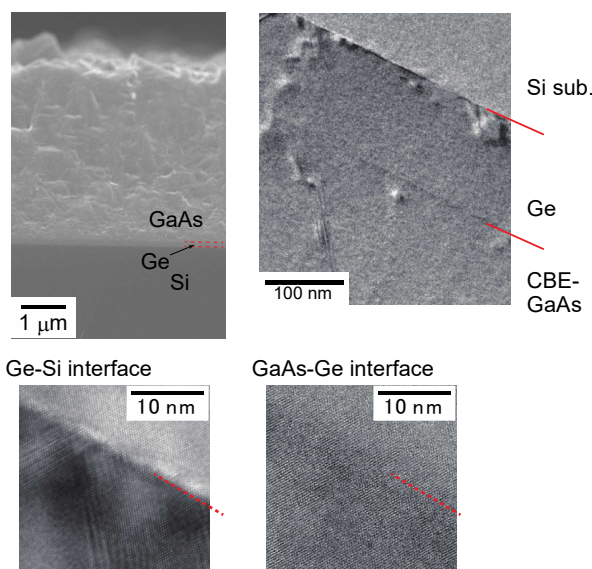
図III-2-(口)-B-1-c2-2 各成長温度，照射時間におけるLO半値幅および歪み量

②安全な原料である tertiarybutylgerman (TBGe) を用いた Ge 薄膜の形成

Si 基板上に直接 GaAs 層を堆積するのではなく、薄い Ge 膜をバッファ層として堆積することで、界面の欠陥を減少できるとの報告がある。一般にエピタキシャル成長における Ge 原料としては、 GeH_4 や Ge_2H_6 が用いられているが、毒性が強く安全装置や除外装置にコストがかかる。そこで、毒性が低く安全な Ge 原料として tertiarybutylgerman (TBGe) を選定した。

2016 年度までに、Ge 薄膜結晶成長条件の探索を行い、エピタキシャル成長可能かつ平滑な表面が得られる条件を見出した。2017 年度は、宮崎大学にて pulsed-jet epitaxy (PJE) 装置を用いて Si (001) 基板上に Ge バッファ層を作製し、その後豊田工大にて chemical beam epitaxy (CBE) 法を用いて GaAs 層を Ge バッファ上に成長させ、評価を行った。図III-2-(口)-B-1-c2-3 に GaAs/Ge/Si (001) の断面 TEM による測定結果を示す。Ge/Si 界面に欠陥が集中しており、GaAs 層への欠陥伝搬も観察される。しかし、欠陥の多くは Ge 層に止まっている。また、GaAs/GaAs/Ge および Ge/Si 界面は平坦になっており、特に GaAs/Ge 界面は格子像で欠陥が見られず、高品質化が可能であることを示唆している。ただし、GaAs 表面は非常に荒く、GaAs 層の成長条件の最適化が必要だと考えられる。

(2)-1 (CBE-GaAs/Ge/Si)



図III-2-(口)-B-1-c2-3 Si (001) 基板上に Ge バッファ層を 100nm 程度堆積し、その上に CBE 法を用いて $4 \mu\text{m}$ の GaAs 層を成長させた試料の断面 TEM 像。左上：低倍率像、右上：GaAs/Ge/Si 界面の拡大像、左下：Ge/Si 界面の拡大像、右下：GaAs/Ge 界面の拡大像。

2. 実用化・事業化見通し

テーマ B においては、シャープ(株)、東大（再委託：タカノ(株)）が ELO によるエピ層剥離装置を、また大陽日酸(株)が HVPE 装置の開発を行った。それぞれのメーカーの実用化・事業化見通しを以下に記載する。また産総研が想定する、HVPE 装置、エピ層移載装置、スマートスタック装置を組み合わせた 2 端子型 InGaP/GaAs//Si (CIGS) モジュールの実用化イメージに関しても述べる。

【低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用（シャープ）】

本プロジェクトで得られた研究開発の成果は、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化への貢献が期待される。具体的な製品として、宇宙用に逆積 3 接合 (IMM3J) セル、成層圏飛行体用に IMM3J セルおよび両面採光型 2 接合セル、車載用には透過型 2 接合セルとシリコン（もしくは CIS）セルをスタックした 4 端子型セルを予定する。

テーマ B で得られた成果は以下に示す内容にて、それぞれの事業分野での活用が期待される。

研究開発成果	事業分野	貢献・活用
エピ層剥離装置の開発によりエピ剥離後基板の再利用が 10 回以上可能であることを実証した。量産装置の設計および価格見積を行い、開発したプロセスのコスト試算を実施した。	成層圏飛行体用 車載用	光透過型 2 接合セルのエピ層剥離、基板再利用 10 回が確認できたため、新規製品を予定する成層圏飛行体向け両面採光型セルの低コスト化が期待できる。 更に、将来の車載用として製品開発を予定しているメカニカルスタック 4 端子型の 2 接合トップセルの低コスト化が期待される。

以上のように、研究開発の成果を活用し、成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化へに向けた開発を推進する予定である。

【低コスト実装プロセス：エピ層移載（タカノ（再委託））】

量産向け ELO 装置は世界的にもまだ販売例は見られず、III-V 化合物薄膜太陽電池の製造企業における装置内製に留まることを考慮すると、本プロジェクトで開発した成果を早期に量産化技術として確立することで、今後予測される車載用及び UAV 用の高効率太陽電池のニーズの高まりを見据え、関連市場の拡大促進への貢献が期待できる。基板表面の高速全面観察装置については、ELO 技術、基板再生技術の研究開発段階での活用に留まらず、生産ラインにおける非接触高速検査や品質管理のためのサンプリング検査などへの応用を想定した技術展開も考えられる。

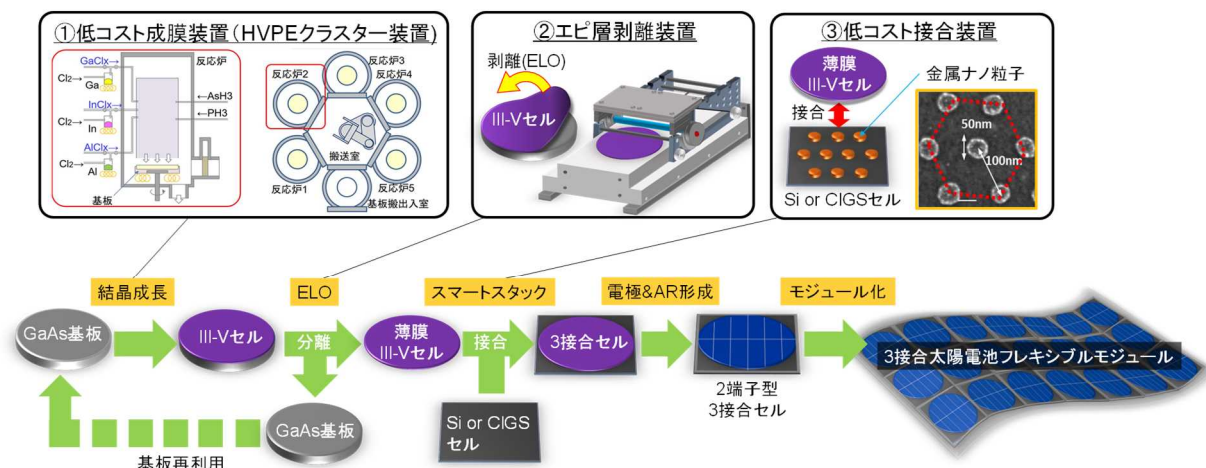
【低コスト III-V 化合物半導体製膜技術（大陽日酸）】

本研究で得られた 2 インチ基板に対する GaAs、InGaP 成長技術を元に、HVPE の大型量産装置を開発することで III-V 族化合物半導体太陽電池の市場普及に貢献する。その達成のためには製造コストの削減が必須であり、具体的には基板の大口径化、成長速度の更なる高速化、V 族/III 族ガス比率の低減、原料

利用効率の向上に取り組む計画である。大型量産装置の概略図は、「4. 今後の展開」において詳細に述べる。

【Si 上Ⅲ-Vセル（スマートスタック）・低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE（産総研）】

産総研が想定する2端子型 InGaP/GaAs//Si (CIGS) モジュールの実用化イメージを、図Ⅲ-2-(ロ)-B-2-1 に示す。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-2-1 InGaP/GaAs//Si (CIGS) モジュール作製のプロセスイメージ図

上図において、HVPE に関しては大陽日酸が実用化・事業化を検討し、シャープ・タカノが取り組むエピ層剥離装置の実用化と合わせたモジュール作製を想定する。低コスト接合装置に関しては、スマートスタックの技術移転等によりスマートスタック自動装置の開発を行い、Si または CIGS ボトムセルに大面積 InGaP/GaAs トップセルを自動で接合する装置を実現する。HVPE で作製したトップセルをスマートスタックし、2端子型 InGaP/GaAs//Si (CIGS) モジュールを作製する。

3. 波及効果

本事業の主目的達成のために開発する要素技術の中には、下記の通り種々の応用に波及効果を有するものが多く存在する。

【移動体等の新規太陽電池用途への応用】

ELO により作製される薄膜太陽電池は生産コストの低減のみならず、軽量、フレキシブルといった薄膜太陽電池自体の特徴を活かした新規用途（車載電源、モバイルバッテリー、など）の創生への波及が期待できる。化石エネルギーの埋蔵量や、近年より顕在化している気候変動、異常気象、また世界情勢の揺らぎに起因する安定的エネルギー供給への懸念といった世界的な諸問題に対して、電気自動車への搭載、普及が早期に実現されることで、社会生活の安定化に一定の効果をもたらすと考えられる。さらに、当該技術の国外流出を防ぎ、国内自動車関連企業等と連携し、車載をはじめとした移動体用途向け

の太陽電池モジュールの生産体制を確立することで、我が国の経済再生へ大きく貢献できる。また、近年の高度 IT 社会におけるポータブルバッテリーの需要の高まりに対して、軽量で高い発電性能を有する太陽電池が搭載されることで、さらなる市場の拡大、産業創生、雇用創生に大いに期待される。

【光デバイス、パワーデバイス等の化合物半導体の製造技術】

本事業で得られた MOCVD、HVPE 高速製膜技術は化合物半導体太陽電池だけでなく、そのほかの光デバイス、パワーデバイス等の化合物半導体の製造技術にも採用可能であり、当該装置の生産能力向上による化合物半導体のコストダウンや市場普及に貢献する。加えて HVPE 装置による複雑な構造の製膜の実現は、従来 MOCVD で担ってきたデバイス構造への HVPE 技術の応用の可能性を持っており、これによりさらなる製造コストの削減など新たなデバイス製造方法の普及に繋がるものとする。

また、今回大幅な高速化を達成できた MOCVD プロセスに関しては、光ファイバー通信に用いるレーザーおよび変調器を集積した光集積デバイスの製造技術としても大きな注目を集めている。実際、InP などの化合物半導体基板上に光導波路構造を形成した後にクラッド層を形成する「埋め込み再成長」においては、厚さ 10 μm に達する結晶層を数時間かけて成長しており、生産性の低さが製造過程のボトルネックとなっている。このため、今回開発した高速 MOCVD 技術に対する光デバイス業界からの注目度は高く、すでに MOCVD 装置を供給する大陽日酸に対して InP 系結晶の埋め込み再成長のデモが要請され、予備的な開発が始まっている状況である。

【InGaP トップセルのモバイル機器等への応用】

屋内光（照明等）に対して高効率で発電可能な InGaP トップセルについても、単体でエピ層剥離が可能であるため、基板再利用による大幅なコスト削減が期待できるため、高効率セルの低価格化の実現により、モバイル機器などへの応用、普及が期待される。

【ウエハ全面表面観察装置の開発】

本事業で開発している基板表面全面観察評価機は、レーザーや光変調器などの III-V 族化合物半導体製品に対する製造工程内の検査を可能とする。ラインセンサとライン状照明を用いたフォトルミネッセンス画像化および異常診断技術を応用する。

【シリコン基板への化合物半導体のヘテロエピタキシャル成長】

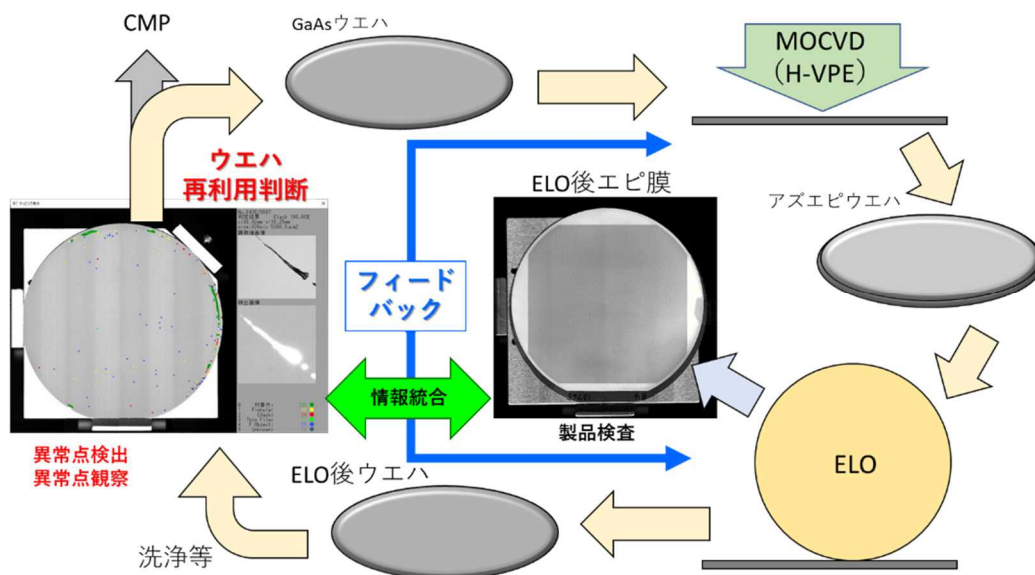
III-V 族化合物半導体のシリコンプラットフォームへの集積は、発光・高感受光機能を持つエレメントをシリコン集積回路に混載することを可能にし、CPU チップ内の光クロック分配やコンピュータボード間の光通信、さらにインターネットのバックボーンである光ネットワーク素子の高速・小型化など情報通信分野を中心に大きな需要がある。ヘテロエピタキシャル成長による III-V 化合物半導体/Si 構造が高品質で実現できれば、これらの応用への波及効果は極めて大きい。

さらに、層状半導体バッファを用いるシリコン基板上の III-V 族化合物半導体成長は、ファンデルワールス界面で劈開できることから、成膜した GaAs エピタキシャル層を簡便に基板から剥離することを可能とする。III-V 族化合物半導体を機能部位として集積したフレキシブルデバイスなどへの応用が考えられる。また、大口径のシリコン基板が繰り返し利用可能であることで、本事業の主要技術として開発している犠牲層エッチングを用いた GaAs 基板からの III-V 族化合物半導体層の剥離 (ELO) よりも、将来的にスループットの向上、低コスト化が期待できる。

4. 今後の展開

【低コスト実装プロセス：エピ層移載技術】

本研究テーマにおいて、ELO 自動機開発、高速表面観察技術開発、およびウエハ再利用技術開発といった高効率薄膜太陽電池の製造工程において低コスト化に貢献しうる重要な要素技術の検討を実施した（図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-1）。現状の ELO 試作機では 1 プロセス毎に 1 ウエハを処理しているが、産業化に向けては多数のウエハを同時に処理するための量産技術への応用が必須となる。また、開発した表面観察技術及びシステムを用いる事で、異常点検出～顕微鏡観察～異常点分類を機械で全自動化し、人は異常点分布を画面上で確認した上でウエハ再利用の判断や、問題となっている製造装置の予測を担うといった役割分担が想定される。残された課題は、ウエハ再利用可否の判断と製造装置へのフィードバックの自動化となるが、システムの実出力データから統計的な解析方法を用いる事で解決の道筋が見えてくると考えている。但し、最終的な判断には「人の責任」が必要となり、自動化の線引きについては議論の余地がある。研究テーマとの相乗効果によって今後の研究成果に大いに役立っていくと期待している。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-1 表面観察技術を中心としたⅢ-V化合物太陽電池製造工程のプロセスモニタ

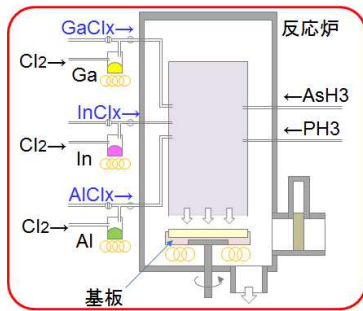
【低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術（MOCVD）】

今回開発した高速 MOCVD プロセスは、既存の装置の中で反応器とガス供給系を改造するのみで製造現場に実装できるため、大陽日酸を主要なサプライヤーとして市場投入が可能な状況である。太陽電池に先駆けて、「3. 波及効果」で述べた光デバイス製造工程に導入される可能性が高い。太陽電池用途には、MOCVD の成熟した装置技術（ウエハ表面への原料供給過程に関する流体力学や反応工学に基づく技術蓄積の賜物である）と HVPE の利点である超高速製膜や高原料利用率を組み合わせた新概念の結晶成長技術が開発されるべきである。これに関しては、後続の NEDO プロジェクトにおいて主要テーマとして研究開発が進められる予定である。

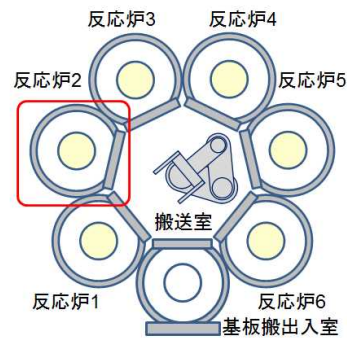
【低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術（HVPE）】

HVPE に関しては、Ⅲ-V 族化合物太陽電池を低コストで成膜可能な量産型結晶成長装置を開発し、そ

の実用化・事業化・普及を図る。Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池用のHVPE量産機開発は世界でまだ行われておらず、開発に成功した場合のメリットは非常に大きい。それにより、他の追随を許すことなく、HVPE装置市場の大部分を占有できる可能性がある。具体的には、6インチ多数枚処理に対応できるHVPE装置を開発し、量産効果による製造コスト削減を目指す。主な開発要素は原料の外部供給による大口径多数枚処理への対応である。図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-2に、金属原料外部供給ガスノズルの概念図を示す。また、図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-3には、HVPEによる6インチ基板複数枚処理の概念図を示す。図のように反応炉をクラスター化することにより、量産型HVPE装置の開発を進める予定である。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-2 金属原料外部供給ガスノズル概念図



図Ⅲ-2-(ロ)-B-4-3 複数枚処理概念図

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)			1	1		2
論文	2	3	6	13	7	31
研究発表・講演 (うち国際会議)	9 (5)	31 (16)	44 (31)	25 (12)	39 (20)	148 (84)
新聞・雑誌等への掲載		1	6	1	1	9
その他(受賞)		1	2	2		5

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	大陽日酸株式会社	特願 2017-148986	国内	2017/8/1	未審査	気相成長装置	山口晃、 小関修一、 椎名一成
2	大陽日酸株式会社	特願 2018-238882	国内	2018/12/20	未審査	気相成長装置	生方映徳、 小関修一

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	R. E. E. Tamayo, T. Hoshii, R. Tamaki, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada, K. Miyano	東京大学	Maskless fabrication of broadband antireflection nanostructures on glass surfaces	Journal of Optics, v 18, n 6, p 064008 (6 pp.), June 2016.	有	2016/06
2	H. Xu, K. Toprasertpong A. Delamarre, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Effect of low-V/III-ratio metalorganic vapor-phase epitaxy on GaAs solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 08MC06, 2017	有	2017/07
3	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effects of various dopants on properties of GaAs tunneling junctions and p-i-n solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 08MC11, 2017	有	2017/07
4	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 大陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	Extremely High-Speed GaAs Growth by MOVPE for Low-Cost PV Application	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 8, 887-894, 2018	有	2018/04
5	N. Miyashita, B. Behaghel,	東京大学、 IRDEP,	Enhancement of photocurrent in epitaxial lift-off thin-	Applied Physics Express, Vol. 11,	有	2018/06

	J. -F. Guillemoles and Y. Okada	CNRS	film GaInNAsSb solar cells due to light-confinement structure	072301, 2018		
6	A. Paszuk, O. Supplie, B. Kim, S. Brückner, M. Nandy, A. Heinisch, P. Kleinschmidt, Y. Nakano, M. Sugiyama, Thomas Hannappel	Iluminau Univ., 東京大学	GaAsP/Si tandem solar cells: In situ study on GaP/Si:As virtual substrate preparation	Solar Energy Materials and Solar Cells, v 180, p 343-9, June, 2018	有	2018/06
7	B. Kim, K. Toprasertpong, A. Paszuk, O. Supplie, Y. Nakano, T. Hannappel, M. Sugiyama	東京大学, Iluminau Univ	GaAsP/Si tandem solar cells: Realistic prediction of efficiency gain by applying strain-balanced multiple quantum wells	Solar Energy Materials and Solar Cells, v 180, p 303-10, June, 2018	有	2018/07
8	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Growth of InGaAs(P) in planetary metalorganic vapor phase epitaxy reactor using tertiarybutylarsine and tertiarybutylphosphine for photovoltaic application	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RD09, 2018	有	2018/08
9	T. Nakata, K. Watanabe, N. Miyashita, H. Sodabanlu, M. Giteau, Y. Nakano, Y. Okada, and M. Sugiyama	東京大学	Thin-film multiple-quantum-well solar cells fabricated by epitaxial lift-off process	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RF03, 2018	有	2018/08
10	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, S. Koseki, K. Matsumoto, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、大陽日酸(株)、産業技術総合研究所	24.5% efficient GaAs p-on-n solar cells with 120 μm h-1 MOVPE growth	Journal of Physics D: Applied Physics Vol. 52, 105501, 2018	有	2018/11
11	A. Paszuk, O. Supplie, M. Nandy, S. Brückner, A. Dobrich, P. Kleinschmidt, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, T. Hannappel	Iluminau Univ, 東京大学	Double-layer stepped Si(1 0 0) surfaces prepared in As-rich CVD ambience	Appl. Surf. Sci., 462, 1002-1007, Dec. (2018)	有	2018/12
12	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and	東京大学、大陽日酸(株)、産業技術総合研究所	High-Speed MOVPE Growth of InGaP Solar Cells	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 10, 480-486, 2020	有	2020/03

	M. Sugiyama					
13	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工大	Potential and Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	ECS Journal of Solid State Science and Technology, 5(2):Q68-Q73	有	2015/12
14	K. Lee, K. Araki, L. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Assessing material qualities and efficiency limits of III-V on silicon solar cells using external radiative efficiency	Prog. Photovolt: Res. Appl. (2016) DOI: 10.1002/pip.2787 (online)	有	2016/09
15	山口真史、 Kan-HuaLEE、 荒木建次、 小島信晃	豊田工大	(解説) 次世代太陽電池の高 効率化に関する考察	信学技報 116 卷 471 号 pp. 67-72	無	2017/02
16	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Katsumata, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	(Invited Review) Efficiency potential and recent activities of high- efficiency solar cells	Journal of Materials Research, 32(18);3445-3457	無	2017/09
17	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima, H. Yamada, Y. Katsumata	豊田工大	Analysis for efficiency potential of high - efficiency and next - generation solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 26, pp. 543-552 (2018). Top downloaded article 2017-2018	有	2017/11
18	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	(Topical Review) A review of recent progress in heterogeneous silicon tandem solar cells	Journal of Physics D: Applied Physic, 51(13); 133002	無	2018/03
19	A. Ubukata, H. Sodabanlu, K. Watanabe, S. Koseki, Y. Yano, T. Tabuchi, T. Sugaya, K. Matsumoto, Y. Nakano, and M. Sugiyama	大陽日酸 株、 東京大学、 産業技術総 合研究所	Accelerated GaAs growth through MOVPE for low-cost PV applications	Journal of Crystal Growth Vol. 489, 63-67, 2018	有	2018/05
20	K. Matsumoto, A. Ubukata, P. Guanxi, Y. Yano, T. Tabuchi, S. Koseki, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	大陽日酸 株、 東京大学	Design evolution of MOVPE reactors for improved productivity: Adaptation to nitrides and feedback to classical III-V	Journal of Crystal Growth Vol. 507, 134-138, 2019	有	2019/02
21	A. Ubukata, H. Sodabanlu, T. Aihara,	大陽日酸 株、 東京大学、	High throughput MOVPE and accelerated growth rate of GaAs for PV application	Journal of Crystal Growth Vol. 509, 87-90, 2019	有	2019/03

	R. Oshima, T. Sugaya, S. Koseki, K. Matsumoto, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	産業技術総 合研究所				
22	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸株	Fabrication of GaAs solar cells grown with InGaP layers by hydride vapor- phase epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, 08RD06 (2018)	有	2018/07
23	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸株	Improvement of heterointerface properties of GaAs solar cells grown with InGaP layers by hydride vapor-phase epitaxy	IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 9, pp.154-159 (2019)	有	2018/11
24	Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸株	Ultrafast growth of InGaP solar cells via hydride vapor phase epitaxy	Applied Physics Express, vol. 12, 052004 (2019)	有	2019/04
25	T. Aihara, T. Tayagaki, R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸株	Analysis of subcell open- circuit voltages of InGaP/GaAs dual-junction solar cells fabricated using hydride vapor phase epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics vol. 59, SGGF02 (2020)	有	2020/02
26	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸株	High-doping performance of sulfur and zinc dopants for tunnel diodes using hydride vapor phase epitaxy	IEEE Journal of Photovoltaics, 10, pp. 749~753, (2020)	有	2020/02
27	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸株	Evaluation of GaAs solar cells grown with different growth regimes by hydride vapor phase epitaxy	Journal of Crystal Growth, 537, 125600 (2020)	有	2020/03
28	Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸株	Effects of growth interruption on InGaP fabricated via hydride vapor phase epitaxy	Journal of Crystal Growth, 544, 125712 (2020)	有	2020/05
29	T. Tayagaki, R. Oshima, Y. Shoji, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所	Luminescence effects on subcell current-voltage analysis in InGaP/GaAs tandem solar cells	Journal of Photonics for Energy, 10, 025504 (2020)	有	2020/06
30	H. Suzuki et al.,	Univ. Miyazaki	Real-time observation of rotational twin formation during molecular-beam epitaxial growth of GaAs on Si (111) by x-ray diffraction	AIP Advances, Vol16, 035303	有	2016/03
31	H. Suzuki, Y. Ohshita, N. Kojima,	Univ. Miyazaki, Toyota	Effect of substrate orientation on strain relaxation mechanisms of	Jpn. J. Appl. Phys. 6 08MA06	有	2017/03

	A. Fukuyama, T. Iakri, M. Yamaguchi	Tech. Inst.	InGaAs layer grown on vicinal GaAs substrates measured by in situ X-ray diffraction			
--	---	----------------	--	--	--	--

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	宮下直也, Benoit Behaghel J.-F. Guillemoles 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフにより作製した GaInNAsSb 薄膜太陽電池 評価	第 63 回応用物理学会春季 学術講演会	2016/03
2	長岡恵里奈, 井上智之, トープラサートポ ン カシディット, 山下 大之, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭	東京大学	GaAs/Si 太陽電池におけ る変換効率・発電コスト の GaAs 層厚依存性	第 63 回応用物理学会春季 学術講演会	2016/03
3	宮下直也, 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフ による薄膜 GaInNAsSb 太陽電池の作製	第 13 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム (長岡)	2016/05
4	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Growth of C-Doped GaAs in Planetary MOVPE Reactor Using Tertiarybutyl-Arsine and Carbon- Tetrachloride	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-18), San Diego, USA	2016/07
5	木村大希, 宮下直也, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハ ッサネット, 中田達也, 杉山正和, 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフ 法により分離した GaAs 基板の表面清浄化手法の 検討	第 77 回応用物理学会秋季 学術講演会	2016/09
6	N. Miyashita, B. Behaghel, J.-F. Guillemoles and Y. Okada	東京大学	Enhancement of Photocurrent in Epitaxial Lift-Off Thin Film GaInNAsSb Solar Cells By The Light Confinement Structure	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
7	H. Xu, K. Toprasertpong A. Delamarre, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Effect of low-V/III- ratio metalorganic vapor-phase epitaxy on GaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
8	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effects of various dopants on properties of GaAs tunneling junctions and p-i-n solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10

9	宮下直也, 岡田至崇	東京大学	Enhancement of photocurrent in thin film dilute nitride cells separated by epitaxial lift-off technique	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
10	ソダーバンル ハ ッサネット、 渡辺健太郎、 生方映徳、 菅谷武芳、 杉山正和、 中野義昭	東京大学、 大陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	Extremely high growth rate MOVPE: GaAs growth for low-cost PV application	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
11	中田達也、 渡辺健太郎、 ソダーバンル ハ ッサネット、 木村大希、 宮下直也、 杉山正和、 岡田至崇、 中野義昭	東京大学	エピタキシャルリフトオフにより分離した GaAs 基板上の堆積物分析	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
12	M. Sugiyama, (Invited)	東京大学	III-V nano-epitaxial MOVPE for high-efficiency and low-cost solar cells	MRS Spring meeting 2017 (Apr. 17-21, 2017, Phoenix, USA) ES11.7.01.	2017/04
13	B. Kim, O. Supplie, T. Watanabe, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, Ilumenau Univ.	Double-layer step formation on Si (100) surfaces by moderate-temperature annealing coupled with TBA exposure	Compound Semiconductor Week 2017 (May 14-18, 2017, Berlin, Germany) P1.24.	2017/05
14	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	In-situ control over dimer orientation on Si(100) surfaces in arsenic ambient and its impact on the sublattice orientation of subsequently grown GaP	Compound Semiconductor Week 2017 (May 14-18, 2017, Berlin, Germany) D6.6.	2017/05
15	K. Watanabe, E. Nagaoka, D. Yamashita, K. Toprasertpong Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Development of GaAs//Si current-balanced dual junction solar cell integrated by surface-activated bonding	Proceedings of 2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration, LTB-3D 2017, p 53 (June 13, 2017, Tokyo)	2017/06
16	T. Nakata, K. Watanabe, H. Sodabanlu, D. Kimura, N. Miyashita, Y. Okada, Y. Nakano, and	東京大学	Analysis of Deposited Residues and Its Cleaning Process on GaAs Substrate after Epitaxial Lift-Off	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 238.	2017/06

	M. Sugiyama				
17	H. Sodabanlu, K. Watanabe, A. Ubukata, T. Sugaya, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学、 大陽日酸(株)	Extremely high-speed GaAs growth by MOVPE for low-cost PV application	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 650.	2017/06
18	B. Kim, K. Toprasertpong O. Supplie, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, Ilumenau Univ.	Efficiency of GaAsP/Si Two-junction Solar Cells with Multi- Quantum Wells: a Realistic Modeling with Carrier Collection Efficiency	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 722.	2017/06
19	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	In situ control over the sublattice orientation of heteroepitaxially grown single-domain GaP/Si:As virtual substrates for tandem absorbers	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 726.	2017/06
20	H. Sodabanlu, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	An Alternative Methodology to Investigate Properties of Minority Carriers: Effects of n Dopant Species	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017/09
21	宮下直也, 八木修平, 渡辺健太郎, 木村大希, ソダーバンル ハ ッサネット, 中田達也, 杉山正和, 岡田至崇	東京大学、 埼玉大学	基板再利用に向けた ELO 後基板の清浄化工程と再 成長の検討	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
22	中田達也, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハ ッサネット, 宮下直也, 岡田至崇, 中野義昭, 杉山正和	東京大学	エピタキシャルリフトオフ 工程により生じた GaAs 基板上堆積物の結晶化条 件の評価	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
23	X. Hao, H. Sodabanlu, K. Toprasertpong A. Delamarre, K. Watanabe, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	High Speed Growth for GaAs Solar Cells with Low V/III Ratio	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
24	T. Nakata, H. Sodabanlu, N. Miyashita,	東京大学	Thin-film multiple quantum wells solar cells fabricated by	27th International Photovoltaic Science and Engineering	2017/11

	Y. Okada, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama		epitaxial lift off process	Conference (PVSEC-27), Otsu	
25	H. Sodabanlu, M. Sugiyama, K. Watanabe, and Y. Nakano	東京大学	Growth of InGaAs(P) in planetary MOVPE reactor using TBA and TBP for photovoltaic applications	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017/11
26	K. Watanabe, M. Sugiyama, H. Sodabanlu, K. Toprasertpong Y. Nakano	東京大学	Current-matched design of GaAs//Si dual junction solar cells integrated by surface activated wafer bonding	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27) (Nov. 12-17, 2017, Biwako, Japan) 3TuPo.118	2017/11
27	B. Kim, O. Supplie, A. Pasazuk, T. Hannappel, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, Ilumenau Univ.	MOVPE preparation of GaP template on Si(100) with in-situ reflectance anisotropy monitoring: impact of reactor contamination	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27) (Nov. 12-17, 2017, Biwako, Japan) 3TuPo.130	2017/11
28	M. Sugiyama, (Invited)	東京大学	PHOTOVOLTAIC 4.0: Next- generation Renewable Energy Systems Powered by High-efficiency Low- cost Photovoltaics	Global Photovoltaic Conference 2018 (March 14~16, 2018, Gwangju, Korea).	2018/03
29	中田達也、 渡辺健太郎、 宮下直也、 ソダーバンル ハ サネット、 岡田至崇、 中野義昭、 杉山 正和	東京大学	エピタキシャルリフトオ フによる薄膜多重量子井 戸太陽電池の開発	第 65 回応用物理学会春季 学術講演会	2018/03
30	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, 太陽日酸, 産総研	Effects of V/III ratio on the quality of GaAs grown by MOVPE with extremely-high growth rate	第 65 回 応用物理学会 春 季学術講演会	2018/03
31	K. Watanabe, T. Nakata, N. Miyashita, H. Sodabanlu, M. Giteau, Y. Nakano, Y. Okada, and M. Sugiyama	東京大学	Light absorption enhancement in thin- film multiple quantum wells solar cells fabricated by epitaxial lift-off technique	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018/06
32	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 大陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	Impacts of V/III ratio on the quality and performance of GaAs p-n solar cells by ultrafast MOVPE	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018/06

33	O. Supplie, A. Heinisch, M. Sugiyama, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	In situ quantification of the Arsenic content in GaAsP graded buffer layers for III-V-on-Si tandem absorbers during MOVPE growth	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018/06
34	A. Paszuk, O. Supplie, M. Nandy, S. Brückner, A. Dobrich, P. Kleinschmidt B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	As-modified Si(100) Surfaces for III-V-on- Si Tandem Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018/06
35	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 太陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	GaAs p-n Solar Cells with MOVPE Growth Rate of 120 $\mu\text{m}/\text{h}$	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Brussels	2018/09
36	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 太陽日酸、 産総研	High growth rate MOVPE: InGaP growth for low- cost PV application	第 66 回 応用物理学会 春 季学術講演会	2019/03
37	M. Giteau, K. Watanabe, H. Sodabanlu, N. Miyashita, M. Sugiyama, A. Cattoni, S. Collin, J.-F. Guillemoles and Y. Okada	東京大学、 IPVF CNRS	Epitaxial Lift-Off of Ultrathin Heterostructures for Hot-Carrier Solar Cell Applications	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019/05
38	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 太陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	Effects of MOVPE growth parameters on high speed grown InGaP PV	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019/05
39	N. Miyashita, N. Ahsan, Y. Okada, R. Tatavarti, A. Wibowo, and N. Pan	東京大学、 MicroLink Devices	Epitaxial Lifted-Off Thin Film GaInP/GaAs/GaInNAsSb Lattice-Matched Triple Junction Solar Cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC46), Chicago, USA	2019/06
40	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 太陽日酸 (株)、 産業技術総 合研究所	High-speed MOVPE growth of InGaP solar cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC46), Chicago, USA	2019/06
41	H. Sodabanlu, A. Ubukata, T. Sugaya,	東京大学、 太陽日酸 (株)、	High Speed MOVPE for InGaP/GaAs Multijunction Solar	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and	2019/09

	K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	産業技術総合研究所	Cells	Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 9-12, 2019, Marseille, France) 3BV.1.46	
42	O. Supplie, A. Heinisch, A. Paszduk, A. Tummaliéh, M. Sugiyama, T. Hannappel	Ilumenau Univ., 東京大学	Optical in situ Quantification of the As versus P Content during GaAsP Graded Layer Growth for III-V- on-Si Tandems	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 9-12, 2019, Marseille, France) 3BV.1.52	2019/09
43	宮下直也, 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフ法を用いたエピ薄膜分離と基板再生技術開発 (招待講演)	第 67 回応用物理学会春季 学術講演会	2020/03
44	H. Sodabanlu, A. Ubukata, K. Watanabe, T. Sugaya, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学, 太陽日酸, 産総研	GaAs rear- heterojunction solar cell: application of high-speed MOVPE to tandem PV cells	第 67 回応用物理学会春季 学術講演会	2020/03
45	Z. Zhang, K. Watanabe, H. Sodabanlu, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Solid Epitaxial Lift- off (ELO) of GaAs Solar Cell on Silicon Substrate	第 67 回応用物理学会春季 学術講演会	2020/03
46	十楚博行	シャープ(株)	III-V 化合物太陽電池の未 来予想図	第 34 回 P V T E C 技術交 流会	2016/05
47	高本達也	シャープ(株)	Cost-reduction technologies for High- efficiency III-V Multijunction Solar Cells	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会 (パシフィコ 横浜)	2017/03
48	高本達也	シャープ(株)	III-V 族化合物半導体多接 合太陽電池の低コスト化 と応用	光機能材料研究会 (東京 理科大 森戸記念館)	2018/08
49	高本達也	シャープ(株)	「宇宙から地上へ」高性 能太陽電池の開発	2019 年応用物理学会秋季 学術講演会シンポジウム (北海道大学)	2019/09
50	M. Yamaguchi, K. H. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	(Invited) Potential and Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	228th ECS Meeting, Phoenix Convention Center and Hyatt Regency, AZ, USA	2015/10
51	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Present and future of III-V/Si tandem solar cells	PV Asia Scientific Conference 2015, Sands Expo and Convention Center, Singapore	2015/10
52	M. Yamaguchi, K. H. Lee, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工大	(invited) Potential and Recent Results of High- Efficiency III-V/Si Tandem Solar Cells	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), BEXCO, Busan, Korea	2015/11
53	L. Wang, H. Nakamura, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Optical properties of layered $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{Se}_3$ buffer material deposited on GaAs(111) substrate for III-V	25th International Photovoltaic Science&Engineering Conference (PVSEC- 25), Busan, Korea	2015/11

			/Silicon solar cell		
54	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Defect Engineering for Super High Efficiency III-V Compound MultiJunction Solar Cells	2015 MRS Fall Meeting & Exhibit, Hynes Convention Center/Sheraton Boston Hotel, MA, USA	2015/12
55	K. Lee, K. Araki, L. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Assessing Material Qualities and Efficiency Limits of III-V on Silicon Solar Cells Using Radiative Efficiency	CPV-12	2016/04
56	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Science and Technology of High Efficiency Solar Cells and Materials	229th ECS Meeting, San Diego, USA (招待講演)	2016/05
57	K. Lee, K. Araki, L. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Assessing Material Qualities and Efficiency Limits of III-V on Silicon Cells Using External Radiative Efficiency	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05
58	K. Lee, K. Nakamura, T. Kamioka, N. Kojima, H. Lee, L. Wang, K. Araki, Y. Ohshita, A. Ogura, M. Yamaguchi	豊田工大	Fabrication and performance analysis of a mechanical stack InGaP/GaAs//Si solar cell	43rd IEEE PVSC	2016/06
59	K. Lee, K. Araki, L. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Assessing material qualities and efficiency limits of III-V on silicon solar cells using external radiative efficiency	43rd IEEE PVSC	2016/06
60	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Recent Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	ICTMC-20, Halle, Germany (招待講演)	2016/09
61	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, K. Nakamura, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工大	Efficiency Potential of Future Generation Solar Cells	PRiME 2016, Honolulu, USA	2016/10
62	Y. Wang, H. Suzuki, Y. Yokoyama, T. Ikari, A. Fukuyama, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Selective-area growth of GaAs on patterned Si substrates by using chemical beam epitaxy	PVSEC-26 (ポスターアワード受賞)	2016/10
63	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	High-efficiency III-V triple junction solar cells and silicon solar	7th Korea Si PV Workshop, Busan, Korea (招待講演)	2016/11

			cells		
64	山口真史	豊田工大	次世代太陽電池の高効率化の可能性	2016年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会、福島県郡山市(招待講演)	2016/12
65	山口真史、 Kan-Hua Lee、 荒木建次、 小島信晃	豊田工大	次世代太陽電池の高効率化に関する考察	電子情報通信学会「電子デバイス研究会/シリコン材料・デバイス研究会共催」北海道札幌市	2017/02
66	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Katsumata	豊田工大	Efficiency Potential and Recent Activities of High Efficiency and Si Tandem Solar Cells	2017 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演)	2017/04
67	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	Efficiency Potential of Future Generation Solar Cells	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/05
68	Y. Wang, K. Araki, K. Nakamura, K. Lee, T. Kamioka, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Enhancement of Si Photovoltaic Module by Introducing III-V/Si Hybrid Configurations and Cost Evaluations under Various Cost Ratios of III-V/Si Photovoltaics	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC)	2017/06
69	Y. Wang, A. Yamamoto, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Molecular-beam epitaxy grown GaAs on Si substrate with a GaAs buffer layer grown by migration-enhanced epitaxy	第14回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2017/07
70	M. Yamaguchi, L. Zhu, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, H. Tampo, H. Shibata, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	Analysis for Future Generation Solar Cells and Materials	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017)	2017/09
71	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Katsumata	豊田工大	Analysis for Efficiency Potential of High Efficiency Solar Cells	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017)	2017/09
72	N. Kojima, L. Wang, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Novel Epitaxial GaAs Lift-Off Approach via van der Waals Interface in In ₂ Se ₃ Buffer Layer	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017) <ポスターアワード受賞>	2017/09
73	N. Kojima, L. Wang, Y. Ohshita,	豊田工大	SINGLE DOMAIN GROWTH OF LAYERED In ₂ Se ₃ ON Si(111) AS AN	The 27th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11

	M. Yamaguchi		INTERMEDIATE BUFFER LAYER IN GaAs ON Si	(PVSEC-27)	
74	Y. Wang, O. Elleuch, A. Yamamoto, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	GALLIUM ARSENIDE ON SILICON WITH A LOW-TEMPERATURE BUFFER LAYER GROWN BY MIGRATION-ENHANCED EPITAXY	The 27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017/11
75	山口真史	豊田工大	Si タンデム太陽電池の高効率化の可能性と研究開発動向	学振第 175 委員会 次世代シリコン太陽電池分科会 超高効率太陽電池分科会合同研究会 (招待講演)	2017/12
76	N. Kojima, Y. Wang, K. Kawakatsu, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	XRD Pole Figure Analysis of In ₂ Se ₃ Zinc-Blende Like (ZBL) Van der Waals Template for Epitaxial GaAs Lift Off	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/06
77	Y. Wang, A. Yamamoto, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Low-Temperature Grown Gallium Arsenide on Silicon by Using Migration-Enhanced Epitaxy	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/06
78	川勝 桂, Yu-Cian Wang, 小島信晃, 大下祥雄, 山口真史	豊田工大	層状化合物 In ₂ Se ₃ エピタキシャル膜の双晶ドメイン評価	第 15 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2018/07
79	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Mechanical epitaxial lift off of GaAs epitaxial layers by using cleavage of In ₂ Se ₃ layered structures	第 15 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2018/07
80	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	GaAs Epitaxial Layers Grown on Ga ₂ Se ₃ /In ₂ Se ₃ for Epitaxial Lift-off by Using Cleavage of α -In ₂ Se ₃ Layered Structures	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11
81	M. Yamaguchi, K. Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工大	Overview for Efficiency Potential of Solar Cells	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11
82	N. Kojima, Y. Wang, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Epitaxial GaAs Lift Off via III-VI Layered Compounds	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 46)	2019/06
83	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	GaAs grown on Si (111) by inserting metal selenides films	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 46)	2019/06

84	川勝桂、 Yu-Cian Wang、 小島信晃、 大下祥雄、 山口真史	豊田工大	Si (111) 微傾斜基板上 2D-In ₂ Se ₃ 成膜に基板オフ方向が与える影響	第 16 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2019/7
85	Y. Wang, N. Kojima, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Improved GaAs quality on 4° vicinal Si(111) with metallic selenides buffers by annealing GaAs at the initial growth	第 16 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2019/07
86	小島信晃、 Wang Yu-Cian、 川勝桂、 山本嵩勇、 大下祥雄、 山口真史	豊田工大	2D-In ₂ Se ₃ を利用した Si (111) 上 GaAs エピ層の薄層剥離	2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
87	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Metallic selenides as the buffers for GaAs grown on Si (111)	2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
88	川勝桂、 Yu-Cian Wang、 小島信晃、 大下祥雄、 山口真史	豊田工大	Si (111) 微傾斜基板のオフ方向が 2D-In ₂ Se ₃ 薄膜の結晶方位に与える影響	2019 年第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
89	N. Kojima, Y. Wang, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Heat-resistant 2D-metal Selenides as a Mechanical Cleavage Layer for the GaAs Lift-off	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019/11
90	K. Kawakatsu, Y. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Effect of the off-cut Direction of Si(111) Substrate on 2D-In ₂ Se ₃ Twin Formation as a Mechanical Cleavage Layer for the GaAs Lift-off	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019/11
91	Y. Wang, N. Kojima, K. Kawakatsu, A. Yamamoto, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工大	Multi-step Growth of GaAs on 4° Vicinal Si (111) with Metallic Selenide Buffers	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019/11
92	A. Ubukata, H. Sodabanlu, K. Watanabe, S. Koseki, Y. Yano, T. Tabuchi, T. Sugaya, K. Matsumoto, Y. Nakano, and M. Sugiyama	大陽日酸(株)、 東京大学、 産業技術総合研究所	Extremely Rapid GaAs Growth by MOVPE for Low-Cost PV Applications	18th US Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE-18), Santa Fe, USA	2017/07

93	生方映徳、 相原健人、 ソダーバンル ハッサネット 大島隆治、 菅谷武芳、 小関修一、 矢野良樹、 田淵俊也、 松本功、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 (株)、産業 技術総合 研究所、 東京大学	高速成長 GaAs の低 温フォトルミネセン ス特性	第 65 回応用物理学 会春季学術講演会	2018/03
94	A. Ubukata, T. Aihara, H. Sodabanlu, R. Oshima, T. Sugaya, K. Watanabe, S. Koseki, Y. Yano, Y. Nakano, M. Sugiyama	大陽日酸 (株)、産業技術 総合研究 所、 東京大学	MOVPE の歩留まりお よび太陽電池応用 GaAs の高速成長の検 討	19 th -Int. Conf. Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE)- XIX	2018/06
95	生方映徳、 相原健人、 ソダーバンル ハッサネット 大島隆治、 菅谷武芳、 矢野良樹、 田淵俊也、 松本功、 渡辺健太郎、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 (株)、産業技術 総合研究 所、 東京大学	GaAs 太陽電池構造の 超高速成長	学振 175 委員会	2018/07
96	生方映徳、 相原健人、 ソダーバンル ハッサネット 大島隆治、 菅谷武芳、 渡辺健太郎、 小関修一、 矢野良樹、 田淵俊也、 松本功、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 (株)、産業技術 総合研究 所、 東京大学	超高速成長 GaAs の 低温フォトルミネセ ンス特性	第 79 回応用物理学 会秋季学術講演会	2018/09
97	生方映徳、 ソダーバンル ハッサネット 相原健人、 大島隆治、 渡辺健太郎、 小関修一、 菅谷武芳、 松本功、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 (株)、東京大 学、産業技術 総合研究 所	Extremely rapid Growth of GaAs and P-based materials by MOVPE for low-cost PV applications	電子材料シンポジウ ム	2018/10

98	生方映徳、 菅谷武芳、 大島隆治、 牧田紀久夫、 庄司靖、 小関修一	大陽日酸 ㈱、 産業技術 総合研究 所	GaAs および InGaP 太 陽電池の高速成長	175 委員会	2019/07
99	生方映徳、 大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 ソダーバナル ハッサネット 渡辺健太郎、 小関修一、 菅谷武芳、 松本功、 中野義昭、 杉山正和	大陽日酸 ㈱、 東京大 学、産業 技術総合 研究所	Comparison of growth method of III-V compounds for low-cost III-V compound semiconductor PV applications	電子材料シンポジウ ム	2019/10
100	大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Fabrication of p-i-n GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
101	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Characterization of GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy in a horizontal reactor	IEEE photovoltaics specialist conference 44	2017/06
102	菅谷武芳	産業技術総 合研究所	スマートスタックと HVPE による低コスト多接合太 陽電池の研究開発	学振 175 委員会超高効率 太陽電池分科会	2017/07
103	大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	ハイドライド気相成長法 による低コスト GaAs 太陽 電池の作製	第 14 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2017/07
104	大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	HVPE 法を用いた低コスト III-V 族太陽電池の高均一 成長	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
105	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Fabrication of GaAs solar cells grown with InGaP window layers by hydride vapor phase epitaxy	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
106	K. Makita, R. Oshima, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Fabrication of InGaP Solar Cells with Hydride Vapor Phase Epitaxy	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
107	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	A comparison of HVPE and MBE growth technologies for GaAs solar cell structures	2018 MRS Spring meeting	2018/04
108	R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸㈱	Improvement of heterointerface properties of GaAs solar cells grown with InGaP layers by hydride vapor-phase epitaxy	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06

109	大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法で作製した GaAs 太陽電池のヘテロ界面品 質の向上	第 15 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2018/07
110	大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法を用いた GaAs 太 陽電池のヘテロ界面の検 討	第 79 回応用物理学会秋季 学術講演会	2018/09
111	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	ハイドライド気相成長法 による InGaP 太陽電池の 高速成長	第 79 回応用物理学会秋季 学術講演会	2018/09
112	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法を用いた InGaP 結 晶の超高速成長と太陽電 池応用	第 1 回結晶工学×ISYSE 合同研究会	2018/11
113	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法における InGaP 結 晶の成長速度の高速化	第 66 回応用物理学会春季 学術講演会	2019/03
114	大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法によるトンネル接 合に向けた高濃度ドーピ ングの検討	第 66 回応用物理学会春季 学術講演会	2019/03
115	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata, T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Observation of dislocations in graded buffer layers of IMM single junction InGaAs solar cells by two- photon excitation photoluminescence	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
116	大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法で作製した InGaP/GaAs 2 接合太陽電 池	第 16 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2019/07
117	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法による InGaP 太陽 電池の作製と AlInGaP の 成膜検討	第 16 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2019/07
118	Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata, T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Influence of growth interruption on InGaP grown by hydride vapor phase epitaxy	The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2019/07
119	T. Sugaya	産業技術総 合研究所	招待講演: High speed growth of III-V materials using MOVPE and HVPE for low cost photovoltaics	The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2019/08

120	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	Evaluation of GaAs solar cells grown with different growth regimes by hydride vapor phase epitaxy	The 19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2019/08
121	R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	招待講演：Recent progress on HVPE-grown III-V solar cells with extremely high growth rates	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials	2019/09
122	T. Aihara, T. Tayagaki, R. Oshima, Y. Shoji, T. Sugaya	産業技術総合研究所	Characterization of subcell open-circuit voltages in InGaP/GaAs tandem solar cells fabricated using hydride vapor phase epitaxy	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials	2019/09
123	大島隆治、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法を用いた GaAs の超高速成長	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
124	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法における AlInGaP のエピタキシャル成長	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/09
125	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	InGaP solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy for application to low-cost high-efficiency photovoltaics	第 38 回電子材料シンポジウム	2019/10
126	菅谷武芳	産業技術総合研究所	依頼講演：太陽光発電の国内外における状況と今後の研究開発について	電気学会東京支部茨城支所	2019/10
127	Y. Shoji, R. Oshima, T. Aihara, K. Makita, A. Ubukata. T. Sugaya	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	Growth of AlInGaP by hydride vapor phase epitaxy using AlCl ₃ for application to InGaP solar cells	The 29th International PV Science and Engineering Conference	2019/11
128	T. Sugaya, R. Oshima, Y. Shoji, K. Makita, A. Ubukata	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	High-speed growth of III-V materials by HVPE for low-cost smart stacked multijunction solar cells	2019 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS)	2019/12
129	大島隆治、 相原健人、 太野垣健、 庄司靖、 牧田紀久夫、 生方映徳、 菅谷武芳	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法を用いた 2 接合セルの EL 発光による開放電圧解析	第 67 回応用物理学会春季学術講演会	2020/03
130	庄司靖、 大島隆治、 牧田紀久夫、	産業技術総合研究所、 大陽日酸(株)	HVPE 法による AlAs の結晶成長および ELO の実証	第 67 回応用物理学会春季学術講演会	2020/03

	生方映徳、 菅谷武芳				
131	Y. Shoji, R. Oshima, K. Makita, A. Ubukata, T. Sugaya	産業技術総 合研究所、 大陽日酸(株)	Epitaxial Lift-Off of the Single-Junction GaAs Solar Cells Grown via Hydride Vapor Phase Epitaxy	47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2020/06
132	徳田、鈴木、 福山、碓、他	宮崎大学	表面光起電力法を用いた GaAs/Si 太陽電池におけ るバッファ層の評価	第 12 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2015/05
133	原田、鈴木、 福山	宮崎大学	MBE 法による Si (11L) 基板 上の GaAs 成長と結晶性評 価	第 45 回結晶成長国内会議	2015/10
134	奥谷、鈴木、 福山、碓、他	宮崎大学	MBE 法を用いて高指数 Si (11L) 基板上に作製した GaAs の結晶評価	第 13 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジ ウム	2016/05
135	I. Harada H. Suzuk, T. Ikari, A. Fukuyama	Univ. Miyazaki	Crystal Growth of GaAs on High indexed Si Substrates for Multi- Junction Solar Cells	PVSC43	2016/05
136	H. Suzuki, T. Ikari, A. Fukuyama, et al.	Univ. Miyazaki	The influence of substrate orientation on strain relaxation mechanisms of InGaAs layer grown on vicinal GaAs substrates measured by in situ X- ray diffraction	PVSEC-26	2016/10
137	Yu-Cian Wang, H. Suzuki, M. Yamaguchi et al.	Toyota Tech. Inst. Univ Miyazaki	Selective-area growth of GaAs on patterned Si substrates by using chemical beam epitaxy	PVSEC-26	2016/10
138	H. Suzuki, T. Ikari, A. Fukuyama, et al.	Univ. Miyazaki	Ge thin film growth on Si (001) substrates using tBGe for buffer layer of GaAs/Si structure	7 th JSPS Si symposium	2016/11
139	河野将大, 鈴木秀俊等	宮崎大学	新規 Ge 原料 t-C ₄ H ₉ GeH ₃ の Si もしくは GaAs 基板上 における表面反応過程	2016 年真空・表面科学合 同講演会	2016/11
140	戒能賢治, 碓哲雄, 福山敦彦, 鈴木秀俊等	宮崎大学	Si 基板上 GaAs 薄膜のレ ーザーアニールによる結 晶性への影響	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
141	奥谷哲, 碓哲雄, 福山敦彦, 鈴木 秀俊等	宮崎大学	MBE 法を用いて作製した Ga 事前供給 GaAs on Si (113) の結晶性の評価	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/03
142	H. Suzuki, et al.	Univ. Miyazaki	In-situ observation of lattice relaxation processes by X-ray diffraction during GaAsSb/GaAs (001) growth	2017 EMRS Spring meeting	2017/05

143	秋田裕紀, 鈴木 秀俊等	Univ. Miyazaki	tBGe を用いたパルスジェ ットエピタキシー装置に よる Si(001) 基板上への Ge 薄膜の成長	第 78 回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/09
144	T. Okuya, T. Ikari, A. Fukuyama, H. Suzuki, et al.	Univ. Miyazaki	THE EFFECTS OF Ga PRE- EVAPORATION ON THE CRYSTAL QUALITY OF GaAs THIN FILM GROWN ON Si (113) BY MOLECULAR BEAM EPITAXY	PVSEC-27	2017/11
145	K. Kaino, T. Ikari, A. Fukuyama, H. Suzuki, et al.	Univ. Miyazaki	INFLUENCE OF LASER ANNEALING ON CRYSTAL QUALITY OF GaAs THIN FILMS GROWN ON SI (001) SUBSTRATE”	PVSEC-27	2017/11
146	M. Kawano, Y. Ohshita, H. Suzuki, et al.	Univ. Miyazaki, Toyota Tech. Inst.	SURFACE REACTION PROCESS OF GE THIN FILM ON Si AND GaAs SUBSTRATE BY PULSED-JET EPITAXY APPARATUS	PVSEC-27	2017/11
147	H. Suzuki, O. Elleuch, Y. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi, et al.	Univ. Miyazaki, Toyota Teck. Inst.	FFECTS OF GE BUFFER LAYER PREPARED BY PULSE-JET EPITAXY ON CRYSTAL QUALITY OF GAAS FILM GROWN ON SI (001) SUBSTRATE	PVSEC-27	2017/11
148	金子翔一、 鈴木秀俊等	宮崎大学	低温成長させた Si(001) 基板上 GaAs の結晶性に対 するレーザーアニールの 影響	第 46 回結晶成長国内会議	2017/11

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	大陽日酸 株式会社	「高性能・高信頼性太陽光発電の 発電コスト低減技術開発」の受託 並びに研究開始のお知らせ	大陽日酸㈱株式会社 ホームページ http://www.mocvd.jp/jp/common/pdf/20170116.pdf	2017/1/16
2	産業技術 総合研究 所	ガリヒ素太陽電池 安価な材料で製 造 HVPE 装置開発	化学工業日報、B 版 1 面	2017/06
3	産業技術 総合研究 所	高効率 GaAs 太陽電池 低コスト製 造装置開発	日刊産業新聞、朝刊 11 面	2017/06
4	産業技術 総合研究 所	効率 20.3% の「ガリヒ素太陽電 池」を低コストで製造	日本経済新聞電子版	2017/06
5	産業技術 総合研究 所	「成膜のコストを 10 分の 1 に」 GaAs 太陽電池の普及へ、低コスト な製造法を開発	Yahoo! ニュース	2017/06
6	産業技術 総合研究 所	成膜のコストを 10 分の 1 に」 GaAs 太陽電池の普及へ、低コスト な製造法を開発	スマートジャパン	2017/06
7	産業技術 総合研究	高効率太陽電池、用途広く 低コ スト製造装置、日経産業新聞	朝刊 15 面	2017/06

	所			
8	産業技術 総合研究 所	ガリウムヒ素系化合物半導体太陽 電池の低コスト成長技術	次世代の太陽電池・太陽光発電—その 発電効率向上, 用途と市場の可能性 —、技術情報協会、pp. 166-175.	2018/04
9	産業技術 総合研究 所	化合物半導体の高速成長と太陽電 池応用	応用物理、vol. 89, No. 6 pp. 333～ 337.	2020/06

【その他】

	年度	タイトル	受賞者	受賞年月
1	2016	ポスターアワード (26 th PVSEC 薄膜太陽電池部 門)	豊田工大	2016/10/28
2	2017	ポスターアワード (33 rd EU PVSEC - Concentrator and Space Photovoltaics-)	豊田工大	2017/9/29
3	2017	第6回結晶工学未来塾(2017)奨励賞(応用物理 学会 結晶工学分科会)	相原健人、産業技 術総合研究所	2017/11/2
4	2018	第一回結晶工学×ISYSE 合同研究会奨励賞	庄司靖、産業技術 総合研究所	2018/11/29
5	2018	応用物理学会講演奨励賞	庄司靖、産業技術 総合研究所	2019/3/9

C 低コストモジュール開発（シャープ株式会社、豊田工業大学、パナソニック株式会社、宮崎大学）

1. 成果詳細

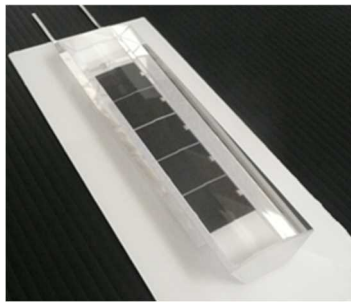
Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a1. 低コストモジュール開発【シャープ】

本テーマでは、「A 低コストセル技術開発」および「B 低コスト化プロセス技術開発」で開発する低コスト化合物太陽電池セル技術を用い、モジュール効率 30%超で、将来の発電コスト目標（7 円/kWh@2030 年）達成に寄与し得るモジュール技術の開発に取り組んだ。

開発は化合物 3 接合型セルを用いた低倍集光モジュールと、本委託業務のテーマ A で開発した InGaP/GaAs₂ 接合セルとシリコンセルとを機械的に接合したメカニカルスタックセルを用いたメカニカルスタックモジュールの 2 種について実施した。

低倍集光モジュールは設定目標の許容角±15° で約 1.9 倍の発電量を得ることができた。

メカニカルスタックモジュールについては、テーマ A で開発したセル構造を基本とした 4 端子構造とした。また、上段の化合物 2 接合型セルはテーマ B で開発した基板再利用法を使用して作製したものを使用した。結果、化合物 2 接合セルの変換効率が 25.3%、シリコンセルの効率が 5.4%となり、モジュール合計では、30.7%を得た。（いずれも自社測定値。モジュールを上面視した時に化合物 2 接合セルまたはシリコンセルもしくはその両方が配置されている部分の外周域を受光部面積として計算した値）。これらのモジュールは屋外評価発電量測定を実施し発電量の試算を行った。



	レンズあり	レンズなし
Voc [V]	3.06	3.01
Isc [A]	0.542	0.277
FF	0.806	0.825
Pmax [W]	1.337	0.689

図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a1-1 低倍集光モジュールの外観（左）、電気特性（右）



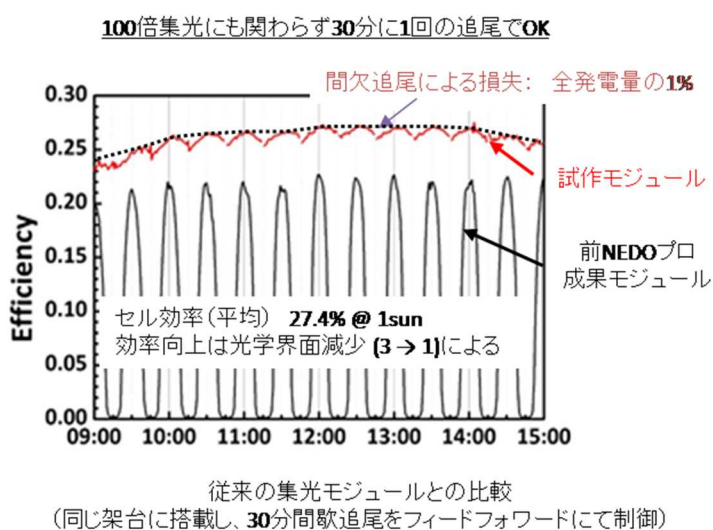
	化合物2接合モジュール		シリコンモジュール	メカニカルスタックモジュール
	ストリング1	ストリング2		
Voc [V]	9.68	9.68	0.70	—
Isc [A]	0.39	0.38	2.40	—
FF	0.83	0.83	0.78	—
Pm [W]	3.11	3.04	1.31	7.46
Eff [%]	12.8	12.5	5.4	30.7

図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a1-2 メカニカルスタックモジュール外観（左）、電気特性（右）

Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a2 低コストモジュール開発【豊田工大】

現状で高コストなⅢ-Vセルを低コスト化するには、集光によりセルの使用量（面積）を減らす必要がある。一方、集光することにより開口角が必然的に減るため、これを抑制するために広角化技術が重要となる。大幅な広角化が実現できれば、低コスト追尾架台の粗い追尾でも動作できるモジュールが可能

となる。そこで、15～30秒毎の追尾が必要であった従来技術に対し、二桁以上粗い15分～30分間隔でも動作する広角設計光学系を用いた低コスト集光モジュールの開発を実施した。開発した集光モジュールの光学系は(1)集光部、(2)ホモジナイザ部からなり、誘電体の一体化構造となっている。誘電体レンズの屈折率により追尾ずれに伴うスポットの移動距離を低減し、ホモジナイザ部の多重反射による混合作用で、どこにスポットが入射しても、出口にて一様な強度および色収差補正が可能となった。試作したモジュール(単眼モジュール)は屋外(宮崎大学)で実証試験した。モジュール効率は、屋外測定にて28.5%の高効率を得られた。比較のために、同じく凸型のレンズを持っている単眼の集光モジュールも同じ追尾面に搭載し、特性を比較した。30分ごとの間歇追尾動作での発電特性を検証した結果を図III-2-(ロ)-C-1-a2-1に示す。間歇追尾を行うと従来型の集光モジュールは発電量が大幅に低下するが、許容入射角を拡大した広角設計光学系を用いた本モジュールでは発電量の低下は1%とごく僅かであった。



図III-2-(ロ)-C-1-a2-1 30分ごとの間歇追尾動作での発電特性を検証した結果

広角集光レンズの設計技術を活用し、無追尾集光モジュールの開発を実施した。あらかじめ設定した許容入射角の光線がセルのエッジに照射する条件から、レンズ高さを初期値として定めた。このレンズ高さは従来型よりも大幅に低くなった。また、無追尾の固定設置を考えると、例えば真南傾斜面に設置した場合、年間積算日射量は、真上からよりも、30°程度斜めに入射する太陽光成分の方がむしろ大きい。そこで、セルに入射する光束を最大化するレンズ形状を最適値問題として求める手法をとった。設計検証の最終試作として2種類のミニモジュールを試作した。一つは効率志向タイプ(Design A)で、許容入射角は±55°とやや狭く設計し、光軸上での発電効率が高くなるように設計している。もう一つは広角・曲面对応タイプ(Design B)で、光軸上の効率を落としつつ、斜めから入射した太陽光に対し高い発電効率となるように設計している(許容入射角±77°)。両者の外観を図III-2-(ロ)-C-1-a2-2に、入射角特性(設計値)を図III-2-(ロ)-C-1-a2-3に示す。モジュール効率は、効率指向型設計(Design A)にて32.84%(産総研測定)が得られ、最終目標30%を達成した。年間光学的効率をシミュレーションして、今回試作した無追尾低倍集光モジュールと非集光平板モジュールを比較した結果を表III-2-(ロ)-C-1-a2-1に示す。設置面によって年間日射量は異なる入射角分布を示すが、本モジュールは設置形態によらず約80%の年間光学的効率を得られ、平板モジュールに対する比率もほぼ一定(0.84)であった。こ

これは、集光によりセル使用量が 1/1.76 (57%) になったにも関わらず、同じセルを用いた平板モジュールの 84%の性能を維持できることを示している。

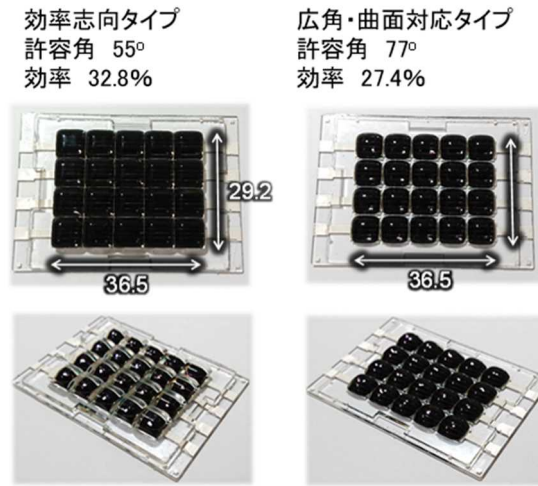


図 III-2-(ロ)-C-1-a2-2 試作した無追尾集光モジュールの外観

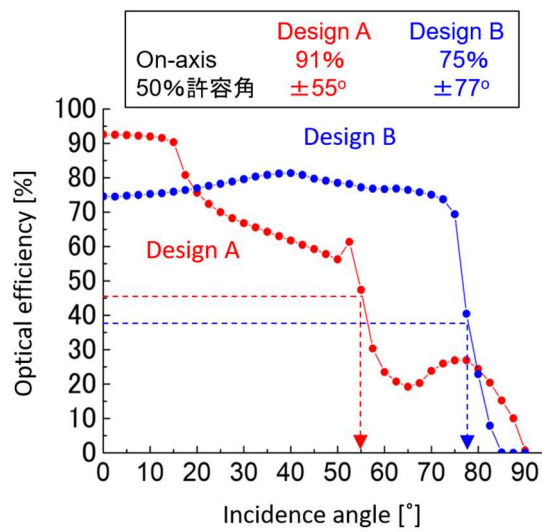


図 III-2-(ロ)-C-1-a2-3 試作した無追尾集光モジュールの入射角特性 (設計値)

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a2-1 無追尾集光モジュールの各設置モードでの年間発電量(平板比)

	低倍集光 CPV [%]	平板 PV [%]	低倍集光/平板 [-]
車載面 (地面粗度は宮崎市並)	78.4	93.3	0.840
全国最適傾斜面 (南向き設置)	78.8	93.8	0.840
ビル壁面 (8方位加重平均)	79.1	93.7	0.844
東西1軸水平追尾 (バックトラッキング)	80.2	94.8	0.846

無追尾低倍集光モジュールのコスト最適化を試算した結果、試作品よりもセルサイズを2割ほど小さくすることにより、セル単品のコストを差し引いたモジュール化コストは16円/Wになると算定された。中国市場での非集光平板モジュール化コスト12円/Wには及ばないが、提案当初の目標22円/Wはクリアした。セルコスト(非集光換算)が11円/W以上であれば、年間発電量から見ても無追尾低倍集光モジュールのコストメリットが出ると算定され、現行のⅢ-V系セルのコストはこれより1桁以上高いので、無追尾低倍集光モジュールはコストメリットの点で十分に魅力的であると判断できる。

さらに、上記広角集光モジュール技術はトヨタ自動車(車載モジュール製品開発)、パナソニック(プラスチック型集光発電システム製品開発)に技術移転した。

Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a3. 低コストモジュール開発【パナソニック】

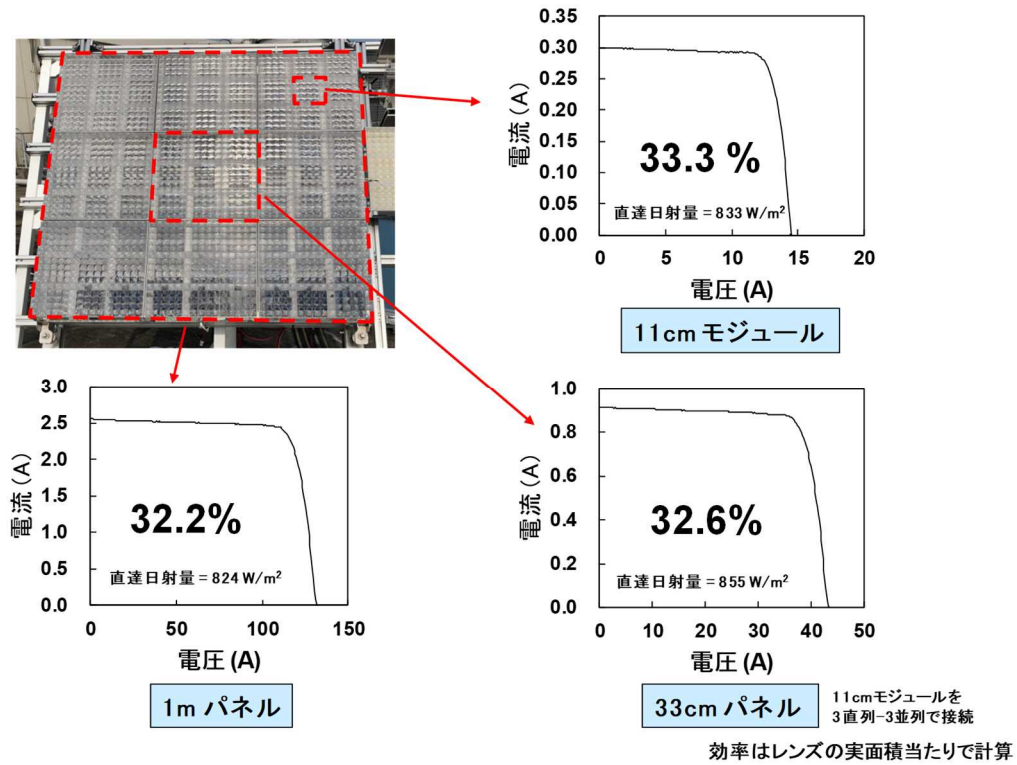
本研究開発では、超高効率発電素子の大きさを最適化し、構成部品のほとんどを低価格で軽量のプラスチック材料にすることで、材料コスト、重量、および体積を従来型CPVよりも約1桁低い、高効率なプラスチックレンズ一体型セルモジュール(Plastic lens integrated Ⅲ-V compound semiconductor cell module、略称PIC)の実現を目指してきた。この実現はモジュールの製造コスト低減に加えて、トラッカーや輸送・設置といったBOSコストの低減にも寄与し、発電コスト目標7円/kWhを達成できると考え、本研究成果でその実現の見通しを得た。以下に、研究開発成果を報告する。

(1) 高効率モジュール設計技術の成果

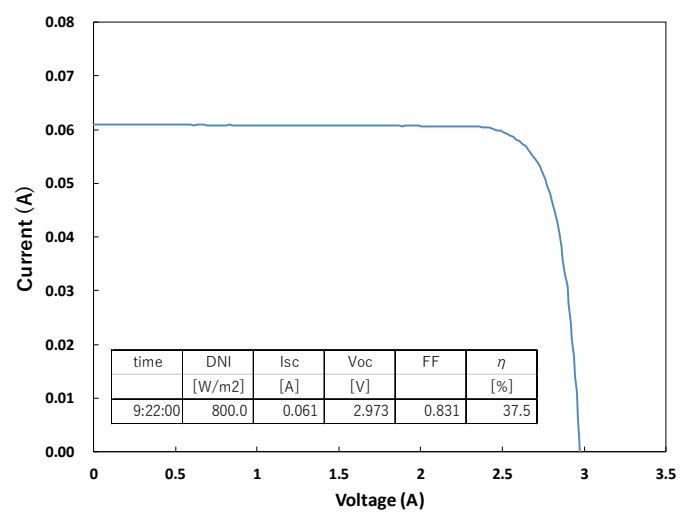
PIC製造プロセスの低コスト化と長期信頼性を確保したPICモジュール構造(薄ガラス回路基板構造)にて、1m角パネルを完成し、大阪門真市にて屋外効率32.2%を確認した。また、さらなる光学損失の向上を図るべく、上記構造から二次レンズを除去した改良構造にて、屋外効率37.5%を約2cm角のモノモジュールで確認した。

(2) 低コストアSEMBル技術の成果

上記改良構造にて、システムコスト試算(2030年、100MW/年生産)を行い、119円/W及び7円/kWh実現の見通しを得た。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a3-1 PIC パネルの変換効率



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a3-2 2次レンズレス型モジュールの I-V 特性

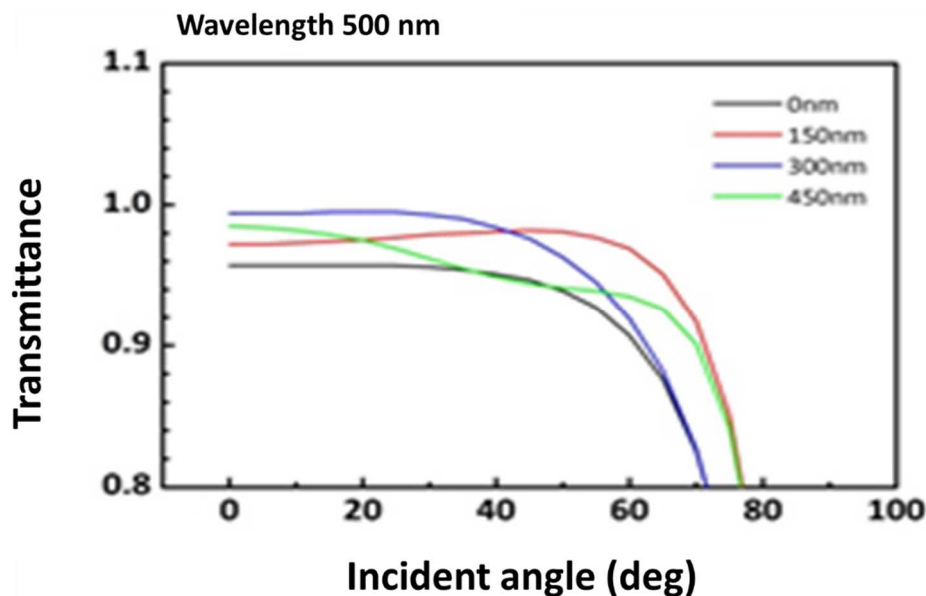
表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-a3-1 PIC 太陽電池システムのコスト試算結果

	モジュール効率 (セル効率)	モジュール コスト(目標)	システム コスト(目標)	発電 コスト(目標)
2020年	38% (48%)	71.16円/W (< 80円/W)	177.84円/W (< 190円/W)	9.48円/kWh (< 14円/kWh)
2030年	48% (53%)	32.74円/W (< 40円/W)	118.57円/W (< 125円/W)	6.97円/kWh (< 7円/kWh)

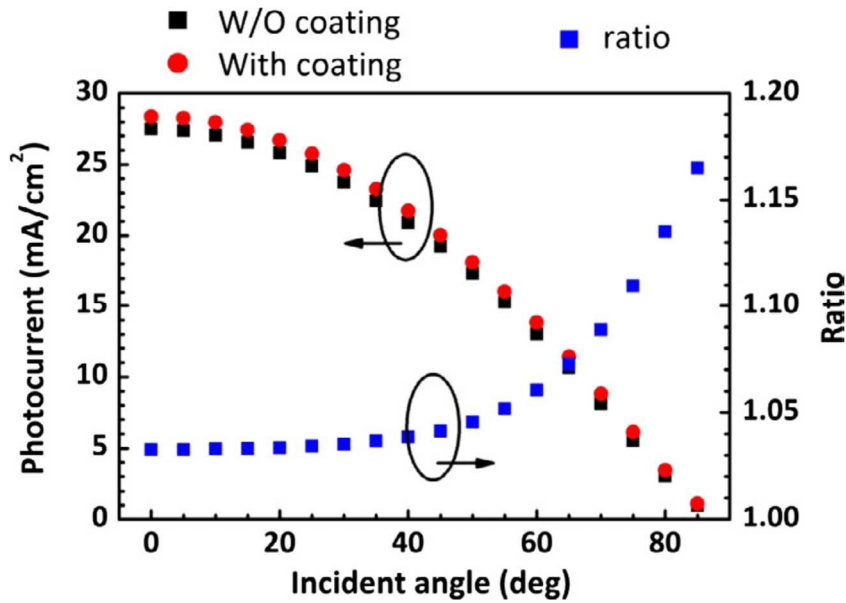
III-2-(ロ)-C-1-a4. 低コストモジュール開発【宮崎大学】

シリカベース反射防止兼防汚コート of 反射防止効果について、特性方程式を用いたシミュレーションにより評価した。シミュレーションには反射防止兼防汚コートとガラス基板の屈折率の波長依存性を用いて透過率の計算を行い、Si 太陽電池の分光感度を用いて光電流の計算を行った。反射防止兼防汚コートの透過率は光の干渉により膜厚に依存した。図III-2-(ロ)-C-1-a4-1 に各膜厚における波長 500 nm における透過率の入射角度依存性を示す。150nm の反射防止兼防汚コートでは基板に高角度（基板に垂直方向を 0 度とする）から入射する光をより多く取り込むことが分かった。これは、屋外評価において入射角度が増加する朝および夕の発電量が増加することと一致した。図III-2-(ロ)-C-1-a4-2 に、光の入射角度と、コート塗工有りおよび無しの太陽電池における電流シミュレーション値の関係を示す。左縦軸が電流値、右縦軸がコートした太陽電池の電流値をコートしていない太陽電池の電流値で除した値 (Ratio) を示す。斜めから入射した場合に Ratio が大きい値を示しコートの効果がより大きくなることがわかった。同様のシミュレーションを III-V 化合物半導体太陽電池モジュールに対して行い、最適膜厚の検討を行った。図III-2-(ロ)-C-1-a4-3 に、III-V 化合物半導体太陽電池を構成するトップサブセルとミドルサブセルで発生する光電流の反射防止兼防汚コート膜厚依存性を示す。III-V 化合物半導体太陽電池は構成するサブセルによって太陽光スペクトルの吸収領域が異なるため、各サブセルで発生する光電流が最大となる膜厚が異なった。取り出せる電流はサブセルで発生する光電流の最小値となるため、最適膜厚は 100nm であった。シリカベースコートは、透過率シミュレーションにより計算された最適膜厚を用いることで、III-V 化合物太陽電池モジュールの短絡電流が最大で 5.6% 増加することが期待され、III-V 化合物太陽電池モジュール出力の増加に寄与する。

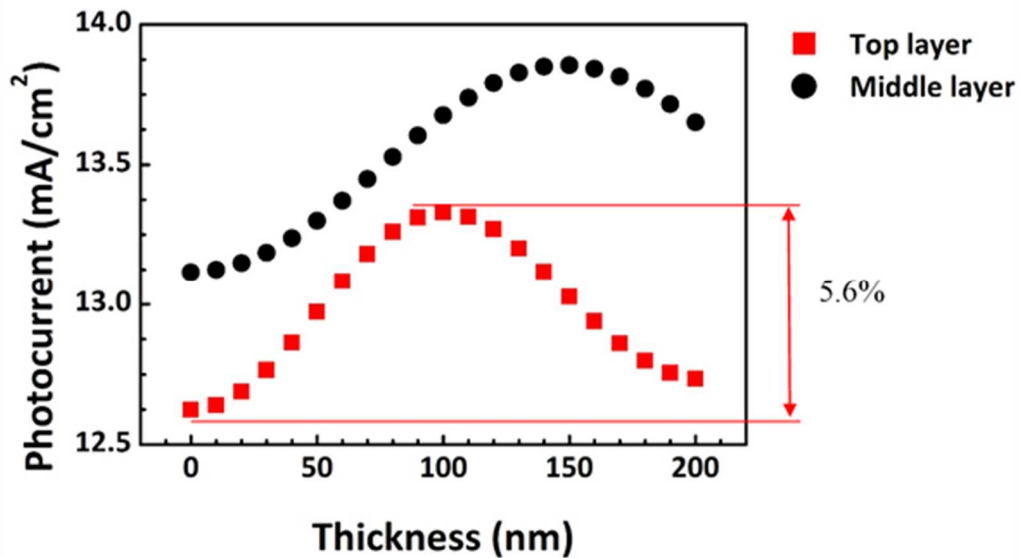
以上の成果より、反射防止コートは研究協力機関におけるモジュール構造に採用され、変換効率 30% を超えるモジュールが開発された。



図III-2-(ロ)-C-1-a4-1 各膜厚における透過率の入射角度依存性



図III-2-(ロ)-C-1-a4-2 光の入射角度とコート塗工有および無しの太陽電池における電流シミュレーション値の関係。左縦軸が電流値、右縦軸がコートした太陽電池の電流値をコートしていない太陽電池の電流値で除した値 (Ratio) を示す。



図III-2-(ロ)-C-1-a4-3 III-V化合物半導体太陽電池を構成するトップサブセルとミドルサブセルで発生する光電流の反射防止兼防汚コート膜厚依存性

III-2-(ロ)-C-1-b1. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価【シャープ】

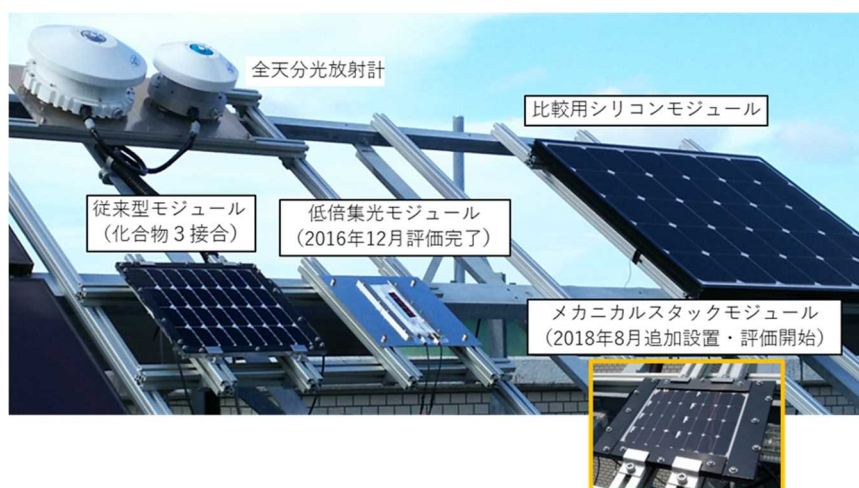
開発したモジュール（低倍集光モジュール、メカニカルスタックモジュール）に加えて、別途作製した化合物 3 接合型セルを用いたモジュール（化合物従来型モジュール）、市販のバックコンタクト型単結晶シリコンモジュール（シリコンモジュール）を使用した屋外発電量測定を実施した。

作製した化合物3接合型モジュールの変換効率は31.2%でモジュールとしては世界最高効率となった。（2016年5月発表当時、シャープおよびNEDO調べ）

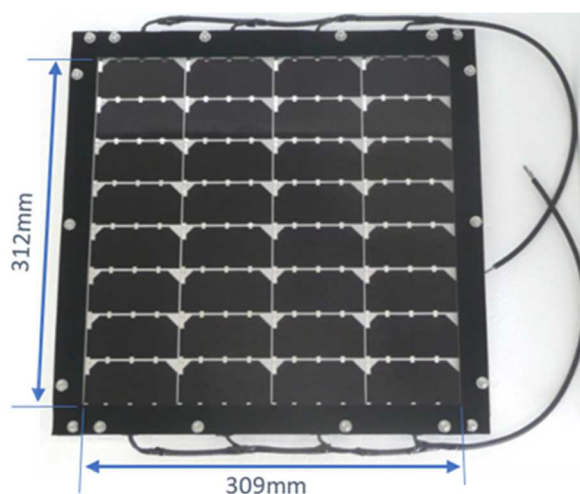
屋外での発電量測定の結果、評価期間全体での発電量はそれぞれシリコンモジュールと比較して化合物従来型モジュールは151%、メカニカルスタックモジュールは128%の結果を得た。なお、得られた発電量データは宮崎大学と共有し、該大学において実施した各種モジュールの発電量試算に用いた。

一方、太陽電池量産性の評価も本項で実施した。評価は化合物3接合型で実施し、約2500枚のエピウエハの作製、これらのセル化により評価した。結果、変換効率の平均は35.0%となり目標としていた34%を上回る結果となった。

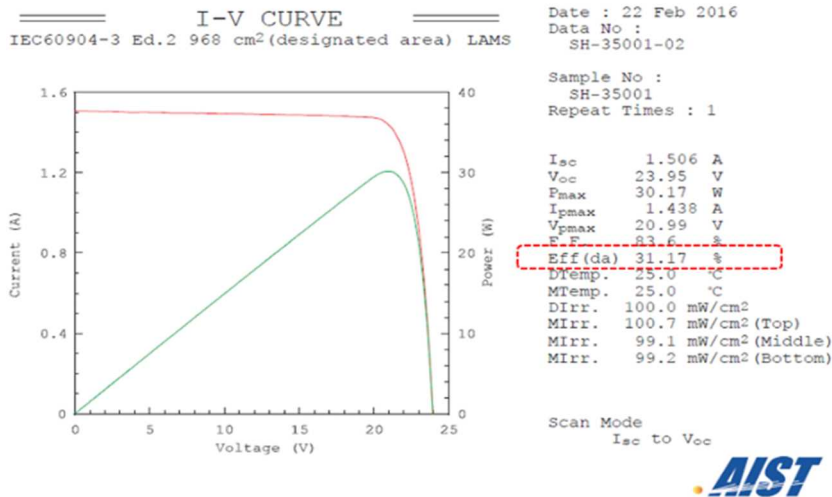
また、本項では太陽電池の新たな応用先として期待される移動体の動力用電源用途について、その可能性の検証、課題の確認、実使用状態での発電量等を検証するために市販車両に太陽電池を搭載して公道走行試験を実施した。なお、モジュールは前述した量産性評価に用いたセルを使用し作製した。また、車両の準備、改造、太陽電池モジュールの車両への取り付け、走行試験およびデータ収集は本委託事業に協力機関として参画のトヨタ自動車株式会社、日産自動車株式会社に依頼して実施した。トヨタ自動車では、プラグインハイブリッド車のプリウスPHVに約860W、日産自動車では電気自動車のe-NV200に約1150W搭載した。



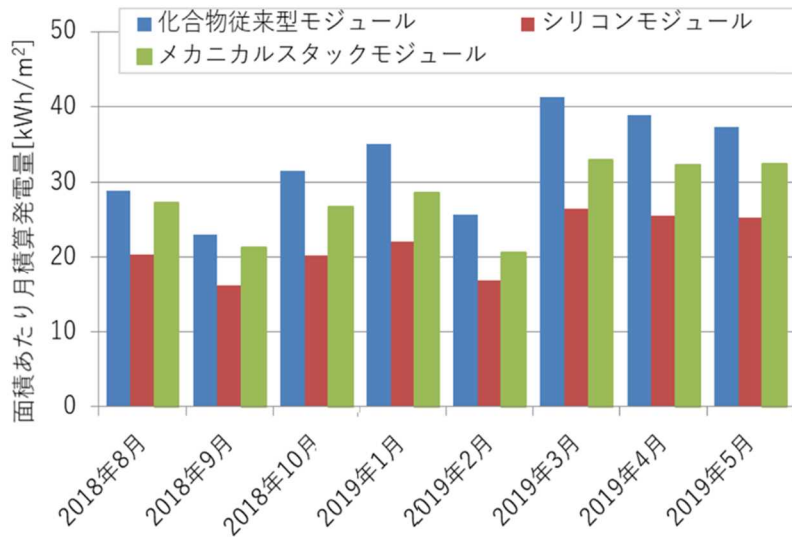
図III-2-(ロ)-C-1-b1-1 屋外評価テストサイトの様子 (宮崎大学構内)



図III-2-(ロ)-C-1-b1-2 化合物3接合型モジュール外観



図III-2-(ロ)-C-1-b1-3 化合物3接合型モジュール電気特性 (産総研測定)



図III-2-(ロ)-C-1-b1-4 各モジュールの屋外発電量測定結果

表III-2-(ロ)-C-1-b1-1 各モジュールの屋外発電量比較

	モジュール面積あたり発電量	P/R
シリコンモジュール	173 kWh/m ² (100%)	0.94
従来型モジュール	262 kWh/m ² (151%)	0.88
メカニカルスタックモジュール	222 kWh/m ² (128%)	0.87
化合物2接合	161 kWh/m ² (93%)	-
シリコン	61 kWh/m ² (35%)	-

[表中 () 内の数字はシリコンモジュールに対する比率]

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-2 化合物3 接合型セルの量産性評価結果

	Voc (mV)	Isc (mA)	Pmax (mW)	FF	η (%)
Ave	2989.7	321.5	801.5	0.834	35.0
Min	2884.4	309.5	748.7	0.763	32.7
Max	3072.7	336.4	847.0	0.855	37.0
σ	22.2	3.6	13.4	0.014	0.58



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-5 太陽電池搭載車両外観 (トヨタ プリウス PHV)

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-3 太陽電池搭載量 (トヨタ プリウス PHV)

	セル枚数	搭載容量 (W)
フード	288	211
ルーフ	576	422
バックドアウィンドウ	270	197
バックドアガーニッシュ	36	30
合計	1176	860



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-6 太陽電池搭載車両外観 (日産 e-NV200)

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b1-4 太陽電池搭載量 (日産 e-NV200)

	セル枚数	搭載容量 (W)
フード	240	175
ルーフ	1056	790
リアゲート	256	185
合計	1552	1150

Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b2. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価【豊田工大】

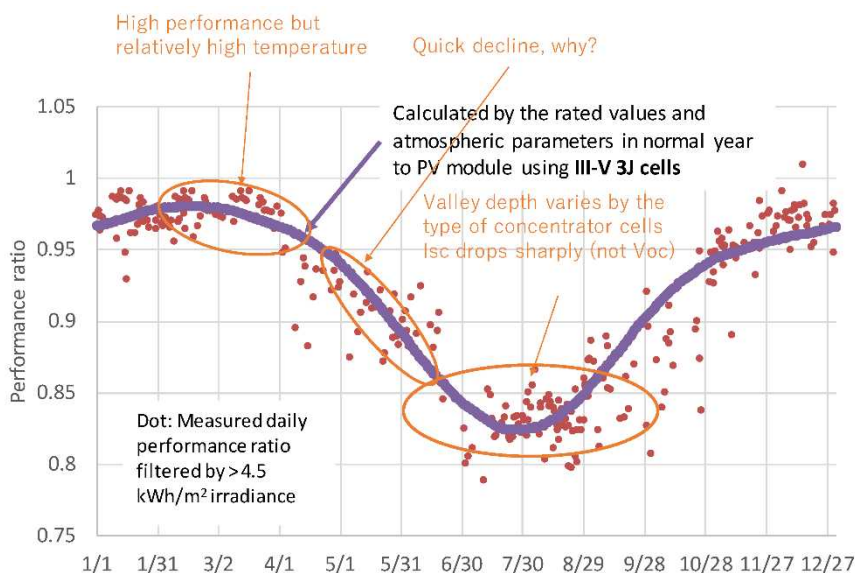
モジュールの発電コスト算定のためには正確な年間発電量のモデル化が必須である。しかしながら、多接合太陽電池ではスペクトルミスマッチングの影響により、従来型の発電モデルと乖離が大きい。そこで、多接合太陽電池および種々の設置モードで統一的に同じ基準で年間発電量を算定できるモデルを宮崎大学と共同で開発した。

スペクトルの正確な予測に加えて、非集光あるいは無追尾集光への応用を考えると、入射角度により直達光と散乱光の比率が大きく変化するため、スペクトルの角度依存性も重要となる。これらをモデルに組み込み、METPV-11 の日射・気象データを活用して、多接合セルモジュールの年間発電特性を計算した。大気パラメータ季節変動特性、および多接合セルモジュールの発電モデルを用いて、実際の多接合セルを使ったモジュールの年間発電特性を比較した結果を図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b2-1 に示す。多接合セルを用いたモジュールは従来の発電モデルでは説明できない季節変動特性を示すが、本モデルでの計算では再現することが可能となった。



PV module using 3J tandem cell

Area: 983 cm²
STC: 31.17%
2016/08 - up to now



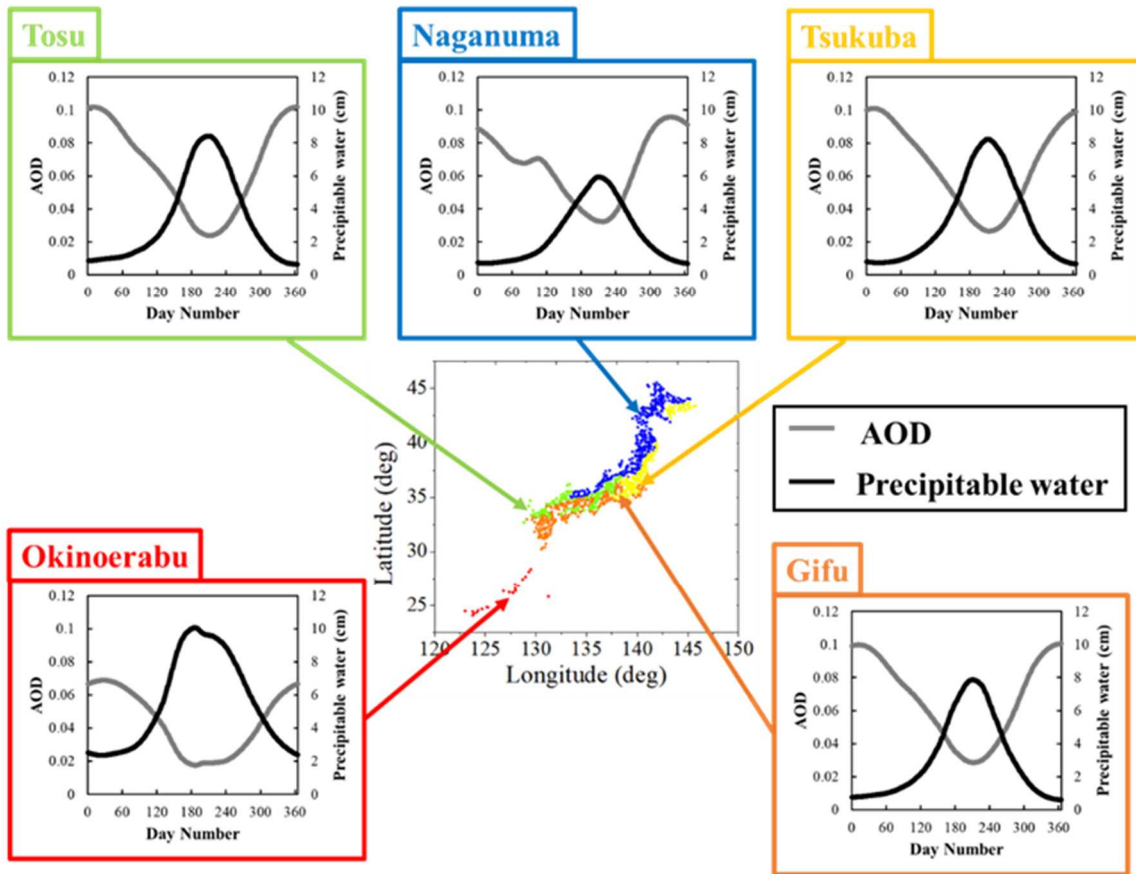
図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b2-1 大気パラメータ季節変動特性、および多接合セルモジュールの発電モデルを用いて、実際の多接合セルを使ったモジュールの年間発電特性を比較した結果

Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3. 低コストモジュール発電量試算、屋外評価【宮崎大学】

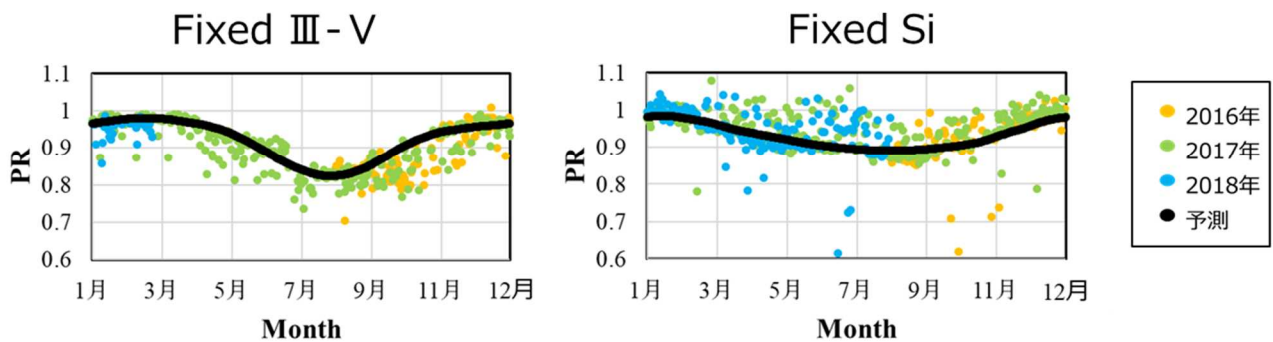
宮崎大学に設置している各種太陽電池の実動作データをもとに、日変動および年変動についても実測値と計算値が一致するようにパラメータを抽出し、発電量シミュレーションモデルを構築した。モデルでは、日射量、温度、スペクトル、入射角度特性を考慮し、精密なシミュレーションが可能となった。設置場所および方法などのサイト情報取得し、それに適応した METPV-11 の日射データおよび5日射気候区の大気パラメータ平年値を使用した。METPV-11 の日射データを用いて、直達および散乱、反射日射量をそれぞれ算出した。図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-1 に示す、5日射気候区の大気パラメータ変動平年値により、各地域におけるスペクトルを導出した。これらの過程を経て日射量・スペクトル合成し、さらに、温度補正、角度特性補正を考慮したモジュール特性を計算した。最後に365日24時間で出力(kW)を積算することで年間予測発電量(kWh)を算出した。この作業を日本全国837地点で行うことで太陽光発電ポテンシャルを表す年間予測発電量マップを作成した。

図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-2 に南向き傾斜設置したⅢ-V族3接合型太陽電池モジュールおよび単結晶Si太陽電池モジュールのPRの実測値および計算値の年変動を示す。季節により日射量、温度、スペクトル等、様々な動作環境が変化するが、それらを考慮したモデルを構築したことにより、実測値と計算値は精度よく一致した。構築したモデルをもとに日本の各地点における年間日射量を計算した。

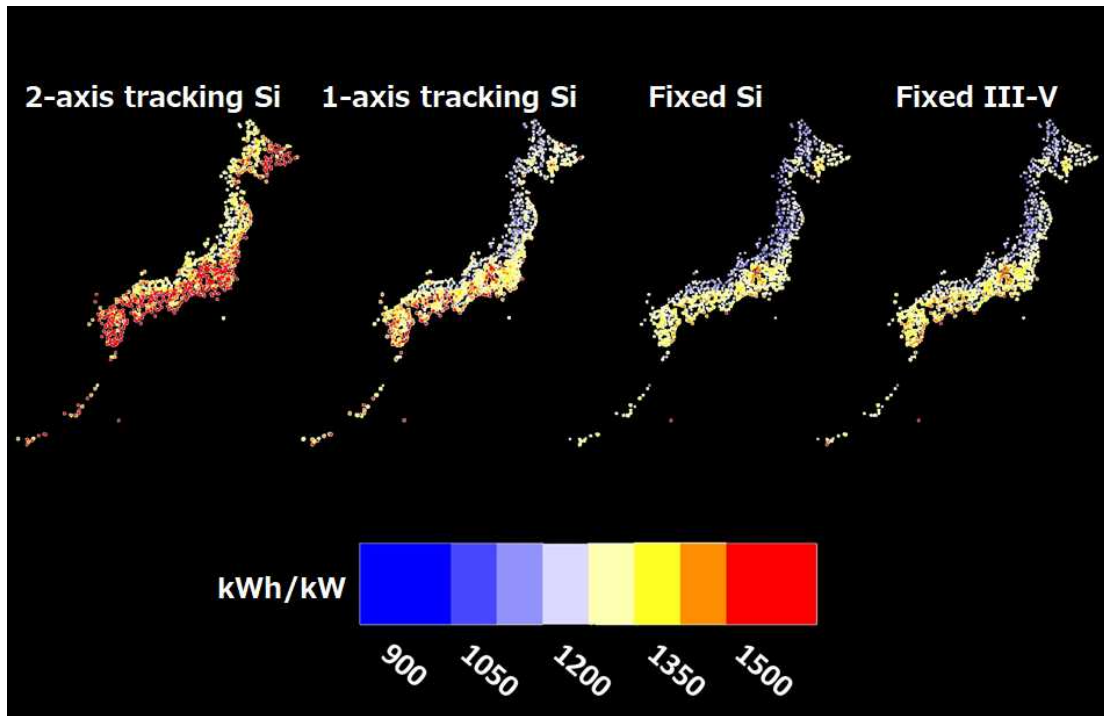
図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-3 に、各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量を示す。2軸追尾Si太陽電池、1軸追尾Si太陽電池、南向き傾斜設置Si太陽電池、および南向き傾斜設置Ⅲ-V太陽電池のデータを示している。気象データにはMETPV-11データベースを用い、全国837箇所における定格出力あたりの年間発電量を計算した。この図に示すように、太陽電池の種類を変えた場合や太陽電池の設置方法を変えた場合の日本全国における発電量予測が可能となった。これらの結果に加え、各種太陽光発電システムのイニシャルコストや維持費等を考慮することにより、各種太陽光発電システムを各地域に設置した場合のkWhあたりのコストを導出することが可能となった。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-1 日射地域区分および代表地点の大気パラメータ変動



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-2 南向き傾斜設置したⅢ-V太陽電池モジュールおよび単結晶 Si 太陽電池モジュールの PR の実測値および計算値の年変動



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1-b3-3 各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトで得られた研究開発の成果は、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化への貢献が期待される。具体的な製品として、宇宙用に逆積3接合（IMM3J）セル、成層圏飛行体用にIMM3Jセルおよび両面採光型2接合セル、車載用には透過型2接合セルとシリコン（もしくはCIS）セルをスタックした4端子型セルを予定する。

テーマCで得られた成果は以下に示す内容にて、それぞれの事業分野での活用が期待される。

研究開発成果	事業分野	貢献・活用
エピ層剥離2接合型セルを用いたモジュールを作製（27.4%）。また、Siセルとのスタック構造モジュールで効率30.7%を得た。	車載用	4端子型は高効率化低コスト化の両立が期待できるため、将来の車載用として開発を継続する。
逆積み3接合型モジュールで31.2%の効率を得た。本モジュールの屋外発電量を評価し、結晶Siモジュール比151%の単位面積当たり発電量を確認。化合物2接合+Siの4端子構造	車載用	化合物3接合型モジュールおよび化合物2接合型とシリコンをスタックした4端子型モジュールの屋外での高い発電特性が確認でき、更に、電動自動車に搭載し、PVによる走行距離拡大の実証試験を開始したことにより、電動車搭載のPVの価値が認

<p>モジュールの屋外評価を実施し、結晶 Si モジュール比 128% の単位面積あたりの発電量を確認。</p> <p>車載用途評価のためのモジュールを作製、車両への実装および公道での実証試験を実施した。</p>	<p>識され、今後の事業化開発の起爆剤となることが期待される。</p>
--	-------------------------------------

3. 波及効果

超高効率の開発モジュールを用いた PV 搭載車の価値が認識されることで、現在、安価量産が実現できているシリコンモジュールの搭載の価値の再認識、普及拡大が促進されることを期待する

4. 今後の展開

本プロジェクトで試作した PV 搭載電動車の走行試験の継続し、データを蓄積するとともに、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化へに向けた開発を推進する予定である。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	0	3 (0)	3 (1)	2 (1)	8 (2)
論文	5	16	12	10	10	53
研究発表・講演 (うち国際会議)	22 (15)	29 (23)	48 (43)	37 (30)	47 (36)	183 (147)
新聞・雑誌等への掲載	0	8	0	0	7	15
その他	0	2	0	1	2	5

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	パナソニック株式会社	2017-127734	国内	2017/6/29	出願	電子部品の実装方法及び実装基板	金山秀哲
2	パナソニック株式会社	2017-127314	国内	2017/6/29	出願	太陽電池モジュール	西谷輝
3	パナソニック株式会社	2017-127726	国内	2017/6/29	出願	レンズアレイ及びレンズアレイの製造方法	綾洋一郎
4	パナソニック株式会社	2018-086364	国内	2018/4/27	出願	集光型太陽電池モジュール	林伸彦

5	パナソニック株式会社	2018-120151	国内	2018/6/25	出願	太陽電池モジュール	西谷輝
6	パナソニック株式会社	PCT/JP2018/024470	PCT	2018/6/27	出願	レンズアレイ及びレンズアレイの製造方法	綾洋一郎
7	パナソニック株式会社	PCT/JP2019/017731	PCT	2019/4/25	出願	集光型太陽電池モジュール	林伸彦
8	パナソニック株式会社	2019-086226	国内	2019/4/26	出願	レンズアレイ、及び、太陽電池モジュール	西谷輝

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Husyira Al Husna, Yasuyuki Ota, Takashi Minemoto, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Field test analysis of concentrator photovoltaic system focusing on average photon energy and temperature	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 54, No. 8S1, 08KE05-1 - 08KE05-4	有	2015/08
2	Kei Nomura, Kenta Imai, Yasuyuki Ota, Takashi Minemoto, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Effect of aerosols on performance of concentrator photovoltaics	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 54, No. 8S1, 08KE07-1 - 08KE07-4	有	2015/08
3	Takuya Hirohata, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Anti-soiling coating based on silica for Fresnel lens of concentrator photovoltaics	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 54, No. 8S1, 08KE09-1 - 08KE09-4	有	2015/08
4	山口 真史	豊田工大	(解説) 太陽電池市場の現状と将来展望	WEB Journal, 21(9):2-9	無	2016/01
5	Masafumi Yamaguchi, Tatsuya Takamoto, Kenji Araki, Nobuaki Kojima	豊田工大	Recent results for concentrator photovoltaics in Japan	Japanese Journal of Applied Physics, 55:04EA05	有	2016/03
6	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kazuma Ikeda, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Optimization of Land Use for a Multitracker System Using a Given Geometrical Site Condition	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 6, NO. 4, JULY 2016, 960-966	有	2016/06
7	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kan-Hua Lee, Kazuma Ikeda, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design and Development of Dome-Shaped Fresnel Lens	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 6, NO. 5, SEPTEMBER 2016 1339-1344	有	2016/06
8	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Rebeca Herrero, Ignacio Ant' on, Gabriel Sala, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Off-Axis Characteristics of CPV Modules Result From Lens-Cell Misalignment-Measurement and Monte Carlo	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 6, NO. 5, SEPTEMBER 2016, 1353-1359	有	2016/07

			Simulation			
9	Nawwar Ahmad, Keisuke Hatakeyama, Yasuyuki Ota and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Designing of long wavelength cut thin film filter for temperature reduction of concentrator photovoltaic	MATEC Web of Conferences, 65, 04002	有	2016/07
10	Yoshihide Hidaka, Kenta Imai, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Outdoor Performance Comparison of Concentrator Photovoltaic and FlatPlate Photovoltaic Systems	MATEC Web of Conferences, 65, 04003	有	2016/07
11	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kazuma Ikeda, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of static low concentrator PV optimized for vehicle installation	AIP Conf. Proc. 1766, 020001-1- 020001-5;	有	2016/09
12	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Intermittent tracking (30 minutes interval) using a wide acceptance CPV module	AIP Conf. Proc. 1766, 050001-1- 050001-6;	有	2016/09
13	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Which is optimum tracker allocation, checkerboard or rectangular grid?	AIP Conf. Proc. 1766, 070001-1- 070001-5;	有	2016/09
14	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of solar station to EV	AIP Conf. Proc. 1766, 080001-1- 080001-6;	有	2016/09
15	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis of impact to optical environment of the land by CPV	AIP Conf. Proc. 1766, 090002-1- 090002-6;	有	2016/09
16	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Study on tolerance control for optical alignment of CPV modules using a Monte Carlo simulation	AIP Conf. Proc. 1766, 090003-1- 090003-6;	有	2016/09
17	Yasuyuki Ota, Nawwar Ahmad, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	A 3.2% output increase in an existing photovoltaic system using an anti- reflection and anti- soiling silica-based coat	Solar Energy, Volume 136, 547-552	有	2016/10
18	Nawwar Ahmad, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Temperature reduction of solar cells in a concentrator photovoltaic system	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 56, No. 3, 032301-1 -032301-8	有	2017/01

			using a long wavelength cut filter			
19	山口 真史	豊田工大	(解説) 太陽電池市場の現状と将来展望	WEB Journal 2017・1月号 pp. 2-9	無	2017/01
20	Nobuhiko Hayashi, Masaharu Terauchi, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama, Hikaru Nishitani, Tohru Nakagawa, and Michihiko Takase	Panasonic Corporation	Thin concentrator photovoltaic module with micro-solar cells which are mounted by self-align method using surface tension of melted solder	AIP Conference Proceedings, vol.1881, p. 80005, 2017	有	2017/03
21	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis of impact to optical environment of the land by flat-plate and array of tracking PV panels	Solar Energy 144 (2017) 278-285	有	2017/03
22	Taizo Masuda, Kenji Araki, Kenichi Okumura, Shinichi Urabe, Yuki Kudo, Kazutaka Kimura, Takashi Nakado, Akinori Sato, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Static concentrator photovoltaics for automotive applications	Solar Energy, 146; 523-531	有	2017/04
23	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Rebeca Herrero, Ignacio Anton, Gabriel Sala, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	1-D and 2-D Monte Carlo simulations for analysis of CPV module characteristics including the acceptance angle impacted by assembly errors	Solar Energy, 147;448-454	有	2017/05
24	N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka	University of Miyazaki	111 sun concentrator photovoltaic module with wide acceptance angle that can efficiently operate using 30-min intermittent tracking system.	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 56, No.9, 092301-1 - 092301-8	有	2017/08
25	Rebeca Herrero, Ignacio Anton, Gabriel Sala, Davide De Nardis, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Monte Carlo simulation to analyze the performance of CPV modules	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;090001	有	2017/09
26	N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka	University of Miyazaki	Optical and thermal simulation for wide acceptance angle CPV module	AIP Conference Proceedings, Volume 1881, 020001-1 - 020001-8	有	2017/09

27	Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka	University of Miyazaki	Estimation of conversion efficiency for partially static concentrator with III-V on Si solar cell	AIP Conference Proceedings, Volume 1881, 020010-1 - 020010-5	有	2017/09
28	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Outdoor validation of the 30 minutes intermittent tracking of 100 x CPV	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;020002	有	2017/09
29	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design of the partial concentrator lens for III-V on Si static concentration	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;030001	有	2017/09
30	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Impact of the atmospheric conditions to the bandgap engineering of multi-junction cells for optimization of the annual energy yield of CPV	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;070002	有	2017/09
31	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Is it CPV? Yes, but it is a partial CPV	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;080001	有	2017/09
32	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Quantifying the potential of III- V/Si partial concentrator by a statistical approach	AIP Conference Proceedings, Volume 1881;080007	有	2017/09
33	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Bandgaps of multi- junction solar cells potentially determined at the sun height of the culmination on the winter solstice	Solar Energy, 153;445-453	有	2017/09
34	Kenji Araki, Liang Ji, George Kelly, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	To Do List for Research and Development and International Standardization to Achieve the Goal of Running a Majority of Electric Vehicles on Solar Energy	Coatings, 8(7):251	有	2018/07
35	Yasuyuki Ota, Kohsuke Ueda, Tatsuya Takamoto, and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Output evaluation of a world's highest efficiency flat sub module with InGaP/GaAs/InGaAs inverted triple-	Japanese Journal of Applied Physics, Volume 57, Number 8S3, 08RD08-1 - 08RD08-4	有	2018/07

			junction solar cell under outdoor operation			
36	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Achieving Wide-Acceptance Angle and High On-Axis Performance Static Low-Concentration Module Using Hybrid Lens Arrays	AIP Conference Proceedings, 2012:040006	有	2018/09
37	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Takumi Sakai, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis of Fluctuation of Atmospheric Parameters and its Impact on Performance of CPV	AIP Conference Proceedings, 2012:080002	有	2018/09
38	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	The Possibility of the Static LCPV to Mechanical-stack III-V//Si Module	AIP Conference Proceedings, 2012:090002	有	2018/09
39	Daisuke Sato, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi, Noboru Yamada	豊田工大	Design and Evaluation of a III-V/Si Partial CPV Module for Maximization of Power Generation per Unit Module Area	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, 9(1):147-153	有	2018/11
40	荒木 建次, 山口 真史	豊田工大	(解説) 車載太陽電池の技術開発動向	月刊車載テクノロジー-2018年11月号, 33:50-54	無	2018/11
41	Kensuke Nishioka, So Pyay Moe and Yasuyuki Ota	University of Miyazaki	Long-Term Reliability Evaluation of Silica-Based Coating with Antireflection Effect for Photovoltaic Modules	Coatings, Volume 9, Issue 1, 49	有	2019/01
42	荒木 建次, 山口 真史	豊田工大	(解説) 太陽電池の車載応用に向けた最近の動向	応用物理, 88(2):84-90	無	2019/02
43	Daisuke Sato, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Taizo Masuda, Masafumi Yamaguchi, Noboru Yamada	豊田工大	Design of low-concentration static III-V/Si partial CPV module with 27.3% annual efficiency for car-roof application	Progress in Photovoltaics, 2019:1-10	有	2019/03
44	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	A Mesh Down sampling Algorithm for Equivalent Circuit Network Simulation of Multi-Junction Solar Cells	IEEE Access, 7:97208-97215	有	2019/07
45	Kenji Araki, Daisuke Sato, Taizo Masuda, Kan-Hua Lee,	豊田工大	Why and how does car-roof PV create 50 GW/year of new installations? Also,	AIP Conference Proceedings, 2149(1):050003	有	2019/08

	Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi		why is a static CPV suitable to this application?			
46	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Improvement of the spectral sensitivity of CPV by enhancing luminescence coupling and fine-tuning to the bottom-bandgap matched to local atmospheric conditions	AIP Conference Proceedings, 2149(1):060001	有	2019/08
47	Kan-Hua Lee, Sato Daisuke, Kenji Araki, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Demonstration of the performance static low-concentration module using hybrid lens arrays	AIP Conference Proceedings, 2149(1):070009	有	2019/08
48	Kenji Araki, Carlos Algora, Gerald Siefer, Kensuke Nishioka, Ralf Leutz, Sam Carter, Shitao Wang, Steve Askins, Liang Ji, George Kelly	豊田工大	Standardization of the CPV technology in 2019 - The path to new CPV technologies	AIP Conference Proceedings, 2149(1):090001	有	2019/08
49	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Hiromu Saiki, Hiroki Tawa, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Super-Multi-Junction Solar Cells-Device Configuration with the Potential for More Than 50% Annual Energy Conversion Efficiency (Non-Concentration)	Applied Sciences, 9(21):4598	有	2019/10
50	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Measurement and Modeling of the 3-D Solar Irradiance for Vehicle-Integrated Photovoltaic	Applied Sciences, 10(3):872	有	2020/01
51	Hiroki Tawa, Hiromu Saiki, Yasuyuki Ota, Kenji Araki, Tatsuya Takamoto and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Accurate Output Forecasting Method for Various Photovoltaic Modules Considering Incident Angle and Spectral Change Owing to Atmospheric Parameters and Cloud Conditions	Applied sciences, Volume 10, 703-1 - 703-15	有	2020/01
52	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Tatsuya Takamoto, Taizo Masuda,	豊田工大	Overview of Si Tandem Solar Cells and Approaches to PV-Powered Vehicle Applications	MRS Advances	有	2020/01

	Akinori Satou					
53	Kenji Araki, Hiroki Tawa, Hiromu Saiki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	The Outdoor Field Test of the 4T III-V on Si Tandem PV Module and Its Energy Yield Modeling	Applied Sciences, 10(7):2529	有	2020/04

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Jun Hirota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Influence which Calibration in an Azimuth Direction to be Affected to the Tracking Error	11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2015/04
2	Yasuyuki Ota, Koji Abe, Katsuhiko Fujita, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	New Material Fresnel Lens with High Performance in Wide Temperature Range	11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2015/04
3	西岡賢祐, 太田靖之	宮崎大学	既設のPVシステム出力を4%向上させる 反射防止兼防汚コーティング	第12回「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2015/05
4	太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	集光型太陽電池モジュールの最適化 設計	第12回「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2015/05
5	Kenta Imai, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Outdoor performance comparison of concentrator photovoltaic and flat-plate systems	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
6	Shota Kurogi, Takuya Hirohata, Ahmad Nawwar, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Repair of damaged lens surface of CPV using silica based coating	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
7	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Present and Future of R&D for Solar Cells	6th International Symposium of Advanced Energy Science~Towards the Realization of Zero-Emission Energy~, Uji campus, Kyoto University, Japan	2015/09
8	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, and M. Yamaguchi	豊田工大	Possibility of compact stand- alone power system using CPV and Tracking PV hybrid.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
9	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, and	豊田工大	Analysis of Impact to Optical Environment of the Land by Flat- plate and Tracking PV Panels Using METPV-11 Database.	25th International Photovoltaic Science & Engineering	2015/11

	M. Yamaguchi			Conference	
10	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, and M. Yamaguchi	豊田工大	Optimization of Land Use for Multi-trackers System by Given Geometrical Site Conditions.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
11	K. Araki, H. Nagai, R. Herrero, I. Antón and G. Sala	豊田工大	Off-axis Characteristics of CPV Modules Result from Lens-cell Misalignment - Measurement and Monte Carlo Simulation.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
12	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, and M. Yamaguchi	豊田工大	Design and Development of Dome-shaped Fresnel Lens.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
13	S. Naito, K. Araki, K-H. Lee, K. Ikeda and M. Yamaguchi	豊田工大	Optimization of ARC for Si concentrator cells used to wide aperture reflector concentrators	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
14	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Plenary) Present and Future of Super-High Efficiency III-V Multi-junction, Concentrator Solar Cells and Modules	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
15	Masafumi Yamaguchi, Hiroyuki Yamada, Yasuhiro Katsumata	豊田工大	(Invited) Overview of Photovoltaic R&D in Japan	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference	2015/11
16	Kan-Hua Lee and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Present And Future of III-V Compound Multi-Junction And Concentrator Solar Cells	The 20th International Conference on Semiconductor Photocatalysis & Solar Energy Conversion	2015/11
17	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Present and Future of R&D for Solar Cells	The Second International Symposium of Integrated Research and Education Center for Energy Conversion, Storage, Saving, and Transport Technologies	2015/11
18	今井健太, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	集光型および平板型太陽電池システムの屋外性能比較	第7回半導体材料・デバイスフォーラム	2015/11
19	坂元亮太, 黒木翔太, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	防汚兼反射防止コーティングの太陽電池モジュール出力への効果	2015年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11

20	山口真史	豊田工大	(特別講演) 太陽電池の研究開発動向と将来展望	新学術領域研究「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換：実用化に向けての異分野融合」	2016/01
21	山口真史	豊田工大	(招待) 太陽電池の研究開発の現状と将来展望	第23回次世代自動車公開シンポジウム「太陽光エネルギー利用の最新技術」	2016/01
22	坂元亮太, 太田靖之, ¥ 西岡賢祐	宮崎大学	既設の太陽光発電システムの出力を簡単に3%以上向上させる反射防止兼防汚コーティング	第1回COC+みやざきA&Sヒルズ研究会	2016/03
23	Shota Kurogi, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota	University of Miyazaki	Damage Repairment of Lens Surface in CPV by Silica Based Coating	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
24	Shota Kurogi, Jun Hirota, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota	University of Miyazaki	Reduction of Soiling on CPV Module by a Tracker System	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
25	Yasuyuki Ota, Yoshiya Abiko, Kenta Imai, Makoto Inagaki, Takashi Iwasaki, Kenichi Kitayama, Shota Kurogi, Rui Mikami, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Impact of Spectral Distribution and Module Temperature on CPV Systems with Lattice-Matched and Mismatched Solar Cell	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
26	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Study on tolerance control for optical alignment of CPV modules using a Monte Carlo simulation	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
27	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis of impact to optical environment of the land by CPV	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
28	Kenji Araki, Hirokazu Nagai, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of solar station to EV	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
29	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Which is optimum tracker allocation, checkerboard or rectangular grid?	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04

30	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Intermittent tracking (30 minutes interval) using a wide acceptance CPV module	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
31	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kazuma Ikeda, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of static low concentrator PV optimized for vehicle installation	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
32	Yoshihide Hidaka, Kenta Imai, Yasuyuki Ota and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Outdoor Performance Comparison of Concentrator Photovoltaic and Flat Plate Photovoltaic Systems	2016 5th International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials	2016/04
33	日高剛秀, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	エアマスと散乱比を用いた集光型太 陽光発電システムの出力解析	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
34	太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	三接合型太陽電池モジュールへの反 射防止膜の最適化設計	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
35	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史, 太田靖之, 西岡賢祐	豊田工大	車載用無追尾低倍集光パネルの研究 開発	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
36	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史, 太田靖之, 西岡賢祐	豊田工大	高倍集光を 30 分毎の間歇追尾で動 作させるのは可能か?	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
37	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史	豊田工大	複数追尾架台の最適配置問題	第13回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
38	Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Kenji Araki, Kazuma Ikeda, kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	University of Miyazaki	Optimization of Static Concentrator Photovoltaics with Aspherical Lens for Automobile	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
39	Kazuma Ikeda, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nisihoka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	An innovative design approach for static concentrators with large aperture area suitable to automobile application	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06

40	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kazuma Ikeda, Kensuke Nishioka, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of CPV for automobile energy source	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
41	Kenji Araki, Rebeca Herrero, Ignacio Antón, Gabriel Sala, Hirokazu Nagai, Kan-Hua lee, and masafumi Yamaguchi	豊田工大	Why are acceptance angle of Pm and Isc different in spite of uniform illumination onto concentrator solar cells?	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
42	Ryota Sakamoto, Syota Kurogi, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Output Increase of Photovoltaic Module using Silica Based Coat Having Anti-Reflection and Anti- Soiling Effects	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
43	Yoshihide Hidaka, Yasuyuki Ota, Makoto Inagaki, Rui Mikami, Takashi Iwasaki, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Influence of Silicon on Glass Lens Temperature on Concentrator Photovoltaic Modules with and without Secondary Optics	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
44	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Is it possible to track the 100 x CPV module with 30 minutes intervals?	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
45	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	A 2-D Monte Carlo Simulation for Analysis of the Acceptance Angle of CPV	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
46	Kenji Araki, Kyotaro Nakamura, Kan-Hua Lee, Takefumi Kamioka, Shimako Naito, Motoo Morimura, Mohammad A. Bareque, Mari Aoki,	豊田工大	Beyond the limit of Si solar cells - III-V on Si cell and its PCSC module concept	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10

	Toshio Okumura, Hyunju Lee, Norihiko Maeda, Li Wang, Yutaka Hayashi, Yu-Cian Wang, Nobuaki Kojima, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi				
47	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design optimization on static low concentrator PVs installed to various non-optimized locations including the car-roof	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
48	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Hypothesis: Optimization of the Bandgaps Combination at the Specific Site, Considering Ever-changing Spectrum, May Be Determined by the Matching Condition to the Sun Height at the Culmination on the Winter Solstice	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
49	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) R&D activities of super high efficiency III-V multi-junction and concentrator solar cells in Japan	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
50	Kenji Araki	豊田工大	(Plenary) The New and Third Wave of CPV Not Relying on Perfection of Trackers	GPVC 2017	2017/03
51	綾洋一郎, 林伸彦, 金山秀哲, 西谷輝, 中川徹, 高瀬道彦	パナソニック株式会社	New Concept of Thinner CPV Module with High Performance at Low Cost	第 64 回 応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム	2017/03
52	Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Super high efficiency concentrator photovoltaic system and its application to make hydrogen	Laser Solutions for Space and the Earth 2017	2017/04
53	N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka,	University of Miyazaki	Optical and thermal simulation for wide acceptance angle CPV module	13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2017/05
54	Y. Ota, K. Araki,	University of Miyazaki	Estimation of conversion efficiency for partially static	13th International Conference on	2017/05

	K. -H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka		concentrator with III-V on Si solar cell	Concentrator Photovoltaic Systems	
55	綾洋一郎, 林伸彦, 金山哲, 西谷輝, 中川徹, 高瀬道彦	パナソニック株式会社	Thin concentrator photovoltaic module with micro-solar cells which are mounted by self-align method using surface tension of melted solder	13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2017/05
56	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Outdoor Validation of the 30 Minutes Intermittent Tracking of 100 x CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
57	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design of the Partial Concentrator Lens for III-V on Si Static Low Concentrators	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
58	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Impact of the atmospheric conditions to the bandgap engineering of multijunction cells for optimization of the annual energy yield of CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
59	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Is It CPV? Yes, But It Is a Partial CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
60	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Quantifying the Potential of III-V/Si Partial Concentrator by a Statistical Approach	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
61	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Omar Elleuch, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Pypvcell - "LEGO" of CPV Solar Cell Modeling in Python Language	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics	2017/05
62	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	University of Miyazaki	CPV Technologies Not Relying on Perfection of Trackers	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
63	Kenji Araki,	豊田工大	Design Arithmetic of the Lateral	44th IEEE	2017/06

	Kyotaro Nakamura, Yu-Cian Wang, Nobuaki Kojima, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi		III-V / Si Hybrid Module	Photovoltaic Specialists Conference	
64	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Generalized Numerical Design of Axially-asymmetrical and Grid-arranged Static CPV array for Maximizing Annual Energy Generation	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
65	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	CPV Technologies Not Relying on Perfection of Trackers	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
66	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Proposal of the Bandgap Design Using the Sun Height of the Culmination on the Winter Solstice	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
67	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analyzing the Cost Reduction Potential of III-V/Si Hybrid Concentrator Photovoltaic Systems	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
68	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Omar Elleuch, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Pypvcell: An Open-Source Solar Cell Modeling Library in Python	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
69	太田靖之, 植田浩介, 高本達也, 西岡賢祐	宮崎大学	IMM InGaP/GaAs/InGaAs三接合型太陽電池サブモジュールの屋外動作解析	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07
70	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史, 太田靖之, 西岡賢祐	豊田工大	CPVにおける追尾架台への脱依存	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07
71	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史	豊田工大	4 接合以上のモノリシック多接合に意味はあるのか？	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07
72	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Omar Elleuch, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Pypvcell - “LEGO” of Solar Cell Modeling in Python Language	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07
73	Masafumi	豊田工大	(Keynote) Towards Creation of	2017 5th IEEE	2017/08

	Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Satou, Hiroyuki Yamada		Mobility Society Using Solar Energy	International Conference on Smart Energy Grid Engineering	
74	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Sato, Hiroyuki Yamada	豊田工大	(Invited) Si Tandem Solar Cells and Their Potential of Automobile Application	PV Asia Scientific Conference 2017	2017/10
75	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Yu-Cian Wang, Nobuaki Kojima, Yasuyuki Ota, Takumi Sakai, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Opportunities in the Single and Multi-junction Solar Cells for Increasing Power Conversion Efficiency and Annual Energy Yield	18th International Union of Materials Research Societies International Conference in Asia	2017/11
76	N. Ahmad, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka,	University of Miyazaki	EVALUATION AND OPTIMIZATION OF WIDE ACCEPTANCE ANGLE CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC MODULE	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
77	K. Nishioka, S. Kurogi, Y. Ota, J. Hirota	University of Miyazaki	A SOLAR TRACKING SYSTEM WITH DOWNWARD-FACING STANDBY STATE FOR DRY AREAS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
78	R. Kawashima, T. Sakai, Y. Ota, K. Nishioka	University of Miyazaki	ALBEDO IMPROVEMENT AND WEED PROOF EFFECTS OF A WHITE FORM GLASS MADE FROM WASTE GLASS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
79	T. Masuda, K. Araki, K.-H. Lee, Y. Ota, K. Nishioka, M. Yamaguchi	University of Miyazaki	MAXIMIZING ANNUAL ENERGY GENERATION AND MINIMIZING THE AREA OF EXPENSIVE III-V CELLS USING OPTIMIZED STATIC CPV	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
80	Y. Ota,	University of	OUTPUT EVALUATION OF A WORLD' S	27th International	2017/11

	K. Ueda, T. Takamoto, K. Nishioka	Miyazaki	HIGHEST EFFICIENCY FLAT SUB-MODULE WITH InGaP/GaAs/InGaAs INVERTED TRIPLE-JUNCTION SOLAR CELL UNDER OUTDOOR OPERATION	Photovoltaic Science and Engineering Conference	
81	高瀬道彦, 綾洋一郎, 林伸彦, 金山秀哲, 西谷輝, 水野文二	パナソニック 株式会社	NOVEL MICRO CPV MODULE INTEGRATED WITH PLASTIC LENS, CIRCUIT BOARD AND III-V COMPOUND SEMICONDUCTOR UTILIZING INJECTION MOLDING AND SURFACE MOUNTING	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
82	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Takumi Sakai, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	INHERENT UNCERTAINTY OF ENERGY RATINGS OF MULTI-JUNCTION CELLS BY FLUCTUATION OF ATMOSPHERIC PARAMETERS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
83	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	ANALYSIS OF COST-COMPETITIVENESS OF HYBRID III-V-Si CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
84	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	OPTIMIZATION PROBLEM ON TRACKER ALLOCATION USING DIMENSIONLESS PARAMETERS ? THEORY AND MEASUREMENT VALIDATION	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
85	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Takumi Sakai, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	ENERGY YIELD PREDICTION OF MULTI-JUNCTION CELLS CONSIDERING ATMOSPHERIC PARAMETERS FLUCTUATION USING MONTE CARLO METHODS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
86	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	PYPVCELL - OPEN-SOURCED SOLAR CELL MODELING TOOLKIT IN PYTHON LANGUAGE	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
87	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Takumi Sakai, Kyotaro Nakamura, Kan-Hua Lee, Takefumi Kamioka, Kensuke Nishioka, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	SI-BASED TANDEM CELL, 2-TERMINAL OR 4-TERMINAL?	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
88	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi	豊田工大	EV SOLAR STATION, A KEY INFRASTRUCTURE FOR ABSORBING SURPASS ENERGY GENERATION OF PV	27th International Photovoltaic Science and	2017/11

	Yamaguchi		ON THE CAR-ROOF	Engineering Conference	
89	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	RISKS AND OPPORTUNITIES IN CHALLENGING NEW BANDGAP MATERIALS FOR INCREASING NUMBER OF JUNCTIONS ? PROBABILITY STUDY	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
90	Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	STANDARDIZATION OF LOW-CONCENTRATION PHOTOVOLTAICS? TECHNICAL TERMS AND TESTING CONDITIONS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11
91	T. Sakai, Y. Ota, K. Araki, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, K. Nishioka	University of Miyazaki	Estimate of global solar radiation using extraterrestrial radiation and meteorological parameter	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017/11
92	Y. Hidaka and K. Nishioka	University of Miyazaki	Estimation of output power in photovoltaic system using learning function based on performance of the past	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017/11
93	R. Kawashima, T. Sakai, Y. Ota, K. Nishioka	University of Miyazaki	Effects of a white foam glass made from waste glass on albedo improvement and weed control	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017/11
94	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Takumi Sakai, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Prediction of the solar spectrum for accurate prediction of energy yield of the high-performance PV system using multi-junction cells and solar-driven cars	9th PV Performance Modeling Collaborative (PVPMC) Workshop	2017/12
95	荒木建次, 山口真史	豊田工大	(招待) 車載 PV のインパクト、50 GW/年の新市場、温室ガス 8%削減?どんな技術が必要となり何をしなければならぬか、共に考えてみましょう-	学振第 175 委員会 次世代シリコン太陽電池分科会 超高効率太陽電池分科会合同研究会	2017/12
96	Y. Ota	University of Miyazaki	Concentrator photovoltaic system with super high efficiency III-V triple junction solar cell and its application to produce hydrogen and methane	Global Photovoltaic Conference 2018	2018/03
97	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Plenary) Overview of Si Tandem Solar Cells and Potential of Automobile Applications	Global Photovoltaic Conference 2018	2018/03
98	高瀬道彦, 寺内正治, 林伸彦, 西谷輝, 猪原卓二, 綾洋一郎, 金山秀哲, 水野文二	パナソニック株式会社	Light Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC with Three-Junction PV cells	18th International Workshop on Junction Technology	2018/03
99	Kenji Araki,	豊田工大	(Invited) Opportunities for	18th International	2018/03

	Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi		breaking an energy generation limit of photovoltaic using multijunction and super- multijunction cells	Workshop on Junction Technology	
100	Michihiko Takase, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama, and Bunji Mizuno	パナソニック 株式会社	Light Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
101	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Possibility of the Static LCPV to Mechanical-Stack III-V//Si Module	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
102	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Takumi Sakai, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Analysis on Fluctuation of Atmospheric Parameters and its Impact on Performance of CPV	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
103	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Cost-Competitiveness of Hybrid III-V-Si Concentrator Photovoltaic Systems	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
104	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Achieving Wide-Acceptance Angle and High On-Axis Performance Static Low-Concentration Module Using Hybrid Lens Arrays	14th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2018/04
105	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Sato	豊田工大	Analysis for efficiency potential of Si tandem solar cells and approach to automobile application	2018 MRS Spring Meeting and Exhibit	2018/04
106	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) PV for mobility	2nd Terawatt Workshop	2018/04
107	Hiroki Tawa, Yasuyuki Ota,	University of Miyazaki	Comparison of CPV systems with lattice-matched and mismatched	7th World Conference on	2018/06

	Makoto Inagaki, Rui Mikami, Takashi Iwasaki, Munetsugu Ueyama and Kensuke Nishioka		solar cells in long-term outdoor performance	Photovoltaic Energy Conversion	
108	Hironu Saiki, Takumi Sakai, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Masafumi Yamaguchi, and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Verification of uncertainty in CPV' s outdoor performance	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
109	Michihiko Takase, Shutetsu Kanayama, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, and Bunji Mizuno	パナソニック株式会社	A Thin and Light Plastic Integrated CPV Module with Low Temperature mounting process using Induction Heating Technology	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
110	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Hiromi Tobita, Liang Ji, George Kelly, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Toward the Standardization of the Car-roof PV -Challenge to the 3-D Sunshine Modeling and Rating of the 3-D Continuously Curved PV Panel	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
111	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Achieving High Efficiency Static Low-Concentration Photovoltaic Module Using Hybrid Lens Arrays	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
112	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Optimization of the Partially Radiative-coupling Multi-junction Solar Cells Considering Fluctuation of Atmospheric Conditions	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/06
113	S. P. Moe, Y. Ota, K. Nishioka	University of Miyazaki	Long term reliability of antireflective silica-based coating on CIGS photovoltaic module	Grand Renewable Energy 2018	2018/06

114	Michihiko Takase, Masaharu Terauchi, Nobuhiko Hayashi, Hikaru Nishitani, Takuji Inohara, Youichirou Aya, Shutetsu Kanayama, and Bunji Mizuno	パナソニック株式会社	A Plastic Integrated Micro CPV Module: PIC with Induction Heating Technology	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
115	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	How Does R&D on the Car-Roof PV Impact to the Entire PV Technologies?	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
116	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Super-Multijunction Cell, A New Solar Cell Overcoming the Spectrum Loss of Multijunction Cells	Grand Renewable Energy 2018	2018/06
117	林伸彦, 西谷輝, 綾洋一郎, 寺内正治, 猪原卓二, 金山秀哲, 水野文二, 高瀬 道彦	パナソニック株式会社	超薄型集光型太陽電池用レンズアレイの光学系開発	第43回 光学シンポジウム	2018/06
118	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	High efficiency static concentrator lens array for automobile and building integrated photovoltaics	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
119	Kan-Hua Lee, 荒木建次, 山口真史	豊田工大	ZEB 向け PV モジュール開発 豊田工大の挑戦	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
120	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史	豊田工大	「超」多接合セルによるスペクトル変動頑健化	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
121	荒木建次, 増田泰造, 木村和峰, 佐藤彰倫, 山口真史	豊田工大	車載太陽電池 実用化に必要な技術開発は何か	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/07
122	K. Nishioka & Y. Ota	University of Miyazaki	Long Term Evaluation of Anti-Reflection and Anti-Soiling Coating for Existing Photovoltaic Modules	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2018/09

123	高瀬道彦	パナソニック株式会社	薄型プラスチック一体型 CPV モジュール(PIC)および EV 充電ステーションへの応用	日本学術振興会 産学協力研究委員会 次世代の太陽光発電システム 第 175 委員会	2018/10
124	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Satou, Hiroyuki Yamada	豊田工大	(Keynote)Overview of Solar Cell R&D and Approaches to Automobile Applications	15th International Conference and Exhibition on Materials Science and Engineering	2018/11
125	Reita Kawashima, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Effect of White Foam Glass Made from Waste Glass on Albedo Improvement	7th Korea - Japan Joint Seminar on PV	2018/11
126	Rie Shibata, Kazuki Okumoto, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Heat Transfer Simulation for Car-Roof Photovoltaic Modules	7th Korea - Japan Joint Seminar on PV	2018/11
127	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Modeling on Unconventional PVs and Their Standardization? Curved Surface, Vehicle-Integration, Multi-Junction Cells, and Static Concentrators	11th PV Performance Modeling Collaborative (PVPMC) Workshop	2018/12
128	才木大夢, 荒木建次, 太田靖之, Kan-Hua Lee, 山口真史, 西岡賢祐	宮崎大学	集光型太陽電池の屋外性能の不確実性検証	第3回フロンティア太陽電池セミナー	2018/12
129	Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Recent Development of Concentrator Photovoltaic System and Its Applications for Solar to Chemical Energy Conversion	International Symposium on Solar Energy Materials	2019/01
130	Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Estimation of the Range Extension of the Mileage of the Electric Vehicles by the Automotive-Colored Car-Roof Photovoltaic	1st Coatings and Interfaces Web Conference	2019/03
131	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima	豊田工大	(Invited)High Efficiency and Low-cost Concentrator Solar Cells	Global Photovoltaic Conference 2019	2019/03

132	Michihiko Takase, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, and Bunji Mizuno	パナソニック株式会社	High performance concentrator for thin and lightweight CPV modules	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
133	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Improvement of the Spectral Sensitivity of CPV by Enhancing Luminescence Coupling and Fine-Tuning to the Bottom-Bandgap Matched to Local Atmospheric Conditions	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
134	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Daisuke Sato, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Demonstration of the Performance Static Low Concentration Module Using Hybrid Lens Arrays	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
135	Kenji Araki, Daisuke Sato, Taizo Matsuda, Kan-Hua Lee, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Why and How Does Car-Roof PV Create 50 GW/Year of New Installations? Also, Why is a Static CPV Suitable to this Application?	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
136	Kenji Araki, Andreas W. Bett, Frank Dimroth, Karin Hinzer, Ignacio Luque-Heredia	豊田工大	Panel Discussion on Trending CPV Applications	15th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2019/03
137	Kenji Araki	豊田工大	(Invited) Car-roof PV, possibilities and challenges	8th Solar Energy Conference of CEE (Central and Eastern Europe)	2019/04
138	Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Plenary) Overview of Japanese PV R&D Activities, Efficiency Potential of Solar Cells and PV-Powered Vehicle Applications	International Workshop on Energy Business and Sustainable Development	2019/04
139	高本達也	シャープ(株)	Vehicle Applications that Place High Value on Very High Efficiency Solar Cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
140	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuhiko Hayashi, Kouki Ichihashi, Shutetsu	豊田工大	Alignment Tolerance Control of the Micro CPV Array Using Monte Carlo Methods	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06

	Kanayama, Takuji Inohara, Yohei Morita, Michihiko Takase, Masafumi Yamaguchi				
141	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuhiko Hayashi, Kouki Ichihashi, Shutetsu Kanayama, Takuji Inohara, Yohei Morita, Michihiko Takase, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Design of the Micro-Köhler Concentrator Optics for CPV Application	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
142	Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	A Mesh Down sampling Algorithm for Equivalent Circuit Network Simulation of Multi-Junction Solar Cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
143	Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Taizo Masuda, Yoshitaka Hayakawa, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi, Yasuyuki Ota	豊田工大	Rough and straightforward estimation of the mismatching loss by partial shading of the PV modules installed on an urban area or car-roof	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
144	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Curve Correction of the Energy Yield by Flexible Photovoltaics for VIPV and BIPV Applications Using a Simple Correction Factor	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
145	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Kazutaka Kimura, Akinori Satou	豊田工大	Proposals for Accelerating Photovoltaics Installations in Japan and Further Developments of Science and Technologies of Photovoltaics	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06
146	Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Kenji Araki, Noboru	豊田工大	Demonstration of High Efficiency Static Low-Concentration Photovoltaic Module Using Hybrid Lens Arrays	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/06

	Yamada, Masafumi Yamaguchi				
147	西岡賢祐, 霧村雅昭, 永岡章, 太田靖之	宮崎大学	宮崎の特徴を活かした太陽光発電応用研究開発	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07
148	多和紘希, 才木大夢, 太田靖之, 荒木建次, 高本達也, 西岡賢祐	宮崎大学	太陽光スペクトルを考慮したPV予測発電量マップの作成	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07
149	才木大夢, 荒木建次, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	直達スペクトルと全天傾斜スペクトルの比較検証	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07
150	佐藤大輔, Kan-Hua Lee, 荒木建次, 山口真史, 山田昇	豊田工大	III-V/Si 部分集光によるモジュール面積当たりの発電量最大化	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07
151	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kan-Hua Lee, Kensuke Nishioka and Masafumi Yamaguchi	豊田工大	(Invited) Super-multi-junction solar cells, a new configuration of the robust and high-efficiency solar cell and its application - Operation model based on the annual monitoring of the multi-junction PV modules	18th International Conference on Optical Communications and Networks	2019/08
152	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita, Taizo Masuda, Akinori Satou, Kazumi Yamada, Tatsuya Takamoto, Takehiko Sato, Mitsuhiro Yamazaki, Hiroyuki Yamada	豊田工大	(Invited) Solar Cells for Cars	29th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2019/08
153	山口真史, 荒木建次	豊田工大	(招待) 車載用高効率太陽電池開発の現状と将来展望	2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会(シンポジウム:脱炭素社会実現に向けた太陽光発電のポテンシャルと挑	2019/09

				戦～電力を越えて、 移動体、建物、さら にその先へ～)	
154	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou, Mami Hasegawa, Hiroyuki Yamada	豊田工大	Overview of Concentrator Solar Cells and Analysis for Their Non-Radiative Recombination	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2019/09
155	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou, Mami Hasegawa, Hiroyuki Yamada	豊田工大	Some Approaches of PV-Powered Vehicles Applications	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2019/09
156	Hiroki Tawa and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Creation of forecasting PV energy yield map considering the solar spectrum	8th MALAYSIA-JAPAN JOINT WORKSHOP ON PHOTOVOLTAIC SYSTEMS	2019/09
157	Hiromu Saiki, Yasuyuki Ota, and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Comparison in availability of spectrum from direct normal irradiance and global tilt irradiance to estimate multi-junction PV output	8th MALAYSIA-JAPAN JOINT WORKSHOP ON PHOTOVOLTAIC SYSTEMS	2019/09
158	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou, Tatsuya Takamoto	豊田工大	(Keynote) Overview of Si tandem solar cells and potential of automobile applications	3rd International Conference on Materials Science and Materials Chemistry	2019/10
159	多和絛希, 西岡賢祐	宮崎大学	大気パラメータ起因の太陽光スペクトル変化を考慮したPV予測年間発電量マップの作成	2019年応用物理学会九州支部学術講演会	2019/11
160	才木大夢, 西岡賢祐	宮崎大学	太陽光スペクトルを考慮した多接合太陽電池発電量予測の精度検証	2019年応用物理学会九州支部学術講演会	2019/11
161	Hiroki Tawa, Hiromu Saiki, Yasuyuki Ota,	University of Miyazaki	A Spectrum- Energy Model for Annual Yield Estimation of 2-And 4-Terminal Tandem Solar Cells	29th International Photovoltaic Science and	2019/11

	Kenji Araki, Kohsuke Ueda, Tatsuya Takamoto, Masafumi Yamaguchi, Kensuke Nishioka			Engineering Conference	
162	Hiromu Saiki, Hiroyuki Tawa, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Verification of Accuracy in Spectrum-energy Model for Tandem Solar Cell	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
163	Michihiko Takase, Kan-Hua Lee, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, and Kenji Araki	パナソニック 株式会社	Towards Scaling-Up of Plastic Integrated CPV (PIC) Panels: Status, Challenges and Prospects	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
164	Kan-Hua Lee, Michihiko Takase, Nobuhiko Hayashi, Shutetsu Kanayama, and Kenji Araki	パナソニック 株式会社	Modeling the Error Tolerance of Micro-CPV with an Uncertainty Analysis	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
165	Kenji Araki	豊田工大	(Invited) The advantages of MWT modules in photovoltaic vehicles and BIPV	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
166	Kenji Araki, Liang Ji, George Kelly, Emilio Agudo, Ignacio Anton, Mathieu Baudrit, Anna Carr, Rebeca Herrero, Sarah Kurtz, Zhengxin Liu, Moritz Limpinsel, Zhonglin Lu, Mauro Pravettoni, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota, Paul Robusto, Hiromi Tobita,	豊田工大	Standardization Discussions for the Car-Roof PV - Starting Two Years Ago, and What We Have Achieved Since Then	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11

	Qian Wu, Zhenyu Wu, Sewang Yoon, Masahiro Yoshita, Masafumi Yamaguchi				
167	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou, Tatsuya Takamoto, Hiroyuki Yamada	豊田工大	(Plenary) Super-high Efficiency III-V Multi-junction and Concentrator Solar Cells, and PV-powered Vehicle Applications	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
168	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Taizo Masuda, Daisuke Sato, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Solar Irradiance Onto Car Body Using Mobile Multiple Pyranometer Array System for vehicle-Integrated Photovoltaic applications - Measurement and Modeling	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
169	Kenji Araki, Daisuke Sato, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Can We Break the 43% Limit of the Annual Average Efficiency (Non-concentration)?	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
170	Kenji Araki, Daisuke Sato, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Improvement of Performance Ratio of Tandem Cells Using Super- multijunction Configuration- modeling and Outdoor Performance Validation	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
171	Kenji Araki, Daisuke Sato, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Is Tracker Allocation Optimization in Monsoon Region Different from North America and Europe?	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
172	Kenji Araki, Daisuke Sato, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Seasonal Irradiation Prediction in Solar-sharing by Solar- trackers for Uniform Illumination to Crops Using Solar Irradiation Databases	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
173	Daisuke Sato, Kenji Araki, Masafumi Yamaguchi, Noboru Yamada	豊田工大	Performance Evaluation of Low- concentration Static CPV Module with Smooth 3D Curved Surface	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11

174	Kenji Araki, Daisuke Sato, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Minimum Requirements of the Solar Simulators for Curved PV Panels	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
175	Daisuke Sato, Kenji Araki, Noboru Yamada, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Potential of Low-concentration Static CPV Module (Tandem, Flexible and High Coverage to the 3-D Curved Surface) for Car- roof Application	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11
176	Masafumi Yamaguchi, Kenji Araki, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Nobuaki Kojima, Taizo Masuda, Akinori Satou	豊田工大	(Keynote) Importance of Photovoltaic (PV) for Creating Future Clean Energy Society and Our Approaches of PV-Powered Vehicle Applications	4th International Conference on New Energy and Applications	2019/11
177	多和絃希, 西岡賢祐	宮崎大学	太陽光スペクトルを考慮した発電量 予測モデルを用いた2端子および4端 子多接合太陽電池の屋外性能評価	第4回フロンティア 太陽電池セミナー	2019/11
178	才木大夢, 西岡賢祐	宮崎大学	多接合型太陽電池の出力解析モデル の確立および精度検証	第4回フロンティア 太陽電池セミナー	2019/11
179	Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Masafumi Yamaguchi	豊田工大	Performance Modeling of the Car- roof PV - Overview	13th PV Performance Modeling and Monitoring Workshop	2019/12
180	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Daisuke Sato, Kenji Araki, Nobuaki Kojima, Tatsuya Takamoto, Taizo Masuda, Akinori Satou	豊田工大	Overview of Si Tandem Solar Cells and Approaches to PV- Powered Vehicle Applications	2019 MRS Fall Meeting & Exhibit	2019/12
181	Masafumi Yamaguchi, Kan-Hua Lee, Kenji Araki, Daisuke Sato, Nobuaki Kojima	豊田工大	(Invited) Next Generation Solar Cells and PV-Powered Vehicle Applications	4th International Conference on Fossil and Renewable Energy	2020/02
182	林伸彦	パナソニック 株式会社	プラスチックレンズに高効率微小 太陽電池セルを実装した薄型・軽 量集光型太陽電池	JIEP 関西支部 第 16回技術講演会	2020/02
183	森田洋平, 林伸彦, Kan-Hua Lee, 金山秀哲, 高瀬道彦	パナソニック 株式会社	プラスチックレンズ一体型による 集光型太陽光発電モジュールの小 型・軽量化開発	応用物理学会 関西 支部 第3回講演会	2020/02

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	シャープ(株)	太陽電池モジュール 世界最高効率シャープが開発	日経新聞	2016/5
2	シャープ(株)	世界最高の変換効率 シャープ 31.17%達成	化学工業日報	2016/5
3	シャープ(株)	化合物3接合型太陽電池 最高変換効率を達成	日刊産業新聞	2016/5
4	シャープ(株)	世界最高の変換効率達成 シャープの化合物系太陽電池セル	日刊工業新聞	2016/5
5	シャープ(株)	シャープ 化合物太陽電池モジュール 世界最高の変換効率達成	電波新聞	2016/5
6	シャープ(株)	シャープ 変換効率31%の太陽電池	日経産業新聞	2016/5
7	シャープ(株)	太陽電池モジュールとして世界最高の変換効率 NEDO プロジェクトの一環 シャープ 化合物3接合型太陽電池 31.17%を達成	日刊油業報知新聞	2016/5
8	シャープ(株)	太陽電池変換効率31% シャープ 化合物系で世界最高	読売新聞	2016/6
9	シャープ(株)	高効率太陽光パネル搭載 電動車を公道実験 シャープとトヨタ	日経産業新聞	2019/7
10	シャープ(株)	高効率太陽電池を搭載 PHV で公道実証 今/下旬から トヨタ	日刊自動車新聞	2019/7
11	シャープ(株)	公道に太陽電池搭載車 シャープ トヨタ 航続距離や燃費検証	電気新聞	2019/7
12	シャープ(株)	高効率太陽電池搭載 PHV 公道で走行実証 NEDO	化学工業日報	2019/7
13	シャープ(株)	太陽電池車 公道で実験	日刊工業新聞	2019/7
14	シャープ(株)	世界最高水準の高効率太陽電池搭載した電動車	電波新聞	2019/7
15	シャープ(株)	NEDO、シャープ、トヨタ 太陽電池搭載 EV 実験	交通毎日新聞	2019/7

【その他】

番号	年度	タイトル	受賞者など	受賞年月
1	2016	太陽電池モジュールで世界最高の変換効率31.17%を達成	ニュースリリース	
2	2016	ポスターアワード (26th PVSEC 新概念・新材料部門)	豊田工大	2016.10.28
3	2018	Technology Contribution (11thPV Performance Modeling and Monitoring Workshop(PVPMC))	豊田工大	2018.12.04
4	2019	世界最高水準の高効率太陽電池を搭載した電動車の公道走行実証を開始	ニュースリリース	
5	2019	イノバイティブ PV 奨励賞 “Ⅲ-V/Si 部分集光によるモジュール面積当たりの発電量最大化” (第16回「次世代の太陽光発電システムシンポジウム」)	豊田工大	2019.07.05

D 超高効率セル開発

1. 成果詳細

III-2-(ロ)-D-1-a1. 多接合希釈窒化物【東京大学】

50%以上の集光下効率が見込まれる最適な 4 接合太陽電池 (1.9eV/1.4eV/1.0eV/0.70eV) を格子整合材料で構成するためには、第 3 セル(1.0eV 帯)用の材料として GaInNAs 等の III-VN 系希釈窒化物半導体が必要である。GaInNAs の特徴は In と N の組成を制御することにより格子定数とバンドギャップを広範囲に可変できることであり、従来化合物半導体で実現できなかった GaAs や Ge 基板に格子整合させた 1.0eV 材料を得ることができる。

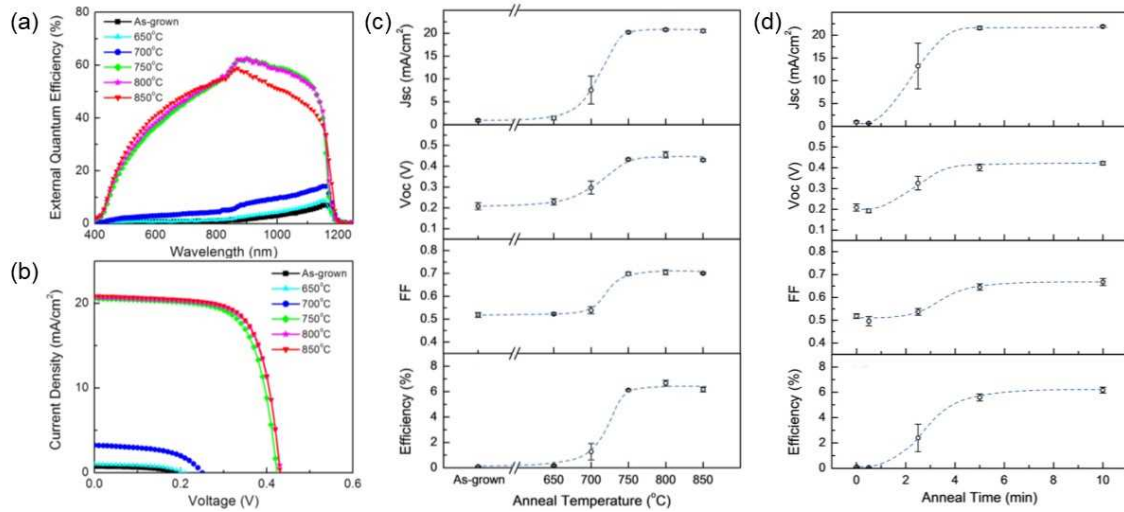
4 接合セルで必要とされる電流密度 $12\sim 13\text{mA}/\text{cm}^2$ を実現するためには、十分な厚さの光吸収層 (1.5 \sim 2.0 μm 以上) が要求される。しかし、GaAs 結晶に窒素原子を導入することによってキャリア移動度、および少数キャリア拡散長が著しく低下してしまうことが課題となっており、1.0eV 帯サブセルとしての十分な光キャリア収集特性を得ることが困難とされていた。この問題解決に当たり、*pn* 構造に *i*-GaInNAs 層を挿入した *p-i-n* 構造を採用し、空乏層領域での内蔵電界による光キャリア収集アシスト効果を積極的に利用することにより電流値の向上が実現できる。さらに、ポストアニールや Sb サーファクタントの導入により窒素に起因した結晶欠陥等が低減され、結晶品質の改善に有効であることを明らかにしてきた。これまでの、GaInNAs:Sb の成長制御技術の開発と高品質化の結果、単接合セルにおいて、GaAs フィルタ下の短絡電流密度 $12.2\text{mA}/\text{cm}^2$ を達成してきた。

本研究開発では、この高品質 GaInNAs:Sb セルを多接合セルに実装するための技術開発に取り組んだ。高品質な GaInNAs:Sb は MBE 法により結晶成長を行うが、他のサブセルについては通常 MOCVD 法により製膜される。そこでシャープ(株)と連携し、MBE と MOCVD を組み合わせたハイブリッド成長 (ウェハシャトル) により多接合セルを構成した。

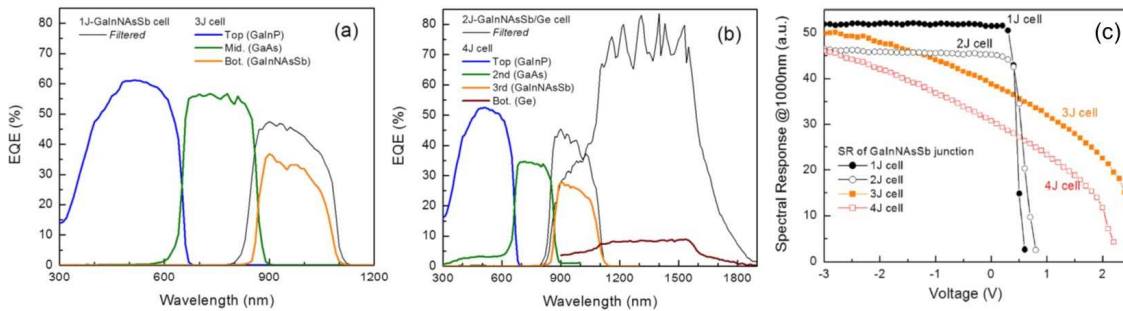
GaInNAs:Sb セルにおいて、十分な水準のキャリア収集効率を得るためには成長後の高温アニール処理 (従来条件では窒素雰囲気下で 850°C , 10 分) が必要であった。しかし、この温度条件は一般的に行われる他のサブセルの MOCVD 成長時の温度と比べて著しく高く、悪影響が懸念されるため、できるだけ低い温度で短時間の処理が好ましい。そこで初めにポストアニール条件の最適化に取り組んだ。十分な光キャリアを生成するため GaInNAs:Sb 層厚を $3\mu\text{m}$ とした単接合セルを MBE 法により作製し、アニール温度と時間を変化させることにより最適条件を探索した (図 III-2-(ロ)-D-1-a1-1)。その結果、従来行っていたアニール温度よりも 100°C 低い 750°C でも十分なキャリア収集が可能であることが見出された。また時間についても 5 分程度まで短縮しても性能が維持できることがわかった。

次に、MBE と MOCVD を用いたハイブリッド成長による多接合太陽電池を検討した。図 III-2-(ロ)-D-1-a1-2 には GaInNAs:Sb セルをベースとした 1J \sim 4J セルの分光感度特性を示す。GaInNAs:Sb 1J セル上に MOCVD で GaInP/GaAs セルを再成長したものが 3J セル、同様に GaInNAs:Sb/Ge 2J セル上に MOCVD で再成長したものが 4J セルである。良好な量子効率が得られた 1J および 2J セルに対し、MOCVD で再成長を行った 3J, 4J セルでは、GaInNAs:Sb セルのキャリア収集の劣化が生じた。この要因を探るため、GaInNAs:Sb 1J セルに対し、MOCVD 環境に起因した材料物性の変化を調べた。その結果、アルシン雰囲気でのアニールによって、GaInNAs:Sb 層中に水素原子が選択的に混入することが明らかになった。これはアルシンの熱分解によって発生する水素原子が試料表面から結晶内部に浸入し、N-H 結合を形成することによって取り込まれたと考えられる。GaInNAs:Sb のバンド内で N-H 結合はエネルギー準位を形成し、ドナー的なふるまいを示すことが知られており、これらの試料の C-V 測定においてもキャリア濃度の増加との相関

が得られている。その結果、内蔵電界が *i*-GaInNAS:Sb 層の一部にしか印加されず、フラットバンド領域で再結合ロスとなって GaInNAS:Sb セルのキャリア収集の劣化が生じたと考えられる。



図III-2-(ロ)-D-1-a1-1 GaInNAS:Sb 単接合セルのポストアニール条件の最適化。アニール時間 10 分で温度を変化させた場合の (a)分光感度特性 (b)電流電圧特性 (c)各パラメータのプロット (d)アニール温度を 750°C に固定し時間を変化させた場合の各パラメータのプロット



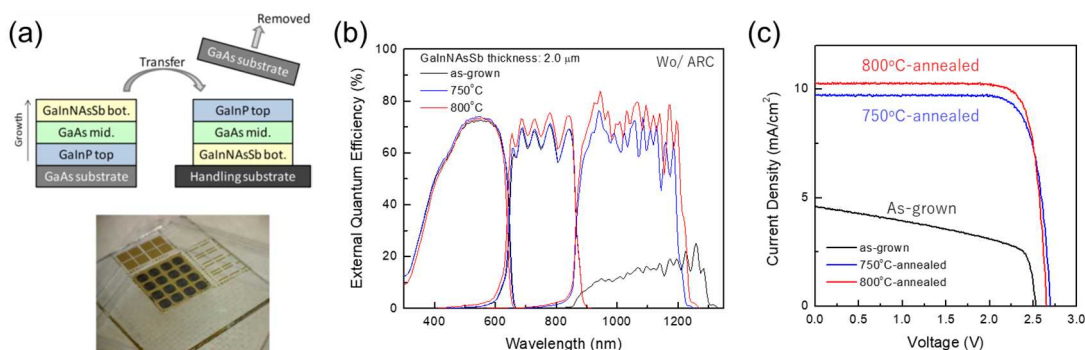
Growth order	1J-cell	2J-cell	3J-cell	4J-cell
Substrate	p-GaAs	p-Ge	p-GaAs	p-Ge
1	GaInNASb subcell by MBE	Ge subcell by MOCVD	GaInNASb subcell by MBE	Ge subcell by MOCVD
2	-	GaInNASb subcell by MBE	GaAs subcell by MOCVD	GaInNASb subcell by MBE
3	-	-	GaInP subcell by MOCVD	GaAs subcell by MOCVD
4	-	-	-	GaInP subcell by MOCVD

図III-2-(ロ)-D-1-a1-2 (a), (b)ハイブリッド成長により作製した多接合セルの分光感度特性 (c)各セルにおける GaInNAS:Sb セルの分光感度 (波長 1000 nm) のバイアス依存性

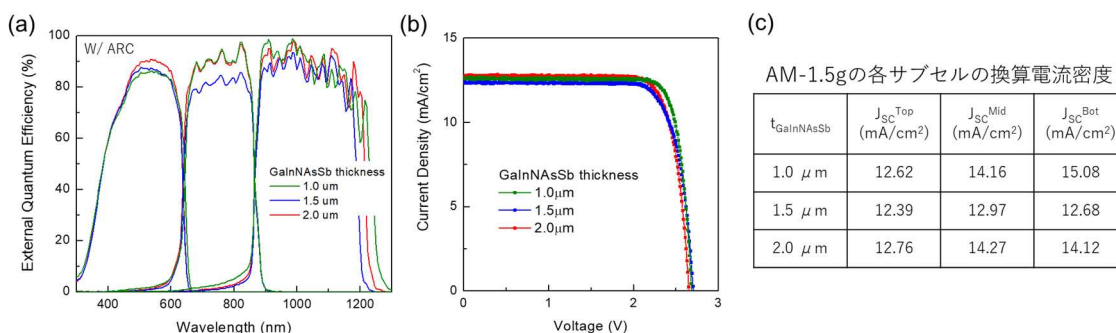
以上の知見を基に、GaInNAS:Sb セルの成膜後の MOCVD プロセスを行わない手法として、格子整合系逆積み型 3 接合セルを提案、検討した。まず、MOCVD で従来とは逆手順で GaInP, GaAs の各セルおよびトンネル接合を形成した。なお、最終的に成長に用いた GaAs 基板を取り除くために、基板とデバイス層の間にエッチストップ層を挿入している。次に MBE で GaInNAS:Sb セルを再成長させ、逆積み型 GaInP/GaAs/GaInNAS:Sb 3 接合セルを試作した。本検討ではエポキシ樹脂を用い、ガラス基板上にセルを転写した。

まず、逆積み 3 接合セルへのポストアニール条件を検討した。GaInNAS:Sb 層厚は 2.0 μm とした。図 III-2-(ロ)-D-1-a1-3 に、アニールなし (as-grown)、750°C・5 分、800°C・5 分 (窒素雰囲気) でアニール

ルを施した場合の太陽電池特性を示す。750°Cでのアニールによって、GaInNAS:Sb セルのキャリア収集効率が向上し、3 接合セルの電流電圧特性の改善が確認できた。また、800°Cのアニールでも他のサブセルへの影響はみられず、750°Cの場合と同程度の特性が得られた。次に、逆積み 3 接合構造における GaInNAS:Sb 吸収層厚の検討を行った (図III-2-(ロ)-D-1-a1-4)。いずれの試料でも同水準の特性が得られ、クラス A ソーラーシミュレータによる評価では 30%を超える効率を得た。一方、多接合セルではルミネッセンスカップリング効果の補正を含むより厳密な評価が必要とされ、その手法に基づき 28.2% (1.0 μm セル) が得られた。GaInNAS:Sb 層厚が最も小さい 1.0 μm のセルにおいても、他の厚さのセルと比べて遜色ない光電流密度が得られており、さらに空乏層厚が短く内蔵電界強度が大きいためキャリア収集効率が向上し FF の改善が得られた。分光感度特性を基にした換算電流を比較すると、いずれもトップセルが電流律速となっており、1.0 eV サブセルとして十分な電流が得られることが確認できた。本検討ではボトムセル側に Au リフレクター (電極) を設けており、その光トラッピング効果を考慮すると、1.0 μm 厚セル、1 回反射条件で実効的には 2.0 μm 厚に相当する光路長となる。光トラッピングがない場合に比べて光電流は 1.18 倍が得られる。一方、2 端子型モノリシック 4 接合の構成ではリフレクター構造の導入が困難であるため、GaInNAS:Sb 厚として 2.0 μm 程度必要となるが、本検討で最も厚い 2.0 μm の場合においても良好なキャリア収集特性が維持できていることから、4 接合展開が可能であると示唆される。



図III-2-(ロ)-D-1-a1-3 MOCVD/MBE ハイブリッド成長により作製した GaInP/GaAs/GaInNAS:Sb 逆積み 3 接合セルにおけるアニール温度の検討



図III-2-(ロ)-D-1-a1-4 MOCVD/MBE ハイブリッド成長により作製した GaInP/GaAs/GaInNAS:Sb 逆積み 3 接合セルにおける GaInNAS:Sb 吸収層厚の検討

本研究で開発した格子整合逆積み 3 接合セル (ILM3J セル) を用い、4 接合セルへ展開するためには 0.7 eV のサブセルが要求される。格子整合系で構成するためには、(i) Ge ボトムセルのエピ成長や、(ii) GaInNAS 系 0.7eV 材料の開発というアプローチが考えられる。しかし、Ge セルの場合には間接遷

移材料であるため光吸収層としては $100\ \mu\text{m}$ オーダーの厚さが必要であり、エピで構成するのは容易ではない。また GaInNAs 系材料の場合にはさらなる開発要素が必要となる。そこで、本研究では ILM3J セル (GaInNAs:Sb 厚= $2.0\ \mu\text{m}$) と Ge ボトムセルとを半導体接合法を用いて直接接合し、GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb//Ge 4 接合セル (ILM3J+Ge1J セル) の試作を行った。接合工程では酸溶液中で表面の自然酸化膜層を除去したのち、ILM3J と Ge1J 試料の表面を合わせ、ファンデルワールス接合により一時的に固定したのち、大気中での加圧・加熱により直接接合させた。その後、上側の GaAs 基板をエッチングにより除去し、デバイス化プロセスを施した。図 III-2-(ロ)-D-1-a1-5 に 4 接合セルの分光感度特性と電流電圧特性を示す。いずれのサブセルに関しても各々の波長帯に対応する分光感度が得られており、4 接合セルとして動作させることに成功した。また、GaInNAs:Sb セルでは IQE は 60~70% 程度に留まるが、それ以外のサブセルについては 90% を超える IQE が得られたことから、半導体接合の 4 接合セル化への有効性が確認できた。AM1.5G 下での換算電流密度の比較から GaInNAs:Sb セルで電流が律速されていると考えられ、電流電圧測定においても確かめられた。GaInNAs:Sb セルの量子効率の低下は、キャリア収集効率の劣化によるものであり、アニール条件のずれや接合面におけるポテンシャルバリアの存在が可能性としてあげられる。なお、AM1.5G 光に加え、GaInNAs:Sb サブセルの吸収波長帯の追加光 (CW = 970nm の LED 光) を同時に照射することで FF の向上が得られたことから、今後実験条件の調整によって上記の問題点を改善し、GaInNAs:Sb セルにおける量子効率の向上を図ることで、4 接合セルとしての効率を大きく改善できることが期待される。

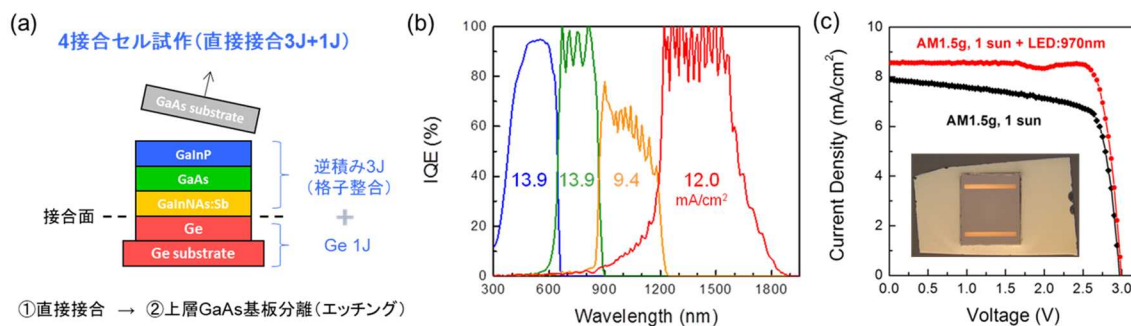
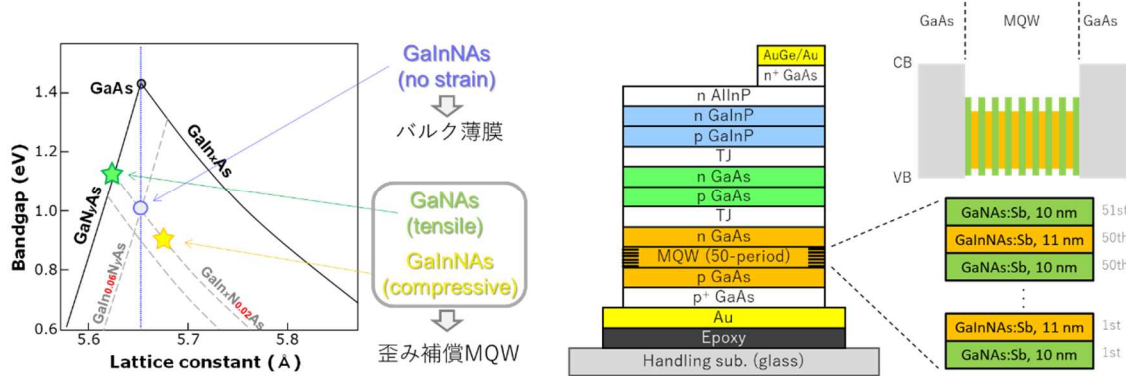


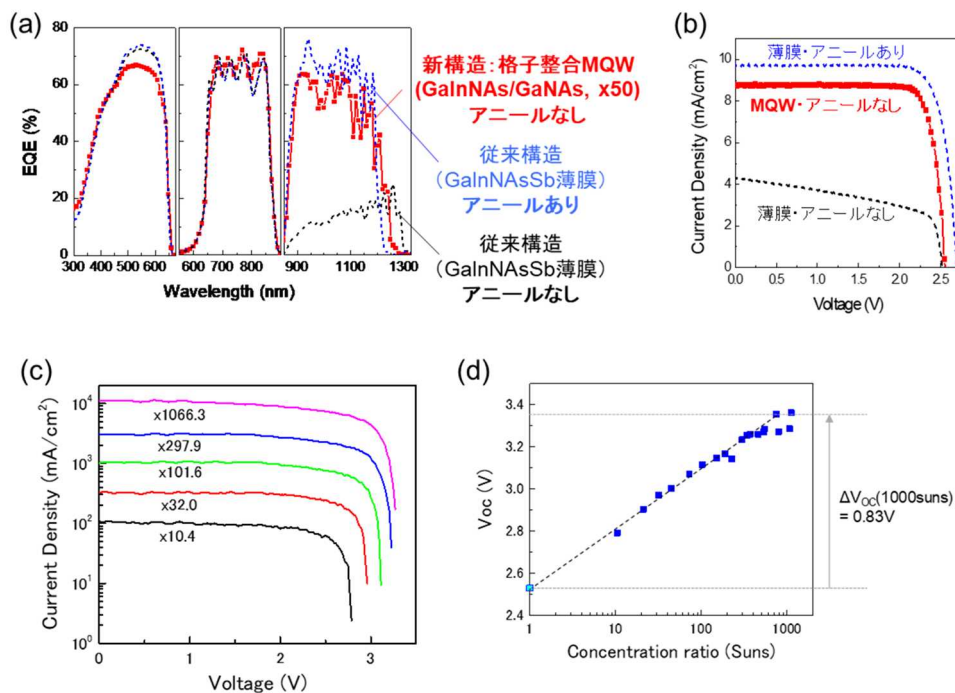
図 III-2-(ロ)-D-1-a1-5 半導体接合により作製した GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb//Ge 4 接合セル

変換効率 50% に向けては集光セルへの展開が必須となる。これまでに開発を進めてきた $1.0\ \text{eV}$ の GaInNAs:Sb バルク薄膜セルではポストアニール処理が必要であり、条件の最適化によって 750°C までアニール温度を低下させることができたが、なおトンネル接合のピーク電流の劣化の影響が高倍集光下では懸念される。最終年度はバルク薄膜に代わる疑似格子整合系の GaInNAs:Sb/GaNAs:Sb 系歪み補償多重量子井戸 (MQW) セルを検討し、ポストアニールを行わなくても良好なセル特性を実現した。この MQW 構成は、In 組成を増やした GaInNAs:Sb 井戸層が圧縮応力を、GaNAs:Sb 障壁層が引張り応力を及ぼすため、繰り返し周期構造を採ることによって歪みの蓄積を補償することができ、MQW 層全体として GaAs 基板上に無歪みに製膜することができる (図 III-2-(ロ)-D-1-a1-6)。バルク薄膜と比較して、同じ $1.0\ \text{eV}$ の実効バンドギャップを実現する際に N 組成を低下させた設計が可能であり、N 添加に起因した結晶欠陥の導入を抑制し高品質な結晶成長が可能となる利点がある。図 III-2-(ロ)-D-1-a1-7(a) および (b) に MQW セルを用いた ILM3J セルの太陽電池特性を示す。ポストアニールは施しておらず、as-grown のセルで良好なキャリア収集効率を得られ、FF も 0.83 と良好であった。さらに集光下で評価を行うため、これまで

のエポキシによるガラス基板への転写に代えて、熱伝導の良い GaAs 基板へ直接接合により転写し、集光セル化した。図III-2-(ロ)-D-1-a1-7(c)および(d)に、~1000 倍集光までの電流電圧特性（片対数プロット）と、開放電圧の集光依存性をプロットした。~1000 倍集光下でもトンネル接合の劣化等は観測されず、開放電圧は 3.35V まで増大した（1sun から 0.83V の増加）。一方、直接接合を採ったことで光トラッピング効果は利用できていないため、ボトムの MQW セルに電流律速されたことで、電流電圧特性は裏面リフレクター付きの場合と比べ劣化が見られた。この点は今後構造の最適化によって改善を図る必要がある。しかし、ポストアニールが不要であることは、多接合セルの高効率化には有用な利点であり、また組成や厚さなど自由度の高い材料設計が可能であるため MQW 構造のさらなる研究発展によって現状よりも多様なバンドギャップ材料の設計に展開することができると考えられる。



図III-2-(ロ)-D-1-a1-6 GaInNAs:Sb/GaNAs:Sb 歪み補償 MQW セルを用いた ILM3J セルの概要



図III-2-(ロ)-D-1-a1-7 GaInNAs:Sb/GaNAs:Sb 歪み補償 MQW セルを用いた ILM3J セルの概要

III-2-(ロ)-D-1-a2. 多接合希釈窒化物【埼玉大学】

4 接合太陽電池の第3セルに適用可能な 1eV 帯の InGaAsN 高品質結晶を得るために、母体の InGaAs 中に窒素の δ ドープ層を数 nm の周期で繰り返し積層した超格子構造あるいは疑似混晶を利用した新しい成長方法を提案し（図III-2-(ロ)-D-1-a2-1）、その作製技術の確立と物性評価を行った。その結果、MBE

法でエピタキシャル成長が安定的に進行する窒素 δ ドープ層の形成条件を明らかにするとともに、In 組成と窒素添加量を変えることで結晶膜の格子歪とバンドギャップが制御可能であることを確認した。In 組成と窒素添加量の増加に伴いバンドギャップは減少し、超格子中の平均窒素組成 1.7%、In 組成 5%とした場合に成長した超格子のバンドギャップが約 1eV となることをフォトルミネッセンスおよびフォトリフレクタンスにより確認した。

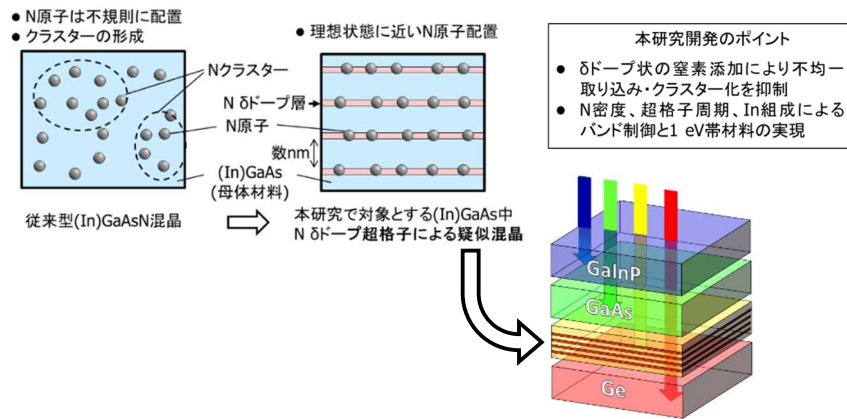


図 III-2-(ロ)-D-1-a2-1 窒素 δ ドープ構造を利用した希釈窒化物混晶の作製

作製した超格子は通常の InGaAsN 混晶に比べ光励起キャリア寿命が 1-2 桁増大し、低温下で 100 ns を超える発光寿命成分が観測されることを見出した(図 III-2-(ロ)-D-1-a2-2)。また、電子移動度として約 300cm²/Vs を得た (図 III-2-(ロ)-D-1-a2-3)。電気特性の改善に必須のアニール処理は同時にバンドギャップの増加を引き起こし、バンド構造の設計上問題となった。このバンドギャップ増大はアニールが膜中の In-N 結合形成を促進することが一因として指摘されていることから、In と N を空間的に分離した新しい積層構造を提案した。その結果、この構造を適用することで In-N 結合形成量が減少し、アニールに伴うバンドギャップ増大の抑制に一定の効果があることを示した。試作セルは 1200nm (約 1eV) までの光感度を示したものの量子効率微弱であり、現状では改善の余地がある(図 III-2-(ロ)-D-1-a2-4)。デバイスシミュレータによる解析から、界面品質や残留キャリアの制御性を改善することがセル効率の向上につながるの見通しを得た。

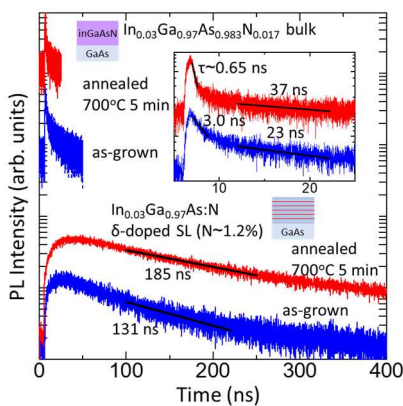


図 III-2-(ロ)-D-1-a2-2 GaInNAs 混晶および InGaAs:N δ ドープ超格子の低温 (5K) 時間分解 PL 特性

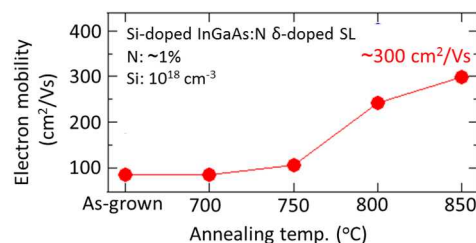
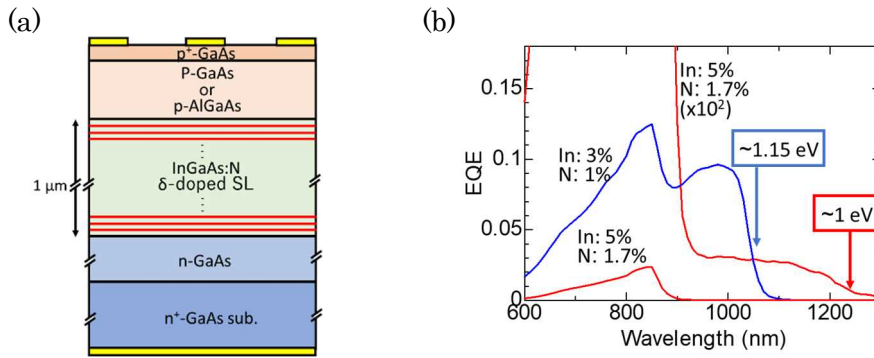


図 III-2-(ロ)-D-1-a2-3 n 型 InGaAs:N δ ドープ超格子の電子移動度のアニール温度依存性



図III-2-(ロ)-D-1-a2-4

(a) 試作 InGaAs:N δ ドープ超格子セルの積層構造と

(b) 外部量子効率スペクトル

III-2-(ロ)-D-1-a3. 多接合希釈窒化物【豊田工大】

GaInNAs セルの高効率化に必要な欠陥評価・解析を実施した。重水素化原料を用いて成膜した GaAsN の赤外吸収測定、過渡容量分光 (DLTS) 測定等での欠陥解析により、残留アクセプタの起源が NH 複合欠陥であり、ダブルアクセプタである可能性を示した。また、九州大学に再委託して、GaAsN 薄膜における欠陥構造の理論解析を行った (次項)。

実施計画見直しにより、本開発項目は 2016 年度で終了となったが、GaInNAs 材料の高品質化のためには、これらの N 起因欠陥の低減が必要であることを示した。

III-2-(ロ)-D-1-a4. 多接合希釈窒化物【九州大】

GaAsN 薄膜における欠陥構造の理論解析を行った。N を含む GaAs 128 原子モデル (N 組成 $x \sim 0.016$) を用いて VASP コードによる第一原理計算により材料の電子物性・構造物性を解析した。複合欠陥を含む材料の電子状態密度を図 III-2-(ロ)-D-1-a4-1 に示す。Ga 空孔複合欠陥は p 型の特性を示している。この意図せぬアクセプタ導入が GaAsN の高品質化を阻害している。また、H 複合欠陥の形成にも寄与している。

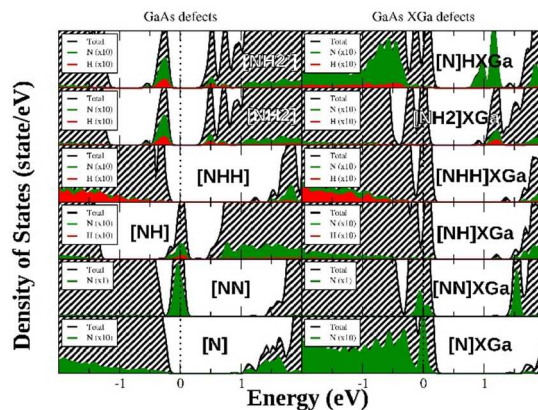
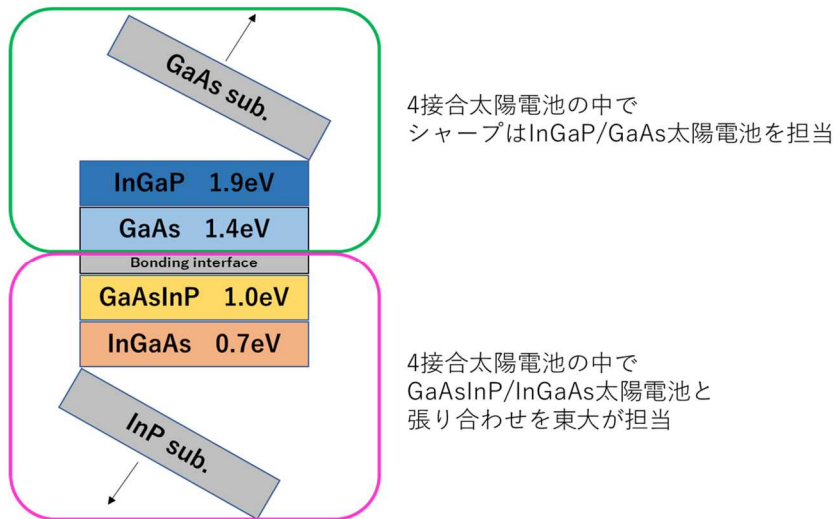


図 III-2-(ロ)-D-1-a4-1 第一原理計算による複合欠陥を含む GaAsN 材料の電子状態密度

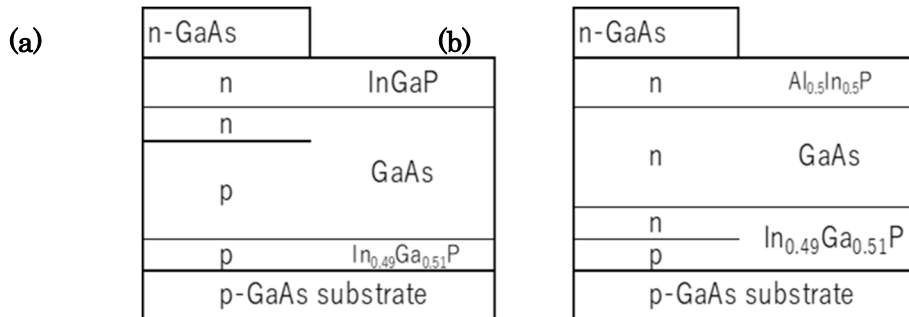
III-2-(ロ)-D-1-a5. 多接合既存構造【シャープ】

参画他機関と共同で4接合もしくは5接合型太陽電池を開発し、50%（集光時）の変換効率を目指すこと目標とし、当社は東京大学とメカニカルスタックの4接合構造での目標達成に取り組み、そのうち受光面側の2接合セル（InGaP/GaAs）の効率向上に取り組んだ。

具体的には、両セルのpn接合部に改良を加えた裏面ヘテロ構造の検討を行い、 V_{oc} の向上を得た。InGaP、GaAsそれぞれについて、いずれも従来比でInGaP: +0.046 V、GaAs: +0.044 V、2接合(InGaP/GaAs): +0.067 Vを得た。本構造で作製したセルは東京大学に提供し、評価検討を実施した。



図III-2-(ロ)-D-1-a5-1 4接合太陽電池構造図



図III-2-(ロ)-D-1-a5-2 構造比較 (GaAsセル) : 従来構造(a)、裏面ヘテロ構造(b)

表III-2-(ロ)-D-1-a5-1 プロジェクト前後での開放電圧の比較

	従来構造	裏面ヘテロ構造			
	(順積み)	(順積み)	上昇幅	(逆積み)	上昇幅
InGaP	1.440	1.486	0.046	1.445	0.005
GaAs	1.020	1.064	0.044	1.087	0.067
InGaP/GaAs	2.460	2.527	0.067	2.488	0.028

III-2-(ロ)-D-1-a6. 多接合量子構造【東京大学】

4 接合セルの電流整合を満たす第 3 セルとして 1.15 eV の光吸収端を有する量子井戸太陽電池の開発を進めた。従来用いていた InGaAs/GaAs/GaAsP 階段量子井戸構造において、GaAs_{0.6}P_{0.4} 障壁層の厚さを 3 nm 程度に抑えてキャリアのトンネル輸送を高効率に保ったまま InGaAs による吸収端を 1.15 eV まで長波長化するために、GaAs 中間層にも P を含有させて InGaAs の圧縮歪みをより効率的に補償できる新構造 (図 III-2-(ロ)-D-1-a6-1) を考案した。MOCVD による層構造の成長法を最適化し、新構造の階段状量子井戸を 70 層含む GaAs 単セルを作製した。AM1.5 照射下での測定により、4 接合セルの第 3 セルとして電流整合を達成するための目標である光吸収端 1.15 eV を得ることができた。開放電圧に関しては、光吸収端エネルギーと V_{oc} との差分として $W_{oc} = 0.35$ V を達成した。これは、本グループで作製した GaAs バルク単セルよりも良好な値である。さらに、GaAs 第 2 セルの下に挿入した場合を想定した 800 nm のフィルタ下での測定により、 $V_{oc}=0.77$ V、 $J_{sc}\cong 10$ mA/cm² (反射率補正後)、曲線因子 0.69 を得た。曲線因子以外は電流整合を達成するための第 3 セルの目標値をほぼクリアした。ただし、量子井戸の層数が 35, 60, 70 と増大するにしたがって、量子井戸の吸収波長域の量子効率や J_{sc} の増大は層数増大から期待される値を下回っており、層数の増大につれてキャリアの外部回路への取り出し効率が劣化していることが懸念された。

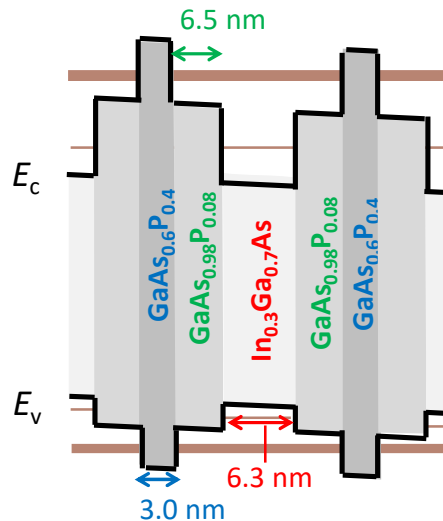
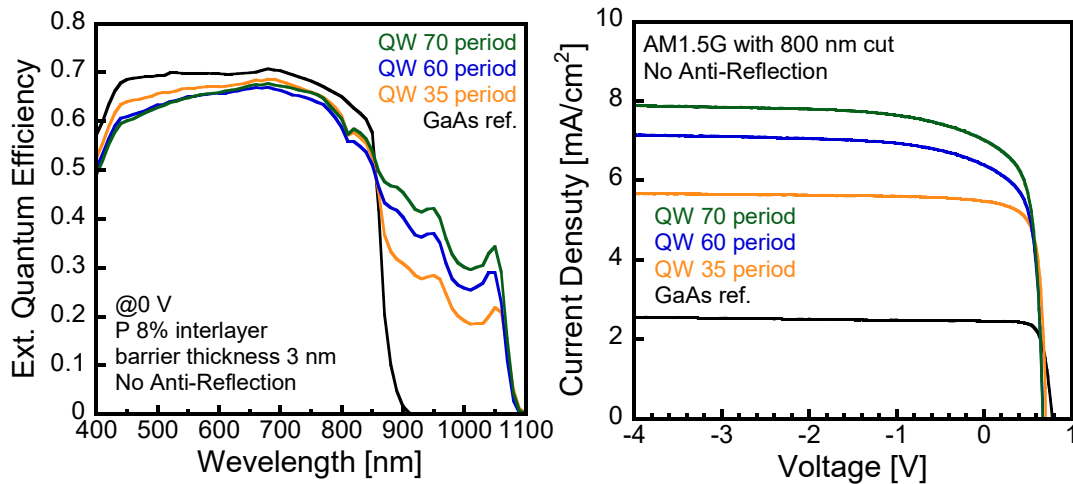
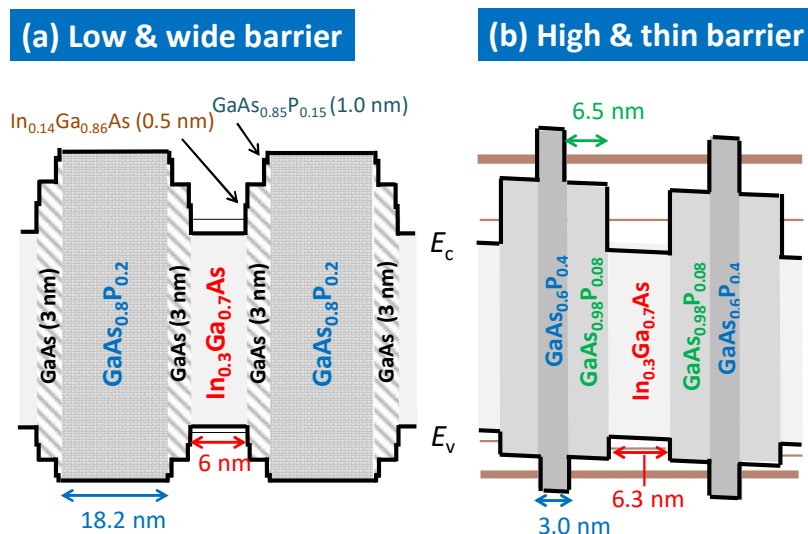


図 III-2-(ロ)-D-1-a6-1 キャリアのトンネル輸送を高効率に保ったまま InGaAs による吸収端を 1.15 eV まで長波長化するために、GaAs 中間層にも P を含有させて InGaAs の圧縮歪みをより効率的に補償できる新構造

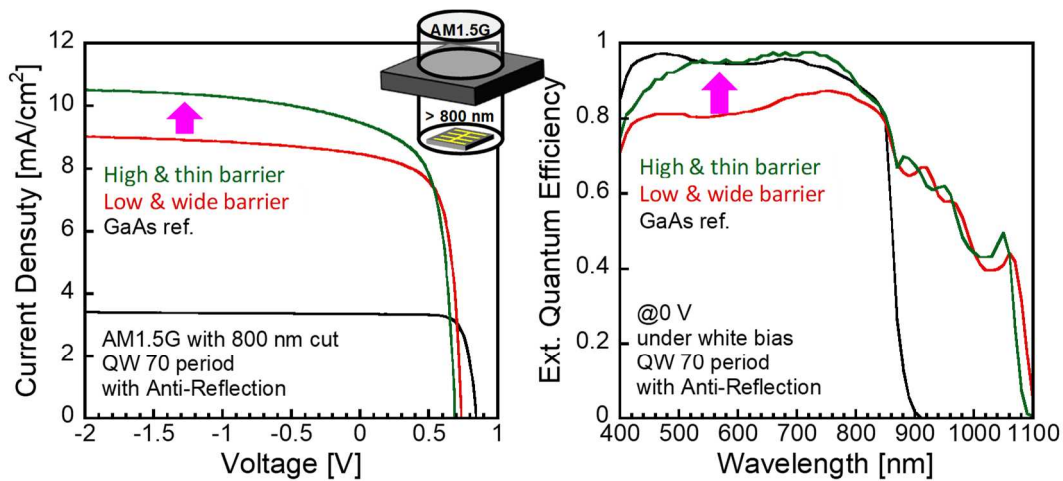


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-2 InGaAs/GaAsP/GaAsP 階段量子井戸を挿入した GaAs 第 3 セルの量子効率と 800 nm フィルタ下での特性

量子井戸の層数が増えた際にキャリア取り出し効率の劣化を招かない構造を検討するため、従来用いていた InGaAs /GaAs /GaAsP 階段量子井戸構造において、歪み補償量子井戸における GaAsP 障壁層に関する 2 つの設計指針 (a: 厚く低い障壁、b: 薄く高い障壁) の優劣を検討した (図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-3)。(b)の構造は、上述の図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-1 の構造である。両構造の量子井戸を 70 層含む GaAs 単セルを作製し、その特性を比較した (図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-4)。短絡条件での内部量子効率に関して、量子井戸の吸収に対応する長波長領域での量子効率は両構造でほぼ等しいが、GaAs の吸収波長域では「b: 薄く高い障壁」のほうが量子効率が高くなった。これは、70 層の量子井戸を横断する少数キャリアの実効移動度が、「b: 薄く高い障壁」でより高くなっている。すなわち、キャリアのトンネルによる輸送がセルの特性向上に貢献していることを明らかにする結果である。4 接合の第 2 セルまでの光吸収に対応するカットオフ 800 nm の長波長透過フィルタのもとでの特性を測定し、効率 50%を得るための 4 接合第 3 セルに求められる特性を比較した。「b: 薄く高い障壁」を用いたセルでは、短絡電流に関しては要求をほぼ満たしているが、開放電圧が若干低く、曲線因子も不十分であった。これは、障壁を薄くするために量子井戸の歪みを圧縮方向にずらした結果、結晶品位が劣化したためであると考えられる。



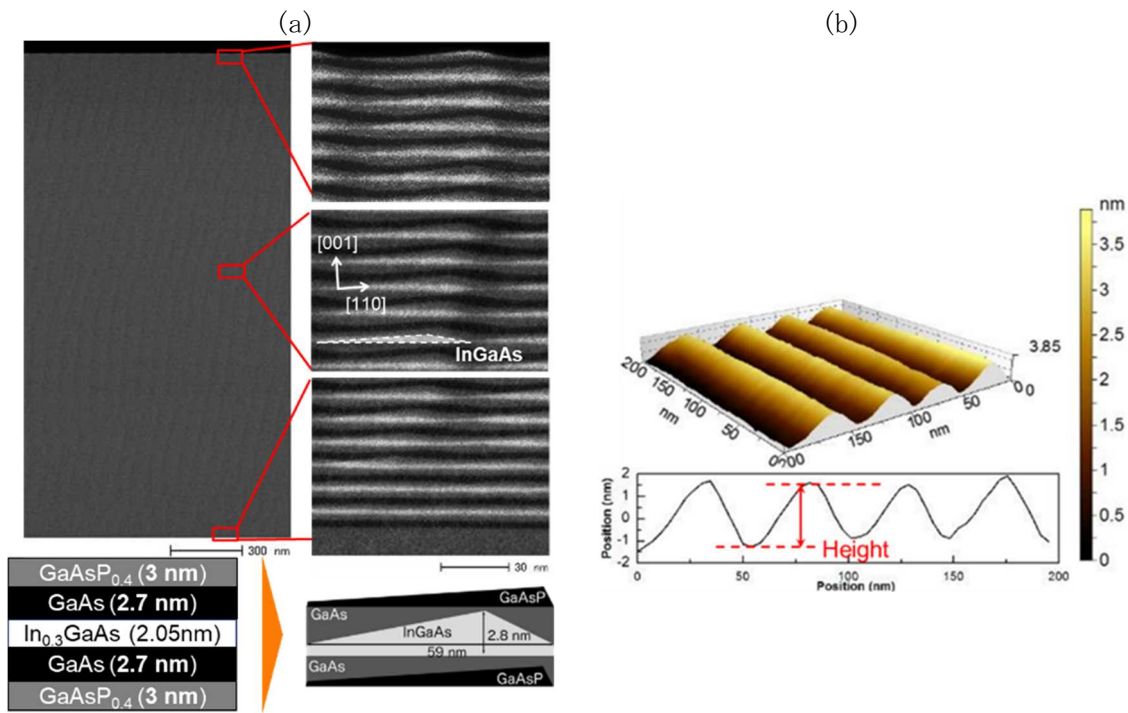
図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-3 InGaAs/GaAs/GaAsP 階段量子井戸構造に関する、2 つの設計指針の比較：(a) 厚く低い障壁、(b) 薄く高い障壁



	1 sun	Low & wide	High & thin	Goal for 4J
J_{sc} (mA/cm ²)		8.5	9.5	11.6
V_{oc} (V)		0.736	0.681	0.74
FF		65%	61%	77%

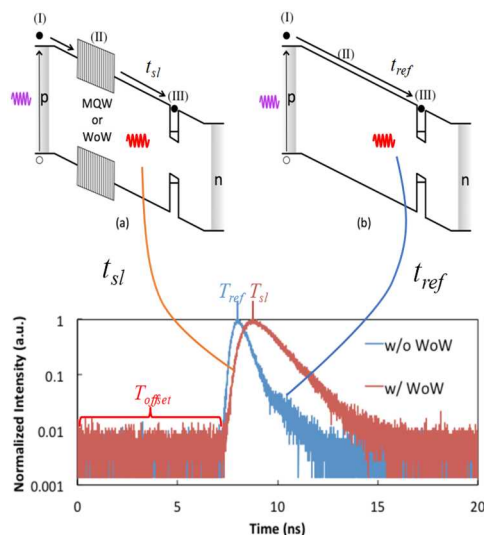
図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-4 図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-3 に示す 2つの設計思想の InGaAs/GaAsP/GaAsP 階段量子井戸を挿入した GaAs 第 3セルの量子効率と 800 nm フィルタ下での特性

電流整合に十分な光吸収と、光励起キャリアの外部回路へ取り出しを両立でき、かつ多数周期の結晶成長を高品位で実現できる構造として、波状量子井戸構造（図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a6-5）を検討した。本構造は、〈110〉方向に 6 度オフした (001) GaAs 基板上に適切な温度で成長した際に、ステップバンチングにより出現する高指数面と、その原料取り込みが (001) 面とは異なることにより出現する構造である。InGaAs 量子細線が量子井戸に載った形になっている。面内で GaAsP 障壁層が薄い部分が存在するので、そこを通して積層された InGaAs 井戸を跨ぐキャリア輸送がトンネル効果により促進され、GaAsP 障壁層が 3 nm の平坦量子井戸よりも光励起キャリアの外部回路への取り出しが促進されることが期待できる。一方、圧縮歪みがかかる InGaAs が 3 次元構造をとるため歪み応力の分散が平坦量子井戸よりも効率的に行われ、多数周期の積層が平坦量子井戸よりも容易なうえに、歪みによる結晶品位の悪化を抑制しやすい利点が期待される。



図III-2-(口)-D-1-a6-5 200層積層した InGaAs/GaAs/GaAsP 波状量子井戸構造の断面 TEM 像(a)と、InGaAs 波状量子井戸で成長を止めた表面の AFM 像(b)

このような波状量子井戸超格子を横切る電子・正孔の輸送に関して、平坦量子井戸との比較を行った。量子井戸構造を積層方向に跨いで移動するキャリアの実効移動度を測定するため、超格子の下部にキャリア検出用のバンドギャップが異なるプローブ井戸を実装したセル構造を作製し、time-of-flight 測定法により電子・正孔の実効移動度を求めた (図III-2-(口)-D-1-a6-6)。405 nm のパルスレーザー励起光照射により表面近傍で光励起キャリアが生成され、量子構造を横切って光励起キャリアが移動してプローブ井戸で発光するまでの時間を時間分解フォトルミネッセンスで測定した。量子構造を含まない参照セルでの測定値との差分をとって、量子構造を横切るキャリアの移動時間を求めた。量子構造全体の積層厚さをこの移動時間で割り、キャリアの移動速度を得た。セルに外部電圧を印加して量子構造にかかる電界を変化させながら、測定を繰り返し、移動速度の電界に対する傾きからキャリアの実効移動度を求めた。その結果を表III-2-(口)-D-1-a6-1 に示す。電子・正孔ともに、波状量子井戸は平坦量子井戸に比べて高い実効キャリア移動度を實現できることが示された。



量子構造をキャリアが走行するのに要する時間

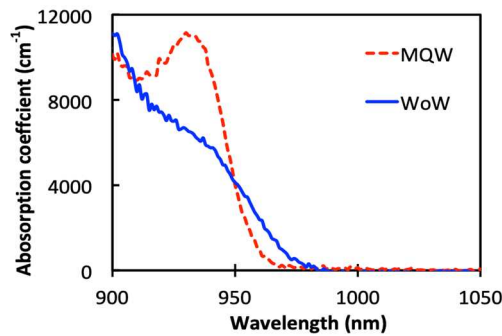
$$t_{sl} - t_{ref}$$

図III-2-(ロ)-D-1-a6-6 平坦量子井戸および波状量子井戸を積層方向に移動するキャリアの実効移動度を測定するためのプローブ井戸付きセル ((a)は量子構造、(b)はバルク GaAs の実効移動度用) のバンドアライメントと、測定した time-of-flight データ

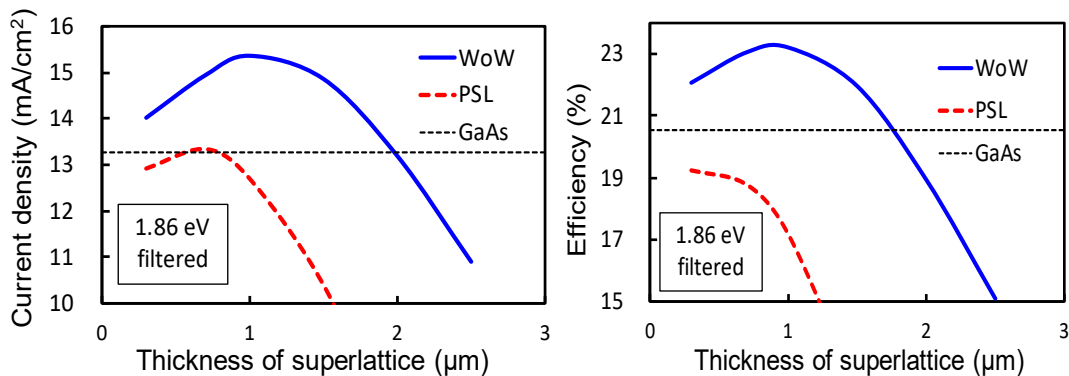
表III-2-(ロ)-D-1-a6-1 平坦量子井戸および波状量子井戸を積層方向に移動するキャリアの実効移動度の測定値

EFFECTIVE MOBILITY			
Carrier mobility [cm ² /(V · s)]			
Structure	electron μ_n	hole μ_p	average
			$\langle \mu_{sl} \rangle = (\mu_n + \mu_p) / 2$
WoW	5.10	2.67	3.89
MQW	1.21	1.45	1.33

これらの値もとに、デバイスシミュレーションを併用して平坦量子井戸と波状量子井戸それぞれを光吸収層に含む GaAs 単セルの特性を見積もった。まず、両構造の GaAs サブバンドギャップ波長帯における光吸収係数を測定した (図III-2-(ロ)-D-1-a6-7)。波状量子井戸では、その構造に由来して電子・正孔の波動関数が空間的にずれていると計算から予測されており、それを反映してエキシトン吸収の無いなだらかな光吸収となっている。また、波状量子井戸構造は平坦量子井戸に比べて不規則であることを反映してか、光吸収端もなだらかな形になっている。しかしながら、サブバンドギャップ波長帯の積分値は両構造でほぼ同じになっている。これらの実効移動度と光吸収係数のデータをもとに、積層した量子井戸を均一な物性 (実効バンドギャップ、光吸収係数、電子・正孔の移動度) を持つバルクと近似して、1次元デバイスシミュレーションに GaAs 単セルの光吸収層として入力することで、光照射下のデバイス特性を予測した (図III-2-(ロ)-D-1-a6-8)。平坦量子井戸に比べて波状量子井戸は、実効キャリア移動度の高いことから、約 100 周期 (積層厚さ約 1 μm) を GaAs 単セルに挿入することで、量子構造を持たない参照セルに比べて短絡電流が増大するだけでなく、変換効率も向上することが予測された。



図III-2-(口)-D-1-a6-7 平坦量子井戸および波状量子井戸の光吸収係数測定結果

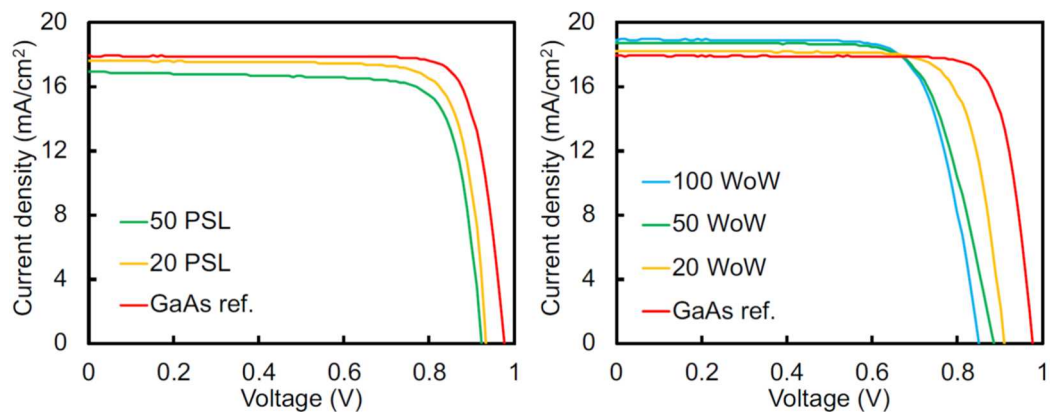


図III-2-(口)-D-1-a6-8 平坦量子井戸および波状量子井戸を光吸収層に含む GaAs 単セルの特性。量子構造を積層方向に移動するキャリアの実効移動度と光吸収の測定値をもとに、量子構造を擬似バルクとして扱った 1 次元デバイスシミュレーションにより推算した。横軸は、積層した量子構造全体の厚さ

この結果をもとに、量子構造の厚さが $1.0\mu\text{m}$ となる 100 周期を最大として、20, 50, 100 周期の平坦量子井戸および波状量子井戸を挿入した GaAs 単接合太陽電池を作製した。ただし、100 周期の平坦量子井戸を挿入した太陽電池は、結晶成長が困難で今回は作製できなかった。同じ 100 周期でも、3 次元構造を有する波状量子井戸のほうが歪みの蓄積が少なく結晶成長が容易なように感じられた。

1 sun 照射下の電流電圧特性 (図III-2-(口)-D-1-a6-9) を見ると、量子構造の挿入により実効バンドギャップが小さくなることに伴い、開放電圧が低下する傾向がみられる。これは、平坦量子井戸と波状量子井戸に共通の傾向である。一方、実効バンドギャップの縮小によりもたらされる光吸収の増大は短絡電流を増加させるはずであるが、このような傾向は波状量子井戸にのみ観察され、平坦量子井戸では逆に量子井戸の挿入により短絡電流が減少する結果となった。これは、平坦量子井戸ではキャリアの実効移動度が小さく、光励起キャリアを外部回路に十分回収できていないためであり、実効移動度の実測結果およびそれに基づくデバイスシミュレーションと整合する結果である。

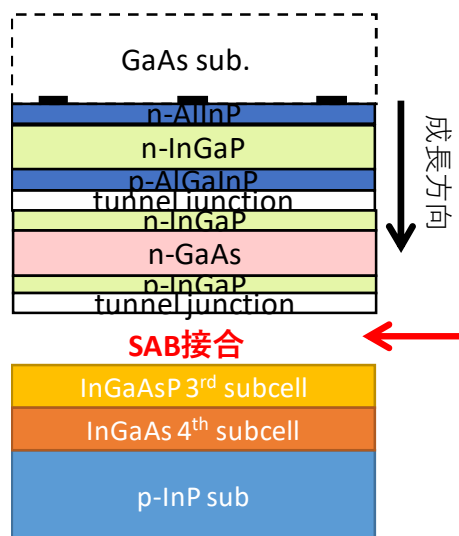
波状量子井戸を挿入した太陽電池の曲線因子が劣化しているが、これはコンタクト層のドーピング濃度が不十分で直列抵抗が重畳しているためであり、再度サンプルを作製してより優れた特性の太陽電池を得て、さらに詳細な比較を行う必要がある。



図III-2-(ロ)-D-1-a6-9 平坦量子井戸 (PSL) および波状量子井戸 (WoW) を挿入した GaAs 単接合太陽電池の電流電圧特性 (1 sun 照射下)

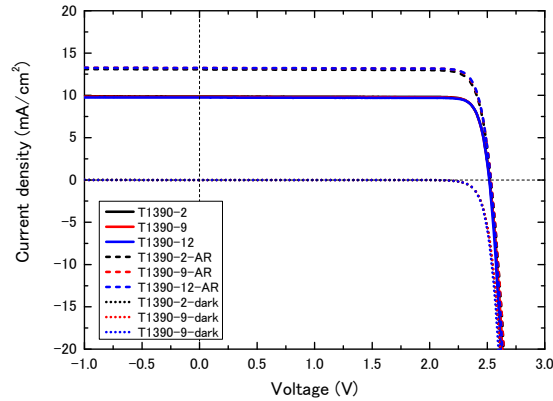
III-2-(ロ)-D-1-a7. 多接合ウエハ接合【東京大学】

シャープから提供された GaAs 基板の上の逆積み InGaP/GaAs トップ 2 接合に、東大で作製する InP 基板の上の InGaAsP/InGaAs ボトム 2 セルを、接合面に寄生構造がなく接合抵抗が低いと期待できる表面活性化ボンディングによりウエハ接合して、4 接合セルの実現を目指した (図III-2-(ロ)-D-1-a7-1)。



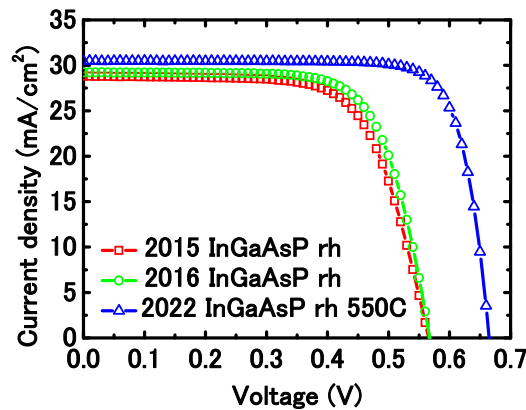
図III-2-(ロ)-D-1-a7-1 表面活性化接合による 4 接合セル形成法

InGaP/GaAs 逆積みトップ 2 接合は、シャープから供給されて、図III-2-(ロ)-D-1-a7-2 に示す良好な電流電圧特性を示した。これに接合されるボトム 2 接合を作製すべく、InP 基板の上の第 3 セル、第 4 セルの作製を進めた。



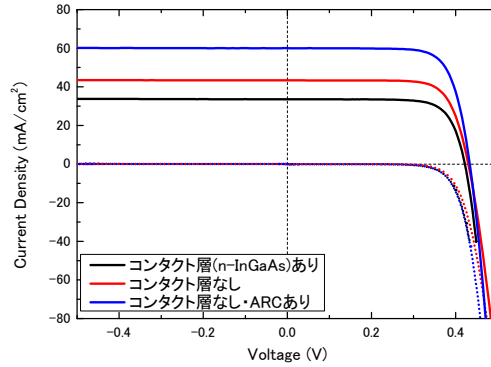
図III-2-(口)-D-1-a7-2 InGaP/GaAs 逆積みトップ 2 接合の電流電圧特性。表面無反射コーティングの有無を比較している

$E_g=1.04\text{eV}$ の InGaAsP セル層構造の結晶成長においては、成長温度が表面モフォロジーに大きく影響した。600°C以上の高温では、表面が凹凸化した。これには、我々が用いている有機V族原料 (TBP) や、MOCVD 反応器の形状 (ガス導入部からウエハまでの距離が比較的長く、供給した原料がウエハ表面に至る前に気相で寄生反応を起こして表面マイグレーションしにくい前駆体を生じやすい) が影響している可能性がある。また、十分な光吸収に必要な $2\mu\text{m}$ 以上を得る際に、膜厚が増加すると表面が凹凸化する傾向があった。一方で、低温成長では、結晶欠陥などが原因となって V_{oc} が上がらない。このような制約の中で、成長温度 550°C で比較的良好なセル特性を得ることができた (図III-2-(口)-D-1-a7-3)。ここでは、高速成長 GaAs セルの構造最適化の中で V_{oc} 増大に効果があるとみられたリアヘテロ構造構造を採用している。



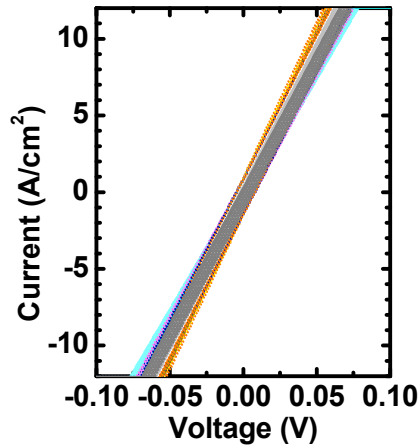
図III-2-(口)-D-1-a7-3 InGaAsP 第 3 セルの電流電圧特性。成長温度を 580°C から 550°C に低下させて比較的良好な特性を得た

一方、 $E_g=0.74\text{eV}$ の InGaAs 第 4 セルに関しては、バンドギャップが小さいので高品位な結晶を得ないと電圧がほとんど出ないという難しいターゲットであったが、幸い表面モフォロジーの課題はなく、結晶成長条件を最適化することで良好なセルを得ることができた。図III-2-(口)-D-1-a7-4 に示すように、 $V_{oc}=0.434\text{V}$, $FF=0.751$, 無反射コーティングつきで $J_{sc}=60\text{mA/cm}^2$ を得ることができた。 $W_{oc}\approx 0.30\text{V}$ であり、既往の文献にも見られないほどの良好な特性が得られている。



図III-2-(ロ)-D-1-a7-4 InGaAs 第4セルの電流電圧特性

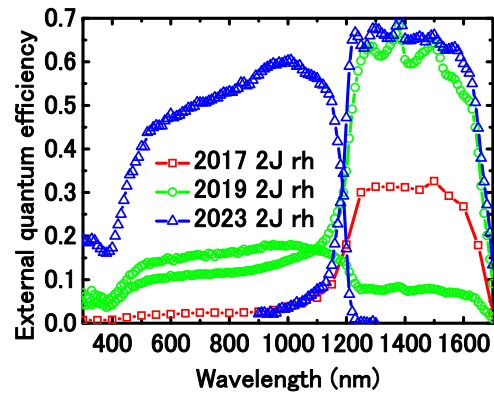
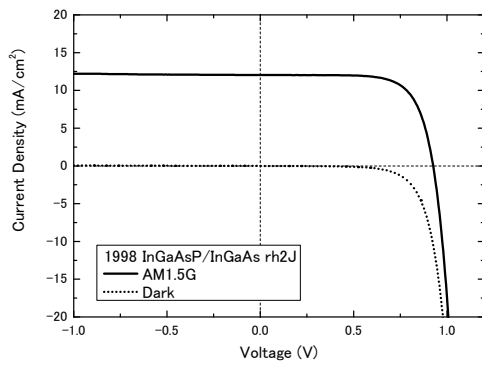
また、InGaAsP と InGaAs セルの間に挿入するトンネル接合に関しては、 $R_{\square \text{ ave}} = 5.5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ と集光動作に十分な低抵抗を得た (図III-2-(ロ)-D-1-a7-5)。



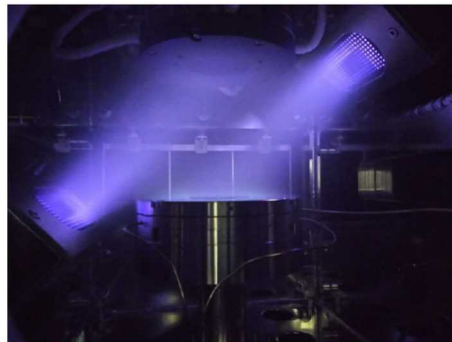
図III-2-(ロ)-D-1-a7-5 トンネル接合の電流電圧特性

これらの2セルをトンネル接合と組み合わせて、1.04eV InGaAsP と 0.74eV InGaAs の2接合セルを形成した (図III-2-(ロ)-D-1-a7-6)。上述の要素をすべて組み合わせた2接合セルとしての動作が確認できた。InGaAsセルの吸収波長帯域ではほぼ理想的な量子効率が得られているのに対して、InGaAsPセルの吸収波長帯域の量子効率が低い。これは、InGaAsPを表面モフォロジー悪化の関係で十分厚くできていないことが理由であり、InGaAsPの成長条件最適化がもう一段必要である。

GaAs基板ベースのトップ2セルと、格子不整合なInP基板ベースのボトム2セルを接合して4接合セルを作製するために、2~4インチサイズウエハ対応の表面活性化接合装置を立ち上げ、GaAsおよびInPウエハに対して機械的接合が成立する条件を求めた。接合にあたっては、接合面から酸化層など接合を妨げる表面汚染を除去するための、高真空中で高速原子ビームを照射する表面活性化プロセス (図III-2-(ロ)-D-1-a7-7) の条件調整が極めて重要である。

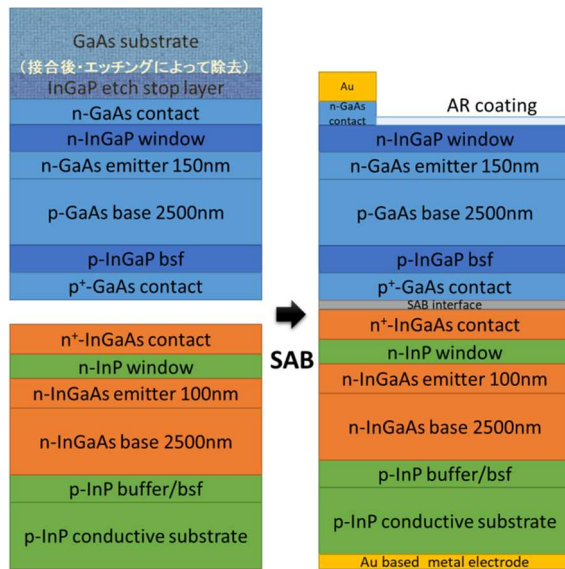


図III-2-(口)-D-1-a7-6 InGaAsP (1.04 eV)と InGaAs (0.74 eV)からなる InP 基板上 2 接合セルの特性 (無反射コーティング無し)

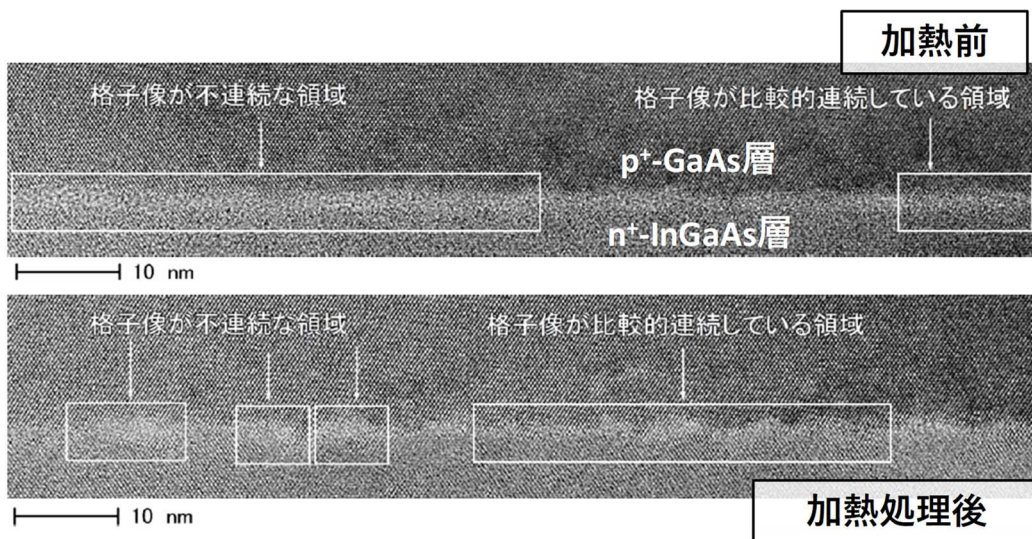


図III-2-(口)-D-1-a7-7 高速 Ar 原子ビーム照射による表面活性化プロセス

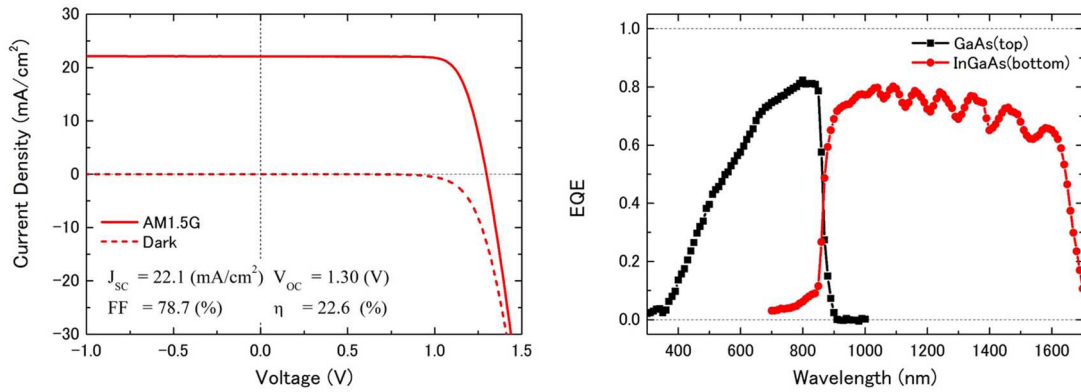
4 接合を作製する前の技術検証として、GaAs 基板上に成長した GaAs セル、InP 基板上に成長した InGaAs セルを表面活性化接合により多接合化し、4 接合セルの第 2 セル、第 4 セルから成る 2 接合セルを作製した (図III-2-(口)-D-1-a7-8)。GaAs 基板側の p^+ -GaAs と InP 基板側の n^+ -InGaAs が高真空中での高速原子ビームによる表面クリーニングを経て接合し、接合面自体がトンネル接合として機能することを狙った。室温での接合では接合界面の電気抵抗が大きかったが、比較低温の熱処理により良好なオーム性接合が得られた。接合面を断面 TEM により解析した結果、接合後には接合面をアモルファス層が連続して覆っているが、アニール処理によりアモルファス層の一部が結晶化し、接合面を跨いで結晶が連続する部分が出現している (図III-2-(口)-D-1-a7-9)。これが接合面の低抵抗化に寄与していると考えられる。トンネル接合の抵抗率は $100\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ であるが、表面処理や熱処理の条件を最適化することでさらに 1 桁程度の抵抗低減が見込まれる。2 接合セルの開放電圧は 1.3 V と良好な 2 接合動作を示唆する値であった (図III-2-(口)-D-1-a7-10)。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a7-8 GaAs 基板の上に成長した GaAs セルと InP 基板の上に成長した InGaAs セルの表面活性化ウエハ接合による 2 接合セルの構造

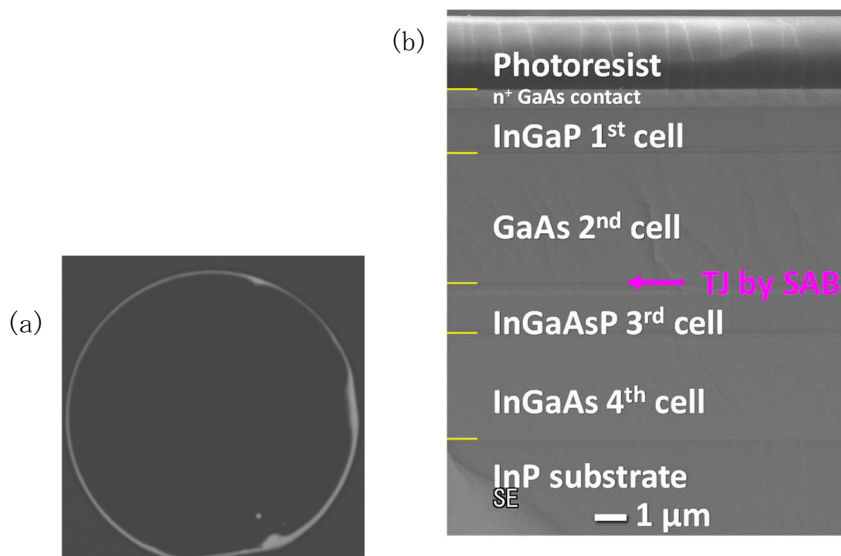


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a7-9 GaAs/inGaAs 2 接合セルの表面活性化ウエハ接合による接合面の断面 TEM 像

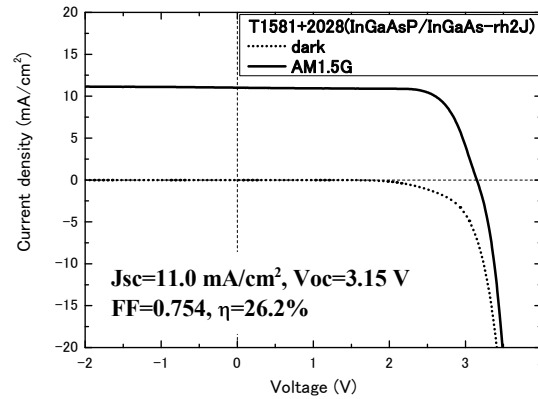


図III-2-(口)-D-1-a7-10 GaAs 基板に成長した GaAs セルと InP 基板に成長した InGaAs セルの表面活性化ウエハ接合による 2 接合セルの特性

本接合技術をもとに、GaAs 基板の上の 2 セルと InP 基板の上の 2 セルを接合した 4 接合セルを作製した。図III-2-(口)-D-1-a7-11 に示すように、void の無い良好な接合面が得られた。電流電圧特性（図III-2-(口)-D-1-a7-12）および分光量子効率の測定から、短絡電流は InGaAsP 第 3 セル (11.0 mA/cm²) であったが、光吸収層 InGaAsP の厚さを 2 μm まで表面モフォロジーを保ったまま増大することができたので、InGaAsP 第 3 セルからの短絡電流はトップ 2 セル (12.5 mA/cm²) とあまり変わらないレベルに到達できた。一方で、V_{oc} は 3.1 V と目標とする 3.5 V には届いておらず、これが効率が低く留まっている原因である。InGaAsP 第 3 セルの更なる特性向上と、ウエハ接合プロセスでセルの効率を低下させない条件最適化がもう一段必要である。とくに、接合後のアニール処理温度が高いとセルの特性を劣化させやすいため、この点をもう一段最適化する必要がある。



図III-2-(口)-D-1-a7-11 表面活性化ウエハ接合による 4 接合セルの特性
 (a) 赤外線カメラで観察した表面。void 無しにウエハが接合できていることを示す
 (b) セルの断面 SEM 層



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a7-12 表面活性化ウエハ接合による4接合セルの特性

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a8. 多接合動作解析【宮崎大学】

エピタキシャル多接合・多接合動作解析では、最適なキャリア回収効率を示す各接合バンドラインナップの設計により、集光下効率50%以上の他接合セル実現に寄与することを目標として研究開発を実施した。

超高効率セル実現を目的として光吸収層に挿入した量子井戸(MQW)におけるキャリア緩和過程の詳細説明を実施した。MQWを挿入することで光吸収領域を長波長側(低エネルギー側)へ拡張できるが、同時にMQW内で形成されたキャリアの再結合損失が生じる。そこでMQW内に形成された光励起キャリアの発光・非発光・熱脱出過程をそれぞれ高感度評価し、キャリア回収過程における内部電界およびセル温度の影響を明らかにして高いキャリア回収効率をもつ多接合構造の提案を行った。

ミドルセルとしてInGaAs/GaAsP歪補償超格子(SL)構造を採用することで、太陽光吸収波長領域を長波長側に拡張できること、形成されるミニバンド内をキャリアがトンネリングにより輸送されるという利点がある。まず初めに、電界印加下でのバンド構造等の理論計算を実施した。nextnanoソフトウェアの導入により、太陽電池の内部電界によってミニバンドが局在化しWannier-Stark ladder(WSL)と化することを示した。WSLにおける電子の存在確率をベッセル関数に基づいた解析から算出したところ、図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a8-1に示すように高次あるいは低次の光学遷移(光吸収)のみが生じることを理論と実験値から示した。また、SL構造のキャリア輸送時には図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-a8-2に示すようなトンネリングと多重フォノン放出によるエネルギー損失が同時に起きていることをフォトリフレクタンス解析から明らかにした。

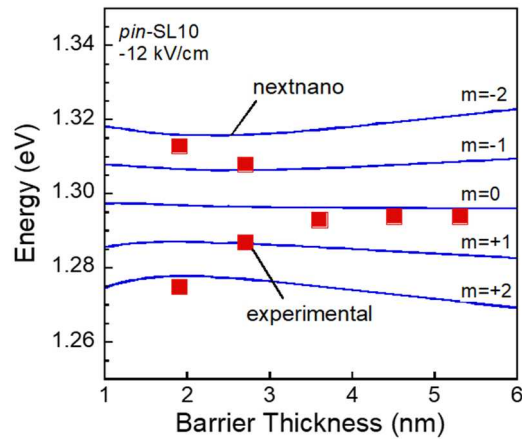


図 III-2-(ロ)-D-1-a8-1 遷移エネルギーの理論値(nextnano)

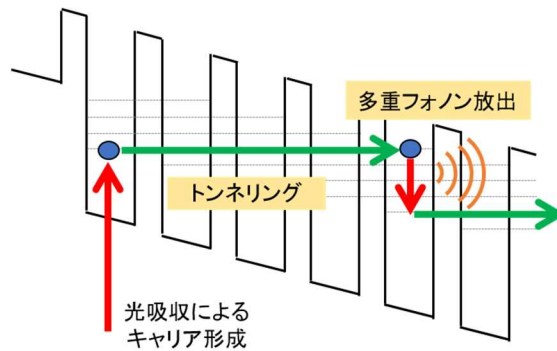


図 III-2-(ロ)-D-1-a8-2 内部電界下でのキャリア輸送とフォトリフレクタンス解析結果の比較

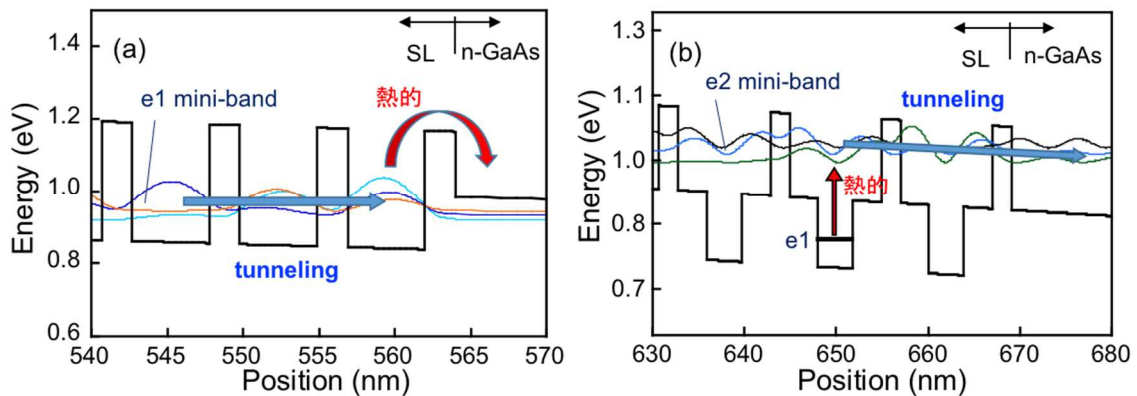


図 III-2-(ロ)-D-1-a8-3 (a)歪緩和層無しおよび(b)歪緩和層有り SL 構造におけるキャリア輸送

光吸収 i 層に SL 構造を挿入した GaAs 太陽電池では、太陽光を十分に吸収するために数 10 スタックの SL 構造を積層させる必要がある。そこで、SL 構造の障壁層と井戸層の間に GaAs 歪緩和層を挿入した試料を用意した。これによって歪の蓄積を回避でき、20 スタックの積層を実現できた。歪緩和層有無の SL 構造領域のバンド構造を、nextnano を用いて計算した結果を図 III-2-(ロ)-D-1-a8-3 に示す。図 III-2-(ロ)-D-1-a8-3(a) に示す歪緩和層無し SL では一次の電子準位 $e1$ がミニバンド化してトンネリングによって輸送できる。しかしながら実際は歪の蓄積によって界面に非発光再結合欠陥が形成され、輸送効率が低下する。さらに、ミニバンドは最右端 InGaAs 井戸層で終了しているため、ここへ到達した電子は最後の GaAsP 障壁層を熱的に乗り越えて n-GaAs 領域へ到達する必要がある。一方、図 III

-2-(ロ)-D-1-a8-3(b)に示す歪緩和層有り SL では e_1 ではなく二次の電子準位 e_2 のみがミニバンド化した。フォトルミネッセンスおよび表面光起電力信号の温度変化測定およびアレニウスプロット解析から、 e_1 に光励起された電子が e_2 へ熱的に励起された後にトンネリングによって輸送されることが分かった。また、 e_2 ミニバンドは n -GaAs 領域まで染み出しているため、再結合することなくアノード領域へ電子が到達する。この結果、従来の SL 構造挿入 GaAs 太陽電池にくらべてキャリア輸送効率が改善される可能性が高いという知見を得た。

上記の nextnano ソフトウェアによるバンド計算から、図 III-2-(ロ)-D-1-a8-3(b)に示すように階段状のポテンシャルになっており、1 次の電子準位 e_1 以外に 2 次の電子準位 e_2 も形成され且つミニバンド化した事が明らかになった。そのため、SL 構造でのキャリア輸送過程は非常に複雑になる。そこで、GaAs 歪緩和層を有する InGaAs/GaAsP 歪補償 SL 構造を GaAs p - i - n 太陽電池光吸収層に挿入した試料に対して、二つの光学的評価手法を用いて、支配的なキャリア輸送過程の同定を行った。

図 III-2-(ロ)-D-1-a8-4 に極低温 4 K における GaAs 歪緩和層挿入サンプル（上部 interlayer）と挿入していないサンプル（下部 no-interlayer）のフォトルミネッセンス (PL) スペクトルを示す。両サンプルともに A、B、C の三つの PL ピークが観測された。C ピークは GaAs 基板起因の発光ピークであり、B ピークは GaAs 層の欠陥起因の発光ピークと考えられる。理論計算との比較より、A ピークが e_1 中電子と価電子帯の 1 次の重い正孔の離散化準位 hh_1 間の発光再結合 e_1 - hh_1 であると同定した。図 III-2-(ロ)-D-1-a8-5 には、A ピークの積分強度を試料温度の関数としてプロットした。

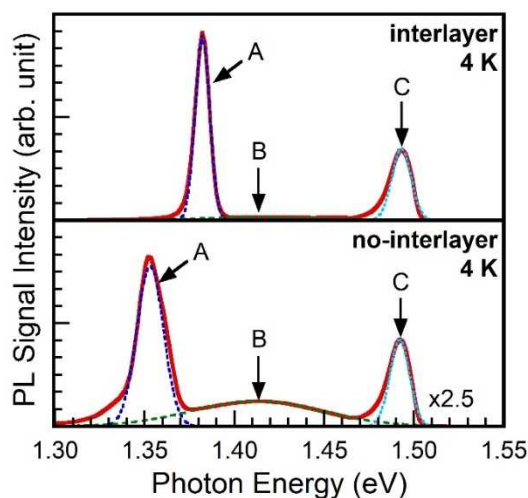
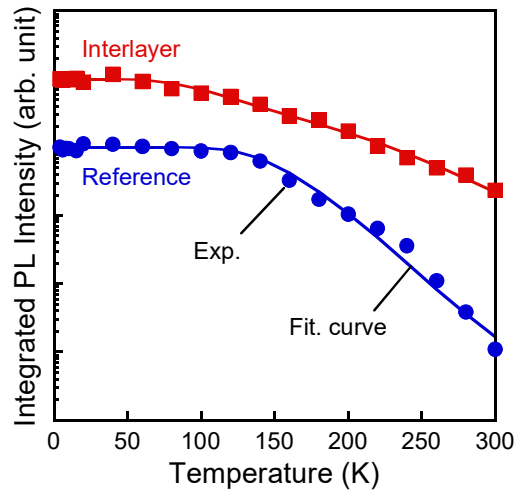
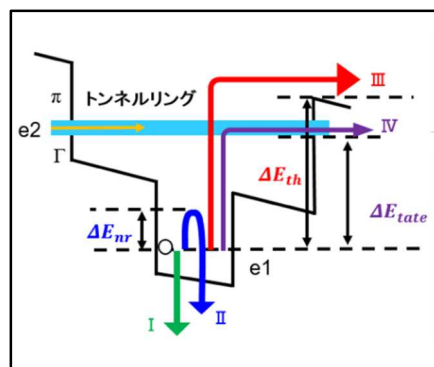


図 III-2-(ロ)-D-1-a8-4 極低温での PL スペクトル

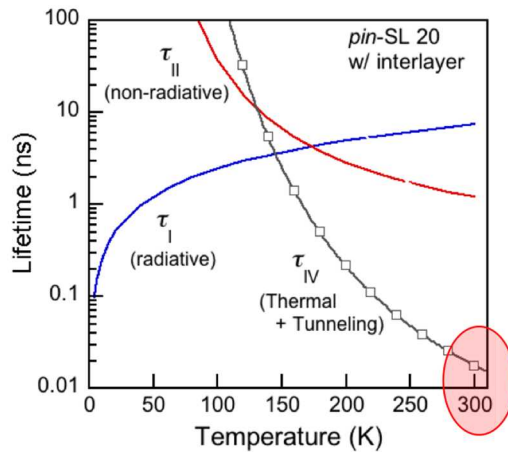


図III-2-(ロ)-D-1-a8-5 A ピークの積分強度温度変化

図III-2-(ロ)-D-1-a8-5 に示した A ピーク積分強度の温度変化は、SL 内電子準位 e1 に光励起された電子の緩和過程を反映した結果である。より詳細な定量解析を行うために、太陽光吸収によって e1 に注入された電子に対して、I:発光再結合損失、II:非発光再結合損失、III:e1 から GaAsP 障壁層を超えて熱励起、IV:e1 から e2 へ熱励起した後に e2 ミニバンドをトンネリング、の四つの緩和過程を定義した (図III-2-(ロ)-D-1-a8-6)。実験値は電子の発光再結合に伴う発光と非発光再結合に伴う発熱をそれぞれ PL 法と圧電素子光熱変換分光 (PPT) 法で検出したものを用いた。四つの緩和過程を考慮した速度方程式を用いて、PL と PPT 信号の積分強度の温度変化をフィッティングした。フィッティングによって算出された各緩和過程の活性化エネルギーは、nextnano によって計算したバンド構造のエネルギー差とよく一致したことから、緩和過程の定義が妥当であったことを確認できた。次に、フィッティングで得られたベストフィットパラメータを用いて、四つの緩和過程の寿命 (τ_I , τ_{II} , τ_{III} , τ_{IV}) を算出した。図III-2-(ロ)-D-1-a8-7 に結果を示す。150 K 以下の低温では τ_I が最短で、発光再結合損失が支配的な緩和過程であることを意味する。一方、150 K 以上の高温では τ_{IV} が最短であった。つまり、GaAs 歪緩和層を挿入することで階段状ポテンシャル化した結果、太陽電池が動作する室温付近では、緩和過程IVが支配的であることが実験的に確かめられた。この結果、GaAs 歪緩和層を有する InGaAs/GaAsP 歪補償 SL 構造では再結合によってキャリアが損失する割合が大きく減少し、キャリア回収効率が大きく向上することが期待できるという知見を得た。

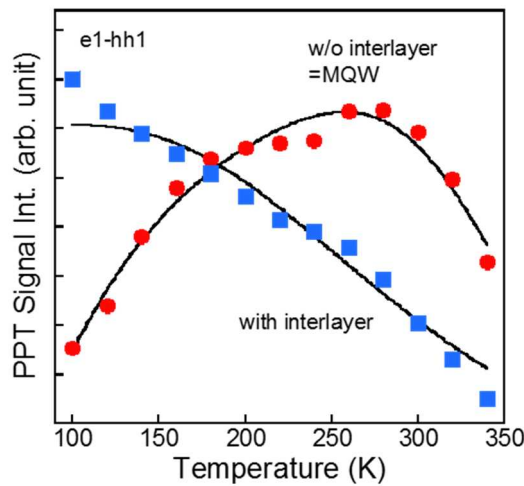


図III-2-(ロ)-D-1-a8-6 e1 電子に対する四つの緩和過程

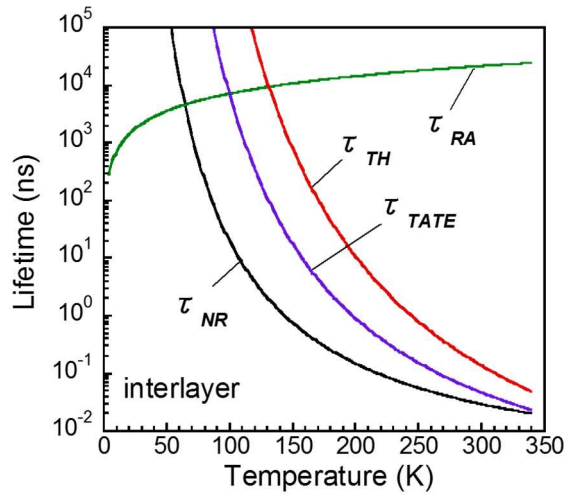


図III-2-(口)-D-1-a8-7 算出された各緩和過程の寿命変化

但し、太陽電池の動作温度である室温付近では PL 信号強度が小さく、測定と解析は困難であったため、解析結果の不確定さが残る。そこで、高温域においても非発光再結合を検出できる PPT 法に着目し、歪緩和層の挿入がキャリア輸送特性に及ぼす影響を議論した。液体窒素温度 (80 K) から室温以上 (340 K) の温度範囲で PPT スペクトルを測定したところ、e1-hh1 遷移起因の PPT ピークが明確に観測された。図III-2-(口)-D-1-a8-8 に、低温から室温以上の温度 (340 K) の温度範囲での PPT 信号強度変化を示す。GaAs 歪緩和層の有無によって高温側の温度変化に明確な違いが観測された。図III-2-(口)-D-1-a8-6 に示した四つの緩和過程を定義したモデルを用いて、上述と同様のフィッティング解析を行い各緩和過程のライフタイムを算出した。結果を図III-2-(口)-D-1-a8-9 に示す。



図III-2-(口)-D-1-a8-8 PPT 信号強度の温度変化



図III-2-(ロ)-D-1-a8-9 室温以上での各緩和過程寿命変化

解析から、全温度領域においてII（非発光再結合損失）のライフタイム τ_{II} が最短になった。この原因は成長時の歪補償が不十分で格子欠陥が増加するためと考えられる。詳細は現在調査中である。一方で、I（発光再結合損失）以外の全てのライフタイムは温度上昇に伴い急激に減少し、340 K付近ではIV（e1 から e2 へ熱励起した後 e2 ミニバンドをトンネリング）のライフタイム τ_{IV} は τ_{II} のライフタイムと同等になった。以上の結果より、実際のデバイス動作環境である室温以上の試料温度（～350 K）での PPT 測定解析から、デバイス動作温度でもミニバンドトンネリング輸送が支配的となり、キャリア輸送特性を改善できることが示唆された。InGaAs/GaAsP 系量子ナノ構造では、(1)低 P 組成障壁層時にミニバンドトンネリングが増加するが、成長時の歪補償が不十分で格子欠陥が増加すること、(2)高 P 組成障壁層では結晶品質はよいが、ミニバンド幅が狭くなること、が分かった。(1)と(2)のトレードオフを考慮した最適設計が必要である。

光吸収層に InGaAs/GaAsP 超格子構造を挿入したエピタキシャル多接合セルにおけるキャリア回収過程を、3つの非破壊評価技術で評価解析を行った。井戸層と障壁層の格子ひずみ緩和を目的とした GaAs 歪補償層を挿入すると高次の電子準位がミニバンド化する。この新たなバンドラインナップを持つ太陽電池セルに対する PL と PPT 信号の温度変化解析から、高次ミニバンドのトンネリングが支配的な緩和過程であることが定量的にわかった。また、実際のデバイス動作環境である室温以上の試料温度（～350 K）での PPT 測定解析から、デバイス動作温度でもミニバンドトンネリング輸送が支配的であり、キャリア輸送特性を改善できることを確認した。

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b1. 量子ドットマルチバンド【東京大学】

(1) 量子ドット超格子太陽電池の高効率化と構造設計

太陽電池の高効率化の1つの方法として量子ドットを用いた太陽電池が提案され、膨大な研究努力が積み重ねられてきた。本研究では、量子ドットを1)単接合セルとして用いた場合、2)タンデムセルのボトムセルとして用いた場合、の2通りに分けて理論解析を行い、一部実験との比較も行って、高効率化に向けての問題点や有用性・可能性を検討した。

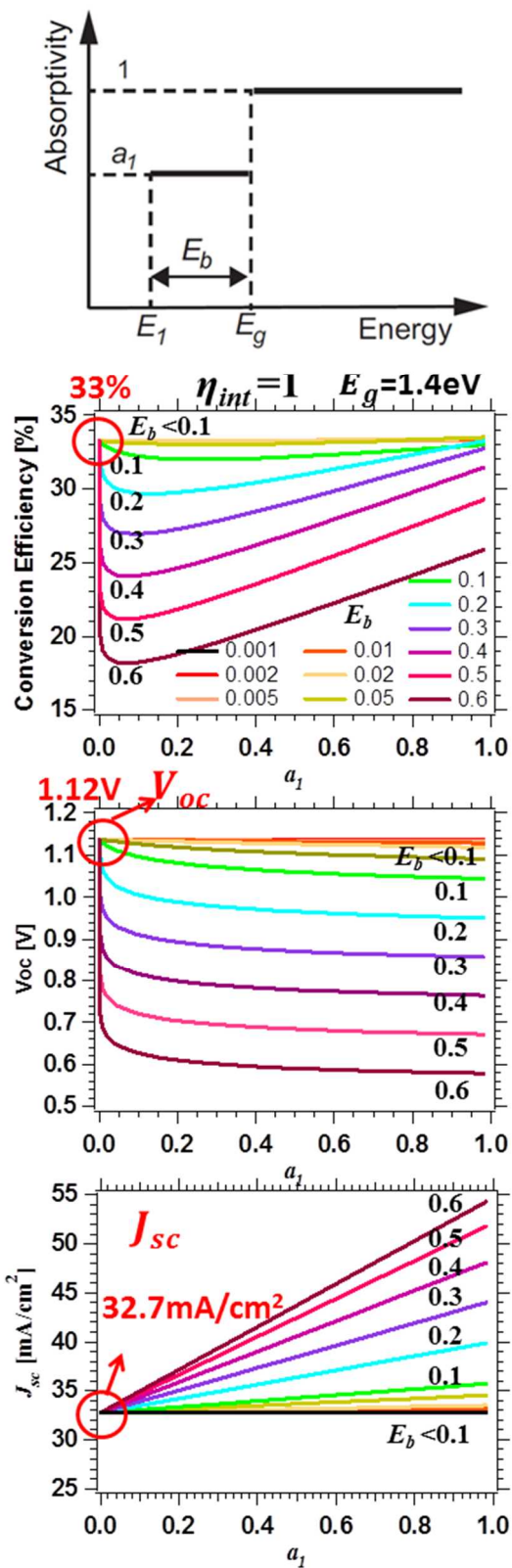
量子ドット単接合セルの場合

中間バンド太陽電池は、単接合セルでも、非集光で45%、最大集光で63%の理論変換効率の可能性を秘めている。その実現に向けては、結晶成長技術や学術研究の蓄積が最も豊富な、エピタキシャル成長したGaAs系半導体に埋め込まれたS-K型のInGaAs量子ドットへの期待が大きい。しかし、これまでの実験報告では、ホスト材料であるGaAsのバルクセルを上回る性能は得られていない。

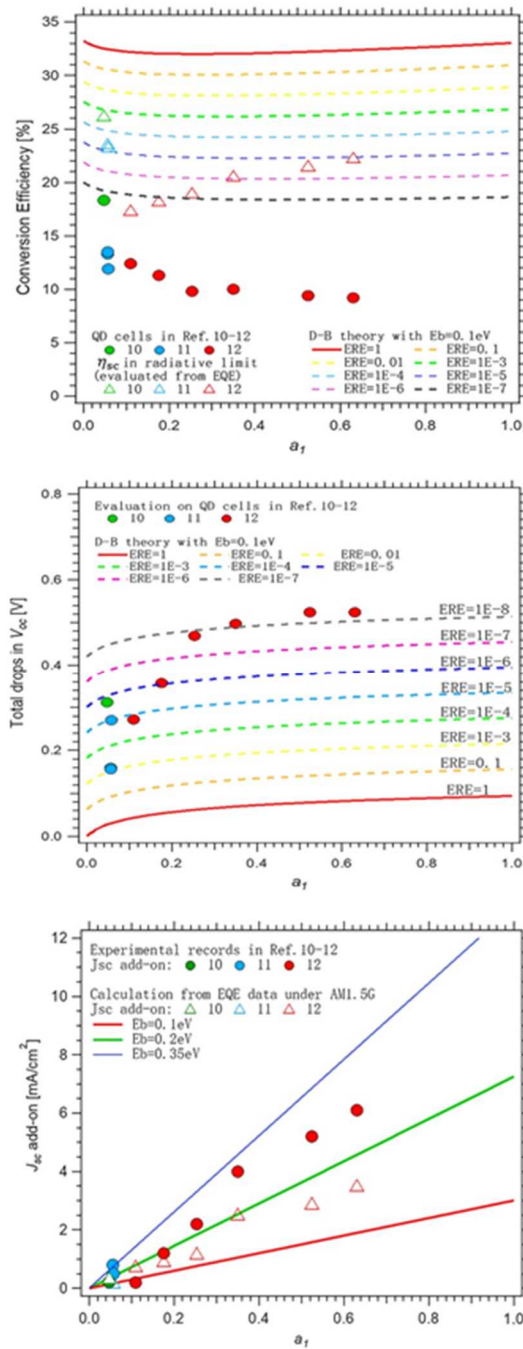
現状、2つの課題があると考えた。1つ目は、フォノンボトルネック効果の有無、2つ目は、量子ドットを埋め込んだ結晶の高品質維持の有無である。高効率の中間バンド太陽電池は、フォノンボトルネック効果有り、高品質維持も有りのもとでなければ実現できない。

我々は、結晶品質は高く維持されているが、フォノンボトルネック効果が無い場合（中間バンド太陽電池として機能していない量子ドット太陽電池）を仮定し、量子ドットと伝導帯の電子の分布に熱平衡条件が成立するとして、短絡電流、開放電圧、曲線因子、変換効率の計算を行った。計算には2ステップ吸収モデルを用いた(図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b1-1)。わずかに量子ドットを導入しただけで著しく開放電圧が低下し、量子ドットによる1段階目の吸収の分だけの電流増加を加味しても、最終的な変換効率が低下することが分かった。これは、高い結晶品質が維持されている「理想結晶」の場合でも見られ、フォノンボトルネック効果が無い場合には必ず生じる内因的(intrinsic)な電圧低下効果であることが分かった。欠陥増加など外因的(extrinsic)な要因で結晶品質が低下して、外部発光効率が低下すると、その対数に比例して、更に開放電圧が低下することも明らかにした。[L. Zhu *et al.*, Scientific Report 8, 11704 (2018)]

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b1-2に示すように、量子ドットに関する過去の実験報告の結果を整理して、上記の計算と比べたところ、この理論モデルで最初に仮定した「フォノンボトルネック効果が無い（あるいは弱い）ために中間バンド太陽電池として機能していない量子ドット太陽電池」の描像が、過去の多くのInGaAs-GaAs系S-K量子ドット太陽電池に当てはまっているようであった。報告された実験結果と理論の比較を更に詳しく見ると、光吸収の増大のために量子ドットの密度を増加させた場合や、ドットのIn含有量やサイズを増やして深い量子ドットを作製したような場合に、開放電圧の顕著な低下の傾向が観測された。理論計算との比較は、In導入による欠陥の増加など、外因的(extrinsic)な結晶品質の低下が生じていることを示唆した。[Lin Zhu *et al.*, Progress in Photovoltaics, <https://doi.org/10.1002/pip.3110>]



図III-2-(ロ)-D-1-b1-1
 量子ドットセルの理論効率
 (フォノンボトルネック効果なし)



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b1-2
理論効率と実験報告との比較

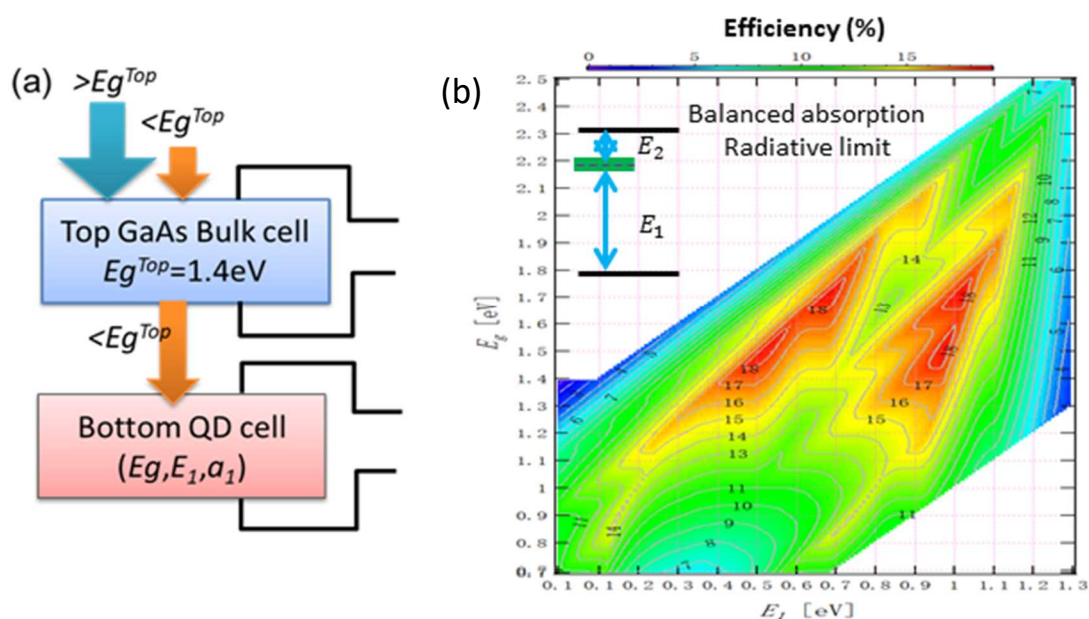
この兆候は、我々自身が米国 NREL と共同で行った、量子ドット太陽電池の絶対エレクトロルミネッセンス測定による開放電圧低下の分析でも検証された。[Lin Zhu *et. al.*, WCPEC-7, June 10-15 (2018)]

以上から、量子ドットを導入した単接合セルで 30%超の変換効率を実現する第 1 の課題は、中間バンド太陽電池の成立条件であるフォノンボトルネック効果を強く誘起させるという本質的な壁であり、第 2 に、欠陥の増加などによる結晶品質低下であることが、明らかになった。

量子ドットセルをタンデムのボトムセルとして用いる場合

量子ドットセルをタンデムのボトムセルとして用いる場合や、類似の場合を検討した。モデルとして、図III-2-(ロ)-D-1-b1-3(a)に示すように、まず、GaAs バルクセル($E_g^{\text{top}}=1.4$ eV)をトップセルとし、バンドギャップ E_g のホスト半導体に埋め込まれた InGaAs 量子ドットセル (エネルギー準位 E_1 、吸収率 a_1) をボトムセルとして、4 端子タンデムセルを構成した場合を調べた。量子ドットボトムセルでは、 E_g^{top} 以下の光子エネルギーの赤外光を、 E_1 エネルギーの量子ドットを介して 2 段階光吸収させる。

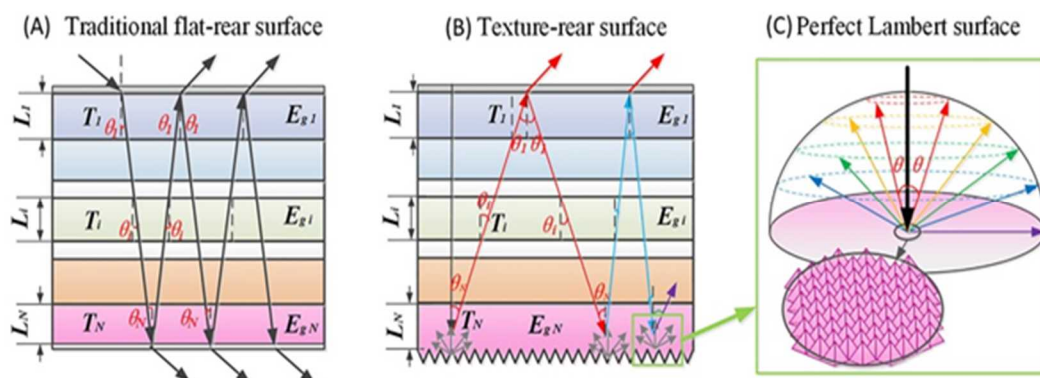
価電子帯から量子ドット、量子ドットから伝導帯の 2 段階光吸収を、 E_g と E_1 の組み合わせごとにバランスさせた最適 2 段階光吸収条件を維持し、かつ、フォノンボトルネック効果が強く中間バンド型ボトムセルが実現されている、理想的な場合について計算したところ、図III-2-(ロ)-D-1-b1-3(b)に示すようにボトムセル効率 18%が期待されることが分かった。GaAs に埋め込まれた InGaAs 量子ドットで、 $E_g=1.4$ eV かつ $E_1=0.95$ eV のときボトムセル効率 17%が期待できることが分かった。理想 GaAs トップセル効率と合わせて、50%超の全体効率となることが分かった。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-3 低電流・高電圧型量子ドットセルのボトムセル理論効率

しかし、フォノンボトルネック効果が無いあるいは弱い現実的な場合について計算したところ、バンドギャップ E_1 のバルクボトムセルと同等の寄与に下がってしまうことが分かった。具体的には、 $E_g=1.4$ eV かつ $E_1=0.95$ eV のとき、約 10%の寄与となった。すなわち、フォノンボトルネック効果が弱い場合には、量子ドットボトムセルを付加したことによって、GaAs バルク単接合セルよりも全体効率が向上することは明らかであるが、通常の 2 種のバルクセルからなるタンデムセルと比較すると等価な寄与のみになってしまう。[Lin Zhu *et. al.*, PVSC-46, June 16-21 (2019)]

ただし、結晶成長上の利点は得られる可能性がある。すなわち、 $E_1=1$ eV 近傍の高品質量子ドットが比較的容易に (低コストに) 成長できれば、歪緩和のための厚いバッファ層を成長したり、メカニカルスタックなどの手法を用いる必要がなくなる。量子ドットの密度が低いために十分な光吸収が得にくい問題に関しては、図III-2-(ロ)-D-1-b1-4に示す裏面テクスチャ構造の導入によりボトムセルの光吸収を格段に増強させられることが、モデル計算により確かめることができた。[Lin Zhu *et. al.*, Progress in Photovoltaics (2019) <https://doi.org/10.1002/pip.3217>]



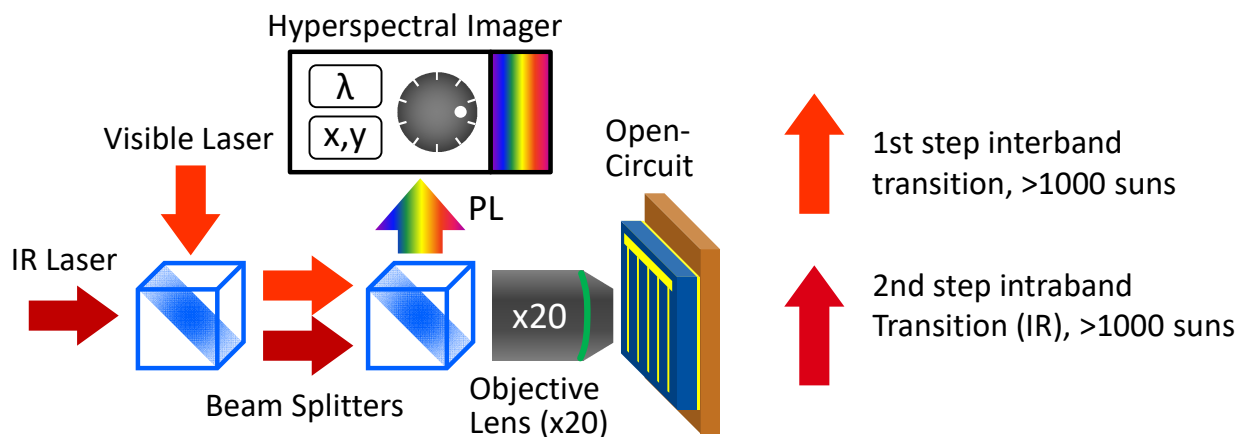
図III-2-(口)-D-1-b1-4 裏面テクスチャ構造による光マネジメント構造

(2) 量子ドットセル集光特性解析：開放電圧の向上

量子ドットセルにおいて、中間バンド型動作による高効率化を実現するためには「2段階光吸収による電流増大」と「擬フェルミレベル分裂による電圧維持」の2つの要件を達成する必要がある。これまで本プロジェクトをはじめとする多くの研究開発により、赤外バイアス照射下での外部量子効率測定 (Δ EQE) や赤外フーリエ変換光電流分光 (FTPS) などを駆使して、量子ドット中間バンド型太陽電池における2段階光吸収について定量的な評価・解析を行い、2段階光吸収によって室温で高効率な電流増大を実現するための必要条件が明らかになってきた。

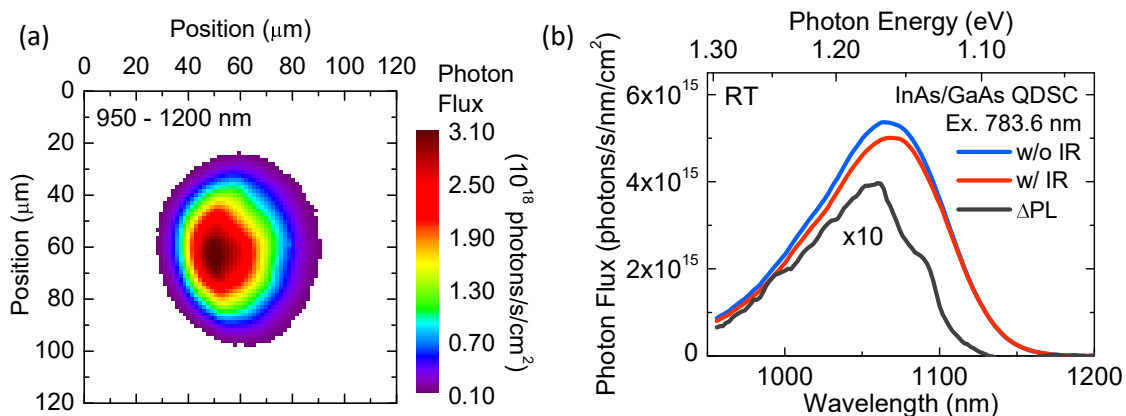
一方で、IB-CB間の擬フェルミレベル分裂による電圧維持については未解明な部分が多い。その理由の一つとして、中間バンド型太陽電池の等価回路が、価電子帯-伝導帯 (VB-CB) 間のダイオードと VB-IB 及び IB-CB 間の直列接続ダイオードとが並列接続した、直並列回路であることが挙げられる。外部端子による電氣的測定ではそれぞれのダイオード電圧を区別することができないため、各準位間で生じる内部電圧、すなわち擬フェルミレベル分裂を区別することができず解析が困難である。

電圧維持の要件達成に向けて、外部回路による電氣的な測定では計測困難な擬フェルミレベル分裂を直接計測するために、絶対値発光分光と一般化プランク則を用いた解析を行った。図III-2-(口)-D-1-b1-5に実験系の模式図を示す。励起光源として1段階目のバンド間遷移を励起するための可視～近赤外光レーザーと、2段階目の IB-CB 間遷移を励起するための赤外光レーザーを太陽電池セルに照射し、試料からの発光スペクトルをハイパースペクトルカメラで測定した。励起光は対物レンズで集光し、励起密度換算で 1000 倍集光相当以上の高倍集光条件下での評価を行った。後述する発光検出系の絶対感度及び波長・空間相対感度校正を行うことによって、量子ドットセルの絶対値発光スペクトルを測定した。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-5 絶対値発光スペクトル測定光学系の模式図

多重積層(10層) InAs/GaAs 量子ドット太陽電池(QDSC)において、絶対値発光(PL)スペクトル分光を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b1-6に室温における絶対値 PL イメージ(950~1200nmの範囲でスペクトル積分)及び絶対値 PL スペクトル(スポット範囲で空間積分)を示す。励起光は宿主材料を励起する 783.6 nm (1.58 eV, 460 W/cm²)を用いた。PL イメージの面内分布は励起光スポット形状を反映している。InAs 量子ドット基底状態からの絶対値 PL スペクトルピークにおいて、赤外バイアス光 1550nm (0.80 eV, 850 W/cm²)の有無により約8%の強度減少を確認した。一般化プランク則を用いた解析により、量子ドット基底状態の擬フェルミレベル分裂は 1.024eV であり、赤外バイアス光照射による擬フェルミレベル分裂の変化量は 1.8meV と見積もられた。この結果は、赤外バイアス光照射により量子ドットの占有密度が減少して、価電子帯と量子ドット(VB-IB)間の擬フェルミレベル分裂が減少する一方、2段階光吸収により量子ドットと伝導帯(IB-CB)間の擬フェルミレベル分裂が生じているためと考えられる。

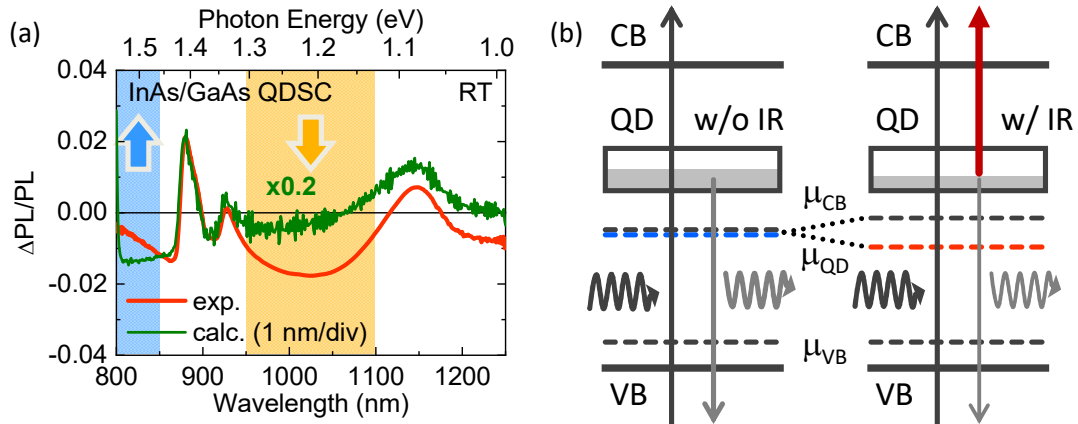


図III-2-(ロ)-D-1-b1-6 InAs/GaAs QDSCにおける室温での

(a)絶対値 PL イメージ (b)絶対値 PL スペクトル

量子ドットからの発光減少メカニズムを解明するため、量子ドット基底状態から宿主材料のバンド端発光までのスペクトル領域における PL 測定を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b1-7に室温における InAs/GaAs 量子ドット太陽電池の差分発光スペクトル(赤線: $\Delta PL/PL$, $\Delta PL = PL_{w/IR} - PL_{w/o IR}$)を示す。図III-2-(ロ)-D-1-b1-6と同様、1050nm を中心とする InAs 量子ドット基底状態からの PL 強度減少を確認した。さらに 910nm の InAs 濡れ層からの発光減少とともに、GaAs バンド端発光ピーク 870nm を中心とする微分形状の $\Delta PL/PL$ スペクトルが得られた。ピークシフトを仮定した差分スペクトル(緑線)と

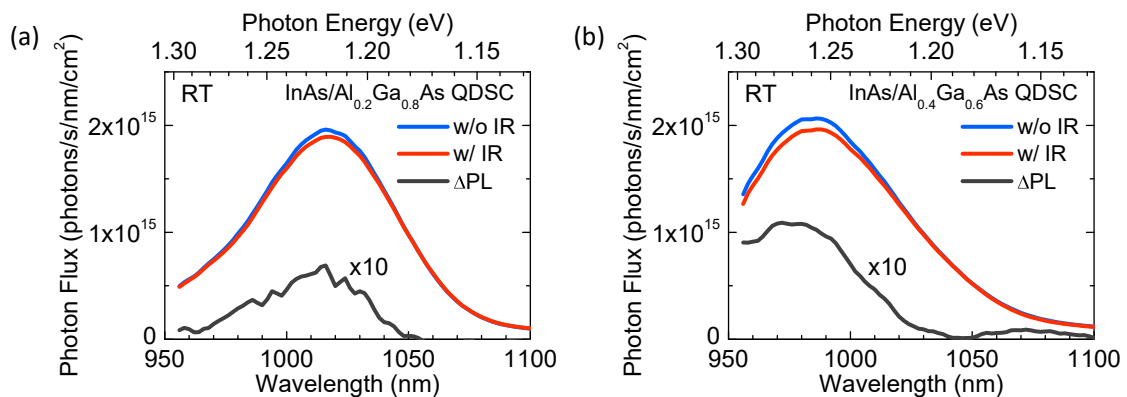
比較すると、GaAs バンド端付近の微分形状については赤外光照射による温度上昇効果と一致した。一方、950~1100nm 付近の減少と 800~850nm 付近の増大は温度変化とは異なる傾向を示しており、2 段階光吸収により量子ドットの占有状態が減少し、伝導帯への光キャリア励起が起きていることを示唆している。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-7 (a)室温 Δ PL/PL スペクトル (b)バンド模式図

InAs/GaAs 量子ドットにおいては、InAs 量子ドットと GaAs 伝導帯間のバンドオフセットが比較的小さく、室温において光キャリアの熱脱出による量子ドット占有密度の減少が避けられない。ワイドバンドギャップ AlGaAs を太陽電池ホスト材料として用いることで、バンドオフセットを大きくして光キャリアの熱脱出を抑制できると期待される。光キャリアの熱脱出は IB-CB 間の擬フェルミレベル分裂を減少させる要因となるため、電圧維持の観点からも有用である。

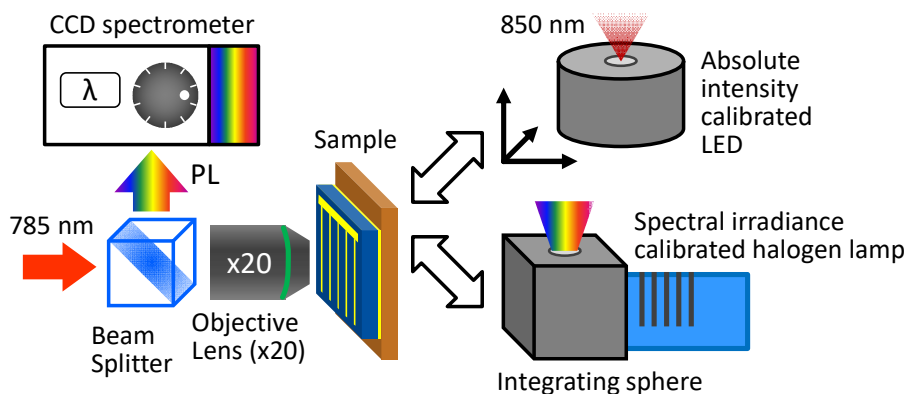
20 層積層した InAs 量子ドットを活性層に含む InAs/Al_xGa_{1-x}As ($x=0.2, 0.4$) 量子ドット太陽電池において、ハイパースペクトルカメラを用いた絶対値 PL 分光により、室温集光下での擬フェルミレベル分裂を評価した。図III-2-(ロ)-D-1-b1-8 に InAs/AlGaAs 量子ドット太陽電池の絶対値 PL スペクトルを示す。InAs/GaAs 量子ドットと同様に、赤外バイアス照射による量子ドット基底状態からの発光減少を確認した。一般化プランク則を用いた解析により、InAs/AlGaAs 量子ドットにおいても InAs/GaAs 量子ドットと同程度の約 1meV の擬フェルミレベル分裂の変化を、赤外バイアス照射下で確認した。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-8 InAs/Al_xGa_{1-x}As QDSC における室温での絶対値 PL スペクトル (a) $x=0.2$ (b) $x=0.4$

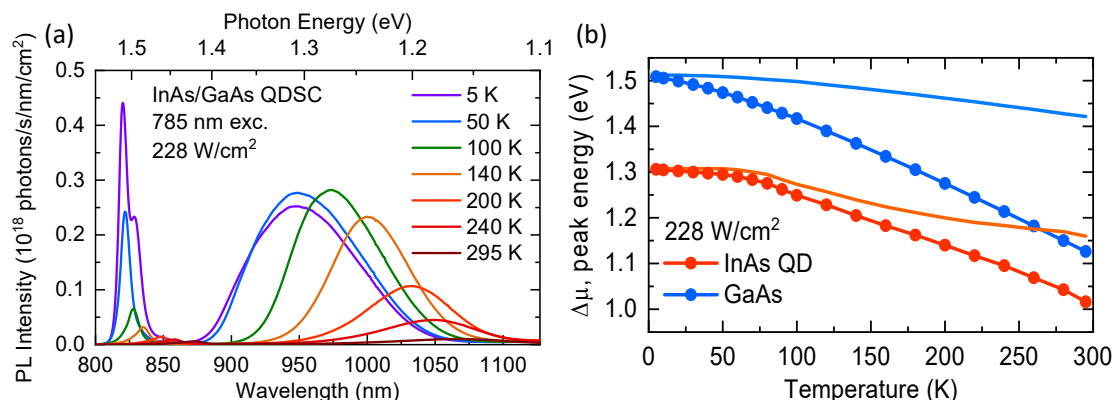
量子ドットセルにおける絶対値発光スペクトルを、量子準位からホスト材料のバンド端まで一括して

計測するために、近赤外高感度 CCD 分光器を導入して光学系を構築した。さらに、熱脱出を抑制した環境下での測定を行うため、低振動光学クライオスタットを導入して顕微分光系に組み込んだ。これらの改良を行った光学系において、図III-2-(ロ)-D-1-b1-9 に示す手順で検出感度の絶対値校正を行った。発光強度の絶対値校正については、強度校正された LED 標準光源（波長 850nm）を用いた。波長・空間相対感度校正には、スペクトル既知の校正用ハロゲンランプと積分球を用いた。これらの校正を行うことによって、通常は任意単位 (arb. units) で得られる発光スペクトル強度を、絶対光子数 (photons/s/cm²/nm) を単位として計測し、一般化プランク則を用いた定量的な解析を行うことが可能となる。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-9 絶対値発光スペクトル測定光学系と校正法の模式図

多重積層(10層) InAs/GaAs 量子ドット太陽電池において、785nm (1.58eV, 228W/cm²) 励起下における絶対値 PL スペクトルの温度依存性を測定した(図III-2-(ロ)-D-1-b1-10)。室温から 5 K の極低温まで、温度降下に伴うバンド端シフトに起因するピークのブルーシフトとともに、PL ピーク強度も大きく変化した。絶対値 PL ピーク強度から各温度における擬フェルミレベル分裂を見積もった。InAs 量子ドットと GaAs ホストの擬フェルミレベル分裂を比較すると、低温では擬フェルミレベル分裂の差が大きくなり、高温では擬フェルミレベル分裂の絶対値は小さくなり両者の差も小さくなった。高倍集光条件下ではフォトフィリング効果によって量子ドットが光キャリアで占有されることを示唆している。

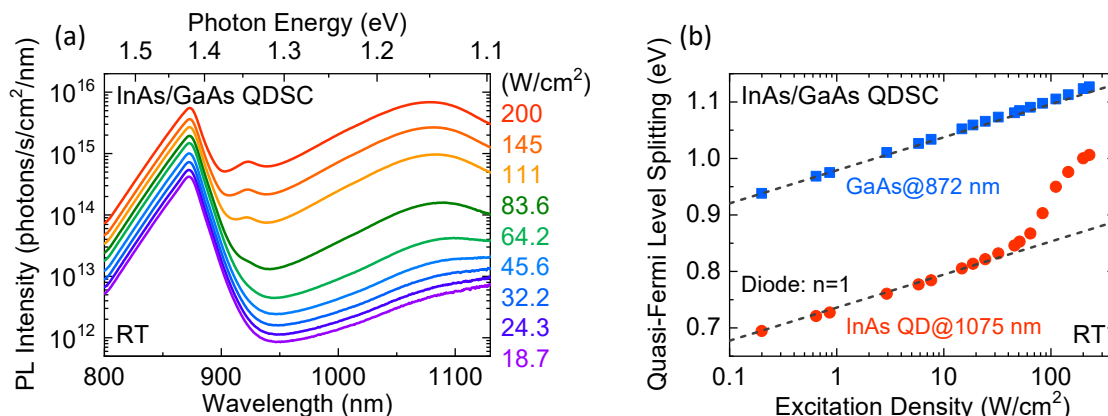


図III-2-(ロ)-D-1-b1-10 InAs/GaAs QDSC の温度依存性

(a) 絶対値 PL スペクトル (b) 擬フェルミレベル分裂

多重積層(10層) InAs/GaAs 量子ドット太陽電池において、785nm (1.58eV) 励起下における室温での絶対値 PL スペクトルの励起光強度依存性を測定した。図III-2-(ロ)-D-1-b1-11 に InAs/GaAs 量子ドット太

陽電池の絶対値 PL スペクトル (縦軸対数) を示す。872nm (1.42eV) の GaAs 及び 1075nm (1.15eV) 付近の InAs 量子ドット PL ピークそれぞれについて、一般化プランク則を用いた解析により擬フェルミレベル分裂を定量評価した。GaAs については励起密度の対数に対して線形に増加し、ダイオード方程式から予想される理論曲線と良い一致を示した。一方で InAs 量子ドットでは、50W/cm² (500 倍集光相当) から急激な擬フェルミレベル分裂の増大を確認した。最大集光時にはおよそ 0.13eV の非線形増大が得られ、高倍集光下におけるフォトフィリングによる電圧維持実現につながると期待される。

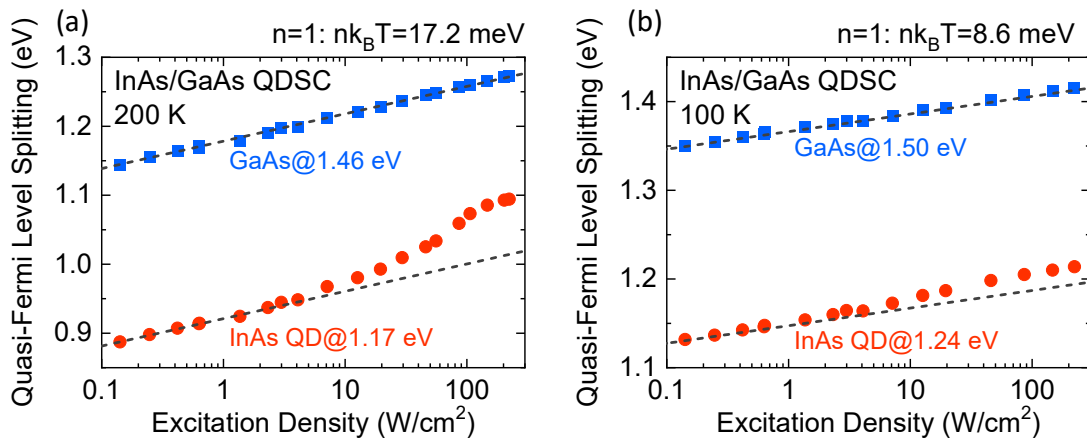


図III-2-(ロ)-D-1-b1-11 InAs/GaAs QDSC の励起密度依存性

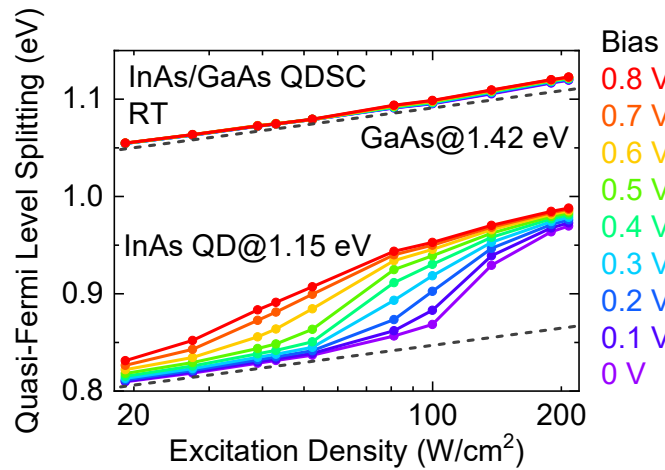
(a) 絶対値 PL スペクトル (b) 擬フェルミレベル分裂

集光による電圧回復の効果をより詳細に理解するために、絶対値発光分光の低温での励起光強度依存性及び電圧バイアス依存性を測定し、集光下での量子ドットにおける擬フェルミレベル分裂の非線形増大の振舞いを解析した。InAs/GaAs 量子ドット太陽電池において、200K と 100K の低温集光下における絶対値 PL スペクトルを測定した。一般化プランク則を用いて絶対値 PL スペクトルを解析し、InAs 量子ドットと GaAs それぞれについて、擬フェルミレベル分裂を定量評価した結果を図III-2-(ロ)-D-1-b1-12 に示す。GaAs バンド端発光については温度によらず室温と同様に、ダイオード方程式から導かれる理論曲線とよく一致した。一方で InAs 量子ドット基底状態については、室温で非線形増大がより顕著であり、100 K の低温ではほぼ理論曲線と一致する傾向を示した。

絶対値発光計測時に外部電圧バイアスを印可し、室温集光下における絶対値 PL スペクトルの電圧バイアス依存性を測定した。電圧バイアス印可時における擬フェルミレベル分裂を一般化プランク則により定量評価した結果を図III-2-(ロ)-D-1-b1-13 に示す。GaAs については印可バイアス電圧によらずほぼ一定の値を示した。一方で InAs 量子ドットでは、バイアス電圧を小さくする (短絡状態に近づく) につれ、非線形増大が起きる励起密度の閾値が大きくなった。これらの温度依存性及び電圧バイアス依存性の結果は、IB-CB 間の非輻射緩和過程により量子ドットに捕獲される伝導帯光キャリアと、量子ドットから伝導帯へと取り出される光電流との間の相反関係を表している。



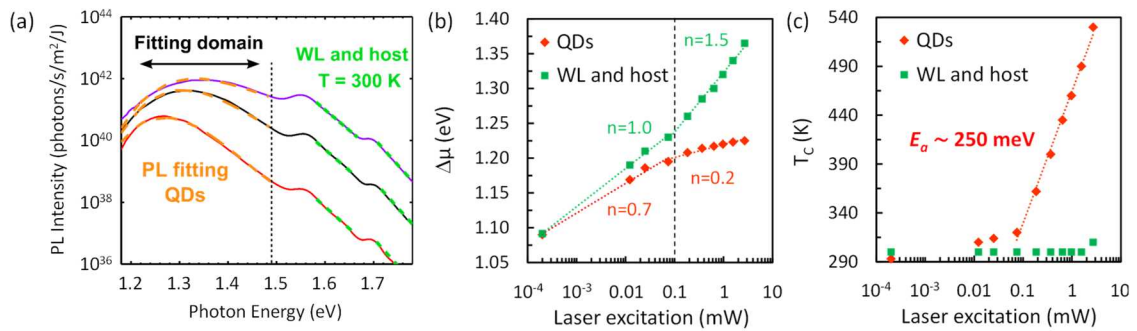
図III-2-(ロ)-D-1-b1-12 InAs/GaAs QDSC における低温での集光下擬フェルミレベル分裂 (a) 200 K (b) 100 K



図III-2-(ロ)-D-1-b1-13 InAs/GaAs QDSC における室温での擬フェルミレベル分裂の電圧バイアス依存性

高倍集光下における電圧回復効果として、量子ドット中間バンド型太陽電池におけるホットキャリア効果についても検討を行った。InAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As 量子ドット太陽電池において、ハイパースペクトルカメラを用いて計測した絶対値 PL スペクトルから、一般化プランク則に含まれるキャリア温度(T_c)もパラメータとしてフィッティングすることで、高倍集光下における擬フェルミレベル分裂とキャリア温度を同時に抽出した。

図III-2-(ロ)-D-1-b1-14 に示すように、集光による擬フェルミレベル分裂の増大に加え、ホットキャリア効果による電圧向上が期待される結果を得た。

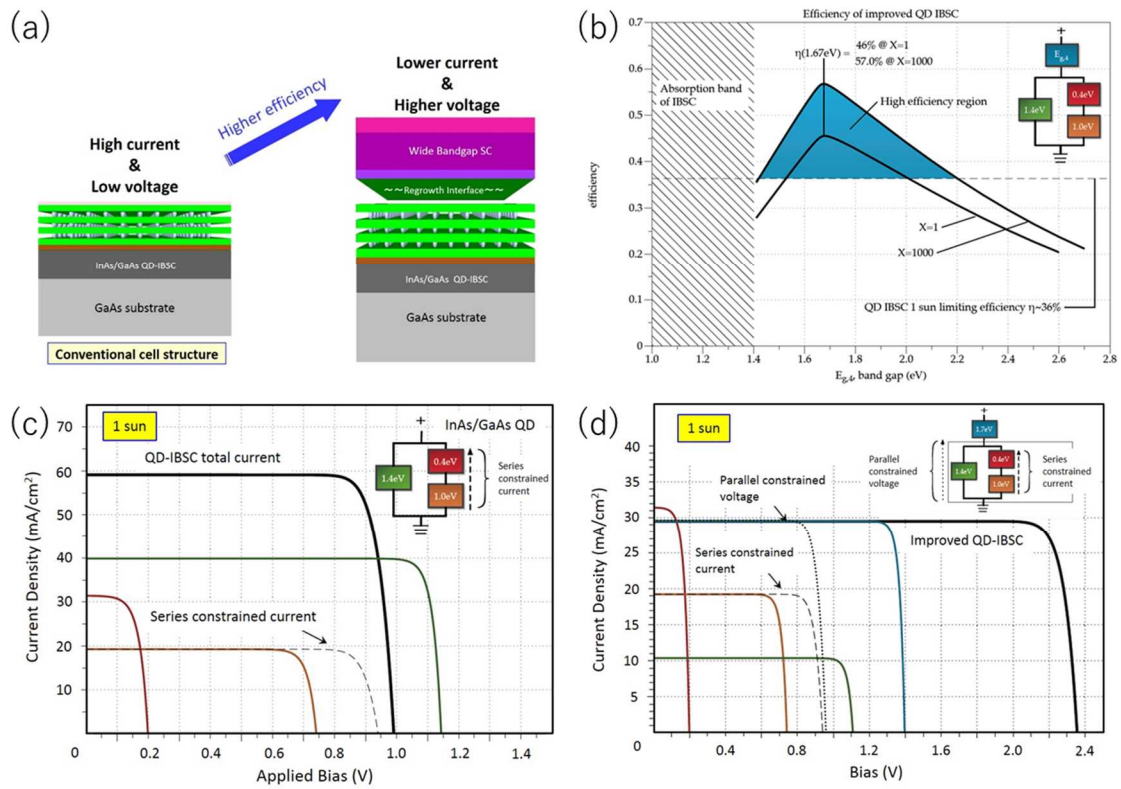


図III-2-(ロ)-D-1-b1-14 InAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As QDSCにおける室温でのホットキャリア効果 (a)絶対値 PL スペクトル (b)擬フェルミレベル分裂 (c)キャリア温度

以上、量子ドットセルにおける中間バンド型動作の要件の一つである電圧維持の達成に向けて、絶対値発光分光計測と一般化プランク則を用いた解析を行い、擬フェルミレベル分裂を直接計測した。得られた知見から、高倍集光下における開放電圧の向上を実現するための指針を見出した。本プロジェクトを通して、室温での高効率2段階光吸収及び電圧維持実現に向けた指針を解明し、量子ドット・マルチバンドセルによる単接合限界を超える高効率化の達成につながる成果を得た。

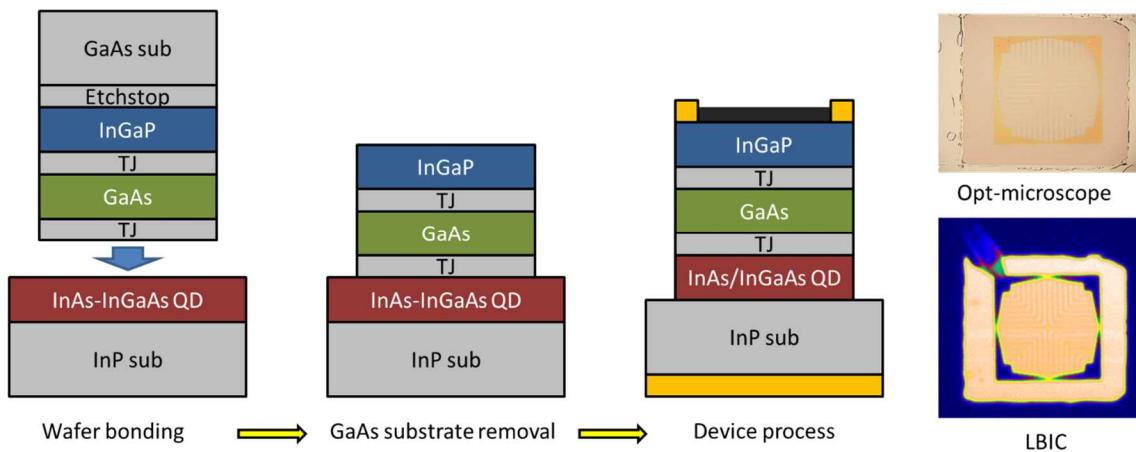
(3) 低電流・高電圧型量子ドットセル

本研究開発では、東大先端研が独自に開発を進めてきた高均一で高密度の量子ドット超格子の作製技術の実績を基に、量子ドット超格子中に形成される中間バンドを介した光電変換過程の制御法を確立し、量子ドットセルの高効率化を目指した。その際、集光動作下において発生する熱のマネジメントが高効率動作実証への重要な要素となる。前述のように中間バンド型太陽電池の動作原理では、中間バンドにおいて擬フェルミ準位分裂によって電圧低下を抑制しつつ、2段階光吸収過程によって生成された追加的なキャリアを収集することで電流を向上させることで、一般的な2準位型の単接合セルに比べて高い効率が得られる。InAs/GaAs系量子ドットセルの場合、短絡電流密度は現状で約30~35mA/cm²で、理論上は~50 mA/cm²になる。したがって100倍以上の集光下では5A/cm²前後になり、ジュール損失とセル温度上昇による影響から、集光効率として約40%が実デバイスの限界と考えられる。そこで電流密度を下げ、開放電圧を上げるアプローチとして、高エネルギーギャップのトップセルの下に、InAs量子ドットを基盤とした中間バンドセルを配置した集光セルの開発を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b1-15に低電流・高電圧型量子ナノ構造太陽電池の概要と理論計算結果を示す。本研究開発では、これまでの26.8% (72 suns) から45%以上の高効率の実証を目指し、トップセル材料として従来のAlGaAsやInGaPセルの他に、InGaP/GaAsタンデムセルを取り上げ、産総研、シャープ(株)と連携して進めた。



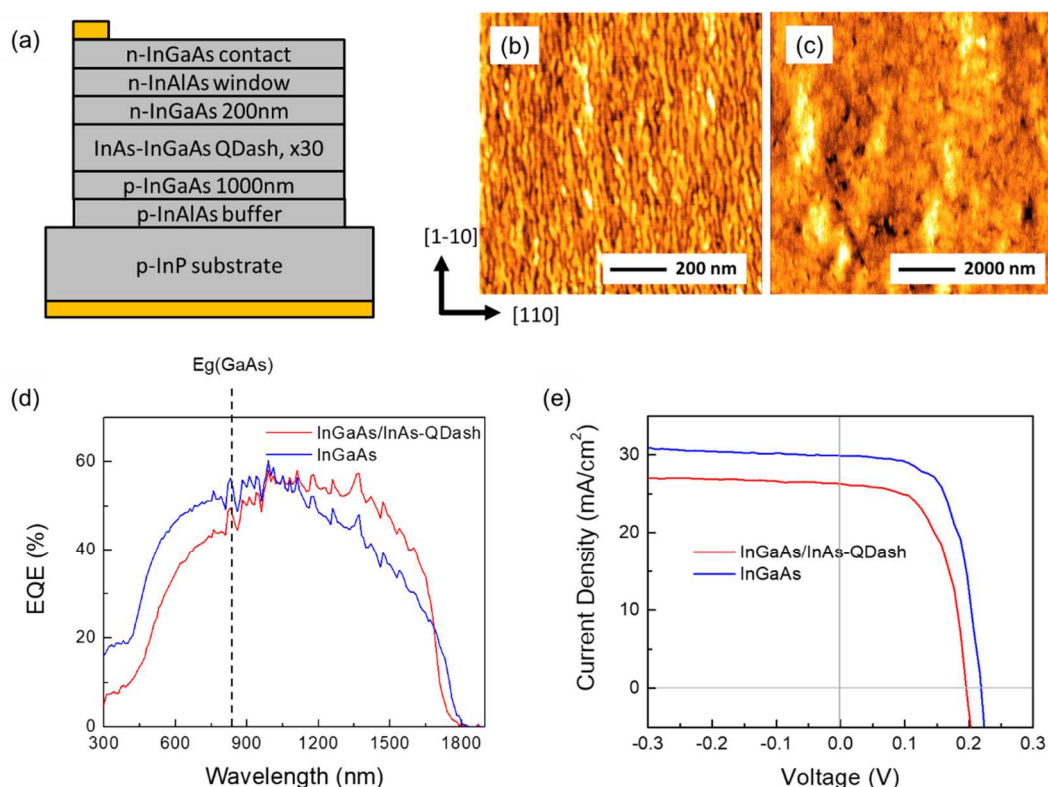
図III-2-(ロ)-D-1-b1-15 低電流・高電圧型量子ナノ構造太陽電池設計

図III-2-(ロ)-D-1-b1-16 に本研究で開発した InAs-InGaAs QD セル、およびシャープ(株)が作製した InGaP/GaAs タンデムセルによる低電流・高電圧型中間バンドセルの作製工程を示す。QD セル上へのトップ側セルの実装には、特性劣化を生じさせずに行える半導体接合法を採用した。ただし、再現性のよい半導体接合のためには試料表面が原子層オーダーで平坦であることが要求される。十分な平坦性が確保されることで、図III-2-(ロ)-D-1-b1-16 に示すように半導体接合後の LBIC マッピングにおいて異常点は見られず均質な電流生成分布を実現できている。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-16 半導体接合による InGaP/GaAs//InAs-InGaAs QD 低電流・高電圧型中間バンドセルの作製

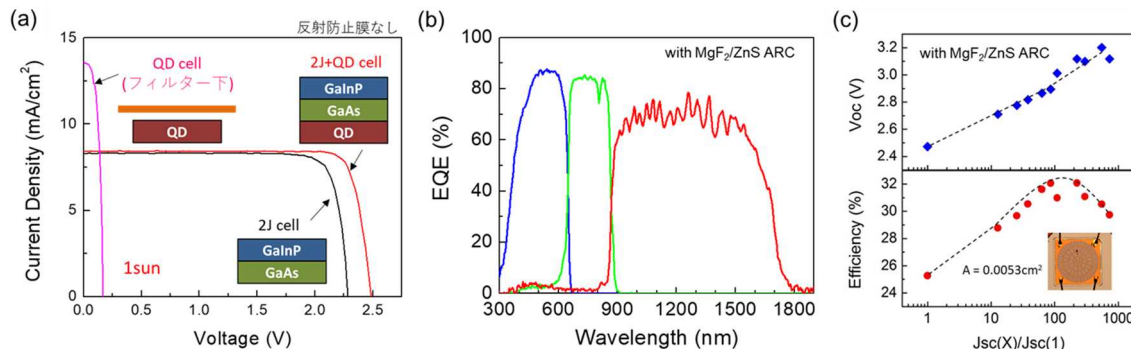
図III-2-(ロ)-D-1-b1-17 に本研究で開発した InAs-InGaAs QD セルの太陽電池特性を示す。成膜には MBE 法を用いた。InP (001) 基板の上に InAs 量子ドットを形成する場合、In 原子の[1-10]方向へのマイグレーション長が[110]方向に比べて大きく、図III-2-(ロ)-D-1-b1-17(b)に見られるような異方性のある形状の量子構造が形成される(量子ダッシュ)。面直方向に対する量子閉じ込め効果に関しては等方的な半球状の量子ドットと近い性質を示すと考えられ、ここでは特に区別せず量子ドットとして取り扱う。この InAs-InGaAs QD 層を埋め込んだセル構造の再表面では原子オーダーで平坦な表面を得られることが確認できる(図III-2-(ロ)-D-1-b1-17(c), RMS ~0.4nm)。図III-2-(ロ)-D-1-b1-17(d), (e)に InAs-InGaAs QD セルの太陽電池特性を、比較用の InGaAs セル(量子ドット層を含まない)と併せてプロットした。トップ側に InGaP/GaAs タンデムセルを配置することを想定し、870 nm よりも長波長域の分光感度に着目すると、量子ドット層を挿入することにより全体に渡って量子効率の向上が得られた。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-17 本研究で低電流・高電圧セル用に開発した InAs-InGaAs QD (QDash)セルの概要 (a)セル構造 (b) InAs-InGaAs QDash 表面と(c)最表面 (n-InGaAs contact) の AFM 像、視野はそれぞれ $1 \mu\text{m} \square$ および $10 \mu\text{m} \square$ (d)分光感度特性 (e)電流電圧特性

次にこの量子ドットセル上に InGaP/GaAs タンデムセルを直接接合した。図III-2-(ロ)-D-1-b1-18(a)に試作した InGaP/GaAs//InAs-InGaAs QD セル (2J+QD セル) の電流電圧特性を、また比較用に接合前の InGaP/GaAs タンデムセル、および QD セル(カットオフ波長 870nm のロングパスフィルタ配置下)の特性も併せて示す。2J+QD セルの短絡電流はトップ側 2J セルに制限された特性を示し、また開放電圧は 2J セルと QD セルの和に相当し、半導体接合に伴う性能劣化等は見られず、各セルの性能を維持できていることが確認できた。図III-2-(ロ)-D-1-b1-18(c)にはパルスソーラーシミュレータを用いた 2J+QD セルの集光特性を開放電圧と効率についてプロットしている。700suns 以上の高倍率集光下においても開放電圧の増加傾向が維持され、225 suns でピーク効率 32.1%が得られた ($J_{sc}/X = 12.3 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc} = 3.12$

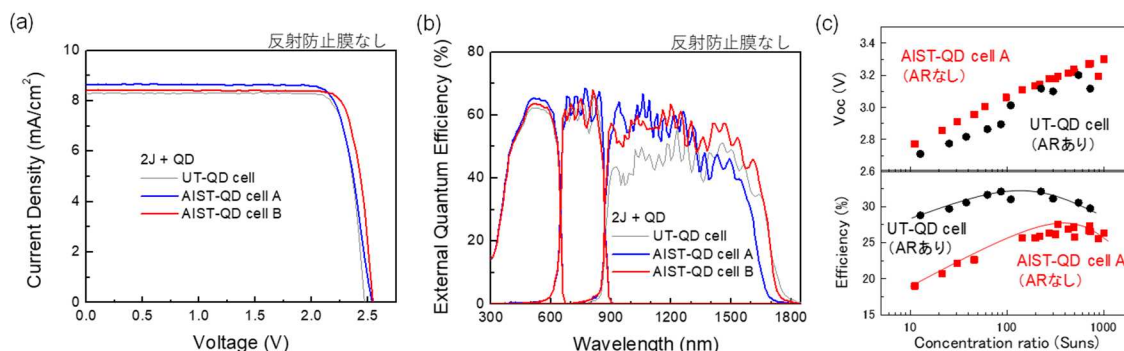
V, FF = 0.837)。一般に、ナローギャップサブセルに比べ、暗電流成分が小さいGaAsやInGaPなどのワイドギャップセルの方が高いFFを示すことから、全体のセル構成をワイドギャップサブセルに電流制限されるように設計することで、集光下においてもFFの低下を抑えることが可能である。このことは、特に、高い電流値が得られる中間バンド型セルには有利であり、低電流・高電圧型セルのコンセプトがジュール損失の抑制だけでなく、FF低下の抑制に対しても有効であることが示された。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-18 InGaP/GaAs//InAs-InGaAs QD セル

(a) 電流電圧特性 (b) 分光感度特性 (c) 開放電圧と効率の集光依存性

また、産総研と連携して QD セルの高品質化にも取り組んだ。図III-2-(ロ)-D-1-b1-19 には、上述の 2J+QD セル (UT-QD cell) に加え、産総研で成膜を行った QD セルを用いた 2J+QD セル (AIST-QD cell A, および AIST-QD cell B) の太陽電池特性をプロットしている。いずれのセルにおいてもほぼ同水準の太陽電池特性が得られ、半導体接合およびデバイス化プロセスの再現性が確認できた。AIST-QD cell A および B では、QD セルの高品質化を図り 0.1V 程度の開放電圧の向上を達成した。特に、AIST-QD cell B では成膜条件の微調整を行うことによって、AIST-QD cell A で見られた表面のクロスハッチパターンを解消することに成功し、QD セルの吸収波長帯において量子効率の向上が得られた。



図III-2-(ロ)-D-1-b1-19 産総研との連携により開発した量子ドットセルを用いた InGaP/GaAs//InAs-

InGaAs QD セル (a) 電流電圧特性 (b) 分光感度特性

(c) 開放電圧と効率の集光依存性

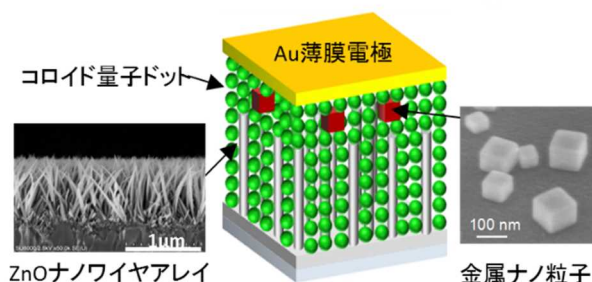
図III-2-(ロ)-D-1-b1-19(c)に示すように、改良セル (AIST-QD cell A) の集光特性評価を行い 1000 suns 集光下で 3.30V と、1 sun 時の 2.54V から約 0.76V が得られた。加えて接合条件の改善も図ったことにより、効率のピークを~100-200 suns から~300-500 suns まで高倍率側にシフトさせることができた。今後、最適化した反射防止膜 (AR) を導入することにより、32.1%以上の効率が得られる見通しである。

本研究では中間バンド型太陽電池の集光動作時に問題となるジュール損失による効率低下を抑制するために、上部に電流制御のためのトップセルを配置した低電流・高電圧型の中間バンド太陽電池の有

効性を示した。本研究では、上部セル、QDセルそれぞれについて最適化されたデバイス特性を損ねることなく実証するために半導体接合法を採用しデバイス化を行ったが、直接エピによる実装技術も今後重要な開発要素である。中間バンド型太陽電池動作の改善についても引き続き取り組むべき課題であり、将来、安価で高効率な主要電源として貢献されることを期待する。

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2. 量子ドットマルチバンド (ナローギャップ) 【東京大学】

当研究グループでは、4 接合ボトムセルの構築を目標として、コロイド量子ドットとワイドギャップ半導体のナノ構造体を用いたバルクヘテロ太陽電池 (PbS/ZnO-NW 太陽電池) の高効率化研究を実施してきた。その過程で、金属ナノ粒子の示すプラズモン電場増強効果の利用が、高効率化に有効であることを明らかにした[ACS Nano, 9, 4165-4172 (2015)]。本事業では、これら2つの特長を組み合わせることで、エネルギー変換効率40%超を狙ったⅢ-V族化合物の多接合太陽電池のボトムセルに資する太陽電池 (図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-1) を、低コスト溶液製造プロセスにより実現するために、以下の中間目標および最終目標を設定し、研究開発に取り組んだ。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-1 研究開発を行ったボトムセルのイメージ構造

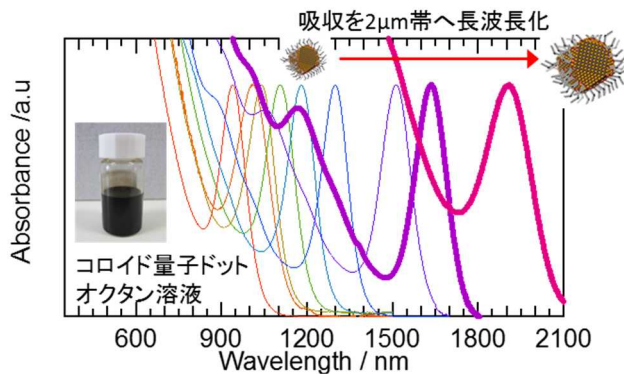
中間目標

- (1) PbS/ZnO-NW セルの近赤外領域 (800nm 以上) で、PCE=4%と $J_{sc}=14\text{mAcm}^{-2}$ を達成
- (2) PbS-QD の吸収領域を 1900nm に拡張し、第一励起子吸収での EQE で 20%を達成
- (3) 金属ナノ粒子のプラズモン電場共鳴を 1400nm で達成し、PbS/ZnO-NW セルに組込む

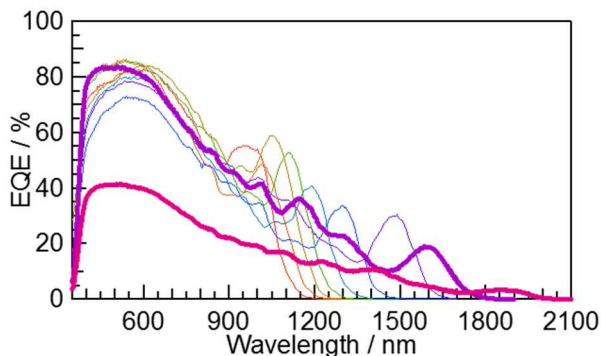
最終目標

プラズモン金属ナノ粒子層を組込んだ PbS/ZnO-NW 太陽電池の近赤外領域 (900nm 以上) において、PCE=4% 以上を達成すると共に、接合層を実装したタンデムセルを実現

本事業の期間内に中間目標を達成することができた。一方、最終目標とした 4%の変換効率に対して 6割の達成度となった。主な要因としては、太陽電池の開放電圧と曲線因子を十分に高めることができなかったことである。この点については、量子ドット表面の欠陥低減や ZnO ナノワイヤ表面欠陥の低減が不十分であったためである。しかしながら、短絡電流値においては、当初目標 (14mAcm^{-2}) を上回る 17.5mAcm^{-2} 程度を達成することができた。また、簡便な溶液プロセスでも、多接合太陽電池のボトムセルとして有効な赤外太陽電池が構築できることを実証することができた。主な研究開発成果は、以下の3点である。



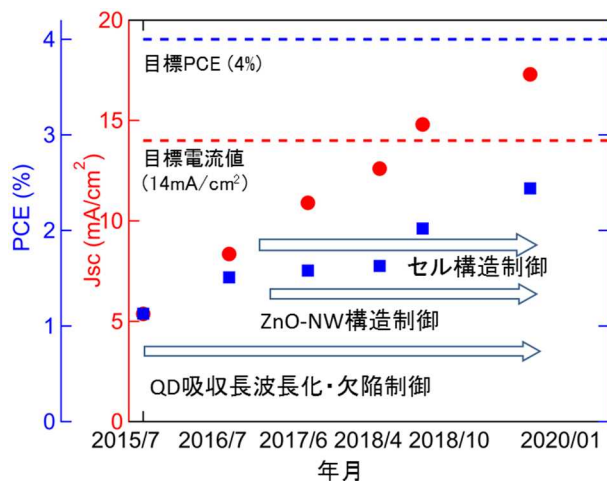
(a) サイズの異なるコロイド量子ドット溶液



(b) EQE スペクトル

図III-2-(ロ)-D-1-b2-2

(a) サイズの異なるコロイド量子ドット溶液の吸収スペクトル (b) EQE スペクトル



図III-2-(ロ)-D-1-b2-3

量子ドット太陽電池の赤外特性改善の推移と主な研究開発内容

*太陽電池特性は、870 nm より短波長を遮断するシャープカットフィルタ下で測定

【主な研究開発成果】

- ◆ 0.87 μm よりも長波長側の疑似太陽光照射下で、エネルギー変換効率=2.44% (短絡電流密度=17.56 mAcm^{-2}) を達成した。溶液プロセスで作製ができ、同等の性能を示す太陽電池の先行報告はない。
- ◆ 金属ナノ粒子の導入により、EQE 及び PCE 向上、1.4 μm で光吸収の増強を達成した。

- ◆ 溶液プロセスで作製できるボトムセルとⅢ-V族化合物 2J トップセルで分光多接合太陽電池を作製し、30%超を実現（世界初）。

以下に本事業で実施したコロイド量子ドットと金属ナノ粒子の電場増強効果を使った赤外光電変換の研究開発成果の詳細を示す。

コロイド量子ドット太陽電池の高性能化

コロイド PbS 量子ドット（以下、量子ドット）の合成条件を検討することで、吸収波長を $1.9\mu\text{m}$ 付近まで拡張し、多接合太陽電池の典型的なボトムセルの一つである Ge セル相当の分光感度領域での光電変換を可能にした（図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-2）。さらに、量子ドット表面のリガンド種やリガンド交換手法を検討することで、表面欠陥の低減や、量子ドット間隔を調整した。本検討では、ハロゲンイオン (I⁻) およびエタンジチオール (EDT) を用いた。コロイド量子ドット太陽電池の光電変換の中核を担う量子ドットと ZnO ナノワイヤの混合層の構築においては、ZnO ナノワイヤ内部における量子ドットの充填状態や ZnO と量子ドットの界面状態に着目した。光励起した電子正孔対の分離および自由キャリア輸送能に影響する ZnO ナノワイヤの構造制御（ワイヤ径、長さ、密度）や、ディップコートやスピコート手法の条件を検討した。

赤外光電変換の高効率化には、量子ドット層の赤外分光感度の拡張と合わせて、窓材料の赤外透過率を高めることが高性能化の重要な要素の一つとなる。コロイド量子ドット太陽電池の透明導電性基板として、F ドープ SnO₂ (FTO) あるいは Sn ドープ In₂O₃ を成膜した基材が一般に用いられるが、これらの金属酸化物は可視領域では高い透過性を示すが、 $1\mu\text{m}$ 付近から自由電子吸収が長波長化と共に強くなる。そこで本研究開発では、透明導電性薄膜の低抵抗値を維持しつつ、自由電子密度を低減させるために、高移動度の透明導電性金属酸化膜の調査研究を行い、結晶性の高い酸化チタン薄膜上に、Ta ドープの SnO₂ を疑似エピタキシャル成長させた金属酸化膜（以下、TTO）が有望であることを見出した。TTO のキャリア移動度は、市販の FTO の 2 倍程度となり、その赤外領域での透過率が高まる [S. Nakao *et al.*, Applied Physics Express, **3** (2010) 031102]。

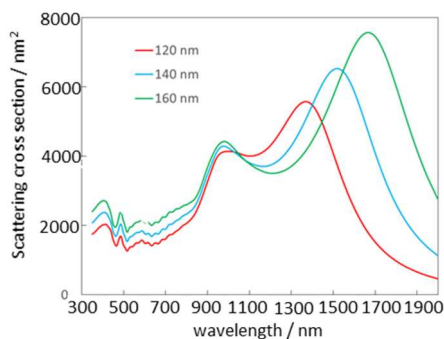
以上の通り、量子ドットの吸収端波長の長波長化や欠陥制御、ZnO ナノワイヤの形態制御、太陽電池素材や構造制御、太陽電池の作製技術の高度化により、コロイド量子ドット太陽電池の近赤外領域での高効率化を行った。多接合化に向けた基礎検討として、上部サブセルの吸収端に相当するカット波長を有する赤外透過フィルタを通した疑似太陽光照射下で短絡電流密度を評価し、最大で 17.5 mAcm^{-2} とすることができた（図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-3）。

さらなる短絡電流密度の向上には、Ag や Au ナノ粒子のプラズモン電場増強効果や光散乱効果の利用を検討した。ボトムセルに適したコロイド量子ドットは、第一励起子ピーク位置を $1.5\text{--}1.7\mu\text{m}$ に有することが好ましい。

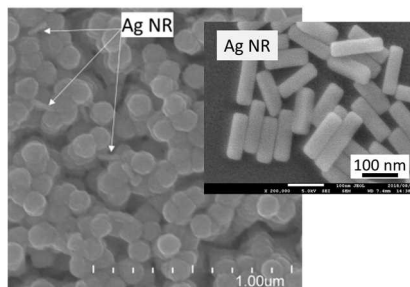
一方、励起子ピーク位置よりも短波長側では、吸収係数が谷を持つ形で減少するため、Ag ナノ粒子のプラズモン電場共鳴効果などにより、光吸収を高めることを目的に、Ag ナノ粒子の形状とサイズを検討し、底辺が 70 nm の正方形で、長さが 140 nm 程度（アスペクト比=2）の直方体（以下、Ag ナノロッド）を、誘電率が 2.6 (PbS 結晶相当) の誘電体内に配置すると、プラズモン電場共鳴効果を近赤外領域で最大にできることを、電磁場シミュレーション計算で明らかにした（図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-4）。アスペクト比を高めれば、さらに長波長シフトさせられることも示された。こうした計算に基づき、金ナノロッドをコアとした銀ナノロッド粒子を合成した。アスペクト比は 2.0 から 3.5 の範囲を合成した。

金属ナノ粒子を PbS 量子ドット/ZnO ナノワイヤ混合層に導入する際には、その位置と濃度が重要で

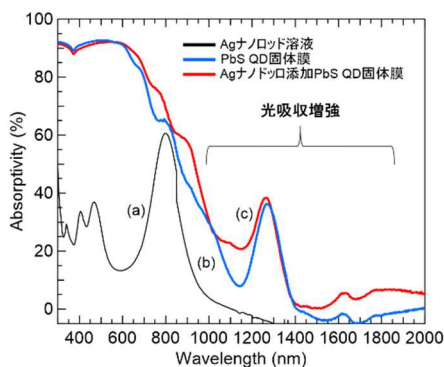
ある [ACS Nano, 9, 4165-4172 (2015)]。そこで、Ag ナノロッドの添加条件を検討した。まず、石英基板上に ZnO ナノワイヤ層を合成し、量子ドットをスピコート法で 25 nm 程度/回の厚さとなるように ZnO ナノワイヤ層を充填して行き、完全に充填する前に、Ag ナノロッドの分散溶液を塗布した後に、量子ドット層を追加で形成すると、Ag ナノロッドを面内に均等に配置できることが分かった (図III-2-(ロ)-D-1-b2-5)。得られた混合層の光吸収スペクトルにおいて、励起子ピークの短波長側を含め、近赤外から赤外領域に渡り光吸収を増加させることができた (図III-2-(ロ)-D-1-b2-6)。Ag ナノロッドを添加した量子ドット/ZnO ナノワイヤ混合層で太陽電池を作製した。光吸収スペクトルと同様に、Ag ナノロッド未添加の太陽電池と異なり、励起子吸収ピーク短波長側の谷部分で、微少ではあるが EQE の増加が起こることを確認した (図III-2-(ロ)-D-1-b2-7)。しかしながら、Ag ナノロッドを添加したセルのエネルギー変換効率は、未添加セルと同程度の値であった。主な要因としては、Ag ナノロッドを配置するプロセスで、量子ドット層に亀裂が発生したり、平坦性が低下するなど、量子ドット層の形態劣化が起こっており、このことがキャリア輸送の低下につながったものと考えられる。



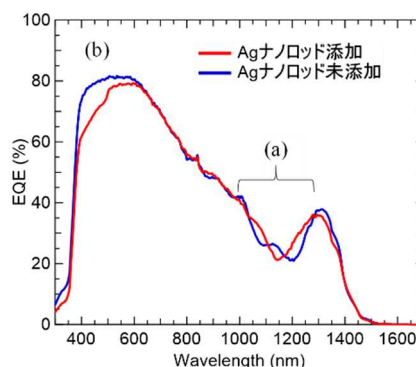
図III-2-(ロ)-D-1-b2-4
Ag ナノロッドを屈折率 2.6 (PbS 相当) 中に分散した時の光散乱スペクトル (計算)



図III-2-(ロ)-D-1-b2-5
(a) ZnO ナノワイヤ・PbS 量子ドット混合層に添加した Ag ナノロッド SEM 像 (b) Ag ナノロッド SEM 像



図III-2-(ロ)-D-1-b2-6
AgNR 溶液 (a) と、AgNR 未添加 (b) と添加膜 (c) PbS QD 固体膜の吸収スペクトル



図III-2-(ロ)-D-1-b2-7
EQE スペクトル Ag NR 未添加 (a) と添加膜 (b)

多接合化検討

III-V 族化合物多接合太陽電池のボトムセルとしてのポテンシャルを検証するために、InGaP/GaAs の 2 接合セル (以下、2Jセル) とコロイド量子ドット太陽電池 (1BJセル) を 2 通りの配置で接続し、疑似多接合太陽電池の性能評価を実施した。並列配置では、2Jセルと GaAs 相当のフィルタ付き 1BJ を並列

にソーラーシミュレータに配置する場合 (a: 並列配置) と、ビームスプリッタにより、GaAs 相当の波長 (約 870 nm) でソーラーシミュレータの光を分割し、短波長側の光 (ビームスプリッタの反射光) を 2J セルに、透過した長波長側の光を 1BJ に照射した場合 (分光タンデム配置) で太陽電池特性を評価した (図 III-2-(ロ)-D-1-b2-8)。

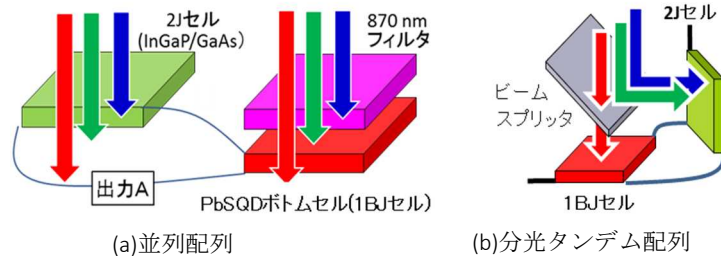


図 III-2-(ロ)-D-1-b2-8 量子ドットセルのボトムセルとしての性能評価に利用したタンデムセル構造 (a) 並列配列 (b) 分光タンデム配列

並列配置の場合、直列接続セルで 30.1% のエネルギー変換効率が得られた。2J セル単独の性能 (28.2%) を上回る値とすることができた。この時、1BJ の短絡電流密度は、 16.9 mA cm^{-2} であり、2J セルの短絡電流密度 (13.5 mA cm^{-2}) との電流マッチングが取れたことが、並列配置で高性能化が達成できた要因と考えられる。

分光タンデム配置では、量子ドットセルのホール輸送層を工夫することで、GaAs 相当のフィルタ下の疑似太陽光照射条件での短絡電流密度を、 17.56 mA cm^{-2} に改善でき、エネルギー変換効率が 2.44% まで高めることができた。2J との分光タンデム配置でも、30% 超 (非集光下) を達成することができた (図 III-2-(ロ)-D-1-b2-9、表 III-2-(ロ)-D-1-b2-1)。

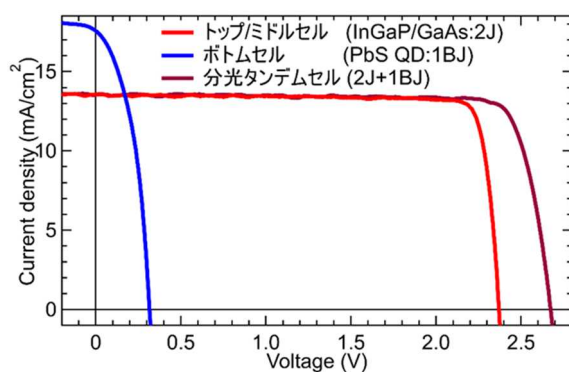


図 III-2-(ロ)-D-1-b2-9 分光タンデム配置で評価したセルの I-V 曲線

表 III-2-(ロ)-D-1-b2-1 分光タンデム配置で評価したセル特性

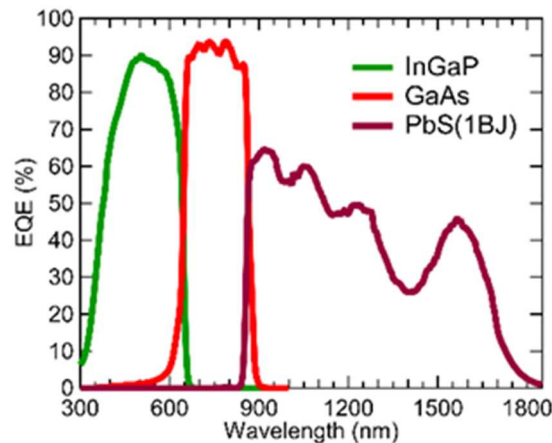
Solar cells	J_{sc}	V_{oc}	FF	PCE
	(mA cm^{-2})	(V)	(%)	(%)
2J	13.56	2.370	87.9	28.25
1BJ	17.56	0.316	44.1	2.44
2J+1BJ	13.53	2.674	84.5	30.58
4T				30.69

2J: III-V 族トップセル
 1BJ: 量子ドットボトムセル
 2J+1BJ: 直列端子接続
 4T: 4 端子接続

1BJ セルの短絡電流密度が並列配置で作製したタンデムセル特性に与える影響を調べたところ、2J セルのそれよりも高くなると、短絡電流密度と共に変換効率は向上し、飽和傾向を示した。例えば、20% の短絡電流密度の上昇により、変換効率は 6.1% の割合で高まることが分かった。一方、2J セルの短絡電流密度に対して 20% 低下するだけで、タンデムセルの変換効率が初期値に比べて 15.4% 低下した。短絡電流密度が 30% 減少した場合は、変換効率は 23.3% 低下することが分かった。つまり、並列配置および分光タンデム配置のいずれでも 30% 程度の値が得られた大きな要因は、1BJ セルの短絡電流値

(フィルタ下) を、2Jセルの短絡電流値 (1-sun 下) よりも高めることができたことである。曲線因子についても、変換効率と同様なコロイド量子ドットボトムセルの短絡電流密度依存性を示した。

本事業で検討を行ったサブセルの分光感度スペクトルを図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-10に示す。コロイド量子ドットボトムセルの分光感度は、1.9 μm から立ち上がり、Ge セルと同等であることが分かる。また、今回分光タンデム化に用いたボトムセルは、近赤外～短波長赤外領域で、EQE が 40 から 50%程度に留まっているが、光吸収量が少ないことが関係していることは間違いないので、ZnO ナノワイヤの形態制御と混合層の厚膜化は必要である。さらに、混合層から Au 電極への逆電流を抑止するために、電子ブロッキング層の最適化を行うことが効果的であると考えられる。

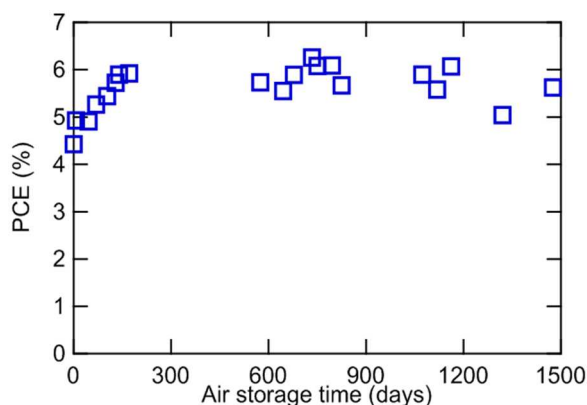


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-10
サブセルの分光感度スペクトル

本事業を通して、多接合太陽電池の高効率化には、ボトムセルの短絡電流密度の向上が重要であることを明らかにした。加えて、金属ナノ粒子のプラズモン電場共鳴効果などの光マネジメント技術の活用は、更なる電流値の増加につながるものとも検証できた。また、ボトムセルの曲線因子と開放電圧には多くの改善の余地が残っている。

並列配置や分光タンデム配置により、多接合太陽電池のボトムセルとしての有効性を実証することができたが、実用性を考慮すると積層構造セルを作製することが不可欠である。積層構造としては、モノリシック型やメカニカル積層型が考えられるが、メカニカル積層型で4端子接続(表Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-1)が有力な候補である。

コロイド量子ドットを使った太陽電池は、低温の湿式プロセスで作製できるために、フレキシブルで軽量の基板利用も可能である。また、耐久性については十分な検討ができていないが、未封止状態で室温放置では4年以上(図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b2-11)、疑似太陽光照射下では、3000時間(評価を正常停止)の長期安定性は確認している。



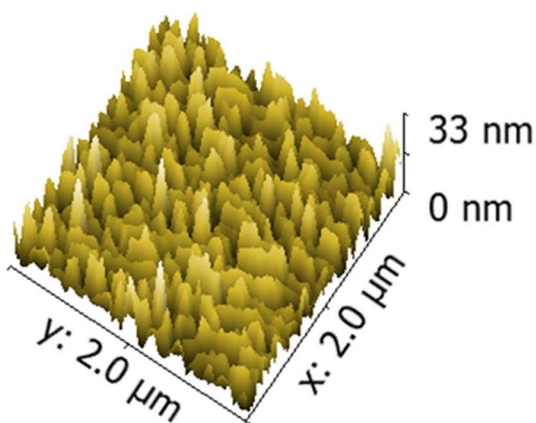
図III-2-(ロ)-D-1-b2-11
コロイド量子ドット太陽電池の動作安定性
評価 (室温大気中)

III-2-(ロ)-D-1-b3. 量子ドットマルチバンド【産総研】

本テーマでは、InGaP 系ワイドギャップホストを用いた光吸収の最適化と、タイプ II 型量子ドットによるマルチバンド中のキャリア長寿命化を兼ね備えた量子ドット太陽電池の作製が目標である。In_{0.48}Ga_{0.52}P 中にタイプ II 型 InP 量子ドットを形成することにより、ワイドギャップホストを用いた太陽光スペクトルの高効率利用に加え、電子と正孔を空間的に分離して閉じ込めるタイプ II 型ポテンシャル中のキャリア長寿命化のため、2 段階光吸収過程の高効率化が期待できる。

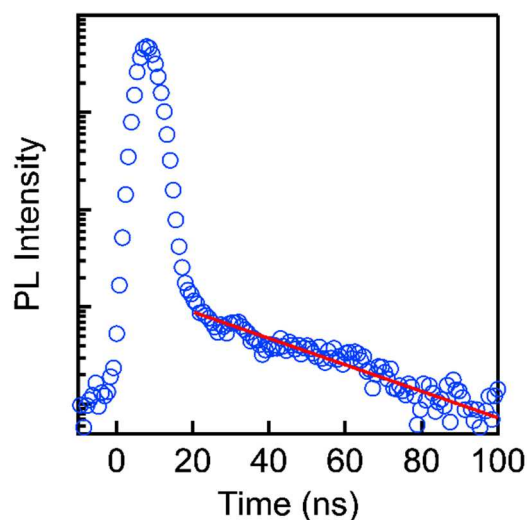
タイプ II 型 InP 量子ドット太陽電池作製の要素技術として、MBE 装置を用いたタイプ II 型 InP 量子ドットのエピタキシャル成長技術の開発を進めた。InP 量子ドットの結晶成長においては、結晶成長速度に依存してタイプ I 型およびタイプ II 型の異なるポテンシャル構造を有した量子ドットが生成されることが知られていた。そこで、本研究では、タイプ II 型 InP 量子ドットを成長するための結晶成長条件の検討を進めた。結晶成長に用いる基板の比較を行い、タイプ II 型 InP 量子ドットを高い割合で生成する条件の検討を進めた。

以上の検討をもとにタイプ II 型 InP 量子ドットを作製し、図III-2-(ロ)-D-1-b3-1 の AFM 像で示すような量子ドットを作成できること、さらに積層膜厚などによってのサイズを系統的に制御できることを確認した。



図III-2-(ロ)-D-1-b3-1 InP 量子ドットの AFM 像

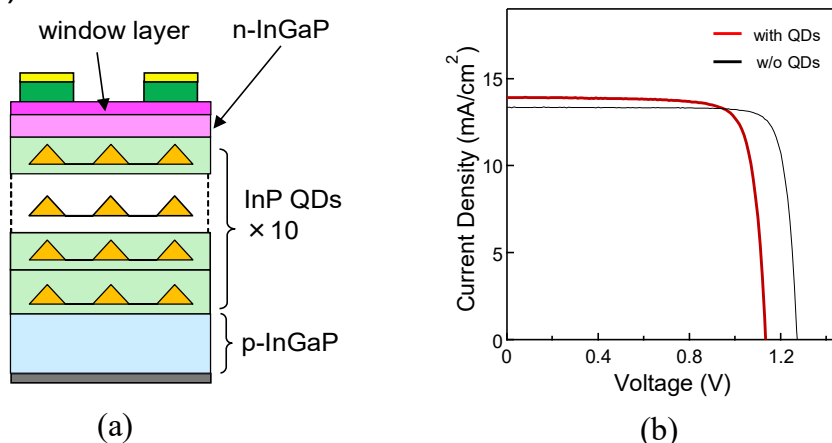
また、得られた InP 量子ドットの基礎的光学特性の評価をもとに、量子ドットのエネルギー準位を同定した。量子ドットの発光エネルギーから量子ドットのバンド間光学遷移（中間バンド型太陽電池の価電子帯—中間バンド間遷移に相当）のエネルギーが約 1.55-1.7 eV であると算出した。さらに、量子ドットからの発光について時間分解測定を行うことによって、図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b3-2 のような発光強度時間変化特性において 30 ナノ秒以上の長い蛍光寿命が観測された。この結果から、量子ドット中のキャリアの寿命が約 30 ナノ秒であることを確認した。これは、通常の GaAs 中の InAs 量子ドットなどのタイプ I 型の量子ドットにおける典型的なキャリア減衰寿命である 1 ナノ秒と比較して、10 倍以上も長いキャリア寿命をタイプ II 型量子ドットが有していることを示している。この長い寿命は、タイプ II 型量子ドットにおいては、電子キャリアと正孔キャリアを空間的に分離して閉じ込めるという特徴によって、輻射再結合過程が抑制されていることを反映している。また、量子ドット中のキャリア寿命が 10 倍以上に長くなるため、太陽光照射下における量子ドット中のキャリア数が 10 倍以上に増大し、これによって 2 段階光吸収による光電流生成の効率も 10 倍以上に増大することが期待される。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b3-2 InP 量子ドットの発光強度時間変化特性

次に、InP 量子ドットを実装した太陽電池セルの作製技術の開発を進めた。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b3-3(a)の模式図に示すような、InGaP 太陽電池セルに InP 量子ドットを挿入した試料を作製した。量子ドットによる光吸収を増大させるために、10 層の InP 量子ドット層を InGaP 層で覆うことにより形成した。分光感度特性より InP 量子ドット層による光電流生成を確認し、10%以上の量子効率が得られた。さらに InGaP ホスト InP 量子ドット太陽電池のデバイス構造検討を進め、高性能化のための最適設計を試みた。模式図中の量子ドット層と n-InGaP 層の間に i-InGaP 層を挿入すること、及びタイプ II 量子ドットの高品質化により太陽電池特性が向上した。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b3-3(b)は、InGaP ホスト InP 量子ドット太陽電池、及び量子ドットを挿入しない太陽電池の電流-電圧曲線を比較したものである。量子ドット太陽電池の短絡電流密度、開放電圧、曲線因子、変換効率は、それぞれ、13.4mA/cm², 1.11V, 0.79, 12.3%である。量子ドットが挿入されていない InGaP 太陽電池と比較し、開放電圧が 210mV 低下し、曲線因子や変換効率も量子ドット挿入によりそれぞれ、0.04, 0.5%低下した。このように、量子ドットの挿入により太陽電池に電圧降下が発現する。本プロジェクトにおいてはそれを抑制することができず、2018 年度を以てワイドギャップホスト及びタイプ II 構造セルの研究開発は終了した。今後は開放電圧低下の起源

についてさらなる解明を進め、それを抑制することで量子ドット太陽電池高効率化の実現に取り組む必要がある。



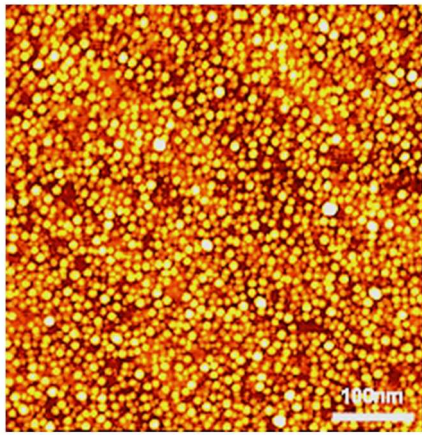
図III-2-(ロ)-D-1-b3-3 (a) 量子ドット太陽電池の模式図と (b) 電流電圧特性

III-2-(ロ)-D-1-b4. 量子ドットマルチバンド・高密度量子ドット成長技術【電通大】

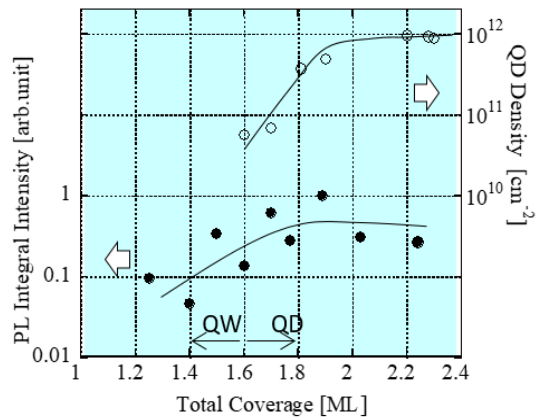
(1) 水冷式 MBE による面内超高密度 InAs 量子ドットの自己形成

量子ドット(QD)太陽電池の低コスト化に向け、本研究プロジェクトでは、一般的に使用されている比較的低価格の GaAs(001) 基板を用い、さらに液体窒素ではなく低コストの水冷シュラウド式の MBE 装置を用い、面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の超高密度 InAs QD 層の成長技術を確立した。面内超高密度 InAs QD は、Stranski-Krastanov (SK) 成長モード遷移により GaAs バッファ層上の InAsSb 濡れ層上に自己形成を行う独自の手法を開発したもので、その SK 成長における 2 次元成長から 3 次元成長への遷移過程のメカニズムを解明した。

図III-2-(ロ)-D-1-b4-1 には、GaAs(001) 基板上への InAsSb 濡れ層上の InAs QD の自己形成により作製した世界最高の面内密度 ($1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) の InAs QD 層の AFM 像で、液体窒素冷却 MBE と同等の面内超高密度 InAs QD 層を高い再現性で成長することが可能となった。また、図III-2-(ロ)-D-1-b4-2 は InAs 成長量に対する QD 密度と PL 積分強度の関係を調べたもので、QD 密度の増加とともに PL 強度も増大し、結晶性が比較的高いことを示すことができた。

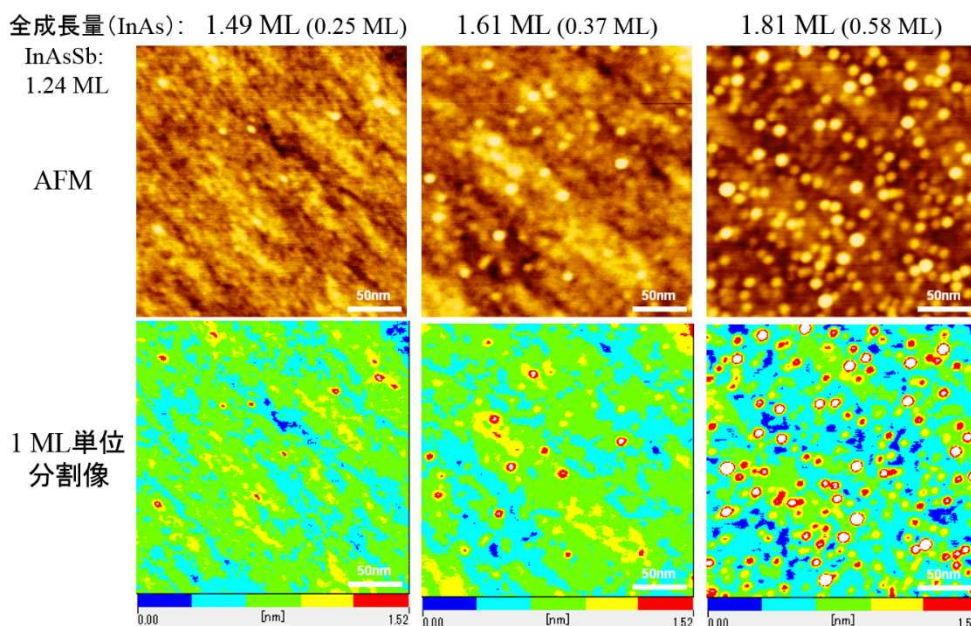


図III-2-(口)-D-1-b4-1
面内超高密度 InAs QD 層の AFM 像
(QD 密度 : $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)



図III-2-(口)-D-1-b4-2
InAs/InAsSb 成長量に対する InAs QD 密度と PL 積分強度 (15 K)

図III-2-(口)-D-1-b4-3 は、InAsSb 1.24 分子層 (ML) 上に InAs を 0.25 ML, 0.37 ML, 0.58 ML 成長したときの原子間力顕微鏡 (AFM) 像を示す。下段には 1 ML 毎に色分けした AFM 像を示す。通常の GaAs 上の InAs 成長に比べ、InAsSb/GaAs 上では 3 次元核形成の初期段階において、下地 2 次元島が細線化し、その上に 3 次元核が形成される多核形成モードが起きていることが分かった。また、InAs を 0.37 ML 成長した後、In 供給を止めても 3 次元化が進行し、下地層から In 原子が供給されていることが明らかになった。こうした InAs 細線構造の形成や下地層からの In 供給は、GaAs 上の InAsSb 層における高い格子歪および表面 Sb 原子による表面拡散の抑制効果によるものと考えられる。その結果、高密度の多核形成が起こり、InAs 成長量が 0.99 ML では面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の超高密度 InAs QD 層が自己形成されることが明らかになった。



図III-2-(口)-D-1-b4-3 InAsSb/GaAs 層上の InAs 成長過程 (InAsSb: 1.24 ML, InAs: 0.25, 0.37, 0.58 ML) AFM 像 (下段: 1 ML 単位で色分け表示)

この面内超高密度 InAs QD のサイズは小さく、平均の QD 高さは約 2nm, 横方向サイズは約 12nm で、QD 間距離も極めて近接している。このような面内超高密度 InAs QD 層の物性を明らかにするために、その発光特性から QD 層内のキャリアの閉じ込め状態について調べた。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-4 には、InAsSb 1.25 ML 層上の InAs の成長量を 0 から 0.99ML まで変化させたときのフォトルミネッセンス (PL) スペクトルの変化を示す。InAs が 2 次元成長する成長量 0.25ML 付近までと 3 次元成長する 0.35ML 以上の領域とを境にして PL スペクトルは大きく異なり、不連続な特性を示すことが分かった。InAs 成長量が 0.35 ML 以上の 3 次元成長領域では、AFM 像からも推察されるように、3 次元的な量子閉じ込め効果が生じている量子ドット構造であることが考えられ、その零次元電子系を調べるために、各 InAs 成長量における 3 次元島構造の平均体積 (V) に対する 15K の低温での PL ピークエネルギー (E) の変化を調べた。その結果を図 III-2-(ロ)-D-1-b4-5 に示す。零次元電子系の QD 構造の場合、QD 形状によって QD 量子準位の体積依存性は異なり、 $E = V^{-\gamma}$ の関係があることが理論計算より示されている。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-5 の実験結果では、形状因子 γ の値が 0.27 (QD 構造が円錐形) のときにより一致を示すことが分かった。したがって、本研究で開発した面内超高密度 InAs QD 層では、面内で近接した微小 QD の集合体ではあるが、低温下においては零次元電子系の 3 次元量子閉じ込め効果を発現していることが明らかになった。180K 以上の高温における電子状態については次の項目にまとめた。

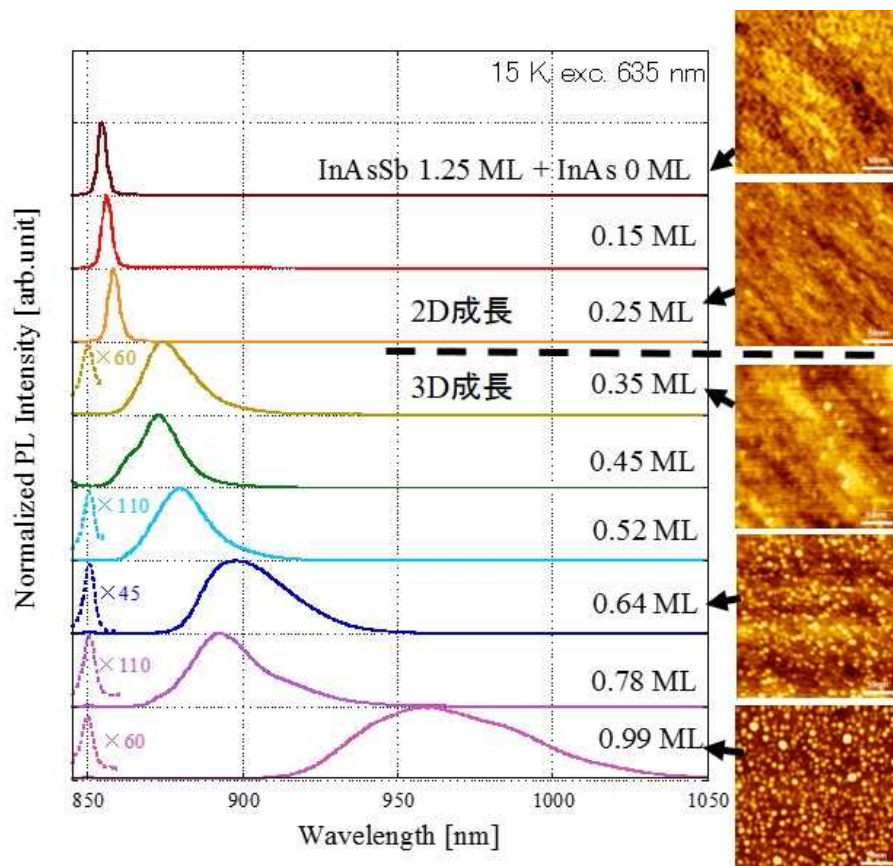
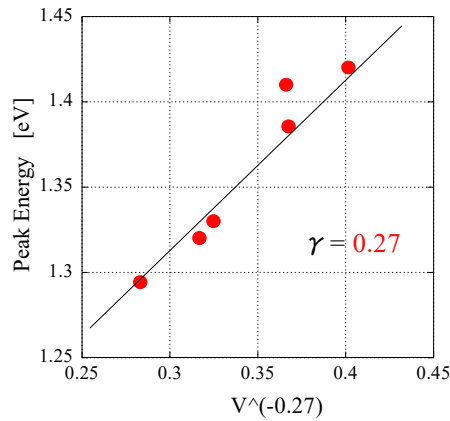


図 III-2-(ロ)-D-1-b4-4
InAsSb 濡れ層上の InAs 成長層の PL スペクトルと AFM 像 (InAs 成長量依存性)

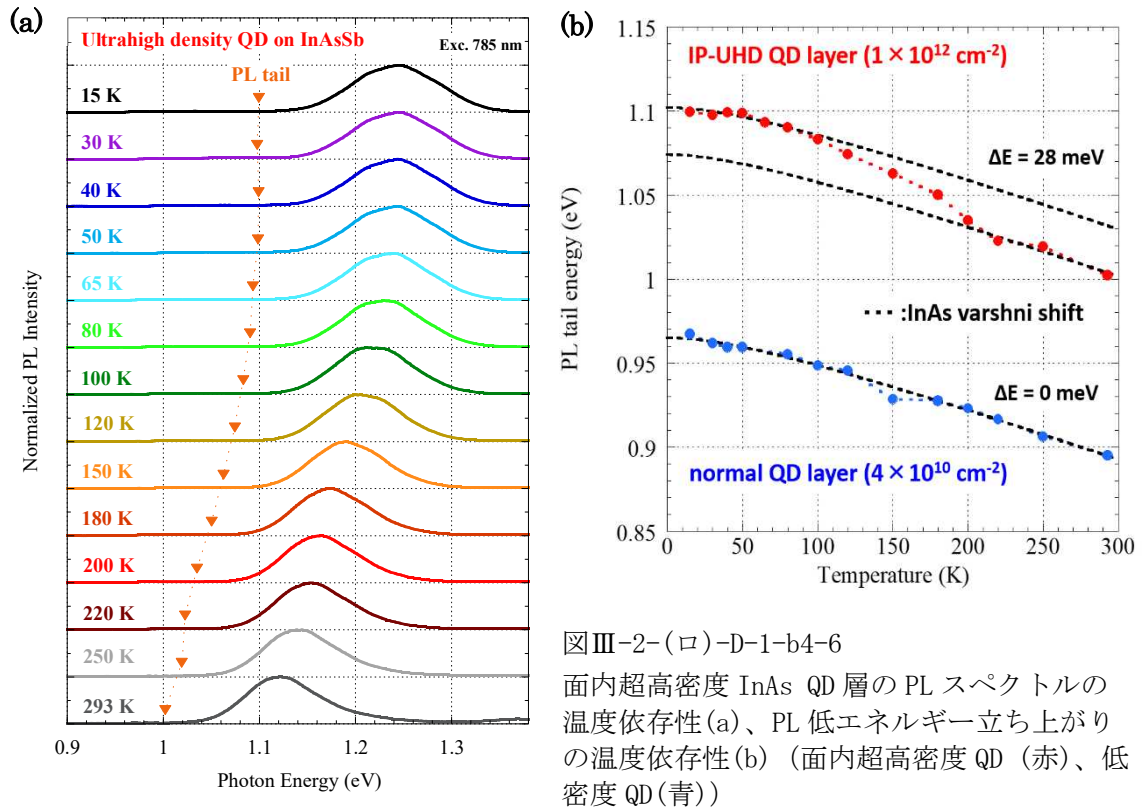


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-5
InAs QD の体積 (V) に対する PL ピーク
エネルギーの変化 ($E = V^{-\gamma}$ の関係)

(2) 面内超高密度 InAs 量子ドット層における中間バンド形成

面内超高密度 InAs QD 層における低温での PL ピークの QD 体積依存性より 3 次元量子閉じ込め効果が確認された。この面内超高密度 QD 層の太陽電池応用では、室温での動作を考えているが、室温付近の高温では QD 量子準位のエネルギー幅 (均一幅) の広がりによって隣接 QD 間での電子的強結合が起これやすくなり、QD 層の面内におけるエネルギーミニバンド (中間バンド) 化の広がり起きたものと考えられる。そこで、この面内超高密度 QD 層の PL スペクトルの温度依存性を測定評価し、QD 準位の均一幅の温度依存性を考慮した独自開発のシミュレーションモデルにより実験結果を検証した。

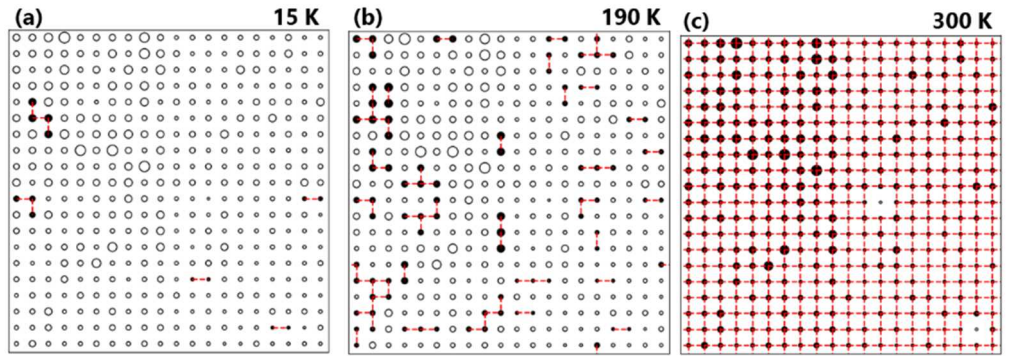
図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-6(a)には、QD 密度が $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の面内超高密度 InAs QD 層における PL スペクトルの温度依存性を示す。低温における PL スペクトルのエネルギー幅は、主に QD サイズ、歪量、組成の不均一分布による QD 量子準位の不均一エネルギー幅および高エネルギー量子準位幅との重なりによるものである。温度上昇とともに PL スペクトルは低エネルギー側へシフトするが、15 K から 80 K の低温領域では、エネルギーギャップの温度依存性、所謂 Varshni 則による低エネルギーシフトを示している。しかし、80 K から 200 K では、Varshni 則よりも大きな低エネルギーシフトを起こすことが初めて観測された。PL スペクトルの低エネルギー側の立ち上がりエネルギーの温度依存性を図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-6(b)に示す。通常の低密度 QD 試料 (密度 $4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$) では、15 K から 300 K までの全温度領域について Varshni 則に沿った一様な温度変化を示すが、面内超高密度 QD 試料では、80 K から 200 K にかけて Varshni シフト量に加えて 28 meV も大きく低エネルギーシフトし、さらに高温側では再び Varshni 則に沿った温度依存性を示すことが分かった。これは温度上昇とともに各 QD 量子準位の均一幅が広がり、面内の隣接 QD 間での量子準位が強結合を起こし、QD 準位のバンド化が発現したことによると解釈される。



図III-2-(ロ)-D-1-b4-6

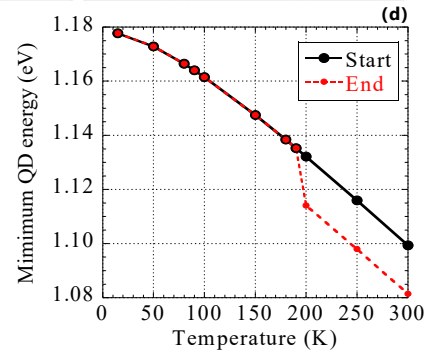
面内超高密度 InAs QD 層の PL スペクトルの温度依存性(a)、PL 低エネルギー立ち上がりの温度依存性(b) (面内超高密度 QD (赤)、低密度 QD(青))

そこで、面内超高密度 QD 層における温度上昇に伴う隣接 QD 間の量子準位の強結合による面内バンド化の拡がりについてシミュレーションを試みた。この計算モデルでは QD 準位の均一幅の温度依存性の実験データを基にした。図III-2-(ロ)-D-1-b4-7(a)-(c)には温度を変化させたときの計算による QD 面内結合状態の様子を示す。黒丸は結合 QD を示し、結合した QD 同士を赤線で繋いだ。図III-2-(ロ)-D-1-b4-7(d)はそのときの QD の最低エネルギーの温度依存性である。15 K では QD はほとんど結合せず、QD の最低エネルギーは Varshni 則に沿って低エネルギーにシフトを示すが、190 K 付近までは徐々に QD 間の面内強結合が拡がり、200 K 以上ではほぼ全 QD が急激に結合することが分かった。よって、最低 QD エネルギーは 200K 付近で急激に大きくシフトし、図III-2-(ロ)-D-1-b4-6(b)の実験結果の様子を計算モデルによってほぼ再現することができた。



図III-2-(ロ)-D-1-b4-7

面内超高密度 QD 層における QD 面内強結合状態図の計算結果。温度 15 K (a), 190 K (b), 300 K (c)。面内超高密度 QD 層の最低エネルギーの温度依存性の計算結果(d)。未結合状態の場合の Varshni 則(黒)、計算後の最低エネルギー(赤)



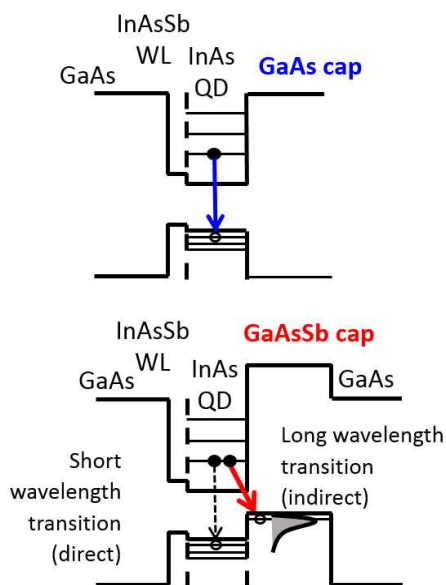
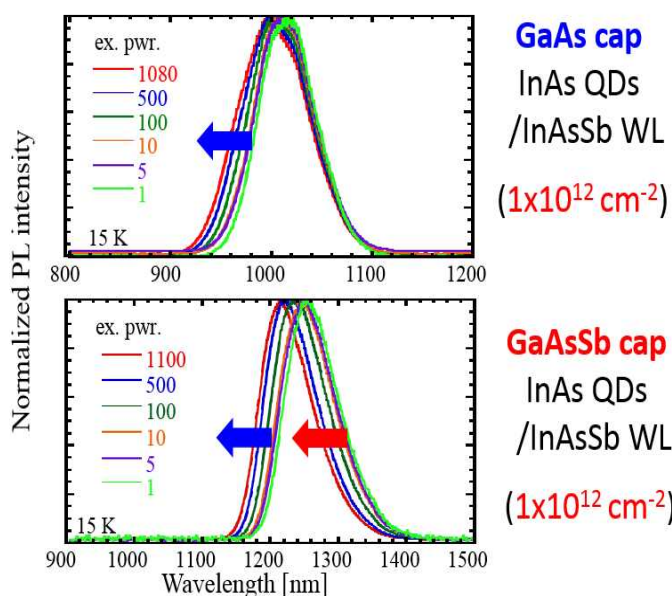
(3) Type-II型面内超高密度 InAs 量子ドット層における光学遷移の解明

InAs/GaAsSb ヘテロ構造は type-II型バンド構造を有し、電子・正孔の空間的分離によるキャリアの長寿命化が期待される。そこで本研究では、InAsSb/GaAs 層上の面内超高密度 InAs QD 層 ($1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) を GaAsSb 層で埋め込み成長を行い、そのフォトルミネッセンス(PL)特性評価を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b4-8 は、GaAs 埋め込み成長したものと GaAsSb 埋め込み成長したものの PL スペクトルの励起光強度依存性である。励起光強度を増すと GaAs 埋め込み層のものでは短波長側に連続的なブルーシフトが観測されるが、GaAsSb 埋め込み層のものでは短波長側だけでなく、長波長側も連続的なブルーシフトが起こった。面内超高密度 QD 構造の場合、QD 間の距離は 5 nm 程度と狭く、トンネル効果による電子の面内輸送現象が考えられる。その結果、電子は QD 準位の低いものから占有し、励起光強度の増大とともに高エネルギーの QD の占有化が進行するために連続的なブルーシフトが起きたものと考えられる。

また、GaAsSb 埋め込み層の場合の長波長側でのブルーシフトは、図III-2-(ロ)-D-1-b4-9 に示すように、type-II バンド構造の GaAsSb 価電子帯中の正孔のエネルギー分布を反映したものと考えられる。さらに、時間分解 PL 測定により、GaAsSb 埋め込み層のものでは direct 遷移成分と in-direct 遷移成分が共存していることが分かり、測定温度の上昇とともに in-direct 成分から direct 成分へと支配性が変化する様子が観測された。

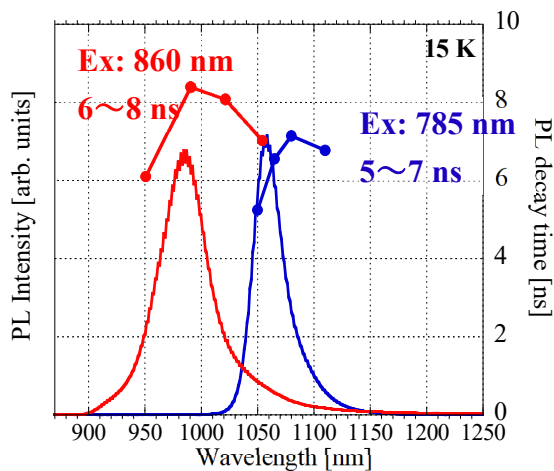
つぎに、GaAsSb/GaAs バッファ層上の type-II型の面内超高密度 InAs QD 層におけるキャリア緩和過程を調べるために、PL 測定における励起光波長を変化させた。図III-2-(ロ)-D-1-b4-10 には、785nm 励起 (GaAs 禁制帯上) と 860nm 励起 (GaAs 禁制帯下) における典型的な PL スペクトルと PL decay time を示す。両励起波長での PL decay time は共に 5~8 ns と長く、type-II バンド構造による in-direct 遷移を示した。785nm 励起における PL ピーク波長は 1060nm で、QD 基底準位の電子と価電子帯正孔との遷移によるが、860nm 励起における PL ピーク波長は短波長化し、QD の励起準位の電子との in-direct 遷移を示した。よって、GaAs 伝導帯上の光励起電子は基底準位まで緩和するが、GaAs 禁制帯以下の InAs 濡れ層での光励起電子は励起準位へ移行し、そのまま励起準位の電子と GaAsSb 価電子帯の正孔との交

差遷移を起こすことが明らかになった。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-8
InAsSb/GaAs 層上の超高密度 InAs QD 層の
PL スペクトルの励起光強度依存性
(上: GaAs cap, 下: GaAsSb cap)

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-9
エネルギーバンド図 (GaAs cap と
GaAsSb cap) および direct 遷移過程と
in-direct 遷移過程



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-10
InAs QD/GaAsSb 層の PL スペクトルおよ
び PL decay time の励起光波長依存性 (励
起光: 860 nm, 785 nm)

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-11 には、785nm 励起および 860nm 励起における PL スペクトルの基板面内位置依存性 (P1~P9) を示す。785nm 励起の場合はほぼ同じ PL スペクトルを示し、位置依存性は見られなかった。これは図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-8 で示した QD 間の電子の面内トンネル輸送によるもので、より低い基底準位の QD から基底準位が filling される効果によるものと考えられ、どの位置で励起しても面内トンネル効果により基底準位の filling が同様に起こることで説明される。一方、860nm 励起の場合には測定位置依存性が明瞭に観測され、励起準位の電子と GaAsSb 価電子帯の正孔との励起子が局在化され

た束縛励起子であると推察された。したがって、基板面内における QD 構造の不均一性の評価には、860nm 励起による PL 測定は有効であることが分かった。

さらに、GaAsSb/GaAs バッファ層上の面内超高密度 InAs QD 層において、キャリアの長寿命化のために GaAsSb 層と InAs QD 層との間に GaAs スペーサ層を導入した。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-12 には、GaAs スペーサ層の有無における 785nm 励起の PL スペクトルと PL decay time を示す。GaAs スペーサ層を導入すると、GaAsSb 層と InAs QD 間の格子不整合量が拡大するために圧縮応力が増大し、PL スペクトルは短波長化することが分かる。また、GaAs スペーサ層によるキャリアの空間分離が拡大することにより、PL decay time は 10ns を超える程まで増長できることが分かった。また、GaAs スペーサ層の導入により type-II 型の交差遷移が室温まで保持され、室温での長寿命化も確認された。

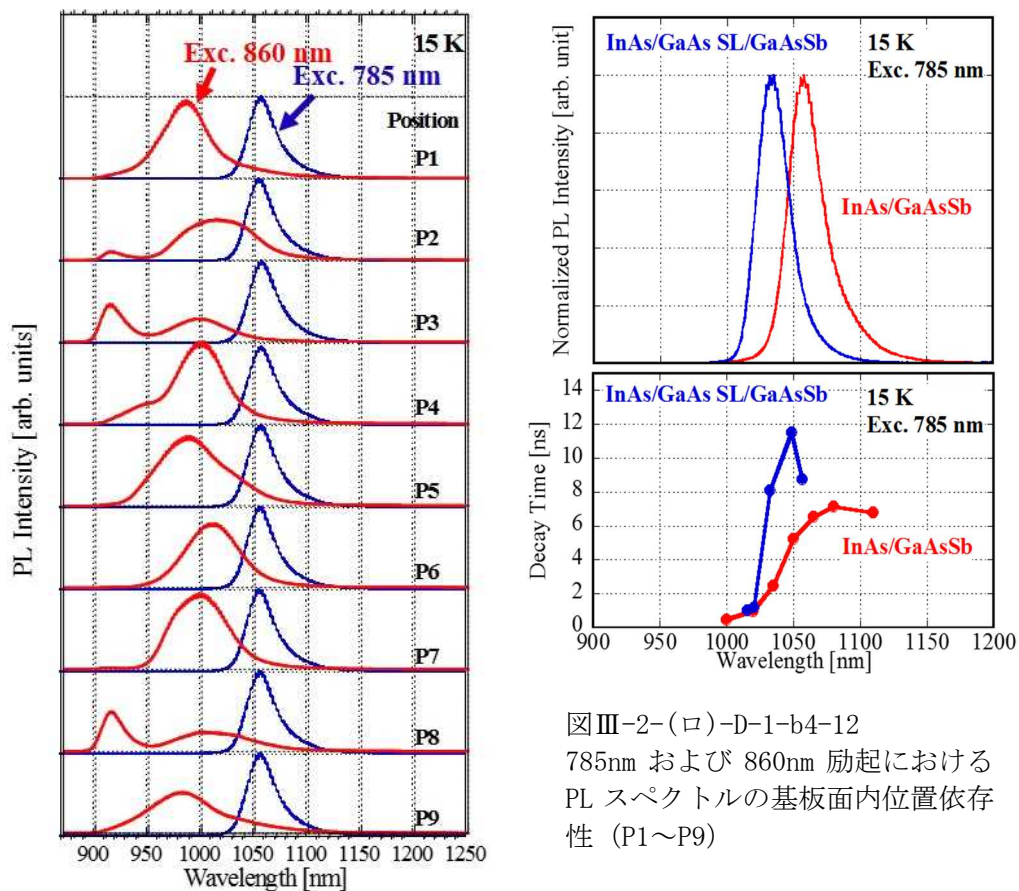
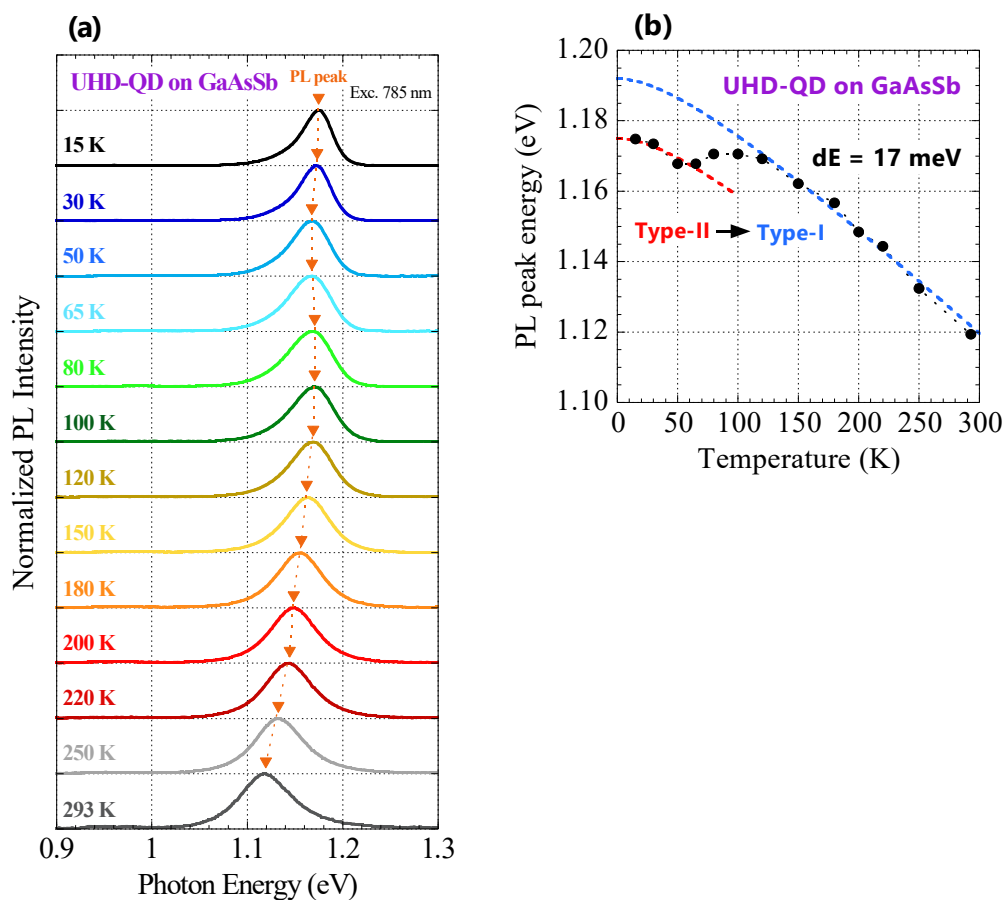


図 III-2-(ロ)-D-1-b4-11
785nm および 860nm 励起における
PL スペクトルの基板面内位置依存性 (P1
~P9)

図 III-2-(ロ)-D-1-b4-12
785nm および 860nm 励起における
PL スペクトルの基板面内位置依
存性 (P1~P9)

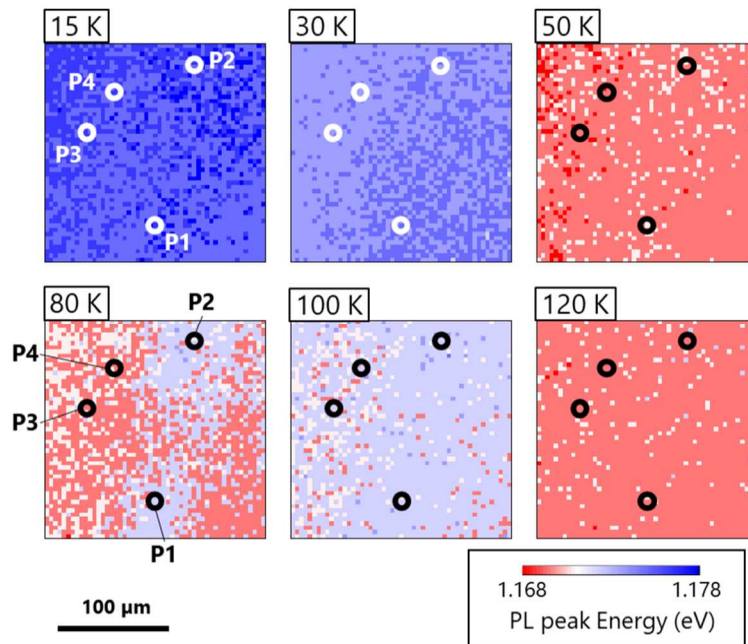
つぎに、Type-II 型面内超高密度 InAs QD 層における再結合過程の遷移について調べた。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-13(a) には、GaAsSb 層上の面内超高密度 InAs QD 層 (GaAs スペーサ層なし) の PL 温度依存性を示す。15K における時間分解 PL 測定より、ピーク付近では InAs QD の電子と GaAsSb 層の正孔の Type-II 遷移による 5-7 ns の長寿命キャリアが確認されている。図 III-2-(ロ)-D-1-b4-13(a) 中に示した PL peak のシフトを図 III-2-(ロ)-D-1-b4-13(b) にプロットし、InAs エネルギーギャップ (E_g) のシフトを破線で示した。PL ピークは 50K まで InAs E_g に従ったシフトを示したが、80-120K の範囲で InAs E_g に対

して 17meV 高エネルギー側へのシフトが見られた。低温域では Type-II 発光成分が支配的であるが、温度上昇によって正孔の GaAsSb 層から InAs QD 層への熱励起過程が促進され、高エネルギー側の Type-I 遷移が支配的になり、PL ピークがシフトしたと考えられる。



図III-2-(ロ)-D-1-b4-13 (a) GaAsSb 上超高密度 QD の PL スペクトル温度依存性 (b) PL ピークの温度シフト

この発光遷移過程の支配性の遷移を調べるために、PL ピークエネルギーの面内マッピング像の温度依存性を調べた。その結果を図III-2-(ロ)-D-1-b4-14 に示す。15K から 50K にかけて、Type-II 支配 PL ピークが一様にレッドシフトしていく様子が観測された。80K では、P1, P2 のような高エネルギーシフトしている領域と、P3, P4 のように PL ピークがまだ低エネルギー側にある領域とが観測され、Type-II 発光から Type-I 発光への発光遷移過程の空間的变化を捉えることができた。このような遷移過程の部分的な変化は GaAsSb 層の Sb 組成や QD サイズなどの面内不均一性によるもので、正孔の挙動に面内でばらつきが発生したものと考えられる。

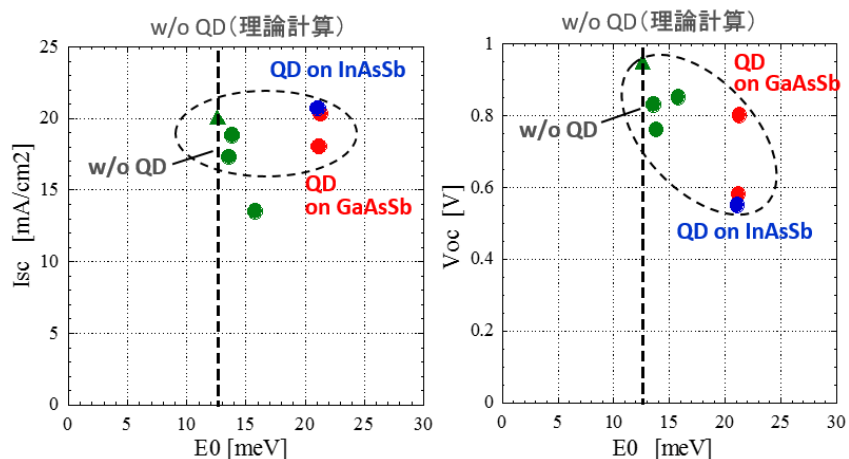


図III-2-(ロ)-D-1-b4-14 GaAsSb 上超高密度 InAs QD 層 PL ピークエネルギーの面内マッピング像の温度依存性

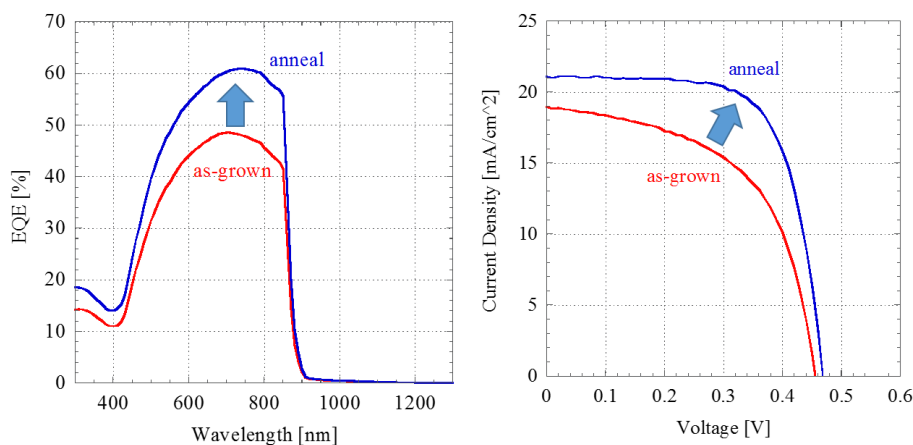
(4) 面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池の結晶性評価

GaAsSb バッファ層上または InAsSb 濡れ層上の面内超高密度 InAs QD 層を導入した GaAs 太陽電池と QD 層の無い GaAs 太陽電池を作製し、基本特性（短絡電流 (I_{sc})、開放端電圧 (V_{oc})) と Urbach tail との関係性を調べた。Urbach tail は半導体結晶の無秩序性によるエネルギーバンドの裾に指数関数的な状態密度が形成されるもので、結晶性の評価の一つにもなる。図III-2-(ロ)-D-1-b4-15には、 I_{sc} と V_{oc} の Urbach tail エネルギー (E_0) 依存性を示す。 E_0 は外部量子効率 (EQE) スペクトルから求めた。また、詳細平衡モデルより計算した QD 層の無い理想的な GaAs 太陽電池の E_0 を点線で示す。理想的なセルの E_0 に比べ、実験結果の QD 無しセルの E_0 は 1~3meV 大きく、QD セルの E_0 は約 6meV 大きい値を示した。 I_{sc} は E_0 にほとんど依存せず、 V_{oc} は E_0 の増大と共に低下する傾向が確認された。Urbach tail により擬フェルミ準位が低下することは明らかであり、QD 層導入セルの結晶性を評価する一つの指標として Urbach tail は重要であると考えている。

つぎに、InAsSb/GaAs 層上の面内超高密度 InAs QD 層 (GaAsSb 埋め込み層) の試料について熱アニール処理 (600°C, 30min) を施し、結晶性の改善効果を調べた。PL 特性においては、アニール処理によって PL 強度は増大し、非発光性再結合の抑制によって蛍光寿命も少し長くなった。また、欠陥によるものと考えられる 1200~1300nm 付近のブロードな PL スペクトル成分も抑制されることが分かり、アニールによる結晶性の改善効果を確認した。図III-2-(ロ)-D-1-b4-16 は、面内超高密度 InAs QD 層を導入した太陽電池を試作し、室温での外部量子効率および光照射 (AM1.5, 1 sun) 下の電流・電圧特性を調べたものである。アニール処理前の as-grown 試料に比べて、アニール処理を施したものでは外部量子効率の向上および光照射 I-V 特性の改善が見られた。

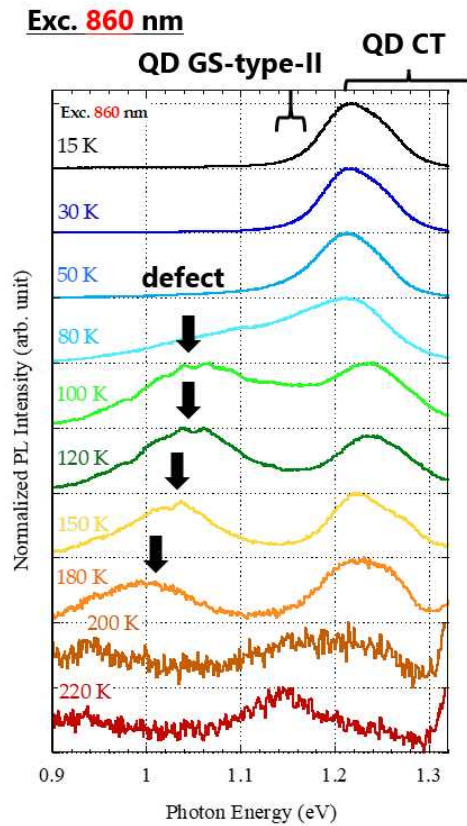


図III-2-(ロ)-D-1-b4-15 面内超高密度 InAs QD 層を導入した GaAs 太陽電池の短絡電流 (I_{sc}) と開放端電圧 (V_{oc}) の Urbach tail エネルギー (E_0) 依存性。点線は QD 層無し理想 GaAs セルの E_0 の理論計算値



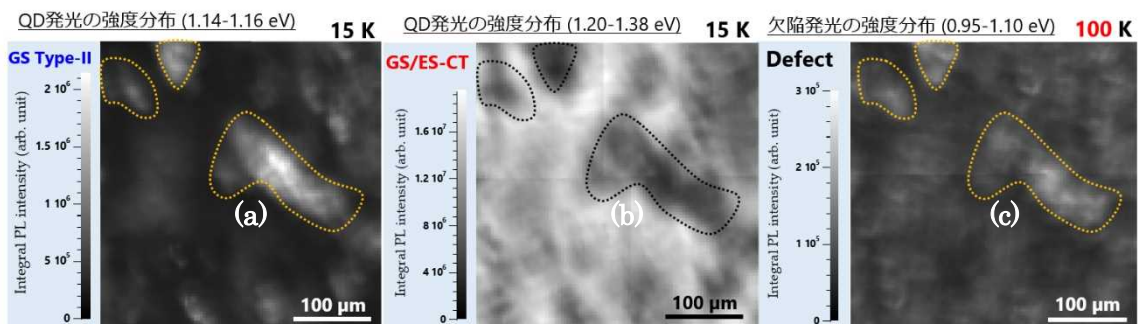
図III-2-(ロ)-D-1-b4-16 InAsSbML/GaAs 層上の超高密度 InAs QD 層を内蔵した GaAs 太陽電池の外部量子効率と光照射 (AM1.5, 1 sun) 電流・電圧特性 (as-grown, anneal 処理)

さらに、自己形成 QD 層の場合、格子歪により非発光性再結合が問題となる。そこで、面内超高密度 InAs QD 層の QD 準位と欠陥の深い準位との関係を調べるために、InAs QD/GaAsSb 層の選択励起 (860nm 励起) を行い、束縛励起子発光による局所的な PL 解析を行った。図III-2-(ロ)-D-1-b4-17 は 860nm 励起における PL スペクトルの温度依存性で、低温領域では QD 基底準位の電子と GaAsSb 層の正孔間の PL (QD GS-typeII) および QD 準位の電子と濡れ層の正孔の交差遷移 (crossed transition, CT) の PL スペクトルが支配的であるが、80K 付近以上になると、1.05eV 付近のブロードな PL スペクトルが強くなり、QD 発光の PL 強度と同程度になることが分かった。この低エネルギー側の深い準位からの発光は欠陥に関与したスペクトルであると考えられ、それらの PL スペクトルについてマッピング測定を行った。



図III-2-(口)-D-1-b4-17
面内超高密度 InAs/GaAsSb QD 層の
PL スペクトルの温度依存性(860 nm
励起)

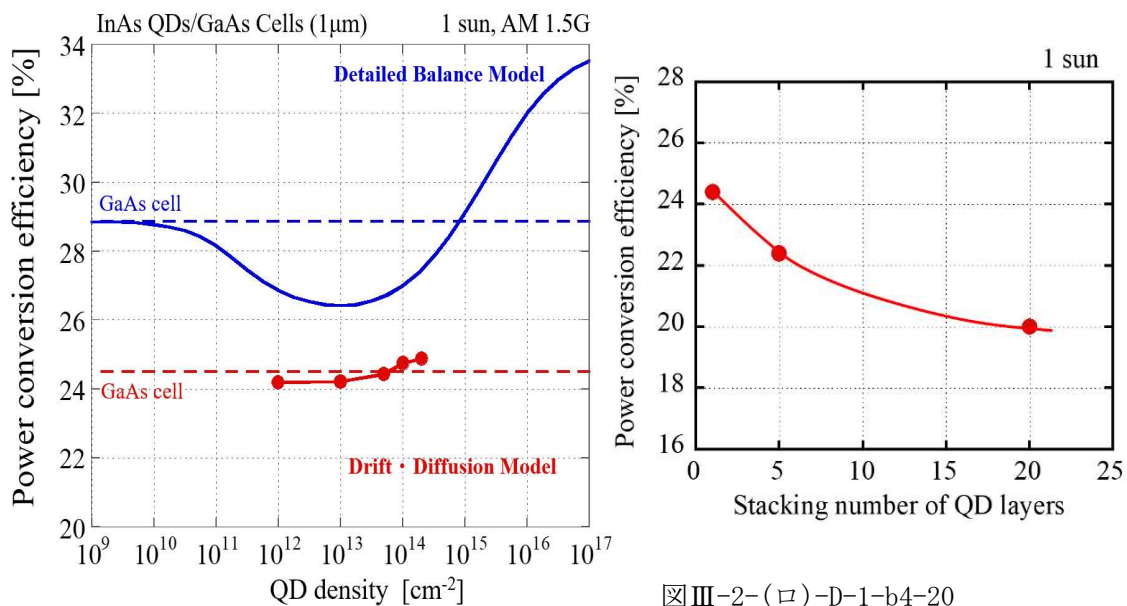
図III-2-(口)-D-1-b4-18には、15KでのQD発光のGS-type-II発光の強度分布(a)とQD CT発光の強度分布(b)および100Kでの欠陥発光の強度分布(c)をそれぞれ示す。GS-type-II発光とQD CT発光には相補性が観測されることが分かった。また、100 Kでの欠陥発光像とQD CT発光像とに対応関係があることも新たに分かった。この欠陥発光は通常のPLマッピング測定では観測されず、しかもQD準位と結合した欠陥準位からの発光の可能性が示唆され、QD近傍に存在する欠陥であることが考えられる。したがって、本手法は試料を非破壊でかつ簡便に広い領域の結晶性評価法として期待される。



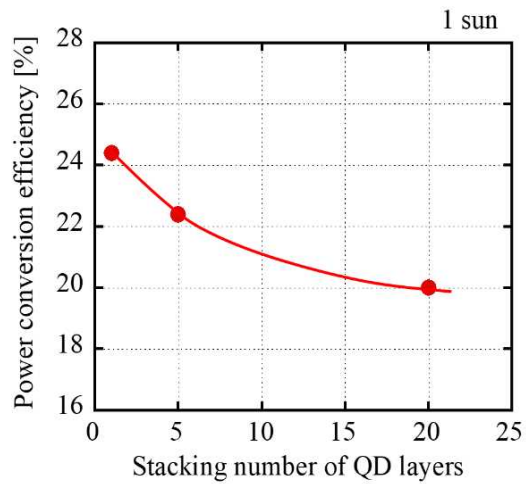
図III-2-(口)-D-1-b4-18
面内超高密度 InAs/GaAsSb QD 層の 15 KにおけるQD GS-type-II 発光の強度分布 (a) と
QD CT 発光の強度分布 (b)、100 Kにおける欠陥発光の強度分布 (c)

(5) 面内超高密度量子ドット太陽電池特性のドリフト拡散モデルによる計算

本プロジェクトの前半までは、主に詳細平衡(DB)モデルによる QD 密度と太陽電池特性を調べ、高効率化のための QD 密度および集光度について設計の目安を得てきたが、より現実的な構造設計の指針を得るために、キャリアの輸送過程を考慮したドリフト拡散(DD)モデルを導入した理論計算(APSYS 2014)による QD 太陽電池構造とその基本特性について検討した。図III-2-(ロ)-D-1-b4-19には、1 sun (AM1.5G)の照射下における InAs QD 密度と変換効率の計算結果を示す。比較のために DB モデル (QD への電子ドープ無し) の計算結果も示す。QD 層の無い GaAs セルについては、DD モデルによる変換効率は DB モデルの結果に比べて4%程低くなることが分った。QD 密度依存性では、DD モデルと同様に、QD 密度が $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 付近までは変換効率は低下し、その後上昇する傾向が得られ、QD 密度が約 $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上で、GaAs セルよりも上回ることが分った。ただし、この計算では 自己形成 InAs QD の下地の濡れ層(QW)が無く、その QD 層を i-GaAs 層の中央に配置した計算である。

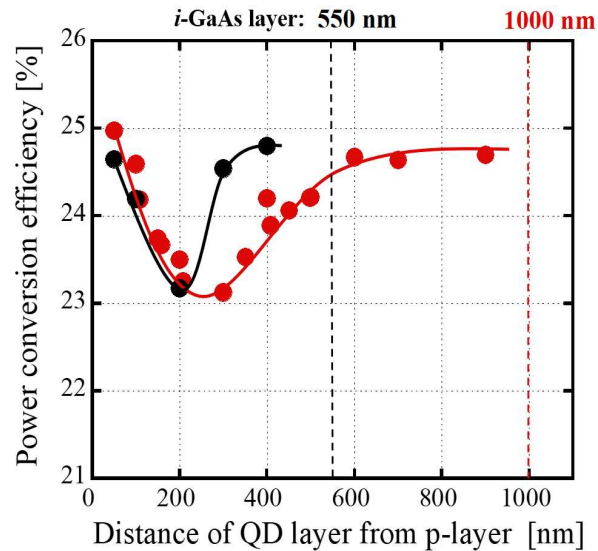


図III-2-(ロ)-D-1-b4-19
InAs QD/GaAs 太陽電池における理論変換効率の QD 密度依存性 (青：詳細平衡モデル，赤：ドリフト拡散モデル)



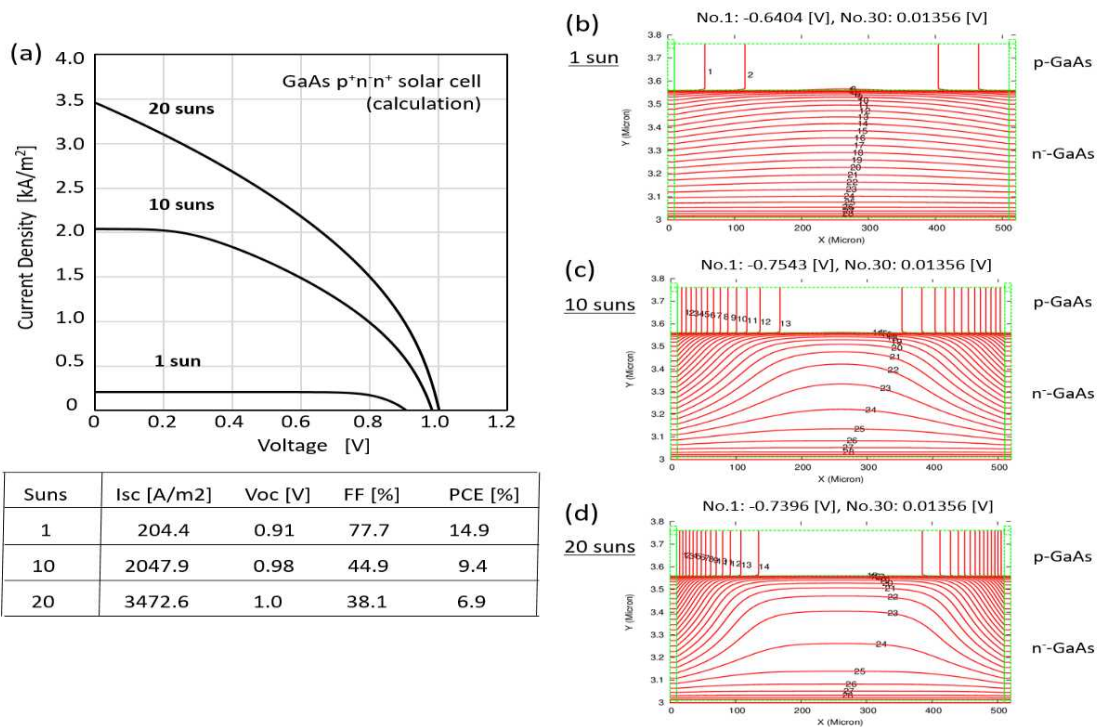
図III-2-(ロ)-D-1-b4-20
理論変換効率の InAs QD 積層数依存性 (ドリフト拡散モデル)

図III-2-(ロ)-D-1-b4-20には、InAs QD 総密度を $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ の一定としたときの変換効率の積層数依存性を計算したもので、QD 積層数を増すと面内密度は低下するが、QD 層での再結合割合が増加するために効率が下がったものと考えられる。また、図III-2-(ロ)-D-1-b4-21には、単一 QD 層 (密度 $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$) の pn 接合間の i-GaAs 層内への導入位置に対する変換効率を計算したもので、i-GaAs 層の厚みを 550nm と 1000nm の 2 種類について調べた結果である。両 i-GaAs 層厚において同様に、p 層から 200~300nm 付近で効率は最小値を示し、p, n 層の両側端部に接近するほど効率は上昇することが分った。これは p, n 層の両端部に近くなるほど、QD 層部の電界が大きく、QD 内電子のホッピング伝導が促進されたことによると考えられる。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-21
理論変換効率の InAs QD 層の導入位置依存性
(ドリフト拡散モデル, i-GaAs 層厚 550 nm,
1000 nm)

つぎに、面内超高密度 QD 層を導入したセルの集光特性を調べるために、まずは QD 層の無い GaAs セルについて集光特性をドリフト拡散モデルにより計算を行った。楕形電極の電極間距離が比較的広い 500 μm の場合は、図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-22(a)に示すように集光度が 10 suns 以上になると I-V 特性の曲線因子 (Fill Factor, FF) が急激に低下した。このときのセル (p^+ -GaAs/ n^- -GaAs 層) 内のポテンシャル分布を計算すると、図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-b4-22(c), (d)のように縦方向の電位勾配だけでなく横方向の電位勾配も形成されていることが分かった。電極間幅の狭い 120 μm の GaAs セルでは、ここでは示していないが、I-V 曲線の劣化も横方向の電位勾配も形成されないことが確認された。したがって、電極間幅の広い (500 μm) セルの場合は面内抵抗が無視できなくなり、特に集光時の電流増大に伴う横方向の電圧降下が起こり、そのため FF が低下したものと考えられる。面内超高密度 QD 層を導入した場合に、面内 QD 層を介したキャリア輸送効果も期待され、実験による検証をつぎの項目 6 で進めた。



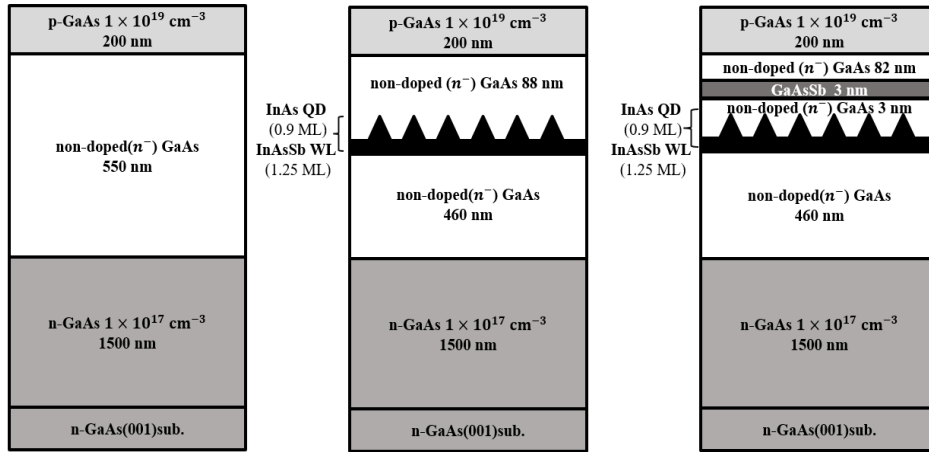
図III-2-(口)-D-1-b4-22

GaAs セル(電極間 500 μ m)の I-V 特性の集光度依存性 (a), ポテンシャル分布の集光度依存性(1 sun (b), 10suns (c), 20 suns(d))の計算結果

(6) Type-II型面内超高密度量子ドット太陽電池の集光特性

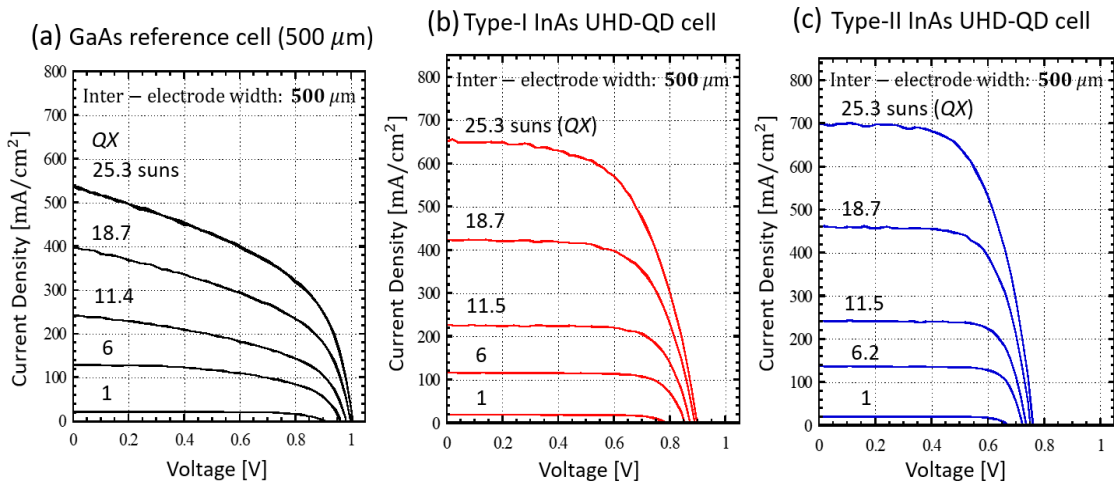
面内超高密度 InAs/InAsSb QD 層を導入した type-I 型・type-II 型の QD セルを作製し、その低倍集光特性を調べた。図 III-2-(口)-D-1-b4-23 には MBE 成長した GaAs 参照用セル(a)と面内超高密度 InAs/InAsSb QD 層を単層のみ導入した type-I 型(b)および type-II 型(c)の QD セルの構造を示す。AlGaAs 層の窓層および反射防止膜は施しておらず、楕形電極の電極間幅は 500 μ m とした。各セルの I-V 特性の集光度依存性を図 III-2-(口)-D-1-b4-24 に示す。GaAs セルについては、前項目の 5 で示した計算結果と同様に、集光度が 10 以上で I-V 曲線の劣化 (FF の低下) が観測された。しかし、type-I および type-II の UHD-QD セルの I-V 曲線は、電極間幅が 500 μ m の場合においても集光度の増加による I-V 曲線の大きな劣化は起こらないことが分かった。

(a) GaAs reference cell (b) Type-I InAs UHD-QD cell (c) Type-II InAs UHD-QD cell



図III-2-(ロ)-D-1-b4-23

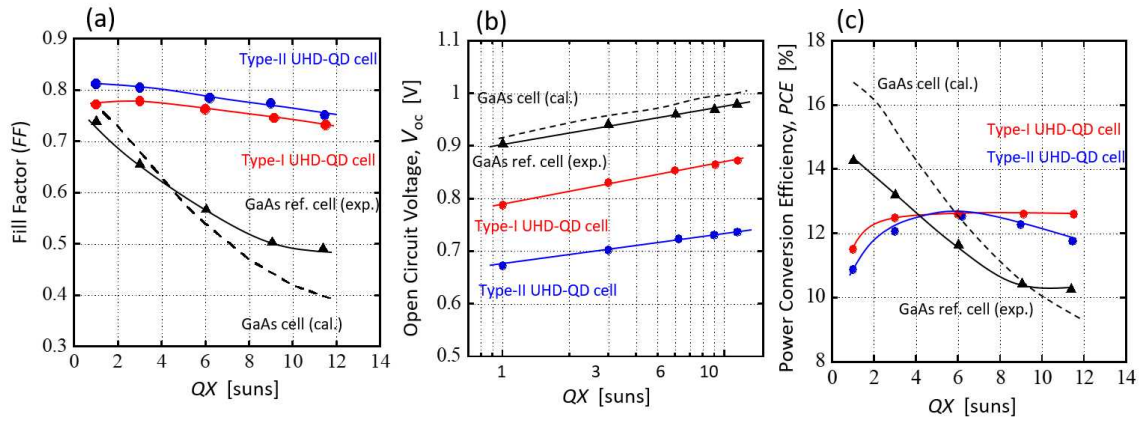
GaAs セル(a), type-I 型 InAs 超高密度(UHD)-QD セル(b), type-II 型 InAs UHD-QD セル(c)の構造図(電極間幅 500 μm)



図III-2-(ロ)-D-1-b4-24

I-V 特性の集光度依存性 (GaAs セル(a), type-I 型 InAs UHD-QD セル(b), type-II 型 InAs UHD-QD セル(c), 電極間幅 500 μm)

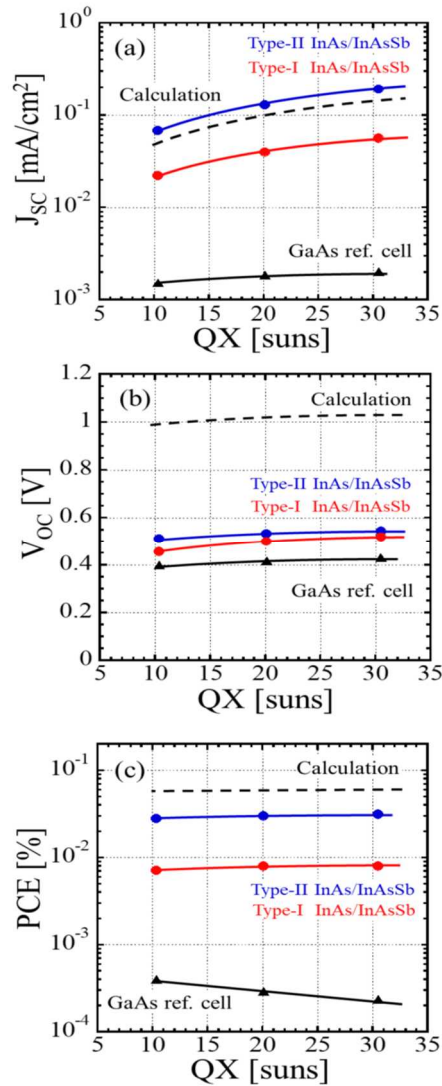
図III-2-(ロ)-D-1-b4-25には、各セルのFF(a)、開放端電圧 (V_{oc}) (b)そして電力変換効率(c)の集光度依存性を示す。図25中の点線は前項目5で述べたGaAsセルについての計算結果で、計算パラメータとしてSRH寿命10ns、Auger再結合速度 $2 \times 10^{-30} \text{cm}^6 \text{s}^{-2}$ 、放射性再結合速度 $2 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ とすることで、GaAsセルの実験結果(▲)を概ね再現出来ることが分かった。図III-2-(ロ)-D-1-b4-25(a)に示すように、GaAsセルでは集光度が増加するとFFは急激に低下するが、type-Iおよびtype-IIのQDセルではFFの低下が抑制された。また、QDセルの V_{oc} はGaAsセルに比べて低下するが、図III-2-(ロ)-D-1-b4-25(b)に示すように集光度の増加に伴い V_{oc} は対数的に増加することが確認された。以上より、電力変換効率の集光度依存性(図III-2-(ロ)-D-1-b4-25(c))では、GaAsセルの変換効率は急激に低下するが、QDセルでは集光することで増加し、集光度が約4以上でGaAsセルの変換効率を超えることが分かった。QDセルの場合に高い集光度においてもFFが維持された要因として、面内超高密度QD層を通した横方向のキャリア輸送効果によるものと考えられ、面内超高密度QD層の有効性を検証することができた。



図III-2-(口)-D-1-b4-25

Fill Factor (a), 開放端電圧(b), 電力変換効率(c)の集光度依存性 (GaAsセル(実験値:▲, 点線: 計算), type-I型 InAs UHD-QDセル(●), type-II型 InAs UHD-QDセル(●), 電極間幅 500 μm)

つぎに、面内超高密度 QD セルの 2 段階光励起特性を評価するために、AM1.5G の擬似太陽光を GaAs セル基板に透過させて QD セルに照射し、電流密度(J)-V 特性を測定した。図III-2-(口)-D-1-b4-26 に短絡電流密度 J_{sc} (a)、開放端電圧 V_{oc} (b)、変換効率 PCE(c)の集光度依存性を示す。詳細平衡モデルによる理論計算の結果も点線で示した。図III-2-(口)-D-1-b4-26(a)より、QD 層のない GaAs セルにおいても不純物準位や欠陥準位を介した光励起と考えられる若干に電流が観測されたが、面内超高密度 QD セルでは 10 sun で GaAs セルの約 44 倍の光電流を確認した。また、キャリア分離構造の type-II 型 QD セルでは、type-I 型 QD セルに比べて J_{sc} が大きく、集光度(QX)の増加に対する J_{sc}/QX の減少も抑制されることが分かった。Type-II 型構造によるキャリアの長寿命化と GaAsSb 層での光励起による光電流の増加によるものと考えられる。 V_{oc} についても GaAs セルに比べて QD セルの方が上回った。また V_{oc} と FF は QX の増大と共にわずかに増加し、その結果、PCE も集光時に増加し、type-II 型 QD セルは type-I 型 QD セルに比べて約 3.7 倍も高くなった。



図III-2-(口)-D-1-b4-26 GaAs 透過光を照射した太陽電池の集光特性 ((a)短絡電流密度, (b)開放端電圧, (c)変換効率)

III-2-(口)-D-1-b5. 量子ドットマルチバンド・キャリア取り出し【神戸大学】

IBSCにおける電子の長寿命化は、VB から IB への第 1 段光吸収と IB から CB への第 2 段光励起に関わる IB を分離することによって実現することに成功した。第 1 段光吸収で励起された電子を第 2 段光励起の始状態に移動させるためのダイナミクスは、量子ドットの超格子を形成することで実現できた。これによって、電子寿命は確実に伸び、これまで不明瞭だった、2 段階光吸収による光電流生成を顕在化させることができた。われわれの成果が端緒となり、このキャリアダイナミクスは「ラチェット機構」とよばれて世界的に活発な研究が始まりだしている。第 1 段光吸収と第 2 段光励起に関わる IB を分離するこのプロジェクトから生まれた独自の考え方は、IBSC の特性向上では根幹の役割をなすものとして国際的に認知されるようになった。

室温での動作を実現するには熱によるキャリア脱出を抑制する必要がある。そのために、われわれは量子ドットをワイドバンドギャップ材料でサンドイッチした DWELL 構造を導入することを提案した。DWELL-IBSC において電子寿命の長寿命化に伴う 2 段階光電流の増加を室温において実証した。電子寿命の直接観察を目的とした高速光電流計測技術を構築し、パルス光励起による光電流の減衰特性を観測す

ることに成功し、IBにおける電子の熱活性に律速された特性を明らかにした。キャリアダイナミックスの詳細な解析により、電子寿命は1msに達していることが明らかになり、IBからCBへの光励起の増加によって光電流は高速に減衰することを観測した。このような2段階の光励起による光電流引き出し効率は集光を模擬した強励起下で80%に達した。また、このような2段階光励起効果の顕在化によって、出力電圧の効果を抑制することに世界で初めて成功した。

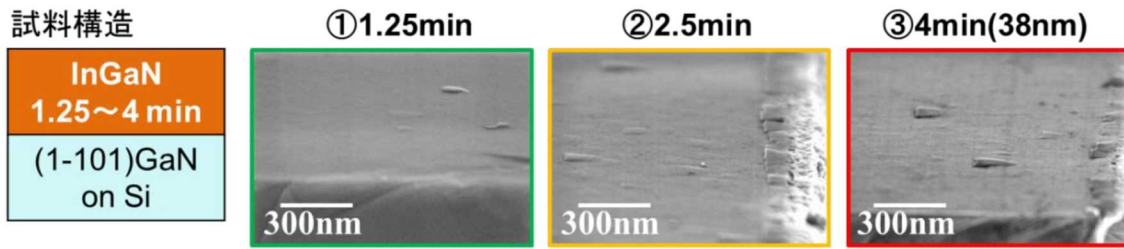
以上の成果をもとに、ワイドギャップのトップセルと量子ドットボトムセルの2接合セル構造での応用を想定して、ボトムセル特性を詳細に調べ上げた。その結果、サブバンドギャップ光のみによるIBSC発電を実証するとともに、サブバンドギャップ光集光下で変換効率0.05%の発電をすることを世界で初めて確認した。

以上の成果は、IBSCの室温での動作を詳細に明らかにしたものであり、サブバンドギャップ光のみによる発電の実証は量子ドットを利用したIBSCが、1997年にマドリッド工科大学のA. LuqueとA. Martíによって提案された原理の通り発電することを証明したものである。本研究で観測したサブバンドギャップ光集光下での変換効率0.05%は、2段階目のIB→CBの吸収を示す赤外域だけで期待されている効率4%に比べて2桁小さい値であった。このことは、電流の取り出しが十分であったにもかかわらず、熱励起電流成分が光励起電流成分に比べて大きく、電圧上昇が理想的なレベルに達しなかったことが原因であると考えている。今回実験で実施できなかった135倍以上のより高集光下での動作においては一層の変換効率向上が期待できる。

III-2-(ロ)-D-1-c1. 窒化物セル【名古屋大学】

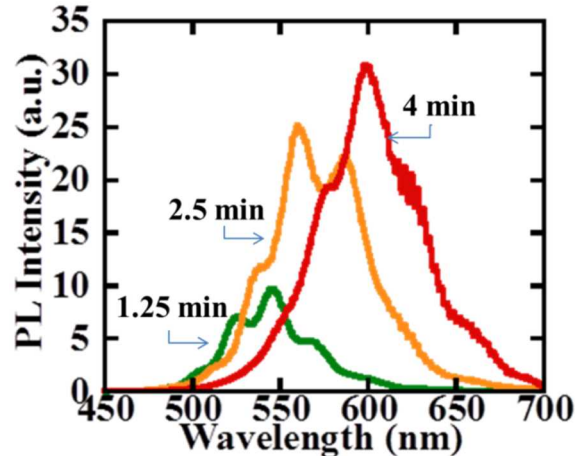
(1) (1-101)面Ga_N上InGa_N結晶成長とPVセル試作

本実験では、比較的In取込効率の高い(1-101)面Ga_Nを用い、InGa_Nの成長実験を行った。初めに、可能な限り成長温度の高い条件でInの取込が30%以上となる成長条件の模索を行った。得られた条件を用いて、厚膜成長を試みた結果を図III-2-(ロ)-D-1-c1-1に示している。試料構造に示すように、Si基板へ作製したGa_N(1-101)面上へInGa_Nを1分15秒から4分まで変化させて成長を行った。成長レートはおよそ10nm/分となっており、通常のInGa_N成長よりも高速で成長を行っている。これは、In原料の偏析を低減させるための成長条件であり、高温での成長が可能となっている。図III-2-(ロ)-D-1-c1-1では得られた結晶の鳥瞰SEM像を示している。成長時間が増えるにつれて、表面に三角形のヒロックが発生している。Inは結晶成長中においては、表面に数ML堆積しながら成長することが知られている。表面でのInの再蒸発と固相中への取込が供給量に追いつかない場合には、Inが凝集したInドロップが発生する。つまり、過剰なIn供給がInドロップの析出の原因である。三角形のヒロックは、このInドロップを起点に成長することが分かっている。先に述べたように、成長条件を最適化した時に成長温度を高く保っているために、再蒸発が促進され、またTMIの供給を制御することで、このようなヒロックを可能な限り低減している。ヒロック周りではIn-rich領域が形成されるために、キャリアの捕獲がおこり、効率低下の原因となるため、可能な限り排除する必要がある。本研究の結果では完全に排除は出来ていないものの、次に示すように発光効率は低減しておらず、良質なInGa_N結晶成長が可能であったことを示している。



図III-2-(ロ)-D-1-c1-1 (1-101)GaN 面上に成長した InGaN 結晶の鳥瞰 SEM 像

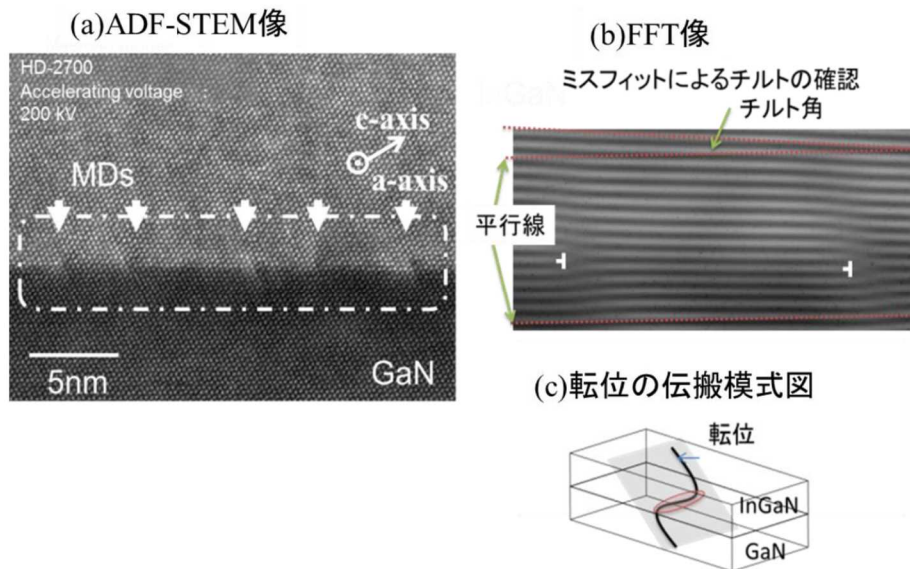
図III-2-(ロ)-D-1-c1-2 は得られた結晶の PL スペクトルを示している。測定は室温で行い、励起レーザーとして 404nm の半導体レーザーを用いた。成長時間が増えるにつれて、発光波長ピークが 540 nm～600nm 程度までシフトしていることが分かる。600 nm の発光では非常に高い In 組成が必要であり、この場合は 35%を超える In 組成であると推定され、本研究の目標値に近い膜厚を得ることが可能であった。このような大きなピークシフトは In 取込効率の変化により説明される。InGaN 膜厚が薄い場合、GaN に格子整合させるために歪エネルギーが蓄積されるため、In を排除することがエネルギー的に安定である。一方で、膜厚が厚くなると格子緩和が起きるために、In 取込効率が上がり In 組成が高くなっていったと考えられる。格子緩和は転位として誘発されるため、通常であれば転位の増加と共に発光強度が低下するはずであるが、本研究においては成長時間の増加と共に発光強度が増加しており、格子緩和と結晶性の相関性が見られていない。これは、緩和のメカニズムがこれまでの c 面での緩和と異なるためであると考えられる。そこで、このような成長手法のメカニズムを解明するために界面での転位の導入過程を観察するため、TEM による評価を行った。



図III-2-(ロ)-D-1-c1-2 各成長時間に対する PL スペクトル

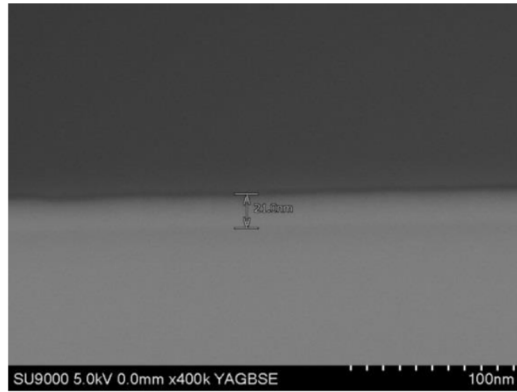
図III-2-(ロ)-D-1-c1-3 に(1-101)面 GaN/InGaN 界面の断面の TEM 像を示す。ADF-STEM 像より GaN と InGaN の界面にミスフィット転位 (MD) が発生していることが分かる。この転位の発生により界面の歪が緩和していると考えられる。InGaN の膜厚が薄い場合は、MD は確認されないことから、4min 成長のサンプルの膜厚 (40nm 程度) が臨界膜厚であることが分かる。MD の間隔は典型的な値として 5nm 程度であった。MD が生成された後に、転位の端で転位が曲がり貫通転位として表面まで伝搬する。この場合、表面での転位密度が大きく増加することから発光効率が下がる。しかしながら、本研究の場合では多くの転位が発生しているにもかかわらず、発光効率に影響が少ない。この理由を明らかにするために、高解像度の原子像 TEM 観察を行い、高速フーリエ変換 (FFT) により得た格子面像を図III-2-(ロ)-D-1-c1-

3に示している。この図から分かるように、ミスフィット転位が入ることにより格子がチルトしており、格子緩和が起きている。チルトによる格子緩和では緩和し切れない場合に、貫通転位の増加が起きると考えられる。その模式図を図III-2-(ロ)-D-1-c1-3(c)に示しているが、GaN層から伝搬した転位に沿って界面でミスフィット転位が発生し、チルトを起こすことで格子緩和を起こした後に、貫通転位として上方に抜けて行くと考えられる。この場合では、緩和前後の転位の密度の変化が非常に小さい状況で格子緩和しており、高品質なInGaN作製が可能であると推測される。

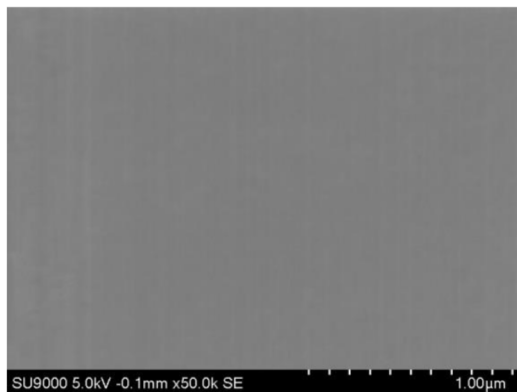


図III-2-(ロ)-D-1-c1-3 (a)断面 ADF-TEM 像と (b) 界面の原子像 FFT 結果及び (c) 転位の伝搬模式図

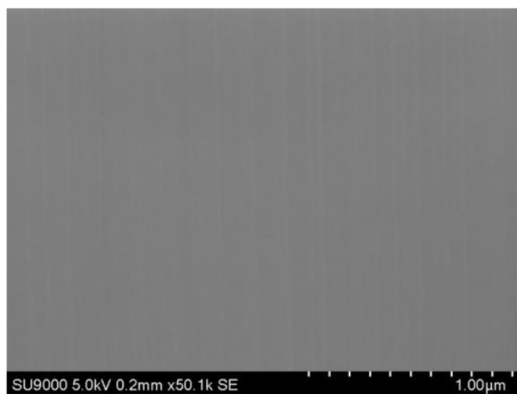
(1-101)面を加工 Si 基板上へ成長したサンプルと、GaN 基板へ成長したサンプルに関して比較を行った。20nm、180nm と成長膜厚を変えた時の表面モフォロジーを SEM にて観察した。まず、20nm 設計のサンプルに関して、図III-2-(ロ)-D-1-c1-4 の(1-101)面 GaN 基板上の断面 SEM 像から InGaN 膜厚は 21 nm であった。図III-2-(ロ)-D-1-c1-5, 6 の表面 SEM 像を比較したところ、平坦性が Si 基板上と GaN 基板上と大きく変わらないことが分かる。実験条件では、In 組成はおよそ 20%程度に設定している。GaN 基板の転位密度は 10^6cm^{-2} 程度であるのに対して、Si 基板上においても同様に低い転位密度を得られているため、成長条件は大きく変わらないことが分かる。一方で、GaN 基板と Si では放射率が異なるため、In 組成が変わると予想される。半極性面での In 組成の同定は比較的高度な計測が必要であり、XRD、EDX および光吸収を用いて評価を進める必要がある。In 組成に関しては成長の温度により修正が可能である。



図III-2-(ロ)-D-1-c1-4 断面 SEM



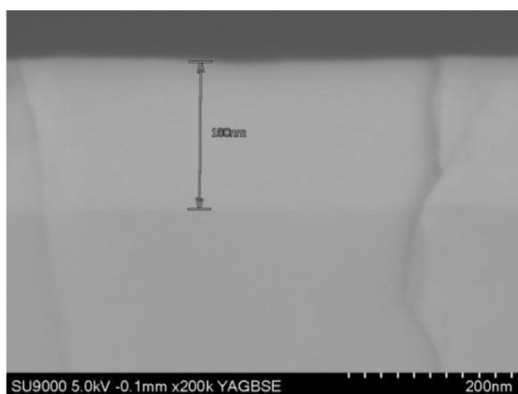
図III-2-(ロ)-D-1-c1-5 Si 基板上(1-101) InGaN 表面 SEM



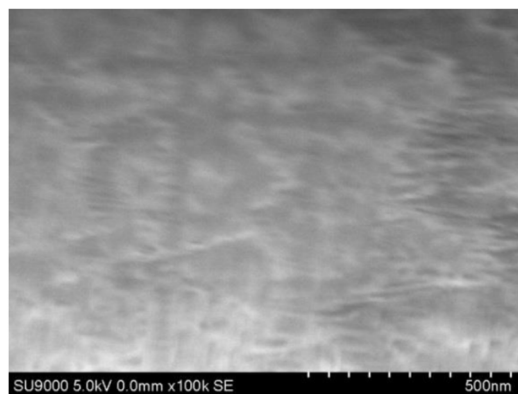
図III-2-(ロ)-D-1-c1-6 (1-101)GaN 基板上 InGaN 表面 SEM

Si 基板上(1-101)Ga_Nおよび(1-101)Ga_N基板を用いて、厚膜における InGa_N結晶成長の比較を行った。InGa_N 成長膜厚の設計値を 170nm 程度とした。図III-2-(ロ)-D-1-c1-7 の断面 SEM 像から InGa_N 膜厚は 180nm であり、おおよそターゲットの膜厚になっている。図III-2-(ロ)-D-1-c1-8 に Si 基板に成長した (1-101)面 InGa_N の表面 SEM 像を示す。表面にコントラストが見られるが、これは In 組成ムラを表していると考えている。厚膜化により格子緩和が進み、In 組成が比較的多く入ったために、このようなムラが現れてきたと考えられる。一方、図III-2-(ロ)-D-1-c1-9 では Ga_N 基板上的結果を示している。部分的には、非常に平坦な部分が見られているが、多くの場所で三角のヒロックが見られる。この違いは、もともとの Ga_N 基板において、転位集中部と無転位部が混在しており、転位集中部に転位を核としたヒ

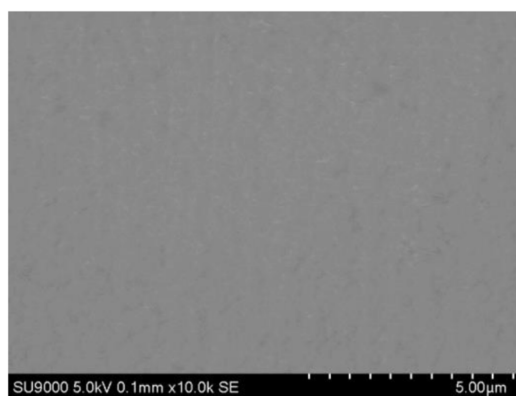
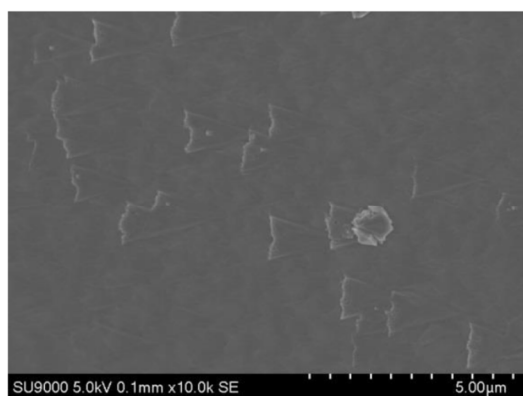
ロック形成が進んだためと考えられる。また、Si 基板で見られるようなムラはあまり観測されていないため、In 組成がやや低くなっていると考えている。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-7 断面 SEM 像



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-8 Si 基板上(1-101) InGaN 表面 SEM 像

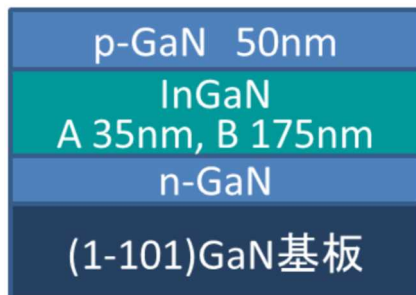


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-9 (1-101)GaN 基板上 InGaN 表面 SEM 像

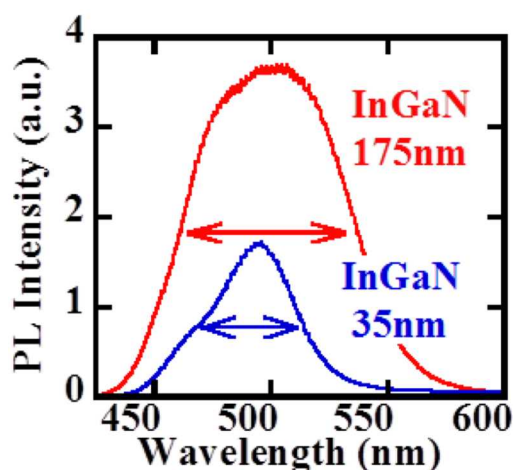
上記のように(1-101) GaN 面上へ高 In 組成の InGaN の結晶成長を行った。しかしながら、厚膜成長においては成長のムラが見られており、これらの成長の不完全がデバイスに与える影響を調査するため、pn 接合を作製し PV セル特性の評価を行った。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-10 が作製した試料構造であり、基板として(1-101)面 GaN を用いている。InGaN の膜厚を 35nm と 175nm とした。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-11 に作製した試料の PL スペクトルを示す。いずれの試料においても、500nm 付近の発光が見られており、In

組成が 30%を超えていることが分かる。35 nm の試料においては、半値幅が 40nm 程度であるのに対して、175nm の試料では 75nm 程度となっている。特に、長波長の領域での発光が増加している事から、格子緩和と共に In 組成が増加していることが示唆される。この結果は上記の成長結果と同等であり、実デバイスにおいて厚膜成長によって結晶性の均一化が課題であることが明らかとなった。

作製試料構造

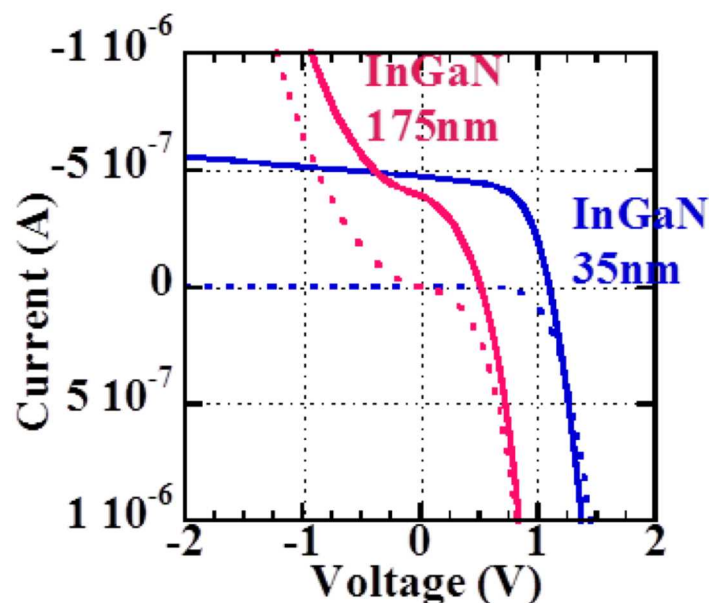


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-10 PVセルの試料構造



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-11 作製した PV セルの PL スペクトル

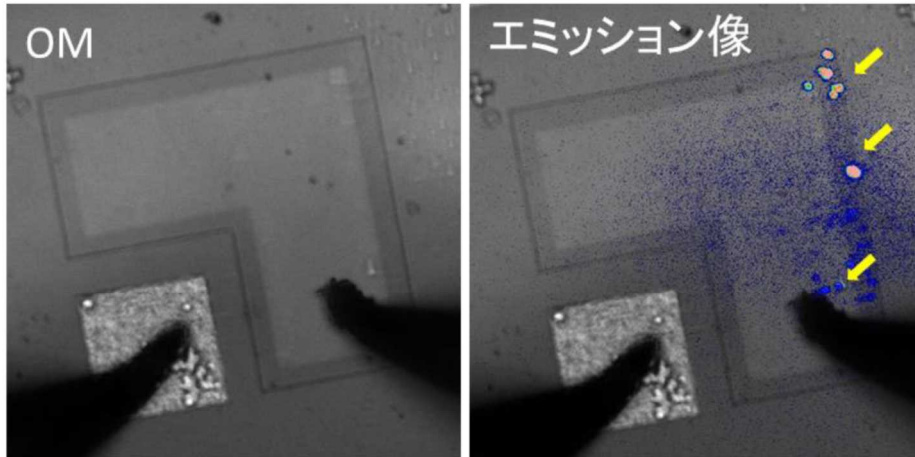
これらの試料に対して、1sun の条件下でソーラーシミュレータを用いて I-V 特性の評価を行った。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-12 に得られた I-V 特性を示す。実線が光照射時の特性、破線が光非照射時の I-V 特性である。まず InGaN 膜厚が 35nm のサンプルに対しては、短絡電流が 0.5 nA となっており、開放電圧がおおよそ 1.2 V であった。これは後に述べるシミュレーション結果と比較して、電流、電圧ともに比較的近い値となっている。一方で、175nm のサンプルに関しては、光を照射しない場合においても大きなリーク電流が発生していた。光照射を行う事で、電流値の増加は見られたものの、35nm のサンプルと比較しても電流量、開放電圧共に低く、理想的な特性を得ることは困難であった。この原因は、前に示したヒロックなどでのリークと考えられる。



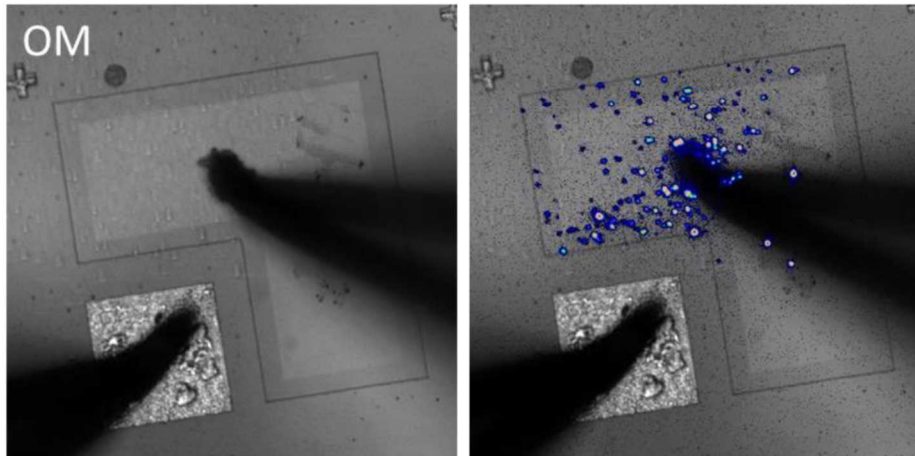
図III-2-(ロ)-D-1-c1-12 異なる InGaN 膜厚を用いた PV セルの I-V 特性比較

リーク電流の異なる2つの素子に関して、リーク箇所を特定するためにエミッション像観察を行った。ヒロックの少ない試料で $6 \mu\text{A}$ (@12 V)、ヒロックの多い試料で $30 \mu\text{A}$ (@6.2 V)の電流が観測されている。図III-2-(ロ)-D-1-c1-13 にエミッション顕微鏡像を示す。上部のヒロックの少ない試料においては、リークはメサ端で多く発生していることがわかる。従って、プロセス不良がリークの支配的な原因であると考えられる。一方で、ヒロックが多く発生した場所の素子では、メサ上に多くのリーク箇所が発生している、OM 像と比較してみると、このリーク箇所がヒロックと一致しており、ヒロック自体がリークに大きく影響していることが明らかとなった。成長ステップの違いから多くの不純物が取り込まれリークが起きていると考えられる。厚膜 InGaN ではヒロックの発生数にバラつきはあるものの、ヒロック自体は完全に抑制出来ておらず、厚膜で I-V 特性を改善するためには結晶成長におけるヒロックの低減が必須である。m 面や c 面 GaN の成長においては、オフ角がヒロックの低減に効果があることが分かっている。また、過飽和度による平坦面の成長に関しても報告があり、(1-101)面においても、これらの実験を進める必要がある。

ヒロック少@-12V-6uA



ヒロック多@-6.2V 30uA

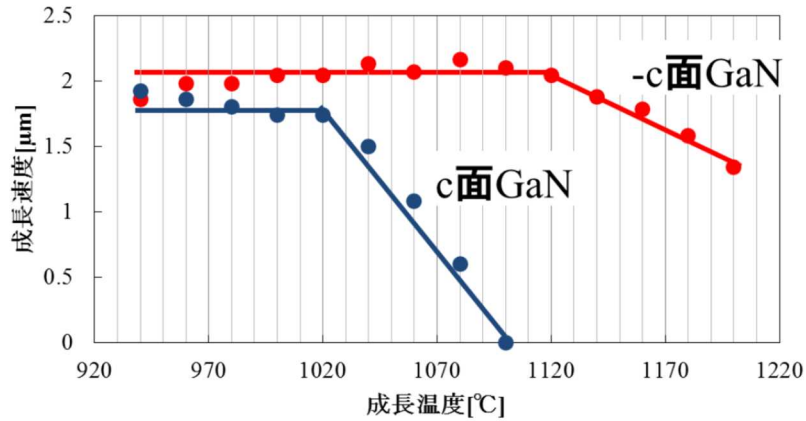


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-13 厚膜 InGaN を用いた PV セルのリーク源特定

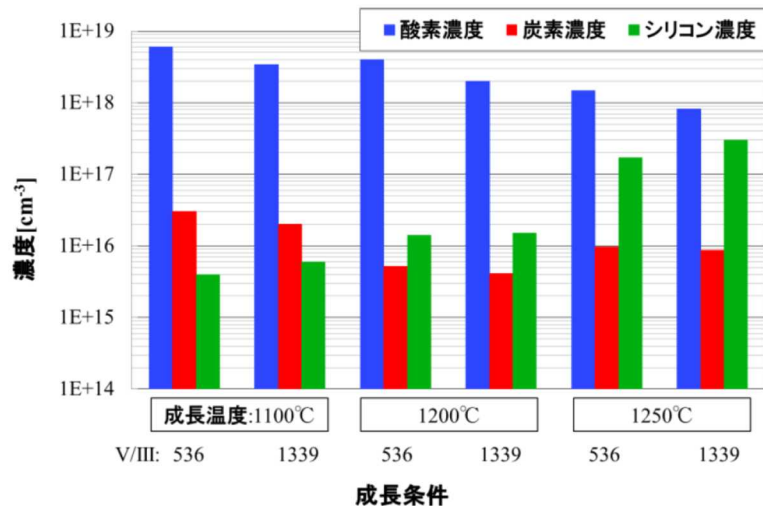
(2) (000-1)面 GaN の結晶成長

前節で述べた(1-101)は非極性面として、PVセル作製に適した面である。また、(000-1)面はピエゾ電界が(0001)面と比較して、正負逆なため、キャリアの掃出しが大きく、同様にキャリアを取り出すのに適した面であると言える。一方で、残留キャリア密度が高く、これまでにLED等へ利用されてきているが、不純物制御に問題を抱えている。そこで、 $-c$ 面の不純物低減を目的とし高温成長を試みた。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-14に c 面 GaN と $-c$ 面 GaN の成長速度の温度変化依存性を示す。成長速度を通常の成長域でおおよそ $2\mu\text{m/h}$ の条件としている。成長温度が低い時はおよそ $2\mu\text{m/h}$ で一定である。 1020°C を超えたところで c 面の成長速度が低下しており、 1100°C でほとんど成長をしていないことが分かる。一方で、 $-c$ 面での成長においては、 1120°C まではほぼ一定の値で有り、そこから成長速度が下がっている。 1200°C においても、成長が可能であり、高温の安定性が高いことが明らかとなった。高温成長にすることで、 NH_3 との反応を活性化し、不純物の削減が期待される。そこで、得られた結晶に対して、酸素濃度、炭素濃度、シリコン濃度をSIMSにより測定した。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-15に測定結果を示す。 1100°C 、 1200°C 、 1250°C で成長を行っており、V/Ⅲ比を540、1340と変化したサンプルを用いた。酸素に関しては、 1100°C 、V/Ⅲ比540において、 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ と非常に高い値であった。V/Ⅲ比の増加により若干酸素が減少することが分かった。成長温度を上げると、V/Ⅲ比の影響は大きく表れており、 1250°C で成長

したサンプルに対しては、V/Ⅲ比が 1340 の時に、酸素濃度は $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ まで減少しており、およそ 1 桁の酸素低減に成功した。しかしながら、シリコン濃度が急激に増えていることが分かる。これは、フローチャネル等、装置に用いられている基材の分解により不純物が増えてしまったと考えられる。炭素についても同様な傾向が見られているが、観測された濃度は 10^{15} 台と低く非常に優れた結晶であると考えている。現実的にデバイスを作製する際は、 10^{16} 台の酸素、シリコンの制御が必要であり、さらなる検討が必要である。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-14 成長温度に対する c 面 GaN と -c 面 GaN の成長速度比較



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-15 (000-1) 面上の各成長条件での不純物取込濃度比較

(3) GaN 非極性面、極性面上の太陽電池シミュレーション

窒化物半導体において極性面での太陽電池特性を得るためにシミュレーションを行った。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-16 に(0001)面で得られた結果を示す。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c1-16(a)では、In 組成を 10~30% と変化した時の I-V 特性を示している。10% の場合は、比較的高い電流密度を示しているが、1.5V を超えたところで急激な電流の低下が観測されている。これは、ピエゾ電界が内部で逆方向の電界を与えているが、1.5V を超えたところで電界が相殺されフラットバンドを形成することによる。その結果、キャリアは界面で再結合により消失するため、電流の低下が見られており、太陽電池としての特性を低下させる原因となっていることが分かる。次に、In 組成を変えた場合を見てみると、いずれの試料も階段状の I-V 特性を示しており、その傾向は In 組成を上げることで顕著にみられている。In 組成が 20% になると光吸収は 3 倍、In 組成が 30% になると 9 倍になるにもかかわらず、電流量が減っていく様子が見て

取れる。これは、In 組成が高い場合に定常状態において非常に大きなピエゾ電界が作用しているためであり、現実的には c 面での太陽電池特性は非常に悪化することを意味している。従って、窒化物半導体においては、c 面以外の成長面における太陽電池作製が必須であると考えられる。図 III-2-(ロ)-D-1-c1-16(b) では、c 面と非極性面(m 面 or a 面)の太陽電池特性の比較を示している。ピエゾ電界は c 面方向に発生するために、90 度傾いた面ではこの効果に関係なくデバイス作製が出来る。2つの面を比較した結果、ピエゾ電界が発生しない面方向においては、通常の太陽電池の特性を示すことが分かった。(1-101)面では、ピエゾ電界は 1/3 程度以下に抑えることが出来るため、有効な成長面と考えられる。

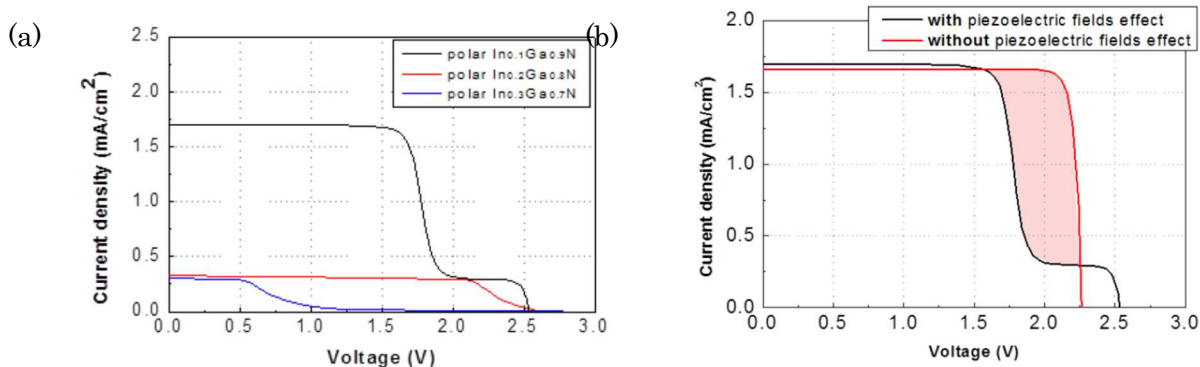
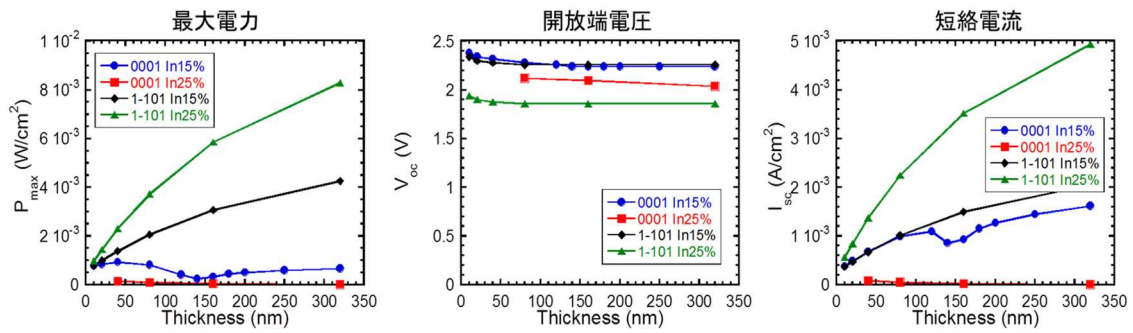


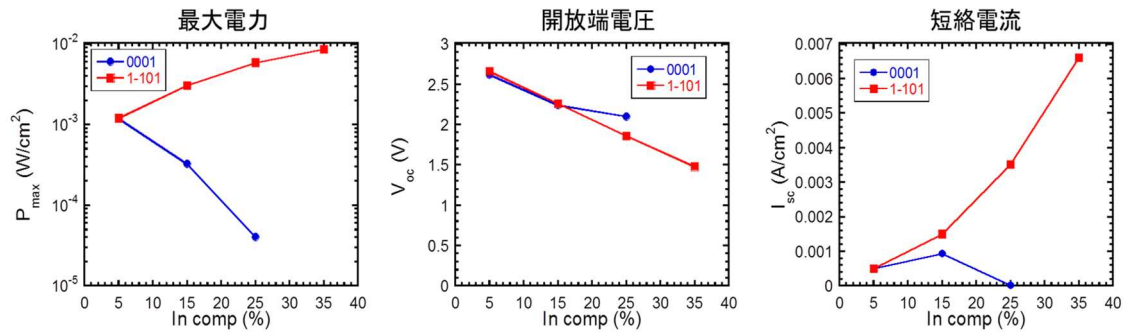
図 III-2-(ロ)-D-1-c1-16 PVSIM による窒化物太陽電池の I-V 特性

(a) In 組成変化と (b) ピエゾ電界有無

上記の結果から、シミュレーションによる (1-101) と (0001) 面の比較を行った。図 III-2-(ロ)-D-1-c1-17 に In 組成を 15% と 25% とし、In 膜厚を 10nm から 320nm まで変化した時の、最大電力、開放端電圧、短絡電流を示している。照射条件として、AM1.5 を想定している。いずれの場合も、膜厚と共に開放端電圧はわずかに減少しているが、概ね 2V 程度である。また、組成が上がるにつれて、電圧は減少する。c 面の場合、膜厚が厚くなるほど電流が減っているがこれはピエゾ電界の影響が強く利いている。一方で、(1-101) 面の場合、電流は単調に増えており、膜厚の増加が電力増大の鍵であることが分かる。160 nm から 320nm と膜厚を 2 倍にすると、3 割程度の電流増加が見られている。一方で、InGa_{0.7}N 成長においては、100nm 以上の高組成 InGa_{0.7}N は困難であり、現実的には 100nm 程度の膜厚における膜質の劣化と、厚膜化の効果がトレードオフになると考えられ、実デバイスでの実験を行う必要がある。次に図 III-2-(ロ)-D-1-c1-18 に In 組成を変化した時に PV セル特性を示す。膜厚は現実的な値として 160nm と固定している。c 面では In 組成を高くするにつれて、効率が著しく下がっているが、(1-101) 面では徐々に上がっていることが分かる。従って、(1-101) 面は PV セルを実現するのに優れた面であることが分かる。一方でやはり高 In 組成 InGa_{0.7}N の成長は困難であるため、図 III-2-(ロ)-D-1-c1-17 の結果と総合的に考えると、150nm 程度 20~30% の In 組成 InGa_{0.7}N を持つ PV セルが当面のターゲットであると考えている。この時、5mA/cm² 程度の電流が得られる事になるが、タンデム型にするためには、十分な電流量でないため今後さらに検討が必要である。



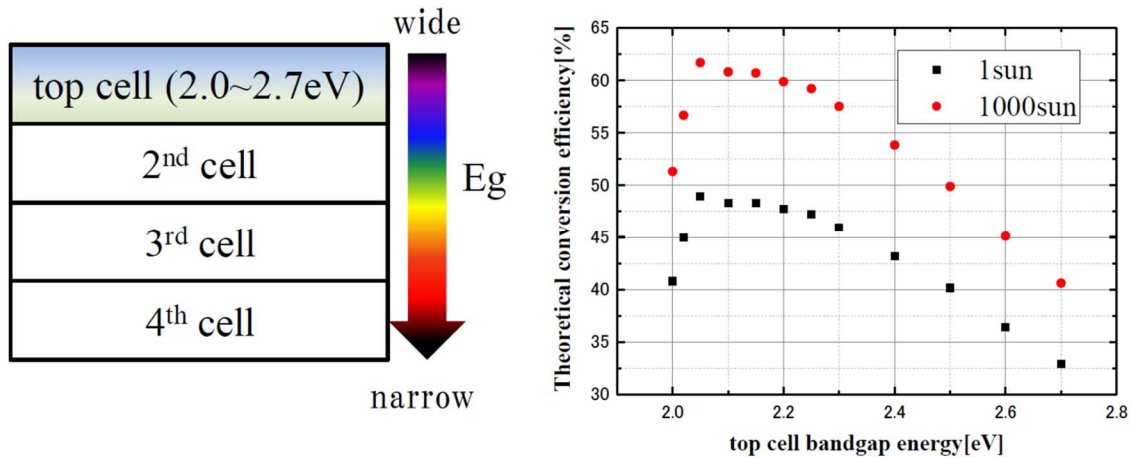
図III-2-(ロ)-D-1-c1-17 In 組成 15%及び 25%における異なる膜厚での PVcell 特性シミュレーション



図III-2-(ロ)-D-1-c1-18 InGaN 膜厚 160 nm における異なる In 組成での PVcell 特性シミュレーション

III-2-(ロ)-D-1-c2. 窒化物セル【名城大学】

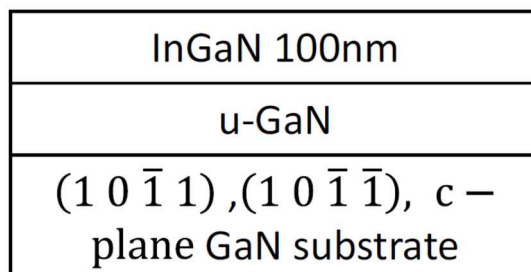
本研究課題では、GaInN を用いたトップセルによって従来実現されていた 3 接合セルのエネルギー変換効率を高めることを目的に研究を推進した。具体的には以下の図III-2-(ロ)-D-1-c2-1 のように 2.0~2.7eV のバンドギャップエネルギーを持つ GaInN トップセルを従来の 3 接合太陽電池に接合することによって、1000 sun で 60%を超えるエネルギー変換効率を持つ太陽電池の実現が期待される。その一方で、GaInN セルと 3 接合セルを高効率太陽電池が実現可能な高品質結晶を結晶成長によって実現するのは困難であり、メカニカルスタックによる高性能化が必須であり、その検討を行った。



図III-2-(ロ)-D-1-c2-1 GaInN トップセルを用いた 4 接合太陽電池の構造と理論的に期待できる変換効率

(1) 半極性 GaInN 太陽電池の検討

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-2 に作製した試料の構造を示す。試料は (10-11)、(10-1-1) 半極性 GaN 基板上に成長温度 800°C、圧力 400 hPa で膜厚 100 nm の GaInN 結晶を MOVPE 法で製膜した。さらに比較として青色 LED や青色半導体レーザーなどで良く用いられている c 面 GaN 基板上にも同じ条件で GaInN 結晶を製膜し、その違いについて検討した。

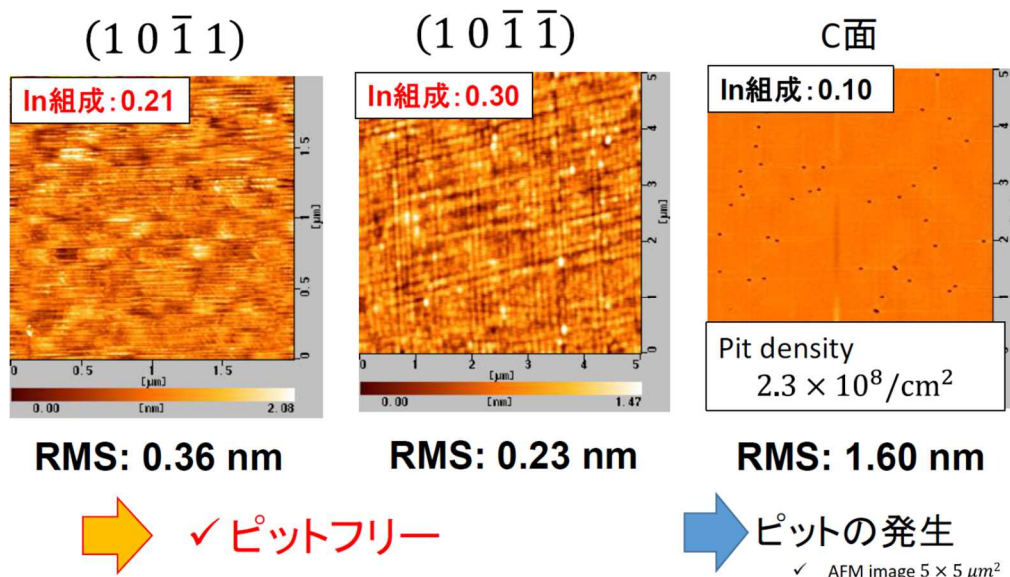


図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-2 製膜した試料の断面構造図

これらの製膜した試料を X 線回折法によって In 組成、原子間力顕微鏡観察によって表面状態を確認した。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-3 にその結果をまとめた。左から(10-11)、(10-1-1)、c 面 GaN 基板上に成長した結果である。In 組成においては大きな違いが確認でき、c 面成長した GaInN においては、In 組成は 10%程度であったものが、(10-11)、(10-1-1)成長した GaInN においては、それぞれ 21%と 30%と高 In 組成化されていることが確認された。これは、カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB) や名古屋大学のグループからも同様の報告がされており、半極性面にすることによって In の取り込み効率が高まっていることが考えられる。一方、表面状態を確認すると、c 面 GaN 基板上に成長した GaInN には 1cm²あたり 2.38×10⁸ 個程度の成長ピットが表れており、表面状態を表す RMS も大きな値を示していた。これは、GaInN と GaN の格子不整合に起因するものであり、多数の研究機関から同様の報告がある。また、過去の研究でこのピットが形成されると太陽電池特性は急激に悪化してしまうことが確認されており、c 面では良好な特性を持つ太陽電池を作製するのは困難であることが示唆された。

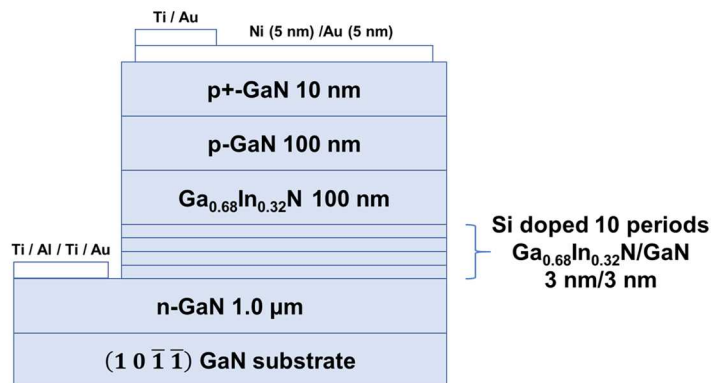
一方、半極性面である(10-11)および(10-1-1)面 GaN 上に成長した GaInN は高い In 組成にもかかわらず、表面はピットフリーであり、且つ表面平坦性の指標である RMS は c 面の場合に比べ 1 桁も低い値が得られていた。この結果は、GaN 系窒化物半導体では(10-11)がグロースピットを形成する場合に発生する面であり、したがってその結晶面ではピットが極めて開きにくいことを示唆している結果であった。次にデバイス化を検討した。

太陽電池を作製するためには pn 接合を形成する必要がある。SIMS 解析やホール測定を行った結果、(10-11)面上に成長した GaN では酸素等の不純物の取り込みが極めて高く、したがって複数回検討したが検討した範囲では良好なデバイス性能を得ることができなかった。以上から、本研究では(10-1-1)面に結晶面を絞り、GaInN 系太陽電池の試作を進めた。

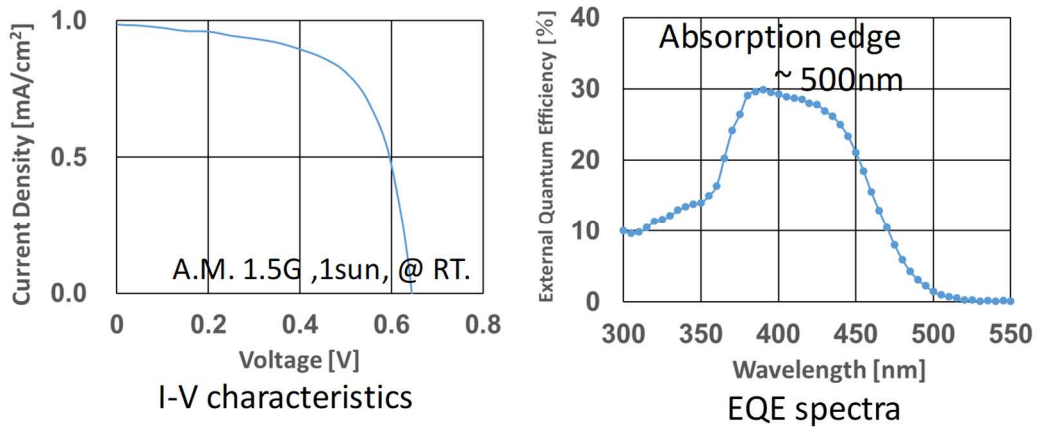


図III-2-(ロ)-D-1-c2-3 各結晶面を持つ GaN 基板上に同製膜条件で GaInN を形成した場合の表面 AFM 像 (図中に各 GaInN 層の In 組成も明記した)

図III-2-(ロ)-D-1-c2-4 に作製したデバイスの試料構造を図III-2-(ロ)-D-1-c2-5 に 1sun 照射時の太陽電池特性及び分光感度特性を示す。本デバイスでは最適化後の結果を示しているが、GaInN 層の直下に GaInN/GaN 超格子を積層したほうが開放電圧の向上が確認されたため、本デバイスではこのような構造を用いた。結果として、光の吸収端は約 500nm まで到達しており、当初の目標である 530nm には到達していないが、従来実現している太陽電池よりも大きく吸収端の長波長化が実現された。一方デバイス特性としては、開放電圧が GaInN のバンドギャップから想定される値に比べて低い課題が残されていることが確認された。このデバイスを透過電子顕微鏡で評価すると、多くの積層欠陥と考えられる欠陥が確認され、この低減が重要だと思われる。



図III-2-(ロ)-D-1-c2-5 作製したデバイス構造

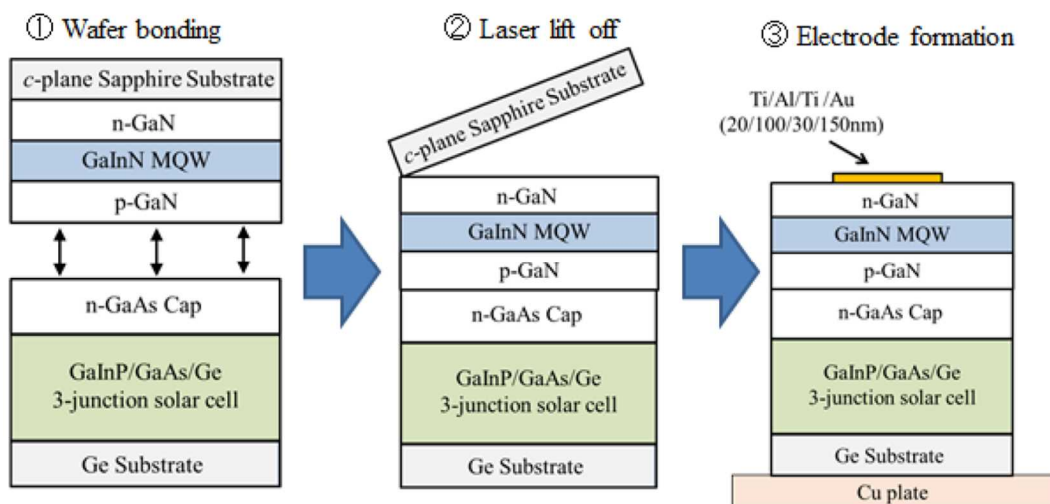


図III-2-(ロ)-D-1-c2-6 作製したデバイスの評価

(2) メカニカルスタック法による4接合太陽電池の試作

次にメカニカルスタック法によって4接合太陽電池の試作を行った。試料はMOVPE法で作製した。本実験ではGe基板上に作製したGaInP/GaAs/Geからなる3接合太陽電池およびGaInN系太陽電池を試作した。本来は各デバイスにおいて電流密度マッチングが必要であるが、本研究ではメカニカルスタックによる4接合セルを実現し、その有用性を検討することが重要であるため、GaInN系セルの電流密度が低いものを用いて実験を行った。

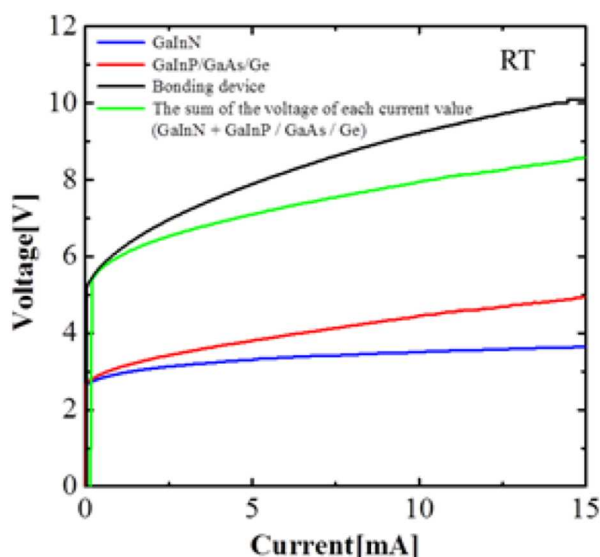
次に、これらの2つの結晶を接合して4接合太陽電池を作製した。一般的に、メカニカルスタック法には、熱・加圧による接合法と、それに加えてプラズマやイオン照射によって表面を活性化した上で接合する方法がある。しかし、検討の結果としてプラズマやイオン照射では表面にダメージが入り、良好な電流-電圧特性を得ることが難しいと判断し、加圧・高温処理によるメカニカルスタック法を中心に最適化を進めた。結果として、ボンディング温度450°C、ボンディング圧力500N、ボンディング時間60 minがボンディング面積と接合強度の点で最適であることがわかった。この実験条件下では、n-GaNとp-GaNがポテンシャル面積の95%以上で結合し、(引張り試験による)結合強度は4.5MPaに達した。この接合強度の値は、Au/Au接合(3.3MPa)の値よりも高い値であり、十分な接合強度を得ていることが確認できた。



図III-2-(ロ)-D-1-c2-7 デバイスプロセスの工程図

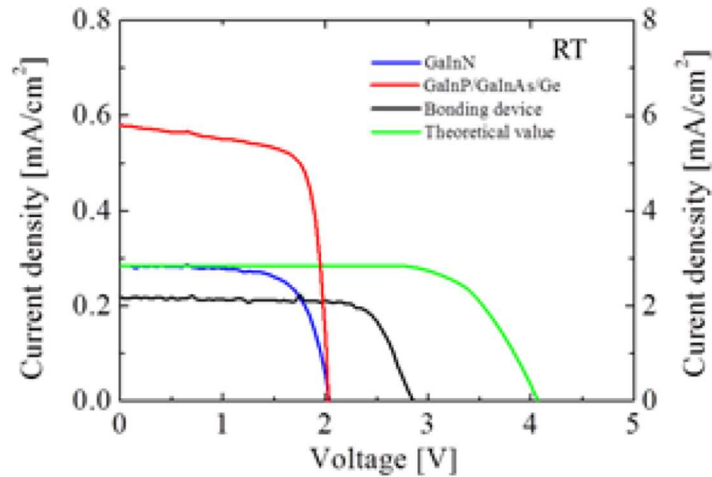
このメカニカルスタック法を用いて次に図III-2-(ロ)-D-1-c2-7のようなプロセスで4接合太陽電池

を試作した。本研究では、Ge は簡易的な Cu プレートによってオーミック接触を得ており、GaN 側の方に Ti/Al/Ti/Au 電極を形成することによってデバイス化を行った。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-8 に作製したデバイスの順方向の電流-電圧特性を示す。本測定では室温で DC バイアス下で測定した。赤線と青線がそれぞれ、別に作製した GaInN および GaInP/GaAs/Ge セルを、黒線が今回作製した 4 接合セルである。理想的には、3 接合セルと GaInN セルは直列接続になっているため、同じ電流値における動作電圧は両デバイスの和で計算できるため、理論的な計算値として緑線を記載した。その結果を比較すると、立ち上がり電圧はほぼ理想的な値を示しているが、一方として電流値の増大にともないその乖離が確認された。これは恐らく接合面に何らかの抵抗成分が存在していると考えられ、今後の検討が必要かと考えられる。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-8 作製したデバイスの電流-電圧特性

図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-9 に 1sun 照射時の 4 接合、GaInN、3 接合太陽電池の電流密度-電圧特性を示す。多接合太陽電池では、理論的な開放電圧 (V_{oc}) は各デバイスの合計であり、短絡電流密度 (J_{sc}) は最小値を持つデバイスに依存する。また、フィルファクタ (FF) が各デバイスの最小値であると仮定し、理論的な四接合太陽電池の特性を図中にあわせてプロットした。また表Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-1 は、各デバイスの V_{oc} 、 J_{sc} 、FF、および変換効率 (η) をまとめた。4 接合太陽電池の V_{oc} は、多接合化によって増大していることが確認できメカニカルスタックによる直列接続が実現した。しかし、それは理想的な値に比べて約 1V 低い値であった。順方向電流-電圧特性では、大きなショットキー障壁は確認できなかったが、この差異は接合界面に起因していると考えられる。デバイス性能を向上させるためには、p 型 GaN および n 型 GaAs 層の不純物濃度を最適化する必要がある。また、レーザーリフトオフおよび接合界面効果などのプロセス損傷に起因する可能性がある。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-9 AM 1.5 G (1sun) 照射下における太陽電池の特性

これらの課題はあるが、研究の第一歩として、当初の目標通りメカニカルスタックによる四接合太陽電池を実現しており、当初の目標は達成したと考えられる。今後は、さらなるデバイス性能を向上させるために、GaInNセルの吸収波長の長波長化、さらにはそれを用いた4接合太陽電池の試作、さらにメカニカルスタック界面の最適化が必要と考えられる。

表Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c2-1 実現した太陽電池の特性

Solar cell	Voc [V]	Jsc [mA/cm ²]	FF	η [%]
GaInN	2.04	0.285	0.69	0.402
Three-junction	2.03	5.79	0.75	8.76
Four-junction	2.85	0.219	0.74	0.460

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-c3. 窒化物セル【東京大学】

本研究の目的は、低温パルススパッタ (PSD) 法を用いて InGa_n 結晶成長を行い、結晶欠陥密度が少なく、且つ無歪みの高品位 InGa_n 基板を供給するための技術を開発することである。(1) InGa_n 成長速度向上のための装置開発と、(2) InGa_n 成長用基板の探索(窒化物、酸化物や金属などの格子整合基板の利用)を行った。(1)において、スパッタガンの改造やチャンバー構造についての検討を進め、In_{0.2}Ga_{0.8}N 薄膜の成長速度 1.2 μm/h までの高速化を実現した。(2)において、In_{0.17}Ga_{0.83}N と格子定数が一致する ScAlMgO₃ (0001) を用いて InGa_n 薄膜の PSD 成長を行い、エピタキシャルが可能であることを見出した。

パルススパッタ法を用いて高 In 組成 InGa_n 薄膜の高速成長プロセスの開発を行い、GaN テンプレート基板上において厚さ 1 ミクロンの In_{0.3}Ga_{0.7}N 成長を実現した。また、トンネル接合用の高電子濃度 n 型 GaN 薄膜成長プロセスの開発を行うために、パルススパッタ法におけるドーピング技術を構築した。パルススパッタ法で作製した Si ドープ n 型 GaN 薄膜の移動度は高速で成膜しても MOCVD-GaN のトップデータに近い値を示し、高品質なものであることが分かった。さらに、パルススパッタ法では 10²⁰ cm⁻³ 台の高濃度ドープを行っても品質劣化が起こらず、MOCVD では実現し得ない高電子濃度 n 型 GaN を作製できることが明らかになった。

パルススパッタ法を用いて高 In 組成 InGaN、InAlN 薄膜の成長プロセスの開発を行い、全 In 組成領域の単結晶薄膜成長を実現した。特に高 In 組成 InAlN 薄膜は熱解離温度が InN よりも低いため、パルススパッタ法による低温成長が有効である。(In/Ga/Al)組成に応じてバンドギャップ、残留電子濃度および電子移動度が系統的に変化することを確認し、それらの制御プロセスの開発を行った。また、GaN 薄膜へのドーピング技術開発も行った。Si ドーピング濃度を MOCVD では達成不能な濃度まで高めることで、酸化物透明導電膜 ITO に匹敵する低抵抗率 n 型 GaN 薄膜の作製に成功した。

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトで得られた研究開発の成果は、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化への貢献が期待される。具体的な製品として、格子整合 3 接合 (LM3J) 及び 4 接合 (LM4J) セルが挙げられる。

一方、海外の直達日射量の豊富な地域などでは、高効率太陽電池を発電部に搭載した集光型発電システムにより、最安値の発電コストが期待されている。セル効率 50% の高効率太陽電池に置き換えることができれば、大幅な発電コストの低減が期待される。具体的な製品として、エピタキシャル/ウエハ接合の両手法で製造可能な 4 接合 (さらに 5 接合) セル、量子ドット中間バンドセルが挙げられる。

テーマ D で得られた成果は以下に示す内容にて、それぞれの事業分野での活用が期待される。

研究開発成果	事業分野	貢献・活用
<ul style="list-style-type: none"> 裏面ヘテロ接合 InGaP/GaAs 2J セル構造で Voc 向上 Voc=2.527V (従来比+0.067V) を実現 量子井戸挿入による 4 接合セルの第 3 セルの電流整合条件を達成 GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb 3J 逆積み格子整合セル (ILM-3J) で、効率 30.3% (非集光) を達成 	宇宙・成層圏用途 車載用途 集光型太陽光発電システム	設置面積等の条件・環境から高効率セルが必要とされる用途で普及が期待される。
<ul style="list-style-type: none"> 低電流・高電圧 2J+QD セル (直接接合) で効率 32.1% (225 倍集光)、スマートスタック 2J+QD セルで効率 31.0% (5 倍集光) 面内 QD 密度 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の超高密度化を実現 (世界最高) dot-in-well 構造において電子の長寿命化を実現、室温で QD からのキャリアの取り出し効率約 80% を達成 (世界初) プラズモン金属ナノ粒子層を組込んだ PbS QD/ZnO NW セルの長波長吸収化 ($J_{sc}=17.3 \text{mAcm}^{-2}$) を達成 	宇宙・成層圏用途 車載用途 集光型太陽光発電システム 熱線利用シーソー太陽電池	多接合セル、量子ドット・マルチバンドセルは高効率であるため、従来から集光型発電システムとして普及が期待されている。一方、基板再利用技術等の低コスト化プロセスにより、新市場の開拓が期待されるため開発を継続する。

3. 波及効果

海外の直達日射量の豊富な地域などでは、高効率太陽電池を発電部に搭載した集光型発電システムにより、最安値の発電コストが期待されている。セル効率 50% の高効率太陽電池に置き換えることができれば、大幅な発電コストの低減が期待される。将来的には、ソーラーステーションとして、大規模な普及が期待できる。

一方、宇宙用太陽電池の製造コストが現状の 1/2~1/3 にできれば、国内市場のみならず、海外市場で大きなシェアを獲得できる可能性がでてくる。海外市場は国内市場の 10 倍以上であり、現行からの大きな事業拡大が期待される。さらに、人工衛星の電気推進（大電力）化や宇宙光発電等に対応した大電力化に 대응するためにも、高効率で低コストの太陽電池モジュールの面積展開が要求されている。本研究成果を活用した大幅な製造コストの低減による高効率多接合セルは、将来の宇宙市場の普及が期待される。

車載太陽電池モジュールの出力を 800W 程度の出力が可能になれば、駆動用電源として電気自動車もしくはハイブリッド車の電費向上が期待される。まずはテーマ A で得られた成果を基に高効率で現実的な製造コストを実現し、大電力が必要な冷凍車や大型トラックなどに搭載されることが期待される。次のフェーズで、テーマ D の高効率セルの市場投入がなされることで、ソーラー電気自動車として、大規模な普及が期待できる。

今回開発されたウエハ接合技術、ELO 技術等の低コスト作製プロセスに関しては、太陽電池セルモジュール以外にも、電子デバイス・光デバイスにおける多機能・異種材料集積、実装技術に広く応用される可能性を持つ。量子ドット中間バンドセルは、バンドギャップ以下の光を 2 段階で吸収させることで電流を増大させるため、可視光の透過率を制御しつつ、近赤外光（熱線）を吸収して発電させるシースルー太陽電池としての可能性がある。

4. 今後の展開

本研究開発では、まず 4 接合セル開発の最終目標達成に向けて種々の課題解決に取り組み、多くの成果を挙げることができた。

- (1) 順積み GaInNAsSb/Ge ボトム 2J セル
- (2) 新規 GaInNAs/GaNAs MQW セル（特徴：アニールなしで高い EQE を達成）
- (3) 表面活性接合 (SAB) による InGaP/GaAs (逆積み) // InGaAs/InP 4J セル (国内初)
- (4) 逆積み裏面ヘテロ InGaP トップセル、InGaP/GaAs セルの高効率化

本研究開発の成果を活用し、現宇宙用太陽電池事業の拡大および成層圏飛行体用等の新規事業の創出、更には、電動自動車へ搭載可能な高出力太陽光発電モジュールの将来の実用化へに向けた開発を推進する予定である。特に移動体用の多接合太陽電池に関しては、2020 年度より NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の新市場創造技術開発／移動体用太陽電池の研究開発」プロジェクトにおいて更なる高効率化、低コスト化技術開発を進めることになっている。

次に量子ドット・マルチバンドセル開発の最終目標達成に向けたハイライト成果として：

- (1) 低電流・高電圧型量子ドットセルの最適化（高密度化等）及び集光特性の評価
直接接合 2J+QD セルで効率 32.1%（225 倍集光、世界初）

スマートスタック 2J+QD セルで効率 31.0% (5 倍集光)

(2) 面内 QD 密度 $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ の超高密度化 (世界最高)

(3) ラチェット構造による中間バンド内の電子の長寿命化、及び室温で QD からのキャリアの取り出し効率約 80%を達成 (世界初)

などが挙げられる。以上は、開発当初より想定・提案していた集光型発電システムへの応用が大いに期待される成果である。さらに今回開発されたウエハ接合技術、ELO 技術等の低コスト作製プロセスには、新しい応用と市場開拓の可能性を秘めている。量子ドット中間バンドセルは、バンドギャップ以下の光を 2 段階で吸収させることで電流を増大させることから、可視光の透過率を制御しつつ、近赤外光 (熱線) を吸収して発電させるシースルー太陽電池としての可能性がある。特にビル壁面設置向けの量子ドット太陽電池に関しては、2020 年度より NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発/壁面設置太陽光発電システム技術開発 (ビル壁面開口部向けシースルー太陽電池の開発)」プロジェクトにおいて更なる高効率化、低コスト化技術開発を進めることになっている。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願	1	1	0	0	0	2
(うち外国出願)	(1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(1)
論文	21	17	22	27	21	108
研究発表・講演	129	129	134	115	105	612
(うち国際会議)	(59)	(73)	(80)	(60)	(56)	(328)
新聞・雑誌等への掲載	1	2	0	1	1	5
その他	7	3	2	4	2	18

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人東京大学	PCT/JP2015/086247	PCT	2015/12/25	公開	太陽電池	岡田至崇、 曾我部東馬 庄司靖
2	産業技術総合研究所	特願 2016-023482	国内	2016/2/10	取下	光電変換素子及び太陽電池	太野垣健、 菅谷武芳

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Generation and collection of photocarriers in dilute nitride GaInNAsSb solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 24, 28, 2015	有	2015 年 6 月

2	P. Rale, A. Delamarre, G. El-Hajje, R. Tamaki, K. Watanabe, Y. Shoji, Y. Okada, M. Sugiyama, L. Lombez, and J.-F. Guillemoles	IRDEP, CNRS、 東京大学	Quantitative optical measurement of chemical potentials in intermediate band solar cells	Journal of Photonics for Energy Vol. 5, 53092, 2015	有	2015年6 月
3	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Evaluation of concentrator photovoltaic properties of GaInNAsSb solar cells for multijunction solar cell applications	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 54, 08KE06, 2015	有	2015年7 月
4	K. Toprasertpong, N. Kasamatsu, H. Fujii, T. Kada, S. Asahi, Y. Wang, K. Watanabe, M. Sugiyama, T. Kita, and Y. Nakano	東京大学、 神戸大学	Microscopic observation of carrier-transport dynamics in quantum- structure solar cells using a time-of-flight technique	Applied Physics Letters Vol. 107, 043901, 2015	有	2015年7 月
5	K. Toprasertpong, T. Tanibuchi, H. Sugiyama, T. Kada, S. Asahi, K. Watanabe, M. Sugiyama, T. Kita, and Y. Nakano	東京大学、 神戸大学	Comparison of Electron and Hole Mobilities in Multiple-Quantum-Well Solar Cells Using a Time- of-Flight Technique	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 5, 1613- 1620, 2015	有	2015年9 月
6	T. Smyth, M. Dvorak, M. J. Y. Tayebjee, V. B. Yasarapudi, H. Xia, Y. Feng, Y. Wang, B. Puthen-Veettil, S. Huang, S. Shrestha, S. P. Bremner, T. W. Schmidt, M. Sugiyama, and G. J. Conibeer	University of New South Wales、 東京大学	Hot Carrier Cooling in $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}/\text{GaAs}_{0.80}\text{P}_{0.20}$ Multiple Quantum Wells: The Effect of Barrier Thickness	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 6, 166- 171, 2015.	有	2015年10 月
7	D. J. Farrell, H. Sodabanlu, Y. Wang, M. Sugiyama, and Y. Okada	東京大学	A hot-electron thermophotonic solar cell demonstrated by thermal up-conversion of sub- bandgap photons	Nature Communications Vol. 6, 8685, 2015	有	2015年11 月
8	H. Wang, V. Gonzalez-Pedro, T. Kubo, F. Fabregat- Santiago, J. Bisquert, Y. Sanehira, J. Nakazaki, and	東京大学	Enhanced carrier transportation distance in colloidal PbS QD-based solar cells using ZnO nanowires	The Journal of Physical Chemistry C Vol.119, 27265, 2015	有	2015年12 月

	H. Segawa					
9	C.-Y. Hung, T. Sogabe, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Growth of ErAs nanodots by molecular beam epitaxy for application to tunneling junctions in multijunction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 21201, 2016	有	2016年1月
10	A. Delamarre, L. Lombez, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP, CNRS	Experimental Demonstration of Optically Determined Solar Cell Current Transport Efficiency Map	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 6, 528-531, 2016	有	2016年3月
11	E. López, A. Datas, I. Ramiro, P. G. Linares, E. Antolín, I. Artacho, A. Martí, A. Luque, Y. Shoji, T. Sogabe, A. Ogura, and Y. Okada	Universidad Politécnica de Madrid、 東京大学	Demonstration of the operation principles of intermediate band solar cells at room temperature	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 149, 15, 2016	有	2016年5月
12	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Improvement of 1.0 eV GaInNAsSb solar cell performance upon optimal annealing	Physica Status Solidi A Vol. 214, 1600586, 2016	有	2016年10月
13	A. Julian, Z. Jehl, N. Miyashita, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学	Insights on energy selective contacts for thermal energy harvesting using double resonant tunneling contacts and numerical modeling	Superlattices and Microstructures Vol. 100, 749, 2016	有	2016年12月
14	M. Sugiyama, H. Fujii, T. Katoh, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, D. Alonso-Álvarez, N. J. Ekins-Daukes, and Y. Nakano	東京大学、 Imperial Collage London	Quantum Wire-on-Well (WoW) Cell with Long Carrier Lifetime for Efficient Carrier Transport	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 24, 1606-1614, 2016	有	2016年12月
15	H. Xia, R. Patterson, S. Smyth, Y. Feng, S. Chung, Y. Zhang, S. Shrestha, S. Huang, H. Uchiyama, S. Tsutsui, M. Sugiyama, A. Baron, and G. Conibeer	University of New South Wales、 東京大学、 理研	Inelastic X-ray scattering measurements of III-V multiple quantum wells	Applied Physics Letters Vol. 110, 043102, 2017	有	2017年1月
16	Y. Arakawa, K. Ueno,	東京大学	Low-temperature pulsed sputtering growth of	Japanese Journal of	有	2017年2月

	H. Noguchi, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka		InGaN multiple quantum wells for photovoltaic device	Applied Physics Vol. 56, 31002, 2017		
17	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, J.-F. Guillemoles, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学、 IRDEP, CNRS	Electroluminescence-based quality characterization of quantum wells for solar cell applications	Journal of Crystal Growth Vol. 464, 94-99, 2017	有	2017年4月
18	H. Cho, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Stability and Controllability of InGaAs/GaAsP Wire-on-Well (WoW) Structure for Multi-junction Solar Cells	J. Crystal Growth Vol. 464, 86-93, 2017	有	2017年4月
19	Y. Shoji, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	Multi-stacked GaSb/GaAs type-II quantum nanostructures for application to intermediate band solar cells	AIP Advances Vol. 7, 65305, 2017	有	2017年6月
20	S. Naito, K. Yoshida, N. Miyashita, R. Tamaki, T. Hoshii, and Y. Okada	東京大学	Effect of Si doping and sunlight concentration on the performance of InAs/GaAs quantum dot solar cells	Journal of Photonics for Energy Vol. 7, 25505, 2017	有	2017年6月
21	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada, and Y. Nakano	東京大学	Design of free-barrier InGaAs/GaNAs multiple quantum well solar cells with 1.2 eV energy gap	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 08MA04, 2017	有	2017年7月
22	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed short-wave infrared PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowire solar cells giving high open-circuit voltage	ACS Energy Letter Vol. 2, 2110, 2017	有	2017年8月
23	L. Wu, G-M. Kim, H. Nishi, and T. Tatsuma	東京大学	Plasmonic photovoltaic cells with dual-functional gold, silver, and copper half-shell arrays	Langmuir Vol. 33, 8976, 2017	有	2017年8月
24	D. Suchet, Z. Jehl, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP, CNRS	Influence of Hot-Carrier Extraction from a Photovoltaic Absorber: An Evaporative Approach	Physical Review Applied Vol. 8, 34030, 2017	有	2017年9月
25	K. Ueno, T. Fudetani, Y. Arakawa, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioka	東京大学	Electron transport properties of degenerate n-type GaN prepared by pulsed sputtering	APL Materials Vol. 5, 126102, 2017	有	2017年12月

26	K. Toprasertpong, T. Inoue, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Investigation and modeling of photocurrent collection process in multiple quantum well solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 174, 146-156, 2018	有	2018年1月
27	T. Fukuda, A. Takahashi, H. Wang, K. Takahira, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Impedance analysis of PbS colloidal quantum dot solar cells with different ZnO nanowire lengths	Japanese Journal of Applied Physics Vol.57, 3EJ02, 2018	有	2018年1月
28	S. Almosni, A. Delamarre, Z. Jehl, D. Suchet, L. Cojocar, M. Giteau, B. Behaghel, A. Julian, C. Ibrahim, L. Tatry, H. Wang, T. Kubo, S. Uchida, H. Segawa, N. Miyashita, R. Tamaki, Y. Shoji, K. Yoshida, N. Ahsan, K. Watanabe, T. Inoue, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Hamamura, T. Toupance, C. Olivier, S. Chambon, L. Vignau, C. Geffroy, E. Cloutet, G. Hadziioannou, N. Cavassilas, P. Rale, A. Cattoni, S. Collin, F. Gibelli, M. Paire, L. Lombez, D. Aureau, M. Bouttemy, A. Etcheberry, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IPVF, C2N, CNRS、 University of Bordeaux, Aix Marseille University	Material challenges for solar cells in the twenty-first century: directions in emerging technologies	Science and Technology of Advanced Materials Vol. 19, 336-369, 2018	有	2018年4月
29	Y. He, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	N-H-related deep-level defects in dilute nitride semiconductor GaInNAs for four-junction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RD11, 2018	有	2018年6月
30	D. Suchet, A. Delamarre,	東京大学、 IPVF, CNRS	Analytical optimization of intermediate band	Progress in Photovoltaics;	有	2018年6月

	N. Cavassilas, Z. Jehl, Y. Okada, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles		systems: Achieving the best of two worlds	Research and Applications Vol. 26, 800- 807, 2018		
31	K. Toprasertpong, S. M. Goodnick, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 Arizona State University	Effective mobility for sequential carrier transport in multiple quantum well structures	Physical Review B Vol. 96, 075441, 2017	有	2018年8 月
32	L. Zhu, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu	東京大学、 京都大学	Intrinsic and extrinsic drops in open-circuit voltage and conversion efficiency in solar cells with quantum dots embedded in host materials	Scientific Report Vol. 8, 11704, 2018	有	2018年8 月
33	S. Kalainathan, N. Ahsan, T. Hoshii, Y. Okada, T. Logu, and K. Sethuraman	Vellore Institute of Technology、 東京大学、 Madurai Kamaraj University	Tailoring sub-bandgap of CuGaS ₂ thin film via chromium doping by facile chemical spray pyrolysis technique	Journal of Materials Science: Materials in Electronics Vol. 29, 19359- 19367, 2018	有	2018年9 月
34	A. Delamarre, D. Suchet, N. Cavassilas, Y. Okada, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IPVF, CNRS	An Electronic Ratchet Is Required in Nanostructured Intermediate-Band Solar Cells	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 8, 1553- 1559, 2018	有	2018年9 月
35	Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	東京大学	Revealing Solar-Cell Photovoltage Dynamics at the Picosecond Time Scale with Time-Resolved Photoemission Spectroscopy	Physical Review Applied Vol. 10, 034056, 2018	有	2018年9 月
36	N. Miyashita, Y. He, N. Ahsan, T. Agui, H. Juso, T. Takamoto, and Y. Okada	東京大学、 シャープ	Incorporation of hydrogen into MBE-grown dilute nitride GaInNAsSb layers in a MOCVD growth ambient	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 185, 359- 363, 2018	有	2018年10 月
37	K. Miyagawa, M. Nagai, G. Yamashita, M. Ashida, C. Kim, H. Akiyama, and Y. Kanemitsu	大阪大学、 東京大学、 京都大学	Quantitative monitoring of the internal field in the depletion layer of a GaAs-based solar cell with terahertz radiation	Applied Physics Letters Vol. 113, 163501, 2018	有	2018年10 月
38	K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato	産業技術総合 研究所、 東京大学	Nonequilibrium Theory on the Conversion Efficiency limit of Solar Cells including Thermalization and Extraction of Carriers	Physical Review Applied Vol. 10, 044069, 2018	有	2018年10 月
39	N. Cavassilas, D. Suchet, A. Delamarre, F. Michélini, M. Bescond, Y. Okada,	CNRS, IM2NP, LIMMS, IRDEP、 東京大学	Beneficial impact of a thin tunnel barrier in quantum well intermediate-band solar cell	EPJ Photovoltaics Vol. 9, 6, 2018	有	2018年11 月

	M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles					
40	L. Zhu, K.-H. Lee, M. Yamaguchi, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, K. Araki, and N. Kojima	東京大学、豊田工業大学、京都大学	Analysis for Non-radiative Recombination in Quantum Dot Solar Cells and Materials	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 27, 971-977, 2019	有	2019年1月
41	F. Aobo Ren, H. Lai, C. Liu, X. Hao, J. Zhang, L. Wu, and M. Sugiyama	Sichuan University、東京大学、Southern University of Science and Technology	A luminescence-based interpolation method for series resistance imaging in thin film solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, 050908, 2019	有	2019年2月
42	K. Toprasertpong, A. Delamarre, Y. Nakano, J.-F. Guillemoles, and M. Sugiyama	東京大学、CNRS, IPVF	Generalized Reciprocity Relations in Solar Cells with Voltage-Dependent Carrier Collection: Application to p-i-n Junction Devices	Physical Review Applied Vol. 11, 024029, 2019	有	2019年2月
43	N. Miyashita, Y. He, T. Agui, H. Juso, T. Takamoto, and Y. Okada	東京大学、シャープ	Inverted Lattice-Matched Triple Junction Solar Cells With 1.0 eV GaInNAsSb Subcell by MOCVD/MBE Hybrid Growth	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 9, 666-672, 2019	有	2019年5月
44	M. Giteau, D. Suchet, S. Collin, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、CNRS, IPVF, C2N	Detailed balance calculations for hot-carrier solar cells: coupling high absorptivity with low thermalization through light trapping	EPJ Photovoltaics Vol. 10, 1, 2019	有	2019年5月
45	M. Bouttemy, D. Aureau, M. Frégnaux, Y. Shoji, Z. Jehl, D. Suchet, J.-F. Guillemoles, A. Etcheberry, and Y. Okada	Institut Lavoisier de Versailles、東京大学、CNRS, IPVF	Nanoscale Wet Chemical Engineering of III-V Quantum Dots for Emerging Solar Applications	ECS Transactions Vol. 89, 37-46, 2019	有	2019年5月
46	A. Ren, H. Xu, J. Zhang, H. Hung, A. Delamarre, K. Watanabe, J. Zhang, L. Wu, C. Liu, and M. Sugiyama	Sichuan University、東京大学、Southern University of Science and Technology	Spatially Resolved Identification of Shunt Defects in Thin Film Solar Cells via Current Transport Efficiency Imaging Combined with 3D Finite Element Modeling	Solar RRL Vol. 3, 1800342, 2019	有	2019年5月
47	B. Behaghel, R. Tamaki, H.-L. Chen, P. Rale, L. Lombez, Y. Shoji, A. Delamarre, A. Cattoni, S. Collin,	CNRS, C2N, IPVF、東京大学	A hot-carrier assisted InAs/AlGaAs quantum-dot intermediate-band solar cell	Semiconductor Science and Technology Vol. 34, 084001, 2019	有	2019年7月

	Y. Okada, and J.-F. Guillemoles					
48	N. Miyashita, Y. He, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Anneal mediated deep- level dynamics in GaInNAsSb dilute nitrides lattice-matched to GaAs	Journal of Applied Physics Vol. 126, 143104, 2019	有	2019年10 月
49	H. Xu, A. Delamarre, B. M. F. Yu Jeco, H. Johnson, K. Watanabe, Y. Okada, J.-F. Guillemoles, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 Australian National University、 CNRS, IPVF	Current transport efficiency analysis of multijunction solar cells by luminescence imaging	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 27, 835- 843, 2019	有	2019年10 月
50	S. Chen, J. Xue, Xi. Hu, Y. Guo, G. Weng, J. Jiang, Z. Zhu, J. Chu, and H. Akiyama	East China Normal University、 東京大学	Diagnosis of Perovskite solar cells through absolute electroluminescence- efficiency measurements	Frontiers in Physics Vol. 7, 166, 2019	有	2019年10 月
51	S. Okumura, R. Suzuki, K. Tsunoda, H. Nishino, and M. Sugiyama	富士通研究 所、 東京大学	Suppression of three- dimensional pit formation of InAs on GaSb(0 0 1) by Sb-free two-step molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth Vol. 528, 125269, 2019	有	2019年12 月
52	K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato	産業技術総合 研究所、 東京大学	Heat recovery solar cell	Physical Review Applied Vol. 12, 064001, 2019	有	2019年12 月
53	Y. Shoji, K. Watanabe, and Y. Okada	東京大学	Photo absorption improvement in multi- stacked InGaAs/GaAs quantum dot	Solar Energy Materials & Solar Cells Vol. 204, 110216, 2020	有	2020年1 月
54	L. Zhu, Y. Hazama, A. Reddy, K. Watanabe, Y. Nakano, M. Sugiyama, and H. Akiyama	東京大学	Modeling and design for low-cost multijunction solar cell via light- trapping rear texture technique: Applied in InGaP/GaAs/InGaAs triple junction	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 28, 251- 265, 2020	有	2020年4 月
55	T. Nakamura, M. Imaizumi, H. Akiyama, and Y. Okada	東京大学、 JAXA	Practical target values of Shockley-Read-Hall recombination rates in state-of-the-art triple- junction solar cells for realizing conversion efficiencies within 1% of the internal radiative limit	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Vol. 28, 417- 424, 2020	有	2020年5 月
56	T. Suzuki, K. Osada, S. Yagi, S. Naitoh, Y. Shoji, Y. Hijikata, Y. Okada, and H. Yaguchi,	埼玉大学、 東京大学	Molecular beam epitaxial growth of intermediate band materials based on GaAs:N δ -doped superlattices	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 54, 08KA07, 2015	有	2015年7 月

57	K. Osada, T. Suzuki, S. Yagi, S. Naitoh, Y. Shoji, Y. Hijikata, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	Control of intermediate band configuration in GaAs:N δ -doped superlattice	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 54, 08KA04, 2015	有	2015年7 月
58	N. Kamata, M. Suetsugu, D. Haque, S. Yagi, H. Yaguchi, F. Karlsson, and P. O. Holtz	埼玉大学、 Linkoping University	Spectral change of intermediate band luminescence in GaP:N due to below-gap excitation: Discrimination from thermal activation	Physica Status Solidi B Vol. 254, 1600566, 2017	有	2016年11 月
59	M. D. Haque, N. Kamata, T. Fukuda, Z. Honda, S. Yagi, H. Yaguchi, and Y. Okada	埼玉大学、 Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 東京大学	Nonradiative recombination centers in GaAs:N δ -doped superlattice revealed by two-wavelength-excited photoluminescence	Journal of Applied Physics Vol. 123, 161426, 2018	有	2018年4 月
60	Md. D. Haque, N. Kamata, A. Z. M. T. Islam, Z. Honda, S. Yagi, and H. Yaguchi	埼玉大学、 Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 University of Rajshahi	Photoluminescence characterization of nonradiative recombination centers in MOVPE grown GaAs:N delta- doped superlattice structure	Optical Materials Vol. 89, 521-527, 2019	有	2019年2 月
61	T. Fukuda, A. Takahashi, K. Takahira, H. Wang, T. Kubo, and H. Segawa	埼玉大学、 東京大学	Limiting factor of performance for solution- phase ligand-exchanged PbS quantum dot solar cell	Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 195, 220, 2019	有	2019年3 月
62	S. Ferdous, N. Kamata, S. Yagi, and H. Yaguchi	埼玉大学	Detection of nonradiative recombination centers in GaPN (N:0.105%) by below- gap excitation light	Physica Status Solidi B Vol. 257, 1900377, 2020	有	2019年10 月
63	Md. D. Haque, N. Kamata, A. Z. M. T. Islam, S. Yagi, and H. Yaguchi	Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 埼玉大学、 University of Rajshahi	Spectral change of E- band emission in a GaAs:N δ -doped superlattice due to below-gap excitation and its discrimination from thermal activation	Journal of Electronic Materials Vol. 49, 1550-1555, 2020	有	2019年12 月
64	O. Elleuch, L. Wang, K.-H. Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Double acceptor in p-type GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Journal of Crystal Growth Vol. 432, 45, 2015	有	2015年9 月
65	O. Elleuch, L. Wang,	豊田工大	N-H related defect playing the role of	Journal of Crystal Growth	有	2017年6 月

	K.-H. Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi		acceptor in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Vol. 468, 581- 584, 2017		
66	H. Valencia, Y. Kangawa, and K. Kakimoto	九州大学	Ab initio study of GaAs(100) surface stability over As ₂ , H ₂ and N ₂ as a model for vapor-phase epitaxy of GaAs _{1-x} N _x	Journal of Crystal Growth Vol. 432, 6, 2015	有	2015年9 月
67	A. Kusaba, Y. Kangawa, Y. Honda, H. Amano, and K. Kakimoto	九州大学	Theoretical approach to surface reconstruction of InN(0001) during raised- pressure metalorganic vapor-phase epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 05FM01, 2016	有	2016年2 月
68	Y. Yokoyama, A. Fukuyama, T. Haraguchi, T. Yamauchi, T. Ikari, and H. Suzuki	宮崎大学	Control of hydrogen and carbon impurity inclusion during the growth of GaAsN thin film by atomic layer epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 55, 01AC06, 2015	有	2015年12 月
69	T. Nakamura, K. Matsuochi, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Effect of Built-in Electric Field on Miniband Structure and Carrier Nonradiative Recombination in InGaAs/GaAsP Superlattice Investigated Using Photoreflectance and Photoluminescence Spectroscopy	Energy Procedia Vol. 102, 121- 125, 2016	有	2016年12 月
70	A. Fukuyama, K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Suzuki, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Investigation of miniband formation and optical properties of strain- balanced InGaAs/GaAsP superlattice structure embedded in p-i-n GaAs solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 08MC07, 2017	有	2017年7 月
71	T. Nakamura, A. Fukuyama, M. Sugiyama, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Effect of strain relaxation layer insertion on carrier recombination and escaping processes in superlattice solar cell structures using photoluminescence spectroscopy	Journal of Physics D: Applied Physics Vol. 52, 045104, 2018	有	2018年11 月
72	T. Nakamura, A. Fukuyama, M. Sugiyama, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Effects of barrier thickness on carrier non- radiative relaxation process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cells by piezoelectric photothermal and surface photovoltage	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, 112001, 2019	有	2019年10 月

			spectroscopies			
73	小森和弘、 菅谷武芳、天野建、 五島敬史郎	産業技術総合 研究所、 愛知工業大学	Nanophotonic devices based on semiconductor quantum nanostructures	IEICE Transactions on Electronics Vol. E99C, 346- 357, 2016	有	2016年3 月
74	太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合 研究所	Type-II InP quantum dots in wide-bandgap InGaP host for intermediate- band solar cells	Applied Physics Letters Vol. 108, 153901, (2016)	有	2016年4 月
75	相原健人、 太野垣健、 長門優喜、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	InGaP-based InP quantum dot solar cells with extended optical absorption range	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 56, 04CS06, (2017)	有	2017年3 月
76	相原健人、 太野垣健、 長門優喜、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	Investigation of the open-circuit voltage in wide-bandgap InGaP-host InP quantum dot intermediate-band solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 04FS04 (2018).	有	2018年2 月
77	相原健人、 太野垣健、 長門優喜、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	Designs and characterization of InGaP-based InP quantum dot solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RF04, 2018	有	2018年7 月
78	H. Kum, Y. Dai, K Aihara, M. A. Slocum, K. Tayagaki, A. Fedorenko, S. J. Polly, Z. Bittner, T. Sugaya, and S. M. Hubbard	Rochester Institute of Technology、 産業技術総合 研究所	Two-step photon absorption in InP/InGaP quantum dot solar cells	Applied Physics Letters Vol. 113, 043902, 2018	有	2018年7 月
79	相原健人、 太野垣健、中元嵩、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	Effects of front InGaP layer thickness on solar cell characteristics in InP/InGaP quantum dot solar cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, SBBF09, 2019	有	2019年3 月
80	K. Sameshima, T. Sano, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Self-Formation of Ultrahigh-Density (10^{12} cm^{-2}) InAs Quantum Dots on InAsSb/GaAs(001) and Their Photoluminescence Properties	Applied Physics Express Vol. 9, 075501, 2016	有	2016年6 月
81	T. Sogabe, Q. Shen, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Recent Progress on Quantum Dot Solar Cells: a review	Journal of Photonics for Energy Vol. 6, 040901, 2016	有	2016年10 月
82	S. Oikawa, A. Makaino, T. Sogabe, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Growth process and Photoluminescence Properties of In Plane Ultrahigh-Density InAs Quantum Dots on InAsSb/GaAs(001)	Physica Status Solidi B Vol. 255, 1700307, 2017	有	2017年12 月
83	N. Kakuda and	電気通信大学	Coarsening Process of	Japanese	有	2018年3

	K. Yamaguchi		High-Density InAs Quantum Dots on Sb-Irradiated GaAs	Journal of Applied Physics Vol. 57, 045601, 2018		月
84	A. Makaino, K. Sakamoto, T. Sogabe, S. Kobayashi, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Self-Formation of InAs Quantum Dots on SiO _x /Semiconductor Substrates by Molecular Beam Deposition	Applied Physics Express Vol. 11, 085501, 2018	有	2018年7月
85	R. Sugiyama, S. Tatsugi, T. Sogabe, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Optical Transition and Carrier Relaxation in a Type-II InAs/GaAsSb Quantum Dot Layers	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, 0120040, 2018	有	2018年11月
86	A. Makaino, Y. Tanaka, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Molecular Beam Deposition of High-Density InAs Quantum Dots on SiO _x Films	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, SDDF07, 2019	有	2019年5月
87	R. Suzuki, K. Terada, K. Sakamoto, T. Sogabe, and K. Yamaguchi	電気通信大学	Low Sunlight Concentration Properties of InAs Ultrahigh-Density Quantum-Dot Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 58, 071004, 2019	有	2019年6月
88	T. Kaizu, T. Matsumura, and T. Kita	神戸大学	Broadband Control of Emission Wavelength of InAs/GaAs Quantum Dots by GaAs Capping Temperature	Journal of Applied Physics Vol. 118, 154301, 2015.	有	2015年10月
89	Y. Harada, N. Kasamatsu, D. Watanabe, and T. Kita	神戸大学	Nanosecond-Scale Hot-Carrier Cooling Dynamics in One-Dimensional Quantum Dot Superlattices	Physical Review B Vol. 93, 115303, 2016	有	2016年3月
90	S. Asahi, H. Teranishi, N. Kasamatsu, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Saturable Two-Step Photocurrent Generation in Intermediate-Band Solar Cells Including InAs Quantum Dots Embedded in Al _{0.3} Ga _{0.7} As/GaAs Quantum Wells	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 6, 465-472, 2016	有	2016年3月
91	Y. Ogawa, Y. Harada, T. Baba, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Effects of Rapid Thermal Annealing on Two-Dimensional Delocalized Electronic States of the Epitaxial N δ-Doped Layer in GaAs	Applied Physics Letters Vol. 108, 111905, 2016	有	2016年3月
92	T. Kaizu, K. Taguchi, and T. Kita	神戸大学	Emission-Wavelength Tuning of InAs Quantum Dots Grown on Nitrogen-δ-Doped GaAs(001)	Journal of Applied Physics Vol. 119, 194306, 2016	有	2016年5月
93	加田智之, 朝日重雄, 原田幸弘, 喜多隆	神戸大学	量子ドット超格子太陽電池における2段階光励起電流生成ダイナミクスの電界依存特性	日本材料学会誌「材料」Vol. 65, No. 9, 647~651, 2016	有	2016年9月
94	M. Suwa, T. Adachi, T. Kaizu,	神戸大学	Polarization Characteristics of Electroluminescence and	Journal of Applied Physics Vol. 120,	有	2016年10月

	Y. Harada, and T. Kita		Net Modal Gain in Highly Stacked InAs/GaAs Quantum-Dot Laser Devices	134313, 2016		
95	T. Tanibuchi, T. Kada, S. Asahi, D. Watanabe, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Photocarrier Transport Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells Using Time-of-Flight Spectroscopy	Physical Review B Vol. 94, 195313, 2016	有	2016年11月
96	朝日重雄、喜多隆	神戸大学	半導体材料・デバイスの最新の進展「太陽電池の変換効率限界を引き上げる半導体材料設計」	材料 別冊 Vol. 66, No. 3, 244-249, 2017	有	2017年3月
97	S. Asahi, H. Teranishi, K. Kusaki, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	Nature Communications Vol. 8, 14962, 2017	有	2017年4月
98	S. Watanabe, S. Asahi, T. Kada, K. Hirao, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photocurrent Generation Enhanced by Miniband Formation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Intermediate-Band Solar Cells	Applied Physics Letters Vol. 110, 193104, 2017. APL Editor's Picks	有	2017年5月
99	T. Kada, S. Asahi, T. Kaizu, Y. Harada, R. Tamaki, Y. Okada, and T. Kita	神戸大学	Efficient two-step photocarrier generation in bias-controlled InAs/GaAs quantum dot superlattice intermediate-band solar cells	Scientific Reports Vol. 7, 5865, 2017	有	2017年7月
100	K. Hirao, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photocurrent Generation Enhanced by the Fundamental-State Miniband Formation in Intermediate-Band Solar Cells Using a Highly Homogeneous InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice	Applied Physics Express Vol. 11, 012301, 2017	有	2017年11月
101	S. Asahi, K. Kusaki, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Increasing Conversion Efficiency of Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell with a Voltage Booster Hetero-Interface	Scientific Reports Vol. 8, 872, 2018	有	2018年1月
102	喜多隆	神戸大学	高変換効率太陽光発電の研究開発～50%を超える変換効率実現に向けた取り組み	電気評論 6月号, 13-17, 2018	有	2018年6月
103	D. Watanabe, N. Iwata, S. Asahi, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Generation in a Solar Cell Containing InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattices as a Light Absorber	Applied Physics Express Vol. 11, 082303, 2018	有	2018年7月
104	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Reply to: Thermal Artefacts in Two-Photon Solar Cell Experiments	Nature Communications Vol. 10, 956, 2019	有	2019年2月

105	S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Adiabatic Two-Step Photoexcitation Effects in Intermediate-Band Solar Cells with Quantum Dot-in-Well Structure	Scientific Reports Vol. 9, 7859, 2019	有	2019年5月
106	Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Generation and Extraction in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	Semiconductor Science and Technology Vol. 34, 094003, 2019	有	2019年9月
107	Y. Harada, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Bound-to-Continuum Intraband Transition Properties in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	Applied Physics Express Vol. 12, 125008, 2019	有	2019年12月
108	河野司、 久志本真希、 永松謙太郎、 新田修吾、 本田善央、天野浩	名古屋大学	-c 面 GaN 基板上的 GaN の MOVPE 成長における酸素低減の研究	IEICE technical report Vol. 117, 19-22, 2017	無	2017年11月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	岡田至崇	東京大学	光を活かす：LED と太陽電池（招待講演）	国際光年記念特別講演会	2015年6月
2	T. Hoshii, S. Naitoh, and Y. Okada	東京大学	Photo-assisted impedance spectroscopy for quantum dot solar cell	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
3	R. Tamaki, Y. Shoji, Y. Okada, and K. Miyano	東京大学	Bandgap engineering for efficient two-step photon absorption in InGaAs quantum dot solar cells	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
4	K. Yoshida, Y. Okada, and N. Sano	東京大学	Effects of sequential tunneling between intermediate states on performance of intermediate band solar cells	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
5	S. Naitoh, N. Miyashita, T. Hoshii, and Y. Okada	東京大学	Effect of infrared light concentration on Si-doped InAs quantum dot solar cell	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
6	H. Fujioka, K. Ueno, A. Kobayashi, and J. Ohta	東京大学	Low temperature epitaxial growth of group III nitrides by pulsed sputtering	Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices 2015, Kyoto	2015年7月
7	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) Design and growth of strain-balanced superlattice for efficiency enhancement of multi-junction solar cells	17th U.S. Biennial Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE-17), Montana, USA	2015年8月
8	S. Naitoh, N. Miyashita, K. Toprasertpong,	東京大学	Effect of Si Doping on Performance of Quantum Dot Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference	2015年9月

	R. Tamaki, T. Hoshii, M. Sugiyama, and Y. Okada			and Exhibition (EU-PVSEC), Hamburg, Germany	
9	P. Rale, B. Behaghel, A. Delamarre, N. Vandamme, D. Ory, S. Collin, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	IRDEP, CNRS、 東京大学	Quantitative Optical Spectroscopy of QDs Intermediate Band Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
10	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Evaluation of 1.0 eV GaInNAsSb Solar Cells for Multi-Junction Applications and Annealing Effects	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
11	A. Julian, Z. Jehl, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	IRDEP, CNRS、 東京大学	Modeling of Selective Energy Contacts for Hot Carrier Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
12	M. Sugiyama, H. Sugiyama, T. Katoh, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, D. Alonso-Álvarez, N. J. Ekins-Daukes, and Y. Nakano	東京大学、 Imperial Collage London	Quantum Wire-on-Well (Wow) Cell with Long Carrier Lifetime for Efficient Carrier Transport	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
13	A. Delamarre, J.-F. Guillemoles, Y. Wang, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 IRDEP CNRS	Influence of the Host pin Diode Material in Multi-Quantum Well Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
14	D. Yamashita, G. Kono, T. Hoshii, K. Watanabe, M. Sugiyama, T. Suga, Y. Okada, and Y. Nakano	東京大学	The Effect of Fast-Atom-Beam Ion Species in the Surface Activated Bonding Process for Multi-Junction Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
15	K. Yoshida	東京大学	(Invited) Quantum Dots & Photonics	18th International Workshop on Computational Electronics, West Lafayette, USA	2015年9月
16	T. Hoshii, S. Naitoh, and Y. Okada	東京大学	Photo-Assisted Impedance Spectroscopy for Quantum Dot Solar Cells	International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM	2015年9月

				2015), Sapporo	
17	N. Ahsan	東京大学	(Keynote) Emerging semiconductor materials and nanostructures for high efficiency intermediate band solar cells	3rd International Conference on Green Energy and Technology, Dhaka, Bangladesh	2015年9月
18	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) Embedded InGaAs lateral nanowires for high-efficiency solar cells	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
19	T. Sogabe, A. Ogura, Y. Okada, Q. Shen, Y. Kuga, T. Toyoda, S. Tomić, P. D. McNaughten, and P. O' Brien	東京大学、電気通信大学、マンチェスター大学	Experimental analysis of hot state multiple exciton generation in PbSe quantum dots and its transportation modelling	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
20	R. Tamaki, Y. Shoji, K. Miyano, and Y. Okada	東京大学	Effect of external biases on infrared photo-response in InAs/AlGaAs quantum dot solar cell	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
21	K. Yoshida, Y. Okada, and N. Sano	東京大学	Effect of Sequential Tunneling on Quantum-Dot Intermediate-band Solar Cells	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
22	C.-Y. Hung, T. Sogabe, R. Tamaki, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Light absorption via discrete states in GaAs solar cell embedded with Er complex	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9月
23	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowires-based solar cells with high efficiency in the near infrared region and long-	The International Conference on Fundamental Processes in Semiconductor Nanocrystals, Spain	2015年9月

			term stability		
24	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Photoelectrochemistry of Metal Nanoparticles	2015 年度光化学討論会	2015 年 9 月
25	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region and long-term stability	TOE0-9	2015 年 9 月
26	玉置亮、庄司靖、岡 田至崇	東京大学	赤外光電流スペクトル計測 による 2 段階光吸収の最適 化設計	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
27	庄司靖、吉田勝尚、 岡田至崇	東京大学	電界減衰型量子ドット太陽 電池のキャリア収集効率の 改善	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
28	吉田勝尚、 岡田 崇、佐野伸行	東京大学、筑 波大学	量子ドット中間バンド型太 陽電池における連続トンネ ルの影響	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
29	井上智之、 トープラサートポン カシディット、 アモリ デウラマレ ー、 渡辺健太郎、 ジャンフランソワ ギルモー、 杉山正和、中野義昭	東京大学、 IRDEP CNRS	EL スペクトルを用いた集光 条件下における開放電圧の 評価	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
30	王海濱、久保貴哉、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大学	近赤外高効率 PbS 量子ドッ ト/ZnO ナノワイヤ太陽電池 の光電変換特性に与える量 子ドット表面の影響	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
31	藤岡洋、上野耕平、 小林篤、太田実雄	東京大学	パルス励起堆積法による新 奇ヘテロエピ構造の創製 (招待講演)	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
32	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmon-induced charge separation at two- dimensional metal semishell arrays on SiO ₂ @TiO ₂ colloidal crystals.	第 5 回 CSJ 化学フェス タ 2015	2015 年 10 月
33	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmon-Induced Photoelectrochemistry	上海師範大学講演会	2015 年 10 月
34	Y. Okada	東京大学	Quantum Dot Growth Technology by MBE for Advanced Photovoltaics	University of Cambridge - The University of Tokyo Joint Workshop on Quantum Nanostructures, Cambridge, UK	2015 年 11 月
35	R. Tamaki	東京大学	Photocurrent Kinetics in Quantum Dot Superlattice	University of Cambridge - The University of Tokyo Joint Workshop on Quantum Nanostructures, Cambridge, UK	2015 年 11 月

36	T. Sogabe	東京大学	Fingerprint of Kondo Resonance in Co-TPP Molecule Coupled to CuN Atomic Layer: A Combined LT-STs and DFT-NEGF Study	University of Cambridge - The University of Tokyo Joint Workshop on Quantum Nanostructures, Cambridge, UK	2015年11月
37	Y. Okada	東京大学	(Invited) Challenges and Advances in Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	MRS Fall Meeting 2015, Boston, USA	2015年11月
38	庄司靖	東京大学	InAs 量子ドット中間バンド太陽電池における AlAsSb キャップ層の導入効果	第11回量子ナノ材料セミナー	2015年11月
39	A. Delamarre, L. Lombez, K. Watanabe, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles	東京大学, IRDEP CNRS	Spatial carrier collection efficiency imaging by luminescence	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015年11月
40	立間徹	東京大学	金属ナノ粒子の光機能 - 光電変換、プラズモンセンサ、機能性色材 - (招待講演)	日本電気計測器工業会 関西支部・戦略的基盤技術検討委員会	2015年11月
41	H. Fujioka	東京大学	Characteristics of nitride films and devices prepared on bulk GaN substrates by pulsed sputtering	9th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-IX)	2015年11月
42	H. Fujioka	東京大学	Preparation of III-Nitride Devices for Large Area Light Emitting Devices and Solar Cells	Collaborative Conference on Crystal Growth (EMN 3CG 2015)	2015年12月
43	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region and long-term stability	The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015), USA	2015年12月
44	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Applications of plasmon-induced charge separation	The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015), USA	2015年12月
45	T. Kubo, H. Wang, Y. Sanehira, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region. - Enhanced carrier transport distance in the PbS-QD/ZnO NW hybrid structure	MRS Fall meeting, Boston, USA	2015年12月
46	N. Ahsan	東京大学	(Invited) Characterization of	EMN meeting on Photovoltaics, Hong	2016年1月

			transition metal-doped chalcopyrite thin films for photovoltaic application	Kong	
47	立間徹	東京大学	ナノ粒子による光エネルギーの捕捉と光機能の発現 (招待講演)	近畿大学第6回エネルギーセミナー	2016年1月
48	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Design optimization for two-step photon absorption in quantum dots by infrared photocurrent spectroscopy	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016年2月
49	K. Toprasertpong, K. Watanabe, T. Kita, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effective drift mobility approximation in multiple quantum-well solar cells	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016年2月
50	T. Inoue, K. Toprasertpong, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Paire, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学, IRDEP CNRS	Quasi-Fermi level splitting evaluation based on electroluminescence analysis in multiple quantum-well solar cells for investigating cell performance under concentrated light	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016年2月
51	岡田至崇, 庄司靖, 玉置亮, 吉田勝尚, 曾我部東馬	東京大学	量子ドット中間バンド太陽電池の高効率化メカニズム (招待講演)	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
52	玉置亮, 庄司靖, 菅谷武芳, 岡田至崇	東京大学	フーリエ変換赤外光電流分光による量子ドット太陽電池における室温2段階光吸収の最適化設計 (招待講演)	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
53	庄司靖, 玉置亮, アーサン ナズムル, 岡田 至崇	東京大学	中間バンド型太陽電池に向けた InAs/InAlAsSb 量子構造の作製と評価	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
54	渡辺健太郎, 井上智之, トーブラサートポンカシディット, アモリデラマール, ソダーバンル ハッサネット, 杉山 正和, 中野 義昭	東京大学	太陽電池応用 InGaAs/GaAsP 多重量子井戸への緩和層導入効果	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
55	趙 博文, トーブラサートポンカシディット, ソダーバンル ハッサネット, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭	東京大学	低温での量子井戸および波状量子井戸太陽電池におけるキャリア回収効率の評価	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月
56	井上智之, トーブラサートポンカシディット,	東京大学, IRDEP CNRS	EL 測定を用いた GaAs 太陽電池の構造評価と効率向上	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月

	デュラマレー アモリ、 渡辺健太郎、 ギルモア ジャンフ ランソワ、 杉山正和、中野義昭				
57	山下大之、 渡辺太郎、 藤野真久、 星井拓也、 杉山正和、 岡田至崇、 須賀唯知、 中野義昭	東京大学	超高効率多接合太陽電池作 製に向けた表面活性化接合 界面の評価	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
58	トープラサートポン カシディット、 谷渕 泰三、 加田 智之、朝日 重 雄、渡辺 健太郎、 杉山 正和、喜多 隆、中野 義昭	東京大学、 神戸大学	量子井戸太陽電池における 電子と正孔の走行時間およ び実効移動度の評価	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
59	王海濱、久保貴哉、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO 太陽電 池の光電変換特性の温度依 存	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
60	王海濱、久保貴哉、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット太陽電池へ の ZnO ナノワイヤ導入によ るキャリア拡散距離の伸長 効果	日本化学会第 96 春季 年会	2016 年 3 月
61	立間徹	東京大学	プラズモン誘起電荷分離を 利用した金-銀合金ナノ粒子 の光誘起脱合金化	日本化学会第 96 春季 年会	2016 年 3 月
62	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmonic nanomaterials	PITTCON 2016	2016 年 3 月
63	T. Tatsuma	東京大学	Photoelectrochemistry of plasmonic two-dimensional halfshell arrays and their applications	電気化学会第 83 回大 会	2016 年 3 月
64	王海濱、久保貴哉、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大学	溶液プロセスで構築する量 子ドット太陽電池	第 7 回薄膜太陽電池セ ミナー	2016 年 3 月
65	A. Ogura, Y. Okada, and T. Sogabe	東京大学	Analysis of Multijunction Solar Cells Under High Concentrations	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic System, Freiburg, Germany	2016 年 4 月
66	庄司靖、岡田至崇	東京大学	電界減衰型近接積層 InGaAs/AlGaAs 量子ドット 太陽電池の作製評価	第 13 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016 年 5 月
67	玉置亮、庄司靖、 菅谷武芳、岡田至崇	東京大学、産 業技術総合研 究所	In(Ga)As 量子ドット太陽電 池の 2 段階光吸収特性にお ける普遍的線形関係	第 13 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016 年 5 月
68	N. Ahsan, N. Miyashita, K. M. Yu, W. Walukiewicz, and Y. Okada	東京大学、 Lawrence Berkley National Laboratory	Designing III-V dilute nitride alloys for IBSC application	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016 年 6 月

69	R. Tamaki, Y. Shoji, T. Sugaya, and Y. Okada	東京大学	Universal Linear Relationship on Two-Step Photon Absorption Processes in In(Ga)As Quantum Dot Solar Cells	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6 月
70	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Photocurrent Collection Mechanism and Role of Carrier Distribution in p-i-n Quantum Well Solar Cells	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6 月
71	D. Yamashita, K. Watanabe, M. Fujino, T. Hoshii, Y. Okada, Y. Nakano, T. Suga, and M. Sugiyama	東京大学	Admittance Spectroscopy Analysis on the Interfacial Defect Levels in the Surface-Activated Bonding of GaAs	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016年6 月
72	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Enhancement of carrier collection in GaInNAs:Sb solar cells	EMN Prague Meeting, Energy Materials Nanotechnology, Prague, Czech Republic	2016年6 月
73	Y. Okada	東京大学	(Invited) Current Trends in High-Efficiency III-V Nanostructured Solar Cells	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016年6 月
74	N. Miyashita, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Improvement of 1.0 eV GaInNAsSb solar cell performance upon annealing	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016年6 月
75	Y. Shoji, N. Ahsan, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	InAs/InAlAsSb quantum nanostructures grown on InP substrate for intermediate band solar cell application	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016年6 月
76	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) Strain-balanced superlattice for high- efficiency solar cells	International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC 2016), Graz, Austria	2016年6 月
77	Y. Okada	東京大学	Improvements in Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	19th International Conference of Superlattices, Nanostructures and Nanodevices, Hong Kong	2016年7 月
78	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Paire, L. Lombez, J.-F. Guillemoles,	東京大学, IRDEP CNRS	Electroluminescence-Based Quality Characterization of Quantum Wells for Solar Cell Applications	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE- 18), San Diego, USA	2016年7 月

	M. Sugiyama, and Y. Nakano				
79	H. Cho, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Stability and Controllability of InGaAs/GaAsP Wire-on-Well (WoW) Structure for Multi-Junction Solar Cells	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE- 18), San Diego, USA	2016年7 月
80	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学	InAs 量子ドット中間バンド 型太陽電池における2段階 光吸収の2次元光電流分光	第35回電子材料シン ポジウム	2016年7 月
81	Y. Okada	東京大学	High-Efficiency Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	5th International Conference & Exhibition on Clean Energy, Montreal, Canada	2016年8 月
82	M. Sugiyama, H. Cho, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, and Y. Nakano	東京大学	(Invited) InGaAs/GaAsP Quantum Wells and Wires for High-Efficiency Photovoltaic Applications	16th International Conference On Nanotechnology (IEEE Nano 2016), Sendai	2016年8 月
83	M. Sugiyama, T. K., H. Fujii, H. Cho, H. Sodabanlu, K. Watanabe, and Y. Nakano	東京大学	(Invited) Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy of InGaAs/GaAsP Quantum Wells and Wires for High- Efficiency Photovoltaic Applications	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya	2016年8 月
84	M. Sugiyama, D. Yamashita, K. Watanabe, M. Fujino, T. Suga, and Y. Nakano	東京大学	(Invited) Analysis of Defect Levels at GaAs/GaAs Surface- Activated Bonding Interface for Multi- Junction Solar Cells	PRiME 2016/230th ECS Meeting, Honolulu, USA	2016年9 月
85	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Morphology control of ZnO nanowires for colloidal quantum dot-based solar cells with enhanced efficiency in the near infrared region	E-MRS, Warsaw, Poland	2016年9 月
86	H. Wang, J. Nakazaki, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Solution processed solar cells based on PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire bulk heterojunctions	ICFPE 2016	2016年9 月
87	H. Wang, J. Nakazaki, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowire solar cells in the near-infrared region	10th Aseanian Conference on Nano- hybrid Solar Cells, Beijing, China	2016年9 月
88	H. Wang, J. Nakazaki, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowire solar cells in the near-infrared region	The 22th China-Japan Bilateral Symposium on Intelligent Electro photonic Materials and Molecular	2016年9 月

				Electronics (SIEMME' 22), Suzhou, China	
89	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Optical and Photoelectrochemical Properties of Plasmonic Nanomaterials	CEMS Topical Meeting 2016	2016年9月
90	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学	InAs/AlGaAs 量子ドット太陽電池における量子効率スペクトルマップ	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
91	吉田勝尚, 岡田至崇	東京大学	不純物バンドを利用した量子ドット中間バンド型太陽電池の提案とデバイスシミュレーションによる解析	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
92	トープラサートポソカシディット、井上智之、渡辺健太郎、喜多隆、杉山正和、中野義昭	東京大学、神戸大学	多重量子井戸太陽電池における実効移動度近似の妥当性検証	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
93	趙博文、齊藤昌太、トープラサートポソカシディット、田尻祐介、小川泰弘、ソダーバシル ハッサネット、渡辺健太郎、喜多隆、杉山正和、中野義昭	東京大学、神戸大学	InGaAs/GaAsP 波状量子井戸におけるキャリア寿命の評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
94	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	コロイド量子ドットのパシベーションと光電変換特性	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
95	上野耕平、荒川靖章、今別府秀行、太田実雄、藤岡洋	東京大学	PSD法によるGaNへのn型ドーピング技術の開発	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
96	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum-dot/ZnO nanowire heterojunction solar cells	2016年度光化学討論会	2016年9月
97	T. Tatsuma	東京大学	Photoelectrochemical and photovoltaic properties of plasmonic two-dimensional halfshell arrays	2016年度光化学討論会	2016年9月
98	Y. Okada	東京大学	(Invited) Progress of Quantum Dot Intermediate-Band Solar Cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
99	K. Yoshida	東京大学	Simulation Analysis of Impurity-Band assisted Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-	2016年10月

				26), Singapore	
100	Z. Jehl	東京大学	Selective contacts for Hot Carrier Solar Cells using asymmetric double resonant tunneling barriers	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
101	Y. Shoji	東京大学	Multi-stacked GaSb/GaAs type-II quantum nanostructure for application to intermediate band solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
102	A. Delamarre, P. Verdier, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, and J.-F. Guillemoles	東京大学, IRDEP CNRS	Optical mapping of the transport efficiency in multi-junction solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
103	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada, and Y. Nakano	東京大学	Design of free-barrier InGaAs/GaNAs multiple quantum well solar cells with 1.2 eV energy gap	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
104	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmon-induced charge separation: mechanisms and applications	PRiME2016, Honolulu, USA	2016年10月
105	藤岡洋	東京大学	(Invited) Basic characteristics of GaN prepared by pulsed sputtering deposition	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2016)	2016年10月
106	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Optical and photoelectrochemical applications of plasmonic nanomaterials	International Workshop on Novel Photo-Induced Phenomena and Applications, Tokyo	2016年11月
107	玉置亮	東京大学	InAs 量子ドット太陽電池における室温高効率2段階光吸収の実現に向けて	第12回量子ナノ材料セミナー	2016年11月
108	N. Ahsan, N. Miyashita, T. Hoshii, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学、東京工業大学、VIT University	(Invited) Multiband semiconductors for next generation PV applications	International Conference on Materials Processing and Applications (ICMPA2016), Vellore, India	2016年12月
109	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Improvement Of Dilute Nitride GaInNAsSb Thin Films And Photovoltaic Characteristics	International Conference on Materials Processing and Applications (ICMPA2016), Vellore, India	2016年12月
110	N. Ahsan, N. Miyashita, T. Hoshii, S. Kalainathan,	東京大学、東京工業大学、VIT	(Invited) Emerging semiconductors for highly efficient PV Applications	3rd International Conference on Mechanics and Mechatronics	2016年12月

	and Y. Okada	University		Research (ICMMR 2016), Uthangarai, India	
111	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Characterization Of Dilute Nitride Based Photovoltaics for Multi-junction Solar cell Applications	3rd International Conference on Mechanics and Mechatronics Research (ICMMR 2016), Uthangarai, India	2016年12月
112	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS colloidal quantum dot based solar cells with high external quantum efficiency in the near infrared region	MRS Fall Meeting 2016, Boston, USA	2016年12月
113	T. Kubo	東京大学	(Invited) Organic inorganic hybrid solar cells based on colloidal quantum dots towards high-efficiency near-infrared photovoltaics	ICNME2016, Kobe	2016年12月
114	T. Tatsuma	東京大学	Plasmon-induced photoelectron-chemical and photovoltaic properties of two-dimensional metal half shell array	9th Asian Photochemistry Conference 2016 (APC2016)	2016年12月
115	N. Ahsan, N. Miyashita, K. M. Yu, W. Walukiewicz, and Y. Okada	東京大学、香港市立大学、Lawrence Berkeley National Laboratory	Multiband modification of III-V dilute nitrides for IBSC application	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017年1月
116	Z. Jehl, D. Suchet, A. Julian, C. Bernard, N. Miyashita, F. Gibelli, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、CNRS, IRDEP	Modeling and characterization of double resonant tunneling diodes for application as energy selective contacts in hot carrier solar cells	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017年2月
117	A. Delamarre, J. Jia, P. Verdier, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, and J.-F. Guillemoles	東京大学, IRDEP CNRS	Characterisation of multi-junction solar cells by mapping of the carrier transport efficiency using luminescence emission	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017年2月
118	B. Galvani, F. Michelini, M. Bescond, M. Sugiyama, J.-F. Guillemoles, and N. Cavassilas	Aix Marseille University, 東京大学, IRDEP CNRS	Minibands modeling in strained balanced InGaAs/GaAs/GaAsP cells	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017年2月
119	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed hybrid solar cells using lead sulfide colloidal quantum	AP-HOPV 2017, Yokohama	2017年2月

			dots and zinc oxide nanowires		
120	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells in the near-infrared region and long-term stability	AP-HOPV 2017, Yokohama	2017年2月
121	S. Naito, R. Tamaki, N. Miyashita, K. Yoshida, and Y. Okada	東京大学	Two-step photon absorption in intermediate band solar cells controlled by the electron filling ratio of quantum dots	ISPlasma 2017, Aichi	2017年3月
122	N. Ahsan, N. Miyashita, K. M. Yu, W. Walukiewicz, and Y. Okada	東京大学、 香港市立大学、 Lawrence Berkeley National Laboratory	(Invited) III-V Dilute Nitrides for Intermediate Band Solar Cell	Global Photovoltaic Conference (GPVC) 2017, Gwangju, Korea	2017年3月
123	岡田至崇, 庄司靖, 吉田勝尚, 内藤駿弥, 玉置亮	東京大学	Recent Progress of Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells (招待講演)	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
124	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学	GaSb/GaAs 量子ナノ構造太陽電池における赤外量子効率スペクトル	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
125	庄司靖, 玉置亮, 岡田至崇	東京大学	GaSb/AlGaAs 中間バンド型太陽電池における量子ナノ構造形状の影響	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
126	何軼倫, 宮下直也, 岡田至崇	東京大学	原子状水素援用 MBE による Ga(In)NAs 薄膜の残留キャリアと水素照射効果	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
127	トープラサートポンカシディット、渡辺健太郎、中野義昭、杉山正和	東京大学	多重量子井戸太陽電池のキャリア回収モデル	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
128	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	近赤外吸収 AgBiS ₂ ナノ粒子/ZnO ナノワイヤ太陽電池の作製と光電変換特性	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
129	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO ナノワイヤ太陽電池の短波長赤外域での光電変換特性	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
130	T. Tatsuma	東京大学	Plasmonic Photovoltaic Cells Based on Two-Dimensional Metal Halfshell Arrays	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
131	上野耕平、荒川靖章、小林篤、太田実雄、藤岡洋	東京大学	PSD 法による高濃度高移動度 n 型 GaN の開発	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
132	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Quantum dot size dependent photovoltaic characteristics of PbS	日本化学会第97春季年会	2017年3月

			quantum dot / ZnO nanowire solar cells		
133	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Photocurrent Enhancement of Perovskite Solar Cells by a Plasmonic Waveguide Mode	電気化学会第84回大会	2017年3月
134	Y. Okada, Y. Shoji, and R. Tamaki	東京大学	(Invited) Challenges and Progress on the Development of Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	MRS Spring Meeting 2017, Phoenix, USA	2017年4月
135	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V nano-epitaxial MOVPE for high-efficiency and low-cost solar cells	MRS Spring meeting 2017, Phoenix, USA	2017年4月
136	Y. Shoji and Y. Okada	東京大学	Effect of thin InAlAs buffer layer on InAs/InGaAs quantum dots grown on InP (311)B substrate	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
137	N. Miyashita	東京大学	Effect of Hydrogen Annealing for Dilute Nitride GaInNAsSb Solar Cells	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
138	Y. Okada, Y. Shoji, C.-Y. Hung, D. J. Farrell, and T. Sogabe	東京大学	High Density Quantum Dot Solar Cells for Concentrating Photovoltaics (CPV)	17th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Milano, Italy	2017年5月
139	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmon-induced charge Separation and Electric Field Localization	231st ECS Meeting, New Orleans, USA	2017年5月
140	N. Ahsan, S. Kalainathan, N. Miyashita, T. Hoshii, and Y. Okada	東京大学、VIT University、東京工業大学	Multiband Formation in Cr doped CuGaS ₂ Thin Films Synthesized by Chemical Spray Pyrolysis	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
141	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Type-II Quantum Dots for Application to Photon Ratchet Intermediate Band Solar Cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
142	K. Toprasertpong, B. Kim, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Carrier Collection Model and Design Rule for Quantum Well Solar Cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
143	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V Compound Semiconductor Nano-Epitaxial Structures for High-Efficiency Photovoltaic and Solar-to-Chemical Energy Conversion	International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) 2017, Singapore	2017年6月

144	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Solution processed quantum dots-based solar cells operating in a wide range of the solar spectrum	International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) 2017, Singapore	2017年6月
145	T. Kubo	東京大学	(Invited) Solution-processed hybrid solar cells using colloidal quantum dot molecules	9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics, Kanazawa	2017年6月
146	S. Naito, K. Yoshida, R. Tamaki, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	High-Efficiency Quantum Dot Intermediate Band Solar Cell (IBSC): Effect of Carrier Occupancy Ratios in IB	International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment (SEEME), Newcastle upon Tyne, UK	2017年7月
147	R. Tamaki	東京大学	(Invited) Full spectrum quantum efficiency on III-V quantum dot solar cells	International Workshop on Advanced Smart Materials and Engineering for Nano-and Bio-Technologies, Kobe	2017年7月
148	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Near and Short-wavelength Infrared PbS Quantum Dot / ZnO Nanowire Solar Cells	10th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics	2017年7月
149	宮下直也, 何軼倫, 高本達也, 十楚博行, 安居院高明, 岡田至崇	東京大学、シヤープ	希釈窒化物サブセルを用いた格子整合4接合太陽電池の作製	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
150	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学	InAs 量子ドット太陽電池における FTIR 量子効率マッピングによる2段階光吸収電流の定量評価と高効率化設計	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
151	何軼倫, 宮下直也, 岡田至崇	東京大学	4接合太陽電池に向けた GaInNAs 薄膜中の残留キャリア制御	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
152	N. Ahsan	東京大学	(Invited) Characterization of Cr-doped CuGaS ₂ thin films for intermediate band solar cell application	International Symposium for Advanced Materials Research (ISAMR-2017), Sun Moon Lake, Taiwan	2017年8月
153	T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi,	東京大学、KISTEC	(Invited) Quantum dot-based solar cells with highly transparent conductive oxides for enhanced photocurrent in	15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017), Kyoto	2017年8月

	T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa		the short-wavelength infrared region		
154	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed solar cells based on PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire heterojunctions	15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017), Kyoto	2017年8 月
155	久保貴哉, 王海濱, 瀬川浩司	東京大学	量子ドットを用いた有機無 機ハイブリッド太陽電池と 様々な環境下での発電特性 (招待講演)	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
156	杉山正和	東京大学	超格子の結晶成長技術と太 陽電池応用 (招待講演)	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
157	吉田勝尚, 岡田至崇	東京大学	量子ドット中間バンド型太 陽電池における量子効率の 数値解析	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
158	庄司靖, 玉置亮, 岡田至崇	東京大学	GaSb 量子ナノ構造太陽電池 におけるキャリア抽出過程 の温度依存性	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
159	玉置亮, 庄司靖, 岡 田至崇	東京大学	GaSb/AlGaAs 量子ナノ構造 太陽電池における高効率2 段階光吸収	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
160	松岡絢香, 庄司靖, 玉置亮, 岡田至崇	東京大学	GaAs(311)B 基板上の InGaAs/AlGaAs 積層量子ド ット成長	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
161	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Okada, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Extended Carrier Lifetime in InGaAs/GaNAs Multiple Quantum Well Solar Cells with Free-barrier Conduction Band Structure	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
162	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effects of growth temperature on properties of MOVPE grown InP-based solar cells	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
163	トープラサートポン カシディット, デウラムレー アモ リ, 渡辺健太郎, 中野義昭, ジャンフランソワ ギルモー, 杉山 正和	東京大学, IRDEP CNRS	量子構造太陽電池における 光電的相反関係の拡張	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
164	王海濱, 中尾祥一郎, 久保貴哉, 斎藤英純, 馬飼野信一, 高木克彦, 長谷川哲也, 中崎城太郎, 瀬川浩司	東京大学、 KISTEC	高透過性透明導電膜を用い た量子ドット太陽電池の短 波長赤外域の光電変換特性	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017年9 月
165	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Solution- processed solar cells	2017 International Conference on Solid	2017年9 月

			with nanostructured hybrid materials	State Devices and Materials (SSDM2017), Sendai	
166	T. Tatsuma	東京大学	Synthesis and infrared application of plasmonic compound nanoparticles	2017年度光化学討論会	2017年9月
167	Y. Okada	東京大学	(Keynote) Quantum Dot Photovoltaics: Challenges Towards 50% Efficiency	2nd International Conference on Advances in Materials Science and Technology, Vellore Institute of Technology	2017年10月
168	N. Ahsan	東京大学	(Invited) Multiband characterization of CuGaS ₂ thin films for photovoltaic application	2nd International Conference on Advances in Materials Science and Technology, Vellore Institute of Technology	2017年10月
169	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Development of dilute nitrides and multijunction solar cells	2nd International Conference on Advances in Materials Science and Technology, Vellore Institute of Technology	2017年10月
170	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Colloidal quantum dot-based hybrid nanomaterials towards solution processed high efficiency solar cells	International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth (NENCS 2017), Tokyo	2017年10月
171	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Near and short-wavelength infrared PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cells	International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth (NENCS 2017), Tokyo	2017年10月
172	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Nanostructured plasmonic surfaces and applications	International Workshop on Advanced Nanoscience and Nanomaterials 2017, Shanghai, China	2017年10月
173	T. Tatsuma	東京大学	Photochemical reactions of plasmonic copper sulfide nanoparticles under near-infrared irradiation	International Workshop on Advanced Nanoscience and Nanomaterials 2017, Shanghai, China	2017年10月
174	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) InGaAs/GaAsP Quantum Well Superlattice for 1.15-eV Middle Cell in 4-Junction Solar Cell	2017 Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS 2017),	2017年11月

				Hawaii, USA	
175	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Efficient Two-Step Photon Absorption in Type-II GaSb Quantum Dot Solar Cells	OSA Light, Energy and the Environment Congress, Boulder, USA	2017年11月
176	A. Matsuoka, Y. Shoji, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	InGaAs/AlGaAs Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells Fabricated on GaAs (311)B Substrate	OSA Light, Energy and the Environment Congress, Boulder, USA	2017年11月
177	N. Miyashita, T. Agui, H. Juso, T. Takamoto, and Y. Okada	東京大学、 シヤープ	Characterization of Inverted Grown Lattice-Matching Multijunction Solar Cells with 1.0 eV Dilute Nitride Subcell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
178	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Full Spectrum Quantum Efficiency Mapping on Type-II Quantum Nanostructure Solar Cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
179	B. Behaghel, P. Rale, H.-L. Chen, L. Lombez, Y. Shoji, R. Tamaki, S. Collin, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP CNRS	In(Ga)As/Al _{0.2} GaAs Quantum Dot Intermediate-Band-Assisted Hot-Carrier Solar Cell with Fabry-Perot Cavity	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
180	Y. He, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Control of Background Carrier Concentration in H-MBE Grown GaInNAs Thin Films for 4-Junction Solar Cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
181	Y. Shoji, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	Proportion of Optical Transition on Carrier Extraction from GaSb Quantum Nanostructures	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
182	K. Yoshida and Y. Okada	東京大学	Drift-Diffusion Analysis on Quantum Efficiency of Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
183	M. Sugiyama, K. Watanabe, T. Usuki, and Y. Nakano	東京大学	Step-tunnel InGaAs/GaAsP quantum well superlattice for 1.15-eV middle cell in 4-junction solar cell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
184	K. Toprasertpong, K. Watanabe, A. Delamarre, Y. Nakano, J.-F. Guillemoles, and M. Sugiyama	東京大学、 IRDEP CNRS	Electroluminescence and reciprocity relation in multiple quantum well solar cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
185	Y. Okada	東京大学	(Invited) Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells: Steps towards High	Current trends in Optical and X-Ray metrologies of key	2017年11月

			Efficiency	enabling nanomaterials/devices for the Ubiquitous Society, renewable energy and health (OptoX NANO), Okayama	
186	Z. Jehl, A. Delamarre, D. Suchet, S. Almosny, N. Cavassilas, M. Giteau, M. Sugiyama, Y. Okada, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP CNRS	(Invited) Carrier extraction for solar cells beyond the Shockley Queisser limit	Current trends in Optical and X-Ray metrologies of key enabling nanomaterials/devices for the Ubiquitous Society, renewable energy and health (OptoX NANO), Okayama	2017年11月
187	Y. Shoji	東京大学	Growth and Characterization of GaSb Quantum Nanostructures by Solid-Source Molecular Beam Epitaxy	Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hawaii, USA	2017年11月
188	K. Yoshida	東京大学	Numerical Study of Quantum Efficiency of Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells under Infrared Light Illumination	Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (WINDS), Hawaii, USA	2017年11月
189	T. Tatsuma	東京大学	金属ナノ粒子とその光機能 (招待講演)	第29回油化学講演会	2017年11月
190	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed quantum dots-based solar cells operating in a wide range of the solar spectrum	MRS Fall Meeting 2017, Boston, USA	2017年12月
191	H. Wang, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Near and short-wave infrared PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells	Photocatalysis 2 & SIEMME' 23, Tokyo	2017年12月
192	久保貴哉, 王海濱, 瀬川浩司	東京大学	量子ドットで作る太陽電池 (招待講演)	有機材料フォーラム・ポリマー材料科学若手研究会合同セミナー	2017年12月
193	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Solution-processed colloidal-quantum-dot solar cells operating in the infrared region	Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics (AP-HOPV18), Kita-Kyushu	2018年1月
194	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficient infrared solution-processed PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cell	Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics (AP-HOPV18), Kita-Kyushu	2018年1月
195	R. Tamaki, Y. Shoji, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、 IRDEP CNRS	Quantitative analysis of InAs quantum dot solar cells by photoluminescence spectroscopy	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月

196	A. Delamarre, D. Suchet, N. Cavassilas, Y. Okada, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IRDEP CNRS	Non-ideal nanostructured intermediate band solar cells with an electronic ratchet	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月
197	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Okada, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Characterization of InGaAs/GaAsN multiple quantum well with flat conduction band for improving carrier transport in multijunction solar cell	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月
198	A. Delamarre, D. Suchet, M. Sugiyama, and N. Cavassilas	東京大学、 IRDEP CNRS	Quantum structure for a practical realization of ratchet band solar cells	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月
199	松林宏弥、 アーサン ナズムル、 金明玉、岡田至崇	東京大学	マグネトロンスパッタを用いた薄膜 CuGaS ₂ の作製	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
200	玉置亮、庄司靖、 Laurent Lombez、 Jean-François Guillemoles、 岡田至崇	東京大学、 IRDEP CNRS	絶対値発光分光による InAs 量子ドット太陽電池の動作解析	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
201	何軼倫、宮下直也、 岡田至崇	東京大学	希釈窒化物半導体 GaInNAsSb 中の深準位欠陥の解析と制御	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
202	王海濱、久保貴哉、 中崎 城太郎、 瀬川 浩司	東京大学	溶液プロセスを使った量子ドット太陽電池	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
203	立間徹	東京大学	正孔輸送層を用いた全固体 PICS 光電変換セルの開発	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
204	中村享平、小林篤、 上野耕平、藤岡洋	東京大学	YSZ 基板上 InGaN および InAlN 薄膜の成長と MISFET 応用	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018年3月
205	H. Wang	東京大学	(Invited) Solution processed Infrared PbS Colloidal Quantum Dot / ZnO Nanowire Solar Cells	日本化学会第 98 春季年会	2018年3月
206	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cells operating in a wide range of the solar spectrum	日本化学会第 98 春季年会	2018年3月
207	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Short-wave infrared PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowire solar cells	第五回新型太陽電池学術検討会, Beijing, China	2018年5月
208	Z. Jehl, D. Suchet, N. Miyashita, B. Behaghel, M. Giteau, A. Delamarre, B. M. F. Yu Jeco, J.-F. Guillemoles,	東京大学、 IPVF CNRS	Hot Carrier Extraction Using Energy Selective Contacts and Feedback on the Remaining Distribution	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月

	and Y. Okada				
209	N. Miyashita, Y. He, T. Agui, H. Juso, T. Takamoto, and Y. Okada	東京大学、シ ャープ	Inverted growth of lattice-matched multijunction solar cells with 1.0 eV GaInNAsSb subcell	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
210	Y. He, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Analysis And Control Of Deep-Level Defects In Dilute Nitride Semiconductor GaInNAsSb	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
211	T. Nakamura, L. Zhu, M. Yoshita, M. Imaizumi, H. Akiyama, and Y. Okada	東京大学、 JAXA	Quantitative loss analysis of voltage output characteristics on multi-junction solar cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
212	J. M. Amboy, B. M. F. Yu Jeco, H. Wang, T. Kubo, T. Kinoshita, Z. Jehl, Y. Shoji, N. Ahsan, H. Segawa, Y. Okada, and J. J. R. Balbin	東京大学、 Mapua University	Cesium lead halide perovskite quantum dot deposition on GaAs substrates by dip coating	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
213	M. Asami, K. Toprasertpong, K. Watanabe, Y. Nakano, Y. Okada, and M. Sugiyama	東京大学	Comparison of effective carrier mobility between wire on well and multiple quantum well by time of flight measurement	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
214	A. Delamarre, D. Suchet, N. Cavassilas, Z. Jehl, Y. Okada, M. Sugiyama, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IPVF CNRS	Resilient Intermediate Band Solar Cell using an electronic ratchet	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
215	K. Toprasertpong, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Analytic Approach for Global Structure Optimization of Multiple Quantum Well Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
216	H. Xu, A. Delamarre, J. Jia, B. M. F. Yu Jeco, K. Watanabe, Y. Okada, J.-F. Guillemoles, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 IPVF CNRS	Transport efficiency imaging in multi-junction solar cells by luminescence analysis	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
217	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama,	東京大学	Carrier Collection Improvement in InGaAs/GaAsN Multiple Quantum Well Solar Cell with Flat Conduction Band	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月

	Y. Okada, and Y. Nakano				
218	L. Zhu, Y. Hazama, C. Kim, M. Slocum, Z. Bittner, S. Hubbard, and H. Akiyama	Sun Yat-sen University、 東京大学、 Rochester Institute of Technology	Experimental analysis of open-circuit voltage drop in quantum-dot solar cells via absolute electroluminescence measurement	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
219	K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato	産業技術総合 研究所、東京 大学	A solar cell enabling heat recovery without fast carrier extraction	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
220	Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	東京大学	Contactless measurement of pico-to-nanosecond dynamics of photovoltage: its utility and constraint	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
221	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V Compound Semiconductor Nano- epitaxial Structures for high-efficiency Multi- junction Solar Cells	CIMTEC 2018, Perugia, Italy	2018年6 月
222	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed infrared PbS colloidal quantum dot / ZnO Nanowire solar cells	Grand Renewable Energy 2018, Yokohama	2018年6 月
223	T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学、 KISTEC	Colloidal quantum dot- based photovoltaics with highly transparent conductive oxides in the short-wave infrared region	10th Biannual Conference on Quantum dots, Toronto, Canada	2018年6 月
224	Y. Okada, A. Matsuoka, Y. Shoji, and R. Tamaki	東京大学	Control of Structural Ordering of InGaAs/AlGaAs Quantum Dots in MBE and Application to Intermediate Band Photovoltaics	The 4th edition of Nanotech France 2018 International Conference and Exhibition (Nanotech France 2018), Paris, France	2018年6 月
225	Y. Okada, Y. Shoji, R. Tamaki, and K. Yoshida	東京大学	Effect of Carrier Doping of InAs Quantum Dots on the Performance of QD Intermediate-Band Solar Cells	15th European Vacuum Conference (EVC-15), Geneva, Switzerland	2018年6 月
226	Y. Okada	東京大学	Quantum dot superlattice for application to high- efficiency photovoltaics	12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018), Nara	2018年7 月
227	宮下直也, 何軼倫, 安居院高明, 十楚博行,	東京大学、 シャープ	変換効率31%の逆積み GaInP/GaAs/GaInNAsSb 3接 合太陽電池	第15回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2018年7 月

	高本達也, 岡田至崇				
228	何軼倫, 宮下直也, 岡田 至崇	東京大学	4 接合太陽電池応用に向けた GaInNAsSb 1.0 eV セルの欠陥解析と特性改善	第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018 年 7 月
229	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) Infrared PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells	22nd international conference on photochemical conversion and storage of solar energy, Hefei, China	2018 年 7 月
230	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	Quantum dot / wide-bandgap semiconductor hetero-junction interfaces engineering for efficient infrared solar cells	4D Material, Yonezawa	2018 年 8 月
231	A. Takahashi, K. Takahira, T. Fukuda, H. Wang, T. Kubo, H. Segawa, and N. Kamata	東京大学	Enhanced power conversion efficiency of PbS QD/ZnO solar cells by thermal annealing	4D Material, Yonezawa	2018 年 8 月
232	A. Delamarre, Z. Jehl, Y. Okada, M. Sugiyama, D. Suchet, N. Cavassilas, and J.-F. Guillemoles	東京大学、 IPVF CNRS	(Plenary) Electronic Ratchets as Necessary Stepping Stones for New PV Concepts	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Brussels	2018 年 9 月
233	K. Toprasertpong, A. Delamarre, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Generalized Reciprocity Relation in p-i-n Junction Solar Cells	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Brussels	2018 年 9 月
234	宮下直也, 何軼倫, 岡田 至崇	東京大学	逆積み格子整合 3 接合太陽電池における GaInNAsSb ボトムセル厚の検討	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
235	玉置 亮, 庄司 靖, 岡田 至崇	東京大学、産 業技術総合研 究所	InAs 量子ドット太陽電池における赤外光照射下の発光スペクトル解析	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
236	松林宏弥、 アーサン ナズム ル、金明玉 シヴァベルマン カ ライナザン、 岡田至崇	東京大学、 VIT University	同時スパッタ法による薄膜 CuGaS ₂ の作製	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
237	M. Kim, N. Ahsan, Z. Jehl, H. Matsubayashi, K. Sivaperuman, and Y. Okada	東京大学、 VIT University	Dependence of Electrical Contact between CuGaS ₂ and Mo Thin Films on Sputtering Conditions	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
238	浅見 明太、 トープラサートポン カシディット、 渡辺健太郎、 中野義昭、 岡田至崇、杉山正和	東京大学	Wire on Well 構造におけるキャリア移動度の測定と解析	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月

239	X. Hao, A. Delamarre, B. M. F. Yu Jeco, K. Watanabe, Y. Okada, J.-F. Guillemoles, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 IPVF CNRS	Transport efficiency imaging in multi-junction solar cells by luminescence analysis	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
240	トープラサートポン カシディット, 中野義昭, 杉山正和	東京大学	実効移動度モデルを用いた 量子井戸太陽電池の設計	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
241	王海濱, 中尾祥一郎, 久保貴哉, 斎藤英純, 馬飼野信一, 高木克彦, 長谷川哲也, 中崎城太郎, 瀬川浩司	東京大学、 KISTEC	PbS 量子ドット太陽電池の 短波長赤外領域での光電変 換特性の高性能化	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
242	立間徹	東京大学	異方性プラズモニック粒子 を用いた PICS 固体光電変換 セルの開発	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018 年 9 月
243	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed infrared PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), Tokyo	2018 年 9 月
244	T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学、 KISTEC	PbS quantum dot solar cells giving high spectral sensitivity in the infrared region	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), Tokyo	2018 年 9 月
245	N. Ahsan and Y. Okada	東京大学	(Keynote) Emerging semiconductors for next generation solar cells	International Conference on Innovative and Emerging Technologies for Farming, Energy, Environment, Water (ITsFEW), Vellore, India	2018 年 10 月
246	N. Ahsan and Y. Okada	東京大学	(Invited) Emerging semiconductors-Highly Mismatched Alloys - for solar cells	International Workshop on Material Technology and Applications (IWMTA), Vellore, India	2018 年 10 月
247	岡田至崇	東京大学	化合物半導体量子ドットマ ルチバンド太陽電池 (招待 講演)	第 8 回 CSJ 化学フェス タ 2018	2018 年 10 月
248	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) A global network of hydrogen for	French-Japanese symposium on solar	2018 年 10 月

			disruptive installation of renewable energy	energy, Perpignan, France	
249	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	Highly infrared-transparent oxides and ZnO nanowires for PbS colloidal quantum dot-based solar cells	4th E-MRS & MRS-J Bilateral symposium, Crete, Greece	2018年10月
250	玉置亮, 庄司靖, Laurent Lombez, Jean-François Guillemoles, 岡田 至崇	東京大学、産業技術総合研究所、IPVF CNRS	InAs 量子ドット中間バンド型太陽電池における絶対値発光分光	第37回電子材料シンポジウム	2018年10月
251	N. Ahsan, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学、VIT University	(Invited) Multi-bandgap absorption in chalcopyrite CuGaS ₂ by transition metal doping	International Conference on Catalysis Science, Engineering, and Technology, Plasma Science and Technology, Stockholm, Sweden	2018年11月
252	H. Matsubayashi	東京大学	Characterization of Sputtered CuGaS ₂ Thin Films for Solar Cells	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV, Seoul, Korea	2018年11月
253	M. Kim	東京大学	Majority Carrier Transport between CuGaS ₂ and Mo Thin Films for Solar Cell Application	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV, Seoul, Korea	2018年11月
254	H. Wang, S. Nakao, T. Kubo, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa,	東京大学、KISTEC	High efficiency infrared PbS colloidal quantum dot solar cells with 50% EQE at 1.55 μ m	MRS Fall Meeting 2018, Boston, USA	2018年11月
255	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmonic nanomaterials: applications to photovoltaic, photocatalytic, and chiral materials and devices	The 8th International Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference, Pattaya, Thailand	2018年11月
256	N. Ahsan, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学	(Plenary) Next generation solar cell technology	9th annual symposium on Interdisciplinary science and technology for safety and quality of life, Tsukuba	2018年12月
257	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V semiconductor quantum well and wire structures for boosting the efficiency of solar cells	Asia-pacific Solar Research Conference, Sydney, Australia	2018年12月
258	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficient infrared PbS quantum dot solar cells toward the bottom subcell of tandem solar cells	IPEROP-19, Kyoto	2019年1月

259	H. -H. Huang, K. Toprasertpong, A. Delamarre, J. Z. Sun, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Effective mobility map for InGaP/InGaP multiple quantum-well-based solar cells	SPIE Photonics West 2019, San Francisco, USA	2019年2 月
260	Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	東京大学	Monitoring minority- carrier transport and recombination in photovoltaic devices in real time	SPIE Photonics West 2019, San Francisco, USA	2019年2 月
261	K. Kamide, T. Mochizuki, H. Akiyama, and H. Takato	産業技術総合 研究所、 東京大学	A concept of nonequilibrium solar cell - heat recovery solar cell	SPIE Photonics West 2019, San Francisco, USA	2019年2 月
262	樗木悠亮、 庄司靖、宮下直也、 何軼倫、岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所	高倍集光下における GaSb/GaAs 量子ナノ構造太 陽電池の特性	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
263	M. Kim, N. Ahsanm H. Matsubayashi, Z. Jehl, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学、 VIT University	Optical Properties of Cr doped CuGaS ₂ Thin Films	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
264	H. Huang, K. Toprasertpong, K. Watanabe, D. Amaury, and M. Sugiyama	東京大学	Carrier Transport Modeling in Multiple Quantum Well Based InGaP Solar Cells	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
265	渡辺健太郎、 福谷貴史、 ソダーバンル ハッ サネット、 中野義昭、杉山正和	東京大学	表面活性化接合による GaAs//InGaAs 2 接合太陽電 池の開発	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
266	久保貴哉、王海濱、 瀬川浩司	東京大学	コロイド量子ドットを用い た赤外光電変換と超高効率 太陽電池への可能性(招待講 演)	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
267	王海濱、 César Gagliardi、 久保貴哉、 岡田至崇、瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO ナノワ イヤ太陽電池のヘテロ接合 界面修飾による開放電圧の 向上	第66回応用物理学会 春季学術講演会	2019年3 月
268	H. Wang, S. Nakao, T. Kubo, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa,	東京大学、 KISTEC	Development of high efficiency infrared PbS QD/ZnO NW solar cells toward the bottom subcell of multi-junction solar cells	日本化学会第99春季 年会	2019年3 月
269	H. Wang, A. Higo, Y. Mita, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum dot / ZnO nanowires hybrid test structures for infrared photodetector	32nd IEEE International conference on Microelectronic Test structures, Fukuoka	2019年3 月
270	T. Kubo, H. Wang, S. Nakao, N. Miyashita,	東京大学	PbS QD/ZnO nanowire solar cells for series- connected triple-junction	MRS Spring Meeting 2019, Phoenix, USA	2019年4 月

	Y. Okada, T. Hasegawa, J. Nakazaki, and H. Segawa		solar cells with a power conversion efficiency of approximately 30%		
271	Y. Okada	東京大学	(Invited) Optimizing the structure of quantum dot intermediate-band solar cells	30th World Nano Conference (NANO30), Zurich, Switzerland	2019年5月
272	N. Miyashita, Y. He, N. Ahsan, and Y. Okada	東京大学	Effect of Annealing on The Bottom Cell in GaInP/GaAs/GaInNAsSb Triple Junction Solar Cells by MBE/MOCVD Hybrid Growth	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019年5月
273	Y. Oteki, Y. Shoji, N. Miyashita, Y. He, and Y. Okada	東京大学、 産業技術総合 研究所	GaSb/GaAs quantum nanostructures for intermediate band solar cell under high sunlight concentration	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019年5月
274	H.-H. Huang, K. Toprasertpong, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学	Numerical demonstration of trade-off between carrier confinement effect and carrier transport for multiple-quantum-well based high-efficiency InGaP solar cells	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019年5月
275	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	(Invited) High efficiency infrared PbS QD solar cells toward the bottom subcell of tandem solar cells	The 6th Conference on Science and Technology of Emerging Solar Energy Materials, Beijing, China	2019年5月
276	T. Harada, K. Takauchi, N. Miyashita, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Effect of strong sunlight illumination on Hall mobility in solar cell materials for concentrated multi-junction solar cells	The European Materials Research Society Spring Meeting 2019	2019年5月
277	T. Nakamura, R. Iwanaga, T. Aki, A. Watanabe, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Role of strain relaxation layer on carrier recombination and escaping lifetimes in superlattice solar cell structures	The European Materials Research Society Spring Meeting 2019	2019年5月
278	Y. Okada	東京大学	(Invited) Quantum Dot Photovoltaics: Challenges Towards 50% Efficiency	10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT2019), Marina Bay Sands, Singapore	2019年6月
279	Y. Okada, N. Miyashita, Y. Oteki, and Y. Shoji	東京大学、産 業技術総合研 究所	High-Efficiency InAs-InGaAs Quantum Dash Solar Cells Developed Through Current Constraint	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago,	2019年6月

			Engineering	USA	
280	T. Nakamura, M. Imaizumi, H. Akiyama, and Y. Okada	東京大学、 JAXA	Effect of SRH recombination rate coefficient on internal luminescence efficiency and conversion efficiency of space solar cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019年6月
281	L. Zhu, Y. Hazama, C. Kim, and H. Akiyama	東京大学	Quantum-Dot Intermediate-band Solar Cell used as Bottom Cell	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019年6月
282	Y. Hazama, Y. Ishida, L. Zhu, C. Kim, S. Shin, and H. Akiyama	東京大学	Femtosecond-laser photoemission spectroscopy for ultrafast photovoltage dynamics: limitations and possibilities	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019年6月
283	Y. Okada	東京大学	(Plenary) Quantum Dot Intermediate Band Photovoltaics: Steps Towards Higher Efficiency	6th International Conference on Nanotechnology, Nanomaterials & Thin Films for Energy Applications (NANOENERGY2019), Kuala Lumpur, Malaysia	2019年7月
284	N. Ahsan	東京大学	(Invited) Current issues in thin-film intermediate band solar cells	6th International Conference on Nanotechnology, Nanomaterials & Thin Films for Energy Applications (NANOENERGY2019), Kuala Lumpur, Malaysia	2019年7月
285	N. Miyashita	東京大学	(Invited) Study of GaInP/GaAs/GaInNAsSb triple junction solar cells: Effect of hydrogen incorporation to GaInNAsSb in MOCVD/MBE hybrid growth	Asia Pacific Society for Materials Research 2019 Annual Meeting (APSMR2019), Sapporo	2019年7月
286	Y. Oteki, Y. Shoji, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学、 産業技術総合 研究所	Effect of Ga deposition rate on GaAsSb/GaAs Quantum Dots formation	Asia Pacific Society for Materials Research 2019 Annual Meeting (APSMR2019), Sapporo	2019年7月
287	M. Giteau, K. Watanabe, N. Miyashita, H. Sodabanlu, S. Collin, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、 IPVF C2N CNRS	Maximizing the Electron Temperature in Hot-Carrier Solar Cells	21st International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 21), Nara	2019年7月
288	浅見明太, 渡辺健太郎,	東京大学	波状多重量子井戸構造を用いた多接合太陽電池の高効	第16回「次世代の太陽光発電システム」シ	2019年7月

	中野義昭, 岡田至崇, 杉山正和		率化	ンポジウム	
289	Y. Okada	東京大学	(Invited) Progress and Approaches to High-Efficiency Intermediate Band Photovoltaics	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
290	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Low Temperature Absolute Photoluminescence Spectroscopy on InAs Quantum Dot Solar Cells	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
291	N. Miyashita and Y. Okada	東京大学	Strain Compensated Dilute Nitride MQWs as New 1 eV Solar Cell Absorber	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
292	Y. Oteki, N. Miyashita, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学、 産業技術総合 研究所	Energy Levels of Type-II GaAsSb/GaAs Quantum Dots for Intermediate Band Solar Cell	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
293	M. Sugiyama	東京大学	(Keynote) Efficiency enhancement of semiconductor photovoltaic structures from power generation to solar-fuel production,	IUMRS-ICA, Perth	2019年9月
294	A. Delamarre, J.-F. Guillemoles, H. Sodabanlu, K. Watanabe, and M. Sugiyama	東京大学、 IPVF CNRS	MIS Structures for Solar Cells Perimeter Passivation	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Marseille, France	2019年9月
295	H. Xu, K. Watanabe, Y. Nakano, A. Delamarre, J.-F. Guillemoles, and M. Sugiyama	東京大学、 IPVF CNRS	Analysis of Spatial Inhomogeneity in Multi-Junction Solar Cells Using Transport Efficiency Mapping	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Marseille, France	2019年9月
296	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合	InAs 量子ドット太陽電池における擬フェルミレベル分	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月

		研究所	裂の集光特性		
297	金 明玉, アーサン ナズムル, イエル リー・カ オ・ザッカリー, デイルマライサミ ログ, シブアペルマン カ ライナザン, 岡田 至崇	東京大学、 VIT University、 IREC	CuGaS ₂ 薄膜太陽電池におけ るバッファ層の効果	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
298	浅見明太, 渡辺健太郎, 中野義昭, 岡田至崇, 杉山正和	東京大学	Ge ベース多接合太陽電池の 高効率化に向けた InGaAs/GaAs/GaAsP 波状量 子井戸構造の作製と評価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
299	樗木悠亮, 庄司靖, 宮下直也, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所	GaAsSb/GaAs 量子ドット形 成における成長速度の影響	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
300	福谷貴史, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハッ サネット, 中野義昭, 杉山正和	東京大学	表面活性化接合を用いた GaAs//InGaAs 2 接合型太陽 電池の開発	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
301	黄祥鴻, トープラサートポン カシディット, 渡辺健太郎, 杉山正和, 中野義昭	東京大学	量子井戸太陽電池における 変換効率制限要因の考察	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
302	王海濱, 久保貴哉, 瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO ヘテロ 接合太陽電池: 平坦型とナ ノワイヤ型の比較	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
303	N. Ahsan	東京大学	(Keynote) Prospects in thin-film intermediate band Solar Cells	Indian Summit 2019, Indianapolis, USA	2019 年 10 月
304	玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所	InAs 量子ドット太陽電池に おける絶対値発行分光に基 づく擬フェルミレベル分裂 の解析	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
305	浅見明太, 渡辺健太郎, 中野義昭, 岡田至崇, 杉山正和	東京大学	波状量子井戸と平坦超格子 における電流密度の比較	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
306	H. Wang, S. Nakao, T. Hasegawa, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Enhanced short-circuit current in PbS quantum dot solar cells with highly infrared transparent window layers	11th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOEO-11), Nara	2019 年 10 月
307	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Energetic hole ejection involved in plasmon-induced charge separation: local oxidation and an application to near IR	236th ECS Meeting (Atlanta, USA)	2019 年 10 月

			photovoltaics		
308	W. Yanwachirakul, T. Nakamura, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 JAXA	Effect of Number of Multiple Quantum Well to Radiative and Non- radiative Recombinations	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 29), Xi' an, China	2019年11 月
309	K. Watanabe, H. Xu, R. Yokota, H. Sodabanlu, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Absolute Electroluminescence Characterization for InGaAs PV Cell Lattice- Matched to InP Substrate	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 29), Xi' an, China	2019年11 月
310	T. Fukutani, K. Watanabe, H. Sodabanlu, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学	Development of GaAs//InGaAs 2-junction Solar Cell with Surface Activated Bonding	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 29), Xi' an, China	2019年11 月
311	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cells with high infrared spectral sensitivity	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 29), Xi' an, China	2019年11 月
312	T. Tatsuma	東京大学	(Invited) Plasmonic hole ejection and photovoltaic applications	International Workshop on Advanced Nanoscience and Nanomaterials 2019 (IWANN2019), Chonburi, Thailand	2019年11 月
313	H. Wang, T. Kubo, C. Gagliardi, Y. Okada, and H. Segawa	東京大学	Enhance open-circuit voltage of PbS quantum dot solar cells with organic surface passivated ZnO nanowires	MRM, Yokohama	2019年12 月
314	T. Kubo, H. Wang, N. Miyashita, Y. Okada, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed colloidal quantum dot- based infrared photovoltaics toward ultra-high efficiency	MRM, Yokohama	2019年12 月
315	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Enhance infrared photocurrent of PbS quantum dot solar cells toward the bottom subcell of multi-junction solar cells	Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20), Tsukuba	2020年1 月
316	R. Tamaki, Y. Shoji, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、 産業技術総合 研究所、 IPVF CNRS	(Invited) Quasi-Fermi level splitting in InAs quantum dot solar cells from photoluminescence measurements	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
317	M. Giteau, K. Watanabe, N. Miyashita, H. Sodabanlu, D. Suchet, S. Collin, J.-F. Guillemoles, and Y. Okada	東京大学、 IPVF C2N CNRS	Designing better absorbers for hot-carrier solar cells	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月

318	H. M. Esmailpour, M. Giteau, A. Delamarre, F. Gibelli, D. T. Nguyen, N. Cavassilas, Y. Okada, J.-F. Guillemoles, L. Lombez, and D. Suchet	IPVF C2N CNRS、 東京大学	Advanced analysis for hot-carriers photoluminescence spectrum	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
319	H. Xu, H. Sodabanlu, M. M. Wilkins, A. Delamarre, T. J. Wijaya, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama	東京大学、 University of Ottawa、 C2N CNRS	Analysis of perimeter recombination on multijunction solar cells using luminescence imaging	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
320	M. M. Wilkins, M. Asami, H.-H. Huang, K. Hinzer, and M. Sugiyama	University of Ottawa、 東京大学	p-i-p structure for time- of-flight measurements of effective carrier mobility in multi- quantum-well structures	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
321	H.-H. Huang, K. Toprasertpong, M. M. Wilkins, K. Hinzer, M. Sugiyama, and Y. Nakano	東京大学、 University of Ottawa	Trade-off study on the radiative efficiency and carrier transport of multiple-quantum-well solar cells	SPIE Photonics West 2020, San Francisco, United States	2020年2 月
322	玉置亮, 庄司靖, Jean-François Guillemoles, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所、 IPVF CNRS	InAs 量子ドット太陽電池に おける絶対値発光分光：電 圧バイアス依存性	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
323	樗木悠亮, 庄司靖, 宮下直也, 岡田至崇	東京大学、 産業技術総合 研究所	GaAs _x Sb _{1-x} /GaAs 量子ドット の組成制御によるキャリア の長寿命化	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
324	L. Thirumalaisamy, N. Ahsan, S. Kalainathan, S. Kunjithapatham, and Y. Okada	東京大学、 VIT University、 Madurai Kamaraj University	Effect of Sn doping in CuGaS ₂ thin films deposited by chemical spray pyrolysis	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
325	J. R. Qiu, N. Ahsan, L. Thirumalaisamy, V. Karthikeyan, M. Kim, S. Kalainathan, and Y. Okada	東京大学、 TUM、 VIT University	Study of Te Substituted CuGaS ₂ (CuGa(S, Te) ₂) Thin Films Deposited by Chemical Pyrolysis	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
326	M. Kim, N. Ahsan, N. Miura, Z. Jehl, and Y. Okada	東京大学、 IREC	Controlling Optical Properties of Sputtered CuGaS ₂ by Sulfurization	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
327	三浦七輝, 金明玉, アーサン ナズムル, 岡田至崇	東京大学	熱蒸着した n-ZnS 薄膜の物 性評価	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月
328	W. Yanwachirakul, T. Nakamura,	東京大学, JAXA	Effect of Compressive Strain in Multiple	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020年3 月

	M. Hino, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano, and M. Sugiyama		Quantum Well Solar Cell		
329	日野眞生, ヤンワチラーケン ワラーコン, 渡辺健太郎, 中野義昭, 杉山正和	東京大学	多重量子井戸を用いた GaAs 太陽電池における発光効率 の向上	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
330	浅見明太, 横田莉子, 渡辺健太郎, 中野義昭, 岡田至崇, 杉山正和	東京大学	波状超格子太陽電池におけ る発光特性と電流電圧特性 の関係	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
331	福谷貴史, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハッ サネット, 中野 義昭, 杉山 正和	東京大学	表面活性化接合を用いた InGaP/GaAs//InGaAsP 3 接 合型太陽電池の開発	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
332	高橋晃宏, 王海濱, 福田武司, 鎌田憲彦, 久保貴哉, 瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO 太陽電 池特性に対する量子ドット 層熱処理の影響	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
333	H. Wang, C. Gagliardi, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Enhancement of PbS quantum dot solar cell performance with surface passivated ZnO nanowires	日本化学会第 100 春年 会	2020 年 3 月
334	Y. Xiao, H. Wang, T. Kubo, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed AgBiS ₂ nanocrystal / ZnO nanowire heterojunction solar cells	日本化学会第 100 春年 会	2020 年 3 月
335	S. Yagi, Y. Sato, N. Ueyama, T. Suzuki, K. Osada, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学	(Invited) Optical and Structural Characterization of GaAs:N δ -Doped Superlattices Grown by Molecular Beam Epitaxy	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015 年 9 月
336	S. Mori, S. Yagi, M. Orihara, K. Takamiya, and H. Yaguchi	埼玉大学	Lateral alignment of InN nano-scale dots grown on 4H-SiC(0001) vicinal substrates	11th International Conference on Nitride Semiconductors	2015 年 9 月
337	T. Ikarashi, M. Orihara, S. Yagi, S. Kuboya, R. Katayama, and H. Yaguchi	埼玉大学	Epitaxial relationship of GaN grown on GaAs (110) by RF-molecular beam epitaxy	11th International Conference on Nitride Semiconductors	2015 年 9 月
338	吉川洋生, 八木修平, 矢口裕之	埼玉大学	第一原理計算による GaAs:N δ ドープ超格子における光 学遷移に関する研究	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月

339	宮崎貴史、 八木修平、 矢口裕之	埼玉大学	第一原理計算による InAsN 混晶の伝導帯の解析	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月
340	八木修平	埼玉大学	希釈窒化物混晶の結晶成長 制御とマルチバンド太陽電 池への応用	第 11 回量子ナノ材料 セミナー	2015 年 11 月
341	米倉成一、 高宮健吾、 八木修平、 上田修、矢口裕之	埼玉大学、 金沢工業大学	レーザー照射による GaInNAs 混晶半導体の発光 効率への影響	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016 年 9 月
342	T. Suzuki, S. Yagi, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	Effect of Carrier Blocking Layer on Carrier Collection in Intermediate-Band Solar Cells using GaAs:N δ - Doped Superlattice	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 26), Singapore	2016 年 10 月
343	八木修平	埼玉大学	窒素 δ ドーピングによる希 釈窒化物混晶の成長と評価	第 12 回量子ナノ材料 セミナー	2016 年 11 月
344	S. Yagi , Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	(Invited) Properties of Dilute Nitride Pseudo- Alloys Grown Using a Nitrogen Delta-Doping Technique	SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA	2017 年 1 月
345	梅田峻平、 八木修平、 宮下直也、 岡田至崇、矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	1 eV 帯 InGaAs:N δ ドー プ超格子の作製	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
346	加藤諒、八木修平、 岡田至崇、矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	n 型 GaAs:N δ ドープ超格子 の電気的特性評価	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
347	R. Kato, S. Yagi, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	Electrical Characterization of N- Type GaAs:N δ -Doped Superlattices	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017 年 5 月
348	宮島数喜、 八木修平、庄司靖、 岡田至崇、矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	希釈窒化物半導体中の窒素 原子配置によるバンドギャ ップへの影響	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
349	高橋渉、高宮健吾、 八木修平、伊藤隆、 秋山英文、矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	GaN 混晶のアップコンバー ジョン発光	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
350	S. Yagi, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	(Invited) Nanostructured Dilute Nitride Alloys for High-Efficiency Solar Cells	International Symposium on Novel Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth (NENCS 2017), Tokyo	2017 年 10 月
351	K. Miyajima, S. Yagi, Y. Shoji, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	Influence of Nitrogen Atomic Arrangement in GaAsN Alloys on Band Gap Energy	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27), Otsu	2017 年 11 月
352	H. Yoshikawa, S. Yagi, and H. Yaguchi	埼玉大学	First-Principles Study of Optical Transitions in Gallium Arsenide: Nitrogen Delta-Doped	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-	2017 年 11 月

			Superlattices	27), Otsu	
353	S. Umeda, S. Yagi, N. Miyashita, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学、 東京大学	Growth of InGaAs:N δ -Doped Superlattices for Multi-Junction Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
354	塚原悠太、 八木修平、矢口裕之	埼玉大学	第一原理計算による GaAsN 混晶中の N 原子配置のバンド構造への影響の検討	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9月
355	M. D. Haque, N. Kamata, A. Z. M. T. Islam, Md. Julkarnain, S. Yagi, H. Yaguchi, and Y. Okada	Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 埼玉大学、 University of Rajshahi、 東京大学	Optical Characterization of Nonradiative Centers in GaAs:N δ -Doped Superlattices by Using Below-Gap Excitation Light	International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2), Rajshahi	2019年6月
356	H. Yaguchi, W. Takahashi, K. Takamiya, S. Yagi, N. Kamata, Y. Hazama, and H. Akiyama	埼玉大学、 東京大学	Two-Wavelength Excited Photoluminescence Study of Upconversion Photoluminescence from GaPN alloys	13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS13), Bellevue	2019年7月
357	N. Kamata, K. Nagata, Md. D. Haque, Z. Honda, S. Yagi, H. Yaguchi, and Y. Okada	埼玉大学、 Hajee Mohammad Danesh Science and Technology University、 東京大学	Optical Detection of Nonradiative Recombination Levels via Intermediate Band in GaAs:N δ -Doped Superlattices	30th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS30)	2019年7月
358	S. Md. Amil, A. Shiroma, S. Yagi, K. Takamiya, and H. Yaguchi	埼玉大学	Photoluminescence Intensity Change of GaPN by Laser Irradiation	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
359	米野龍司、 宮下直也、 岡田至崇、 八木修平、 矢口裕之	埼玉大学、 東京大学	InGaAs:N δ ドープ超格子の電気特性評価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019年9月
360	永田航太、 鎌田憲彦、 八木修平、 矢口裕之	埼玉大学	窒素 δ -ドープ GaAs 超格子の二波長励起フォトルミネッセンス法によるキャリア再結合準位評価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019年9月
361	M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, and N. Kojima	豊田工大	(Invited) Recent Results for Concentrator Photovoltaics in Japan	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2015), Sapporo	2015年9月

				Convention Center, Japan	
362	O. Elleuch, L. Wang, H. Kowaki, K.-H. Lee, K. Ikeda, T. Aihara, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Study of the recombination center in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015年11月
363	K.-H. Lee, K. Ikeda, O. Elleuch, L. Wang, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Criteria of 1-eV InGaAsN Solar Cell for Achieving over 45% Multi-Junction Solar Cells	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015年11月
364	L. Wang, O. Elleuch, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	In-diffusion of Nitrogen in GaAsN films after the soft-annealing process	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016年5月
365	O. Elleuch, L. Wang, K.-H. Lee, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Acceptors related to N-H in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016年5月
366	O. Elleuch, L. Wang, K.-H. Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	N-H related defect playing the role of acceptor in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya	2016年8月
367	O. Elleuch, H. Kowaki, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Study of recombination center in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
368	R. Katayama, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	N incorporation at the surface step in CBE grown GaAsN film on GaAs(111) vicinal substrate	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016年10月
369	O. Elleuch, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Effect of Substrate Off-Angle on Defects in GaAsN Buffer Layer	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
370	O. Elleuch, Y.-C. Wang, K.-H. Lee, M. A. Bareque, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita, and	豊田工大	Defects in GaAsN Buffer Layer Grown by Chemical Beam Epitaxy	15th International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM2017), Kyoto	2017年8月

	M. Yamaguchi				
371	O. Elleuch, Y.-C. Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	豊田工大	Effect of (In)GaAsN buffer layer on dislocation density for lattice-mismatched hetero-epitaxial (In)GaAs film	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27), Otsu	2017年11 月
372	M. Yamaguchi, L. Zhu, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, K.-H. Lee, K. Araki, and N. Kojima	豊田工大	Analysis for Non- Radiative Recombination in Quantum Dot Solar Cells and Materials	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Brussels	2018年9 月
373	M. Yamaguchi, L. Zhu, K.-H. Lee, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, K. Araki, and N. Kojima	豊田工大	Analysis for Non- radiative Recombination in Quantum Dot Solar Cells and Materials	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018年11 月
374	M. Yamaguchi, K.-H. Lee, K. Araki, N. Kojima, and Y. Ohshita	豊田工大	Analysis for non- radiative recombination loss in InGaN and InGaAsN solar cells for multi- junction applications	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2018)	2018年11 月
375	A. Kusaba, Y. Kangawa, S. Krukowski, T. Kimura, T. Tanikawa, R. Katayama, T. Matsuoka, and K. Kakimoto	九州大学	Surface Energy and Facet Formation in InN films grown by Pressurized- Reactor MOVPE	第34回電子材料シン ポジウム	2015年7 月
376	寒川義裕	九州大学	窒化物半導体結晶成長用基 板表面の第一原理計算によ る考察（招待講演）	日本学術振興会「ワイ ドギャップ半導体光・ 電子デバイス第162委 員会」第94回研究会	2015年7 月
377	A. Kusaba, Y. Kangawa, S. Krukowski, and K. Kakimoto	九州大学	Relationship between stability of facet surfaces and incorporation of zinc- blende phase in InN during pressurized reactor MOVPE: A theoretical approach	5th European Conference on Crystal Growth (ECCG-5)	2015年9 月
378	寒川義裕、柿本浩一	九州大学	InN 加圧 MOVPE におけるフ ァセット面制御によるポリ タイプ制御（招待講演）	第45回結晶成長国内 会議	2015年10 月
379	A. Kusaba, Y. Kangawa, Y. Honda, H. Amano, K. Kakimoto	九州大学	Ab initio-based approach to surface reconstruction on InN(0001) during induced-pressure MOVPE	The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6)	2015年11 月
380	寒川義裕	九州大学	半導体材料の結晶成長～表 面反応に関して第一原理計 算と熱力学解析の視点から ～（招待講演）	第29期CMMフォーラ ム本例会	2016年1 月

381	H. Valencia, Y. Kangawa, K. Kakimoto	九州大学	MOCVD and CBE of GaAs _{1-x} N _x modeled by ab initio stabilities of (100) surfaces under As ₂ , H ₂ , and N ₂	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya	2016年8月
382	Y. Kangawa	九州大学	(Invited) First Principles Based Simulation for Compound Semiconductor Growth Processes	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016年9月
383	Y. Kangawa	九州大学	Ab Initio-Based Approach to Crystal Growth of Nitride Semiconductors: Contribution of Growth Orientation and Surface Reconstruction	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2016)	2016年10月
384	高本達也	シャープ	超高効率太陽電池の技術動向	第7回薄膜太陽電池セミナー	2016年3月
385	高本達也	シャープ	III-V化合物多接合型太陽電池におけるトンネル接合について	タンデム太陽電池研究会 第2回会合	2018年12月
386	Y. Yokoyama, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学	Control of thickness and residual impurity inclusion of GaAsN thin films grown by an atomic layer epitaxy	第34回電子材料シンポジウム	2015年7月
387	宇宿孝則、中村翼、 松落高輝、 倉留弘憲、 相原健人、 トープラサートポン カシディット、 藤井宏昌、 杉山正和、 福山敦彦、碓哲雄	宮崎大学、 東京大学	矩形および階段状超格子太陽電池におけるミニバンド形成の評価	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9月
388	横山祐貴、 前田幸治、鈴木秀俊、 碓哲雄、福山敦彦	宮崎大学	ALE法を用いたGaAsN薄膜成長におけるSiドーピングが電気的特性へ及ぼす影響	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9月
389	原田一徹、 鈴木秀俊、福山敦彦	宮崎大学	MBE法によるSi(111)基板上のGaAs成長と結晶性評価	第45回結晶成長国内 会議	2015年10月
390	村上匠、中村翼、 松落高輝、 杉山正和、 中野義昭、碓哲雄、 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	量子井戸型太陽電池における熱脱出および非発光再結合に必要な活性化エネルギーの積層数依存性	第7回半導体材料・デ バイスフォーラム	2015年11月
391	武田秀明、中村翼、 松落高輝、村上匠、 杉山正和、 中野義昭、碓哲雄、 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	レーザー変調反射分光法を用いた超格子太陽電池の内部電界がミニバンド幅に与える影響評価	第7回半導体材料・デ バイスフォーラム	2015年11月
392	T. Nakamura, K. Matsuoichi, T. Murakami, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama,	宮崎大学、 東京大学	Effect of internal electric field on the miniband formation of multi quantum well solar cell structures investigated by a	American Vacuum Society 62th Int. Symposium & Exhibition	2015年11月

	Y. Nakano, T. Ikari, and A. Fukuyama		photoreflectance and a photothermal spectroscopy		
393	堀切将, 横山裕貴, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 福山 敦彦	宮崎大学	GaAsN 薄膜の原子層エピタ キシー成長におけるドーパ ンド Si 供給順序が電気特 性に与える影響	2015 年度応用物理学会 九州支部講演会	2015 年 12 月
394	A. Fukuyama, T. Nakamura, T. Usuki, K. Matsuochi, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Carrier collection mechanism in the strain- balanced InGaAs/GaAsP super-lattice solar cells by investigating the temperature changes of the surface photovoltage photoluminescence and piezoelectric photothermal signals	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016 年 2 月
395	T. Usuki, K. Matsuochi, T. Nakamura, K. Toprasertpong, A. Fukuyama, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari	宮崎大学、 東京大学	Observation of mini-band formation in the ground and high-energy electronic states of super-lattice solar cells	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016 年 2 月
396	横山祐貴, 堀切将, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学	GaAsN 薄膜の ALE 法による Si 供給順序が Si 吸着サイ トに与える影響	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
397	武田秀明, 中村翼, 松落高輝, 碓哲雄, 福山敦彦, K. Toprasertpong, 杉山正和, 中野義昭	宮崎大学, 東京大学	フォトルミネッセンス法を 用いた超格子構造中のキャ リア輸送評価	第 13 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016 年 5 月
398	河野将大, 横山祐貴, 堀切将, 山内俊浩, 原口智宏, 碓哲雄, 福山敦彦、鈴木秀俊	宮崎大学	Ga 原料の違いが ALE 成長 GaAsN 薄膜の結晶性および 電気特性に与える影響	第 13 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016 年 5 月
399	T. Nakamura, K. Matsuochi, T. Murakami, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Effect of Built-in Electric Field on Miniband Structure and Carrier Nonradiative Recombination in InGaAs/GaAsP Superlattice Investigated by Using Photoreflectance and Photoluminescence Spectroscopies	European Materials Research Society Spring Meeting 2016	2016 年 5 月
400	Y. Yokoyama, M. Kawano, M. Horikiri, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学	Effects of Si gas flow sequence on electrical characteristics of GaAsN films grown by atomic layer epitaxy GaAsN	第 35 回電子材料シ ンポジウム	2016 年 7 月

401	T. Usuki, K. Matsuochi, T. Nakamura, K. Toprasertpong, T. Ikari, A. Fukuyama, M. Sugiyama, and Y. Nakano	宮崎大学, 東京大学	Observation of mini-band formation in the ground and high-energy electronic states of super-lattice solar cells	第 35 回電子材料シンポジウム	2016 年 7 月
402	Y. Yokoyama, H. Horikiri, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari and A. Fukuyama	宮崎大学	Effects of Si Gas Flow Sequence on Electrical Characteristics of GaAsN Films Grown by Atomic Layer Epitaxy	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya	2016 年 8 月
403	M. Horikiri, W. Ding, Y. Yokoyama, H. Suzuki, T. Ikari, Y. Ohshita, M. Yamaguchi, and A. Fukuyama	宮崎大学	The Influence of Substrate Orientation on Localized Nitrogen State in GaAsN films Grown on Vicinal GaAs (001) Substrates	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016 年 9 月
404	横山祐貴, 堀切将, 原口智宏, 山内俊浩, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学	ALE 成長 Si ドープ GaAsN 薄膜のアニール処理が比抵抗に与える影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016 年 9 月
405	Y. Wang, H. Suzuki, Y. Yokoyama, T. Ikari, A. Fukuyama, N. Kojima, Y. Ohshita, and M. Yamaguchi	宮崎大学, 豊田工業大学	Nucleation layer grown by atomic layer deposition for selective-area growth of GaAs on patterned Si substrate by using chemical beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016 年 10 月
406	K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Investigation of miniband formation and optical properties of strain-balanced InGaAs/GaAsP superlattice structure embedded in p-i-n GaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016 年 10 月
407	H. Suzuki, T. Sasaki, M. Takahashi, Y. Ohshita, N. Kojima, I. Kamiya, A. Fukuyama, T. Ikari, and M. Yamaguchi	宮崎大学, 豊田工業大学	In situ X-ray diffraction study of strain relaxation process of lattice-mismatched InGaAs grown on vicinal GaAs (001) substrates	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016 年 10 月
408	A. Fukuyama, K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda,	宮崎大学, 東京大学	Optical properties of miniband formed in the InGaAs/GaAsP quantum well solar cells by means of	IEEE Nanotechnology Materials and Device Conference	2016 年 10 月

	H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari		photoreflectance, photoluminescence, and photothermal spectroscopies		
409	中村翼, 松落高輝, 武田秀明, K. Toprasertpong, 杉山正和, 中野義昭, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	フラットバンド構造内に挿入された超格子におけるミニバンド形成過程とキャリア輸送評価	2016年度レーザー・量子エレクトロニクス研究会	2016年10月
410	魯家男, 武田秀明, 中村翼, 松落高輝, 鈴木秀俊, 碓哲雄, K. Toprasertpong, 杉山正和, 中野義昭, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	フォトルミネッセンス法を用いた超格子構造中のキャリア輸送評価	第8回半導体材料・デバイスフォーラム	2016年11月
411	碓哲雄, 福山敦彦, 中村翼, 杉山正和, 中野義昭	宮崎大学, 東京大学	光熱変換法によるInGaAs/GaAsP超格子に形成されるミニバンド端エネルギーの測定	第37回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム	2016年11月
412	T. Ikari, K. Matsuochi, T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Excitons in InGaAs/GaAsP multi quantum well and super lattice solar cell structures investigated by a photothermal spectroscopy	The European Materials Research Society Spring Meeting 2017	2017年5月
413	T. Nakamura, K. Matsuochi, H. Takeda, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Effect of barrier thickness on formation of miniband in InGaAs/GaAsP superlattice structure for solar cells application	The European Materials Research Society Spring Meeting 2017	2017年5月
414	高内健二郎, 立神秀弥, 松田真輝, 鈴木秀俊, 西岡賢祐, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	疑似太陽光照射による移動度のドーピング濃度依存性	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
415	魯家男, 武田秀明, 中村翼, 鈴木秀俊, 碓哲雄, トープラサートポン カシディット, 杉山正和, 中野義昭, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	歪緩和層を挿入した超格子太陽電池のキャリア輸送評価	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017年7月
416	中村翼, 武田秀明, 魯家男, 鈴木秀俊, トープラサートポン カシディット, 杉山正和, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	フォトルミネッセンス法による超格子太陽電池のキャリア輸送特性評価	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017年9月

417	H. Takeda, T. Nakamura, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Investigation of carrier transport mechanism in superlattice solar cells with strain relaxation layer	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
418	T. Nakamura, H. Takeda, J. Lu, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Investigation of Carrier Thermal Excitation Process in GaAs-Inserted InGaAs/GaAsP Superlattice Solar Cell	第36回電子材料シンポジウム	2017年11月
419	J. Lu, T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and A. Fukuyama	宮崎大学、東 京大学	Improvement of carrier thermal escape in GaAs interlayer inserted InGaAs/GaAsP superlattice solar cells	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017年11月
420	T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Demonstration of Carrier Tunneling Transport in Stark Ladder Formed in Superlattice Solar Cells	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017年11月
421	碓哲雄, 立神秀弥, 松田真輝, 高内健二郎, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	太陽電池における光照射下のキャリア移動度の変化	第7回次世代太陽電池用材料研究会	2017年11月
422	中村翼, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	超格子太陽電池におけるシュタルクラダー状態下でのキャリア輸送特性	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月
423	A. Fukuyama, S. Tategami, K. Takauchi, N. Matsuda, T. Nakamura, H. Suzuki, K. Nishioka, and T. Ikari	宮崎大学	Effect of Light Irradiation on Carrier Mobility of n- and p-type Si substrates for Solar Cell Application	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6月
424	高内健二郎, 松田真輝, 西岡賢祐, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	集光照射によるGaAsのHall移動度変化と太陽電池特性への影響	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月
425	魯家男, 中村翼, 鈴木秀俊, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学、 東京大学	歪緩和層を挿入した超格子太陽電池のキャリア輸送メカニズム	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月
426	T. Ikari, T. Nakamura, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学、 東京大学	Verification of Stark-ladder formation in InGaAs/GaAsP superlattice solar cell structures by a photo-reflectance	International Conference on the Physics of Semiconductors	2018年7月

427	T. Nakamura, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Role of GaAs interlayer between quantum well and barrier layers in carrier thermal escaping transport process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cells	International Conference on the Physics of Semiconductors	2018年7 月
428	金子翔一, 前田幸治, 碓哲雄, 福山敦彦, 鈴木秀俊	宮崎大学, 東京大学	Si(001)基板上 GaAs 薄膜の 結晶性に対するレーザーア ニールの影響	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
429	R. Iwanaga, T. Nakamura, J. Lu, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Temperature dependence of carrier relaxation process in InGaAs/GaAsP superlattice solar cell with GaAs interlayer	第37回電子材料シン ポジウム	2018年10 月
430	安藝翼, 魯家男, 中村翼, 岩永凌平, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	歪緩和層挿入による超格子 構造内のキャリア輸送特性 変化	第10回半導体材料・ デバイスフォーラム	2018年10 月
431	原田知季, 高内健二郎, 松田真輝, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学	ライフタイム測定による n および p-Si 基板内に形成さ れる光励起キャリア濃度差 に関する考察	第10回半導体材料・ デバイスフォーラム	2018年10 月
432	石脇祐誠, 高内健二郎, 松田真輝, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学	集光照射による Si 基板の Hall 移動度変化と太陽電池 特性への影響	第10回半導体材料・ デバイスフォーラム	2018年10 月
433	渡部愛理, 中村翼, 魯家男, 岩永凌平, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	超格子太陽電池内に形成さ れたシュタルクラダー状態 とキャリアトンネル過程と の関係	第10回半導体材料・ デバイスフォーラム	2018年10 月
434	福山敦彦, 高内健二郎, 西岡賢祐, 碓哲雄	宮崎大学	集光照射下の Si 基板におけ る光励起キャリア濃度の非 線形的な増加要因	第8回次世代太陽電池 用材料研究会	2018年11 月
435	高内健二郎, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学	光照射下の p-Si 基板におけ る光励起キャリア濃度の非 線形的な増加とキャリアラ イフタイムの関係	2018年度応用物理学会 九州支部学術講演会	2018年12 月
436	高内健二郎, 碓哲雄, 西岡賢祐, 福山敦彦	宮崎大学	集光照射下での Si 基板の Hall 移動度の温度依存性	第3回フロンティア太 陽電池セミナー	2018年12 月
437	原田知季, 高内健二郎, 宮下直也, 岡田至崇, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	光照射による n-と p-GaAs の移動度減少と太陽電池特 性への影響	第16回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2019年7 月
438	岩永凌平, 中村翼, 渡部愛理, 安藝翼, 杉山正和, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	P 組成変化超格子太陽電池 試料がキャリア輸送特性に 与える影響評価	第16回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2019年7 月
439	安藝翼, 中村翼, 岩永凌平, 渡部愛理, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	超格子構造中の歪緩和層が 与えるキャリア輸送メカニ ズムへの影響	第16回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2019年7 月
440	渡部愛理, 中村翼, 岩永凌平, 安藝翼,	宮崎大学, 東京大学	圧電素子光熱変換分光法に よる歪緩和層挿入超格子太	第16回「次世代の太 陽光発電システム」シ	2019年7 月

	杉山正和, 碓哲雄, 福山敦彦		陽電池のキャリア輸送特性 評価	ンポジウム	
441	渡部愛理, 中村翼, 岩永凌平, 杉山正和, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	歪緩和挿入による超格子太 陽電池のキャリア輸送特性 変化	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会	2019 年 9 月
442	R. Iwanaga, A. Watanabe, T. Nakamura, T. Ikari, M. Sugiyama, and A. Fukuyama	宮崎大学, 東京大学	Influence of barrier layer height on the carrier transport properties of InGaAs/GaAsP superlattice solar cells	第 38 回電子材料シン ポジウム	2019 年 10 月
443	渡部愛理, 中村翼, 岩永凌平, 杉山正和, 碓哲雄, 福山 敦彦	宮崎大学, 東京大学	Effect of Insertion of the Strain Relaxation Layer on the Carrier Transport Properties of InGaAs/GaAsP Superlattice Solar Cells Investigated by the Photo-Thermal Spectroscopy	第 40 回超音波エレクト ロニクス基礎と応 用に関するシンポジウ ム	2019 年 11 月
444	古川諒, 渡部愛理, 岩永凌平, 中村翼, 碓哲雄, 杉山正和, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	圧電素子光熱変換分光法に よる歪緩和層挿入超格子太 陽電池のキャリア輸送特性 評価	第 11 回半導体材料・ デバイスフォーラム	2019 年 12 月
445	阿部翼, 原田知季, 安藝翼, 碓哲雄, 福山敦彦	宮崎大学, 東京大学	集光照射による Si の移動度 の変化と太陽電池特性への 影響	第 11 回半導体材料・ デバイスフォーラム	2019 年 12 月
446	後藤和泰, 大島隆治, 坂田功, 松原浩司, 菅谷武芳, 近藤道雄	東京工業大 学、 産業技術総合 研究所	Studies on highly stacked Ge/Si quantum dot heterojunction solar cells grown with up to 100 stacked layers	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 25), Busan, Korea	2015 年 11 月
447	中村徹哉、今泉充、 佐藤真一郎、 菅谷武芳、望月透、 岡野好伸、大島武	JAXA、 量子科学技術 研究開発機 構、 産業技術総合 研究所、 東京都市大学	Measurement of Ion Beam Induced Current in Quantum Dot Solar Cells	The 11th Inter- national Workshop on Radiation Effects on Semi-conductor Devices for Space Applications	2015 年 11 月
448	太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合 研究所	(Invited) Carrier dynamics in type-II quantum dots for wide- bandgap intermediate-band solar ' cells	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, USA	2016 年 2 月
449	太野垣健、 長門優喜、 岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合 研究所、 東京都市大学	A Proposal for Wide- Bandgap Intermediate-Band Solar Cells Using Type-II InP/InGaP Quantum Dots	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Portland, USA	2016 年 6 月
450	菅谷武芳、太野垣健	産業技術総合 研究所	Growth of Type-II InP Quantum Dots in InGaP Matrix by Using Solid- Source Molecular Beam Epitaxy for Intermediate- Band Solar Cells	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016 年 6 月
451	後藤和泰、 大島隆治、	東京工業大 学、	Fabrication of strain- compensated	32nd European Photovoltaic Solar	2016 年 6 月

	太野垣健、菅谷武芳、松原浩司、近藤道雄	産業技術総合研究所	heterojunction Ge/Si _{1-x} C _x quantum dots solar cells	Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Munich	
452	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Demonstration of InP/InGaP quantum dot solar cells	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016年9月
453	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	InP/InGaP 量子ドット太陽電池の光学特性評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月
454	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	InP/InGaP 量子ドット太陽電池における開放電圧の温度依存性	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017年3月
455	佐藤真一郎、菅谷武芳、中村徹也、大島武	量子科学技術研究開発機構、産業技術総合研究所、JAXA	Defect Characterization of III-V Quantum Structure Solar Cells Using Photo-Induced Current Transient Spectroscopy	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017年6月
456	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Investigation of the open-circuit voltage in the wide-bandgap InGaP-based InP quantum dot solar cells	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), Sendai	2017年9月
457	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Device designs and characterization of InGaP-based InP Quantum dot solar cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
458	相原健人、太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究所	分子線エピタキシー法を用いた InGaP 中の InP 量子ドット薄膜の発光寿命の評価	第6回結晶工学未来塾	2017年11月
459	相原健人、太野垣健、中元嵩、牧田紀久夫、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	InP/InGaP 量子ドット太陽電池の集光特性評価	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月
460	相原健人、太野垣健、中元嵩、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Effects of front InGaP layer thickness in InP/InGaP quantum dot solar cells	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2018), Tokyo	2018年9月
461	山口浩一	電気通信大学	自己形成量子ドットの作製技術とデバイス応用（招待講演）	第49回基礎科学部会セミナー・低次元形態セラミックスの機能と構造制御、日本セラミックス協会	2015年7月
462	鮫島一樹、山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs 層上の面内超高密度 InAs 量子ドットの発光特性	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015年9月
463	秋元直己、山口浩一	電気通信大学	面内高密度 InAs/GaAsSb 量子ドット層における光励起キャリア効果	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015年9月
464	秋元直己、仁井皓大、南裕太、	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池の	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月

	遠藤航介, 山口浩一		熱処理効果		
465	南裕太, 秋元直己, 鮫島一樹, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層における熱処理効果	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
466	及川信吾, 鮫島一樹, 山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs(001) 上の InAs 成長における 3 次元核形成機構	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
467	山口浩一	電気通信大学	量子ドットのデバイス応用 (招待講演)	太陽光発電プロジェクト講演会「量子ナノ半導体のエネルギー変換デバイスへの応用について」	2016 年 3 月
468	T. Sogabe, Y. Okada, and K. Yamaguchi	電気通信大学、 東京大学	Investigation of Hot Carrier Transportation Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cell	High-efficiency materials for photovoltaics	2016 年 9 月
469	仁井皓大, 南裕太, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一, 岡田至崇	電気通信大学、 東京大学	InAs/GaAs 量子ドット太陽電池におけるホットキャリア輸送ダイナミクス	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016 年 9 月
470	及川信吾, 馬飼野彰宜, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs(001) 上への InAs 3 次元島成長とその発光特性	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016 年 9 月
471	山口浩一	電気通信大学	量子ドットデバイスと最先端太陽電池開発 (招待講演)	第 106 回研究開発セミナー	2016 年 10 月
472	杉山涼, 秋元直己, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	GaAsSb/GaAs(001) 上の InAs 量子ドットの発光特性	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
473	馬飼野彰宜, 及川信吾, 坂本克好, 山口浩一	電気通信大学	Sb 照射熱処理による InAs 量子ドット層の構造変化	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
474	寺田圭佑, 鈴木亮介, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池のドリフト・拡散モデルによる特性解析	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017 年 3 月
475	T. Sogabe, K. Nii, K. Sakamoto, K. Yamaguchi, and Y. Okada	電気通信大学、 東京大学	Hot Carrier Transportation Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cell	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA	2017 年 6 月
476	山口浩一	電気通信大学	量子現象利用デバイス技術動向 (依頼講演)	2017 年度 JEITA 先端電子材料・デバイス技術フォーラム	2017 年 7 月
477	山口浩一	電気通信大学	自己形成量子ドットの進展 (招待講演)	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
478	鈴木亮介, 杉山涼, 加藤智恵, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池における Urbach tail の影響	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
479	杉山涼, 立木象, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	GaAsSb/GaAs(001) 上の高密度 InAs 量子ドットの層の発光特性(2)	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月

480	山口浩一	電気通信大学	面内超高密度量子ドット層の太陽電池応用	第13回量子ナノ材料セミナー	2018年1月
481	杉山 涼, 立木 象, 山口浩一	電気通信大学	GaAsSb/GaAs (001)上の高密度 InAs 量子ドットの層の発光特性(3)	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月
482	ウイクラマナヤカ・ラシミ・プラビーン, 馬飼野彰宜, 坂本克好, 山口浩一	電気通信大学	分子線堆積法による SiO ₂ /半導体上への InAs 量子ドットの自己形成	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月
483	立木 象, 杉山 涼, 加藤智恵, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層の面内 PL マッピング測定評価	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018年3月
484	山口浩一	電気通信大学	量子ドットの基礎知識と結晶成長およびデバイス応用(依頼講演)	R&D 支援センター・セミナー	2018年8月
485	立木象, 杉山涼, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層の PL マッピング解析	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018年9月
486	鈴木亮介, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した量子ドット太陽電池の集光特性	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018年9月
487	杉山涼, 立木象, 山口浩一	電気通信大学	量子ドット太陽電池用 Type-II 型 InAs/GaAsSb 量子ドット層の発光特性	第79回応用物理学会秋季学術講演会	2018年9月
488	佐々木一夢, 馬飼野彰宜, 坂本克好, 山口浩一	電気通信大学	分子線堆積法による SiO _x 膜上への InAs 量子ドットの自己形成(3)	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019年3月
489	立木 象, 杉山 涼, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層の面内 PL マッピング解析(2)	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019年3月
490	池田侑矢, 山口浩一, 坂本克好, 小林哲	電気通信大学	イオンビーム堆積法による InP/ZnS CQD 薄膜作製とキャラクター化	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019年3月
491	戸川 匠, 鈴木亮介, 寺田圭佑, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した量子ドット太陽電池の集光特性(2)	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019年3月
492	立木 象, 杉山 涼, 山口浩一	電気通信大学	高密度 InAs 量子ドット層における欠陥起因の励起子発光マッピング	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019年9月
493	田中優太, 佐々木一夢, 山口浩一	電気通信大学	分子線堆積法によるガラス基板上への InAs 量子ドットの自己形成	第67回応用物理学会春季学術講演会	2020年3月
494	加藤彬紘, 立木象, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層における中間バンド形成	第67回応用物理学会春季学術講演会	2020年3月
495	T. Kada, T. Tanibuchi, S. Asahi, T. Kaizu, Y. Harada,	神戸大学、 東京大学	Two-Step Photocarrier Generation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Intermediate Band Solar Cell	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA	2015年6月

	T. Kita, R. Tamaki, Y. Okada, and K. Miyano				
496	Y. Ogawa, Y. Harada, T. Baba, and T. Kita	神戸大学	Annealing Effects on the Delocalized Electronic States of Epitaxial Two- Dimensional Nitrogen Atomic Sheet in GaAs	第 34 回電子材料シン ポジウム	2015 年 7 月
497	S. Asahi, H. Teranishi, N. Kasamatsu, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Excitation-Intensity Dependence of Two-Step Photoexcitation in InAs/GaAs/Al _{0.7} Ga _{0.3} As Intermediate-Band Solar Cells	第 34 回電子材料シン ポジウム	2015 年 7 月
498	T. Tanibuchi, T. Kada, N. Kasamatsu, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Carrier Time-of-Flight Spectroscopy with Infrared Assistance for Escaping Process in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells	第 34 回電子材料シン ポジウム	2015 年 7 月
499	D. Watanabe, N. Kasamatsu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Distribution in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices and Its Application to Solar Cells	第 34 回電子材料シン ポジウム	2015 年 7 月
500	小川泰弘、 原田幸弘、 海津利行、喜多隆	神戸大学	急速熱アニールによる GaAs 中のエピタキシャル窒素シ ートにおける 2 次元物性の 制御	日本材料学会 半導体 エレクトロニクス部門 委員会 2015 年度第 1 回研究会	2015 年 7 月
501	Y. Harada, Y. Ogawa, T. Baba, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Enhancement of Two Dimensionality in Epitaxial Nitrogen Atomic Sheet in GaAs by Rapid Thermal Annealing	21st International Conference on Electronic Properties of Two- Dimensional Systems/17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures	2015 年 7 月
502	T. Kaizu, T. Matsumura, and T. Kita	神戸大学	Broadband Control of Emission Wavelength of InAs/GaAs Quantum Dots by Growth Temperature GaAs Capping Layer	21st International Conference on Electronic Properties of Two- Dimensional Systems/17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures	2015 年 7 月
503	Y. Harada, T. Baba, Y. Ogawa, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Epitaxial Nitrogen Atomic Sheet in GaAs Grown by Nitrogen δ -Doping Technique	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor	2015 年 9 月

				Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	
504	T. Kita	神戸大学	Growth and Characterization of InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices for Photovoltaics	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2015), Hsinchu, Taiwan	2015年9 月
505	T. Kita	神戸大学	Carrier Dynamics in InAs /GaAs Quantum Dot Superlattices for Photovoltaics	High-efficiency materials for photovoltaics	2015年9 月
506	谷渕泰三、 加田智之、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格 子太陽電池における超高速 時間分解キャリア走行過程	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
507	海津利行、 田尻祐介、 喜多隆	神戸大学	GaAs キャップ層成長温度に よる InAs/GaAs 量子ドット のサイズ二項分布変化	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
508	朝日重雄、 寺西陽之、 谷渕泰三、 渡部大樹、 海津利行、喜多隆	神戸大学	Dot-in-well 中間バンド型 太陽電池のバイアス依存性	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
509	渡部大樹、 原田幸弘、 海津利行、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格 子を利用したホットキャリ ア型太陽電池	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
510	大橋知幸、 諏訪雅也、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ド ット半導体光アンプの光導 波モード解析	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
511	原田幸弘、 笠松直史、 渡部大樹、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格 子におけるホットキャリア 冷却過程	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015年9 月
512	O. Kojima, T. Taji, T. Kita, C. Y. Jin, J. Yuan, and R. Nozel	神戸大学	Decrease in Photoluminescence Decay Rate in InAs Quantum Dots Coupling with In Nanoparticles Due to Increase in Excitation Power	2nd International Conference on Enhanced Spectroscopies	2015年10 月
513	朝日重雄、 寺西陽之、 笠松直史、 加田智之、 海津利行、喜多隆	神戸大学	量子ドット中間バンド型太 陽電池におけるキャリアの 長寿命化と2段階光電流生 成の増強	第26回光物性研究会	2015年12 月
514	田尻祐介、 海津利行、喜多隆	神戸大学	長波長発光近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの偏 光フォトルミネッセンス特 性	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年3 月
515	小川泰弘、 原田幸弘、 海津利行、喜多隆	神戸大学	急速熱アニールした GaAs 中 のエピタキシャル窒素膜の 輻射再結合寿命	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年3 月

516	渡辺翔、朝日重雄、 加田智之、 海津利行、 原田幸弘、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子太陽電池におけるミニバンド形成が2段階光吸収に与える影響	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年3月
517	朝日重雄、 寺西陽之、渡辺翔、 渡部大樹、 海津利行、喜多隆	神戸大学	Dot-in-Well 中間バンド型太陽電池における中間順位内の長い電子寿命	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年3月
518	T. Kaizu, Y. Tajiri, and T. Kita	神戸大学	Polarized Photoluminescence Properties of Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Long-Wavelength Emission	17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Nara	2016年3月
519	S. Asahi, H. Teranishi, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extremely Long Carrier Lifetime Due to Electron-Hole Separation in Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Nara	2016年3月
520	Y. Tajiri, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	GaAs First-Spacer-Layer Thickness Dependence of Polarized Photoluminescence Properties of Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Long-Wavelength Emission	Compound Semiconductor Week 2016 (CSW), Toyama, Japan	2016年6月
521	S. Watanabe, S. Asahi, T. Kada, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Enhancement of Two-Step Photon Absorption Due to Miniband Formation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cell	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Munich	2016年6月
522	S. Asahi, H. Teranishi, S. Watanabe, T. Kada, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extended Electron Lifetime in Intermediate-Band Solar Cells Using Dot-in-Well Structure	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Munich	2016年6月
523	K. Hirao, S. Asahi, S. Watanabe, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Thermal Carrier-Escape Process from the Intermediate Band in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells	第35回電子材料シンポジウム	2016年7月
524	K. Toprasertpong, T. Inoue, K. Watanabe, T. Kita, M. Sugiyama, and Y. Nakano	神戸大学	Investigation of Buck-Like Carrier Transport and Effective Mobility in Multiple Quantum Well Solar Cells	第35回電子材料シンポジウム	2016年7月
525	Y. Harada, J. Yamada, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Polarization-Insensitive Intraband Transition in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices	UK Semiconductors 2016	2016年7月
526	R. Plantenga, V. Kortan, T. Kaizu,	アイントホー ヘン工科大学、	Spatial Electronic Structure of an Isovalent Nitrogen Center in GaAs	33rd International Conference on the Physics of	2016年7月

	Y. Harada, T. Kita, M. Flatte, and P. Koenraad	神戸大学		Semiconductors	
527	T. Kita	神戸大学	(Invited) Carrier Dynamics in InAs Quantum Dot Solar Cell for Photon Ratchet	High-efficiency materials for photovoltaics	2016年9月
528	T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Control In-Ga Intermixing in InAs Quantum Dot on Nitrogen δ -Doped GaAs	19th International Conference on Molecular-Beam Epitaxy	2016年9月
529	朝日重雄、 寺西陽之、 海津利行、喜多隆	神戸大学	ヘテロ界面を利用した光アップコンバージョン太陽電池の2段階光吸収による大幅な電流増加	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016年9月
530	海津利行、 田尻祐介、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの GaAs スペーサ層膜厚と成長温度による広帯域偏光特性制御	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016年9月
531	小川泰弘、 原田幸弘、 海津利行、喜多隆	神戸大学	Dot-in-Well 中間バンド型太陽電池における長い電子寿命の観測	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016年9月
532	平尾和輝、渡辺翔、 朝日重雄、 原田幸弘、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット中間バンド型太陽電池における電子の熱脱出過程の解明	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016年9月
533	喜多隆	神戸大学	量子ドット中間バンド型太陽電池のキャリアダイナミクス (招待講演)	2016年度太陽光発電プロジェクト講演会～量子ナノ半導体のエネルギー交換デバイスへの応用について～	2017年3月
534	海津利行、 田尻祐介、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの GaAs スペーサ層膜厚と成長温度による広帯域偏光特性制御 (2)	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017年3月
535	平尾和輝、 朝日重雄、 海津利行、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子中間バンド型太陽電池特性のミニバンド形成の効果	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017年3月
536	S. Asahi、 H. Teranishi、 T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extremely-Long Electron Lifetime in InAs/GaAs/ $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ Dot-in-Well Intermediate-Band Solar Cells	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017年3月
537	T. Kita	神戸大学	(Invited) Carrier Dynamics and Efficient Two-Step Photon Up-Conversion in Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	MRS Spring meeting 2017, Phoenix, USA	2017年4月
538	T. Kaizu, Y. Tajiri, and T. Kita	神戸大学	Broadband Control of Polarization Characteristics in Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017), Berlin, Germany	2017年5月
539	S. Asahi, K. Kusaki,	神戸大学	Increasing Current Generation by Photon Up-	44th IEEE Photovoltaic	2017年6月

	T. Kaizu, and T. Kita		Conversion in a Single-Junction Solar Cell with a Hetero-Interface	Specialists Conference, Washington DC, USA	
540	草木和輝、朝日重雄、海津利行、喜多隆	神戸大学	フォトンアップコンバージョン太陽電池の開発：構造の提案と原理検証	材料学会 2017 年度半導体エレクトロニクス部門委員会 第 1 回研究会	2017 年 7 月
541	平尾和輝、朝日重雄、海津敏行、原田幸弘、喜多隆	神戸大学	低温キャップ InAs/GaAs 量子ドット超格子中間バンド型太陽電池	材料学会 2017 年度半導体エレクトロニクス部門委員会 第 1 回研究会	2017 年 7 月
542	K. Kusaki, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Photon Up-Converted Photocurrent in a Single Junction Solar Cell with a Hetero-Interface	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017 年 9 月
543	K. Hirao, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extended Optical Response of Two-Step Photoexcitation in InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice Intermediate Band Solar Cells	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017 年 9 月
544	S. Asahi, K. Kusaki, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Increasing Photovoltage Boosted by Photon Up-Conversion in a Single-Junction Solar Cell with a Hetero-Interface	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam, Netherlands	2017 年 9 月
545	原田幸弘、山田淳也、渡部大樹、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子太陽電池におけるバンド内遷移の偏光特性	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
546	海津利行、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの成長温度による電子状態の変化	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
547	朝日重雄、草木和輝、原田幸弘、喜多隆	神戸大学	2 段階フォトンアップコンバージョン太陽電池のヘテロ界面における電圧ブースト効果	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
548	平尾和輝、朝日重雄、海津利行、原田幸弘、喜多隆	神戸大学	低温キャップ InAs/GaAs 量子ドット超格子中間バンド型太陽電池における熱脱出の抑制	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
549	草木和輝、朝日重雄、海津利行、玉置亮、岡田至崇、喜多隆	神戸大学、東京大学	フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるバンド内光学遷移特性	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月
550	T. Kita and S. Asahi	神戸大学	(Invited) Carrier Dynamics in Photon Up-Conversion Solar Cells	6th International Workshop Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures	2017 年 9 月
551	T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	One-Dimensional Miniband Formation in InAs/GaAs	International Symposium on Novel	2017 年 10 月

			Quantum Dot Superlattice	Energy Nanomaterials, Catalysts and Surfaces for Future Earth -Material Research, Characterization and Imaging by In situ/Operando XAFS and X-ray Techniques	
552	S. Asahi, H. Teranishi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photo-Excited Electrons with Extremely-Long Lifetime in Intermediate-Band Solar Cells Using Dot-in Well Structure	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
553	S. Asahi, K. Kusaki, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells Incorporating a Voltage Booster Hetero-Interface	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
554	K. Hirao, S. Asahi, T. Kaizu, Y. Harada, and T. Kita	神戸大学	Efficient Two-Step Photocurrent in Intermediate Band Solar Cells Using Highly Homogeneous InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
555	K. Kusaki, S. Asahi, T. Kaizu, R. Tamaki, Y. Okada, and T. Kita	神戸大学	Infrared Absorption Characteristics in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27), Otsu	2017年11月
556	S. Asahi, K. Nishimura, K. Kusaki, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Efficient Carrier Collection of Up-Converted Electrons in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	第36回電子材料シンポジウム	2017年11月
557	T. Kita, and S. Asahi	神戸大学	(Invited) Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	MTSA2017-OptoX Nano-TeraNano8	2017年11月
558	西村健汰、朝日重雄、海津利行、喜多隆	神戸大学	2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池のキャリア収集効率	材料学会第3回半導体エレクトロニクス部門委員会第2回研究会	2017年11月
559	岩田尚之、渡部大樹、朝日重雄、海津利行、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs量子ドット超格子を用いたホットキャリア型太陽電池の動作検証	材料学会第3回半導体エレクトロニクス部門委員会第2回研究会	2017年11月
560	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	(Invited) Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell: Propose and Demonstration	SPIE Photonics West 2018, San Francisco, USA	2018年2月
561	Y. Harada, J. Yamada, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Polarization Dependent Photocurrent in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics 2018 (ICNN11-2), Yokohama	2018年4月

562	T. Kaizu, K. Hirao, and T. Kita	神戸大学	One-Dimensional Electronic States in Closely Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Different Growth Temperatures	International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics 2018 (ICNN11-2), Yokohama	2018年4 月
563	S. Asahi, K. Nishimura, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Extraction Efficiency of Up-Converted Electrons in Two-Step Photon Up- Conversion Solar Cells	International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics 2018 (ICNN11-2), Yokohama	2018年4 月
564	松尾哲弘、 原田幸弘、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	入射光スペクトル形状を考 慮した2段階フォトンアッ プコンバージョン太陽電池 の理論変換効率	応用物理学会関西支部 2018年度第1回講演会	2018年5 月
565	T. Kaizu, T. Koike, and T. Kita	神戸大学	Multiple Stacking of Capping Temperature- Controlled InAs/GaAs Quantum Dots with AlGaAs Barrier Layers for Broadband Emission	Compound Semiconductor Week 2018, Cambridge, MA, USA	2018年5 月
566	S. Asahi, K. Nishimura, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Carrier Collection Efficiency of Intraband- Excited Carriers in Two- Step Photon Up-Conversion Solar Cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, USA	2018年6 月
567	Y. Harada, T. Wilson, N. P. Hylton, R. D. Richards, J. P. David, T. Kita, and N. J. Ekins-Daukes	神戸大学	Exciton Hopping Dynamics in GaAsBi	9th International Workshop on Bismuth- Containing Semiconductors, Kyoto	2018年7 月
568	Y. Harada, T. Matsuo, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Optimal Band Gap Energies for Two-Step Photon Up- Conversion Solar Cells with Partial Absorptivity	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU- PVSEC), Brussels	2018年9 月
569	原田幸弘、 松尾哲弘、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	2段階フォトンアップコン バージョン太陽電池におけ る理論変換効率の入射光ス ペクトル形状依存性	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
570	朝日重雄、喜多隆	神戸大学	フォトンアップコンバージ ョン太陽電池の照射強度変 化によるアップコンバージ ョンへの影響	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
571	岩田尚之、 渡部大樹、 原田幸弘、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格 子太陽電池におけるホット キャリア電流取り出し特性	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
572	海津利行、 上西奈緒人、 喜多隆	神戸大学	GaAs キャップ温度による窒 素ドーパ GaAs (001) 面上 InAs 量子ドットの発光波長 への影響	第79回応用物理学会 秋季学術講演会	2018年9 月
573	N. Uenishi, T. Kaizu, and	神戸大学	Effects of GaAs-Capping Temperature on The	20th International Conference on	2018年9 月

	T. Kita		Emission Wavelength of InAs Quantum Dots Grown on Nitrogen-Doped GaAs (001) Surfaces	Molecular Beam Epitaxy, China	
574	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Effect of Excitation Power Density on Photon Up-Conversion in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells	第 37 回電子材料シンポジウム	2018 年 10 月
575	K. Kusaki, T. Murata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Intraband Absorption Characteristics in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell	第 37 回電子材料シンポジウム	2018 年 10 月
576	K. Nishimura, S. Asahi, T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	Carrier-Collection Efficiency in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell	第 37 回電子材料シンポジウム	2018 年 10 月
577	絹川典志、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	ヘテロ界面を利用した 2 段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における輻射再結合過程	第 29 回光物性研究会	2018 年 12 月
578	絹川典志、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	フォトンアップコンバージョン太陽電池における輻射再結合と光電流の相反性	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
579	朝日重雄、柴村和樹、草木和輝、喜多隆	神戸大学	正孔のアップコンバージョンを利用したフォトンアップコンバージョン太陽電池の基礎検討	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
580	海津利行、喜多隆	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドット超格子の 1 次元電子状態の測定温度依存性	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
581	原田幸弘、岩田尚之、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子を用いたホットキャリア型太陽電池における開放電圧の向上	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
582	T. Kita	神戸大学	(Invited) Up-Conversion Dynamics in Nanostructure	Round-Table Workshop on Future Quantum Photovoltaics, University of Cambridge	2019 年 3 月
583	Y. Harada, N. Iwata, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Efficient Hot-Carrier Generation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices	Optics & Photonics International Congress 2019, Yokohama	2019 年 4 月
584	T. Kaizu, and T. Kita	神戸大学	One-Dimensional Electronic States in Highly-Stacked InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices	Compound Semiconductor Week 2019 (CSW2019), Nara	2019 年 5 月
585	Y. Harada, N. Iwata, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Extraction in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019 年 6 月
586	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Strong Voltage-Boost Effect in Two-Step	46th IEEE Photovoltaic	2019 年 6 月

			Photon-Up Conversion Solar Cells	Specialists Conference, Chicago, USA	
587	N. Kinugawa, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Reciprocal Relationship Between Photoluminescence and Photocurrent in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Chicago, USA	2019年6月
588	村田貴彦、朝日重雄、喜多隆	神戸大学	量子ドットを内包するヘテロ界面を利用した室温動作量子型赤外検出デバイスの開発	2019年度 第2回半導体エレクトロニクス部門委員会 第1回研究会	2019年7月
589	Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Extensively-Prolonged Electron Lifetime Within Room Temperature Upon InAs/GaAs Quantum Dot-in-Well Solar Cell	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
590	T. Murata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Infrared Photodetector Sensitized by QDs Inserted at the Hetero-Interface	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
591	Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Excitation Energy Dependence of Hot-Carrier Extraction Process in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
592	S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Effect of the accumulated Electron Density at the Hetero-Interface in Two-Step Photon-Up Conversion Solar Cells	7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2019), Kobe	2019年9月
593	原田幸弘、松井麻斗、喜多隆	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子におけるホットキャリア生成過程	第80回応用物理学会 秋季学術講演会	2019年9月
594	Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Extensively-Prolonged Electron Lifetime Within Room Temperature Upon InAs/GaAs Quantum Dot-in-Well Solar Cell	第80回応用物理学会 秋季学術講演会	2019年9月

595	Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Hot-Carrier Extraction from InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices Embedded in GaAs Solar Cells	第 38 回電子材料シンポジウム	2019 年 10 月
596	S. Asahi, N. Kinugawa, and T. Kita	神戸大学	Reciprocal Change in Photocurrent and Photoluminescence by Intraband transition in Two-Step Photon up-Conversion Solar Cells	第 38 回電子材料シンポジウム	2019 年 10 月
597	T. Murata, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Infrared Photodetector Sensitized by InAs Quantum Dots Embedded at a GaAs/Al _{0.3} Ga _{0.7} As Hetero-Interface	第 38 回電子材料シンポジウム	2019 年 10 月
598	T. Kita	神戸大学	Challenge to High Conversion Efficiency Solar Cell Utilizing Quantum Nanostructures	International Workshop on Frontier of Science and Technology for Solar Energy Conversion、Kobe University	2019 年 11 月
599	村田貴彦、 朝日重雄、 喜多隆	神戸大学	InAs 量子ドットを内包する Al _{0.3} Ga _{0.7} As/GaAs ヘテロ界面における強いバンド内遷移と赤外光検出特性	第 30 回光物性研究会	2019 年 12 月
600	絹川典志、 朝日重雄、 喜多隆	神戸大学	2 段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における光電流と輻射再結合電流の相反関係及びキャリア収集特性	第 30 回光物性研究会	2019 年 12 月
601	小島磨、喜多隆、 Richard Hogg	神戸大学	GaAs/AlAs 多重量子井戸における連続波励起子共鳴励起による変調効果	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
602	原田幸弘、 草木和輝、 朝日重雄、 喜多隆	神戸大学	2 段階フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるバンド内遷移特性	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
603	Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita	神戸大学	Voltage Backtracking Behavior in Intermediate-Band Solar Cell under Intensive Bi/Uni-Color Photoexcitation Examination	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
604	渡辺航平、 朝日重雄、喜多隆	神戸大学	変調ドーピングした二段階フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるアップコンバージョン電流増大	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020 年 3 月
605	久志本真希、 宇佐美茂佳、 出来真斗、 本田善央、天野浩	名古屋大学	異なる InGaN 膜厚の(1-101)GaN 基板上太陽電池の作製	第 9 回ナノ・エピタキシャル成長講演会	2017 年 7 月
606	篠田涼二、勝洋介、 小出典克、 岩谷素顕、 竹内哲也、上山智、 赤崎勇	名城大学	窒化物半導体材料のウエハ接合	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015 年 9 月

607	高西徹、大角純也、岩谷素顕、上山智、竹内哲也、赤崎勇	名城大学	半極性(10-11)面自立 GaN 基板上 GaInN の成長機構の解析	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月
608	T. Takanishi, K. Morita, M. Iwaya, S. Kamiyama, T. Takeuchi, and I. Akasaki	名城大学	Microstructure of semi-polar (10-11) plane GaInN thick film on freestanding (10-11) GaN substrate	ISPlasma 2016, Aichi	2016 年 3 月
609	鈴木健太、財部覚、高須賀大貴、小出典克、竹内哲也、岩谷素顕、上山智、赤崎勇	名城大学	GaNN トンネル接合と n 型 GaNSb による低温 p 側構造の作製	第 8 回 窒化物半導体 結晶成長講演会	2016 年 5 月
610	N. Muramatsu, T. Takanishi, S. Mitsufuji, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, and I. Akasaki	名城大学	Semipolar (10-1-1) GaInN/GaN p-i-n light emitting solar cells	12th International Conference on Nitride Semiconductors	2017 年 7 月
611	K. Takahashi, R. Shinoda, S. Mitsufuji, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, T. Hattori, I. Akasaki, and H. Amano	名城大学、名古屋大学	Fabrication of GaInN/GaInP/GaAs/Ge 4-junction solar cell using wafer bonding technology	12th International Conference on Nitride Semiconductors	2017 年 7 月
612	高橋一矢、篠田涼二、光藤駿、岩谷素顕、上山智、竹内哲也、服部友一、赤崎勇、天野浩	名城大学、名古屋大学	ウエハ接合技術を用いた GaInN/GaInP/GaAs/Ge 4 接合太陽電池の作製	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017 年 9 月

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学	県の税優遇 3 社第 1 号 (石川県との共同研究)	北國新聞	2015/11/25
2	東京大学	(科学の扉) 次世代太陽電池 発電量・コスト 巡り競争激化	朝日新聞	2016/5/15
3	東京大学	太陽電池ナノテクで進化 研究中の次世代型 「量子効果」で効率向上	読売新聞	2016/9/1
4	電気通信大学	Cover Page (Phys. Status Solidi B, (2017) pp. 1700307 1-5.)	Phys. Status Solidi B	2018/4
5	電気通信大学	次世代先端デバイス動向(4) 量子ドットデバイス	Yano E Plus	2019/8

【その他】

番号	年度	タイトル	受賞・展示	受賞・展示年月
1	2015	EMS 賞 (第 34 回電子材料シンポジウム)	東京大学; 玉置亮	2015/7/17
2	2015	PVJapan2015 出展 「低コスト高効率太陽電池	東京大学先端科学	2015/07/29~07/31

		開発からエネルギー・ソリューション研究まで」東京ビッグサイト	技術研究センター 岡田研究室	
3	2015	PVJapan2015 出展「次世代太陽電池の研究開発-有機系太陽電池の拓く未来の低炭素スタイル-」東京ビッグサイト	東京大学先端科学 技術研究センター 瀬川・久保研究室	2015/07/29~07/31
4	2015	Poster Prize of Italian Association of Crystallography (AIC), Fifth European Conference on Crystal Growth (ECCG5)	九州大学; A. Kusaba, Y. Kangawa, S. Krukowski, K. Kakimoto	2015/9/10
5	2015	第 39 回応用物理学会講演奨励賞	東京大学 ; 玉置亮, 庄司靖, 岡田至崇	2015/9/14
6	2015	優秀ポスター発表賞 (第 5 回 CSJ 化学フェスタ 2015)	東京大学 ; Ling Wu, Gyu Min Kim, Hiroyasu Nishi, and Tetsu Tatsuma	2015/10/15
7	2015	Young Scientist Award, The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6)	九州大学; A. Kusaba, Y. Kangawa, Y. Honda, H. Amano, K. Kakimoto	2015/11/12
8	2016	PVJapan2016 出展「超高効率かつ低コストを実現する次世代III-V族太陽電池」東京ビッグサイト	東京大学先端科学 技術研究センター 岡田研究室	2016/06/29~07/01
9	2016	Outstanding Contribution in Reviewing Journal of Crystal Growth, Elsevier	電気通信大学	2017/1
10	2016	Poster Prize; Asian Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics (AP-HOPV17)	東京大学 ; H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	2017/2/4
11	2017	PVJapan2017 出展「超高効率かつ低コストを実現する次世代III-V族太陽電池」パシフィコ横浜	東京大学先端科学 技術研究センター 岡田研究室	2017/07/05~07/07
12	2017	Young Researcher Paper Award; 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	東京大学 ; Ryo Tamaki	2017/11/17
13	2018	PVJapan2018 出展「超高効率かつ低コストを実現する次世代III-V族太陽電池」パシフィコ横浜	東京大学先端科学 技術研究センター 岡田研究室	2018/06/20~06/22
14	2018	Best Poster Award; 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	東京大学 ; Maxime Giteau, Stéphane Collin, Zacharie Jehl, Daniel Suchet, Jean-François Guillemoles, and Yoshitaka Okada	2018/7/13
15	2018	Student Award; 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	東京大学 ; K. Toprasertpong	2018/9/26

16	2019	Molecular Beam Epitaxy (Chapter 4, pp. 57-72), Wiley	電気通信大学	2019/2
17	2019	Best Poster Presentation Award (2nd prize); Asia Pacific Society for Materials Research 2019 Annual Meeting (APSMR2019)	東京大学 ; Yusuke Oteki, Yasushi Shoji, Naoya Miyashita, and Yoshitaka Okada	2019/7/29
18	2019	Energy Conversion Efficiency of Solar Cells	神戸大学	2019/8

「高性能・高信頼性太陽光発電の
発電コスト低減技術開発」

事業原簿
【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	--------------------------------------

(ハ) ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

【A 塗布法によるペロブスカイト太陽電池の開発】(パナソニック株式会社)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
塗布法によるペロブスカイト太陽電池の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・30cm 角サイズのモジュール効率20% ・モジュールで高温高湿試験、光照射試験の要求事項の達成 ・製膜速度 3m/分 ・モジュール製造コスト 15 円/W 達成の指針確立 	<ul style="list-style-type: none"> ・大面積均一インクジェット塗布を用いて 30cm 角サイズのモジュールで世界最高効率 17.93%達成(AIST 測定) ・太陽電池セルのペロブスカイト膜の組成制御と界面修飾で高温高湿試験、光照射安定化試験の品質規格の要求事項を達成 ・ペロブスカイト膜のインクジェット塗布速度 3m/分以上でモジュール作製し、上記モジュール効率達成 ・モジュール高効率化、プロセスタクトの短縮、設備コストの低減の可能性を確認し、15 円/W の指針を得た 	<ul style="list-style-type: none"> ○ △ ○ ○ 	<ul style="list-style-type: none"> モジュールでは未達 2022 年達成予定 電極等の材料コストの低減課題

* 1 達成度

◎ : 数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○ : 数値目標クリア、△ : 数値目標未達

【B 超軽量太陽電池モジュール技術の開発】(株式会社東芝)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
超軽量太陽電池用塗布印刷/モジュール化技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・30cm 角程度の超軽量モジュールで変換効率 15%、あるいは 15cm 角程度の超軽量モジュールで変換効率 17% の達成。 ・量産時に製造コスト 15 円/W を実現しうる要素技術を開発。 	<ul style="list-style-type: none"> ・PEN フィルム基板の 24cm×29cm サブモジュールで 14.1%まで向上した。 ・ガラス基板 27cm×29cm で、16.1%まで向上し、フィルムモジュールへ条件を適用中。 ・達成率は 88%である。 ・PEN フィルム上へ R2R 製造を行えば、15 円/W が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 	
超軽量太陽電池の耐久性向上技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・JIS 規格 C8938 準拠の耐熱試験、光照射試験において、変換効率 17% の 5cm 角程度の超 	<ul style="list-style-type: none"> ・Mix ペロブスカイトで光照射 500 時間に対し、400 時間まで相対効率低下 10%を確認。達成度は 96%。 ・Mix ペロブスカイトで耐熱試験 1000 時に対し、550 時間まで相対 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 	

	軽量モジュールで 相対低下率 10%以 下の達成。	効率低下 10%を確認。達成度は 92%。		
--	---------------------------------	--------------------------	--	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【C 低コスト R2R 太陽電池製造技術の開発】(積水化学株式会社)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
①超軽量太陽電池の耐久性の向上	JIS 規格 C8938 準拠の耐久性試験 5 項目について、変換効率 17%の 5cm 角程度の超軽量モジュールの相対低下率 10%以下を達成する。	3cm 角超軽量基板サブモジュールにて変換効率 13%を達成し、JIS 規格 C8381 準拠の耐久性試験 5 項目について相対低下率 10%以下を達成	△ (21年3月達成予定)	ミックスカチオン、ミックスアニオン導入により効率向上を目指す。
②R2R プロセス・材料技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・超軽量基板小面積セルで変換効率 18.8% (2mm 角) を達成する。 ・30cm 角程度の超軽量モジュールで 15%、あるいは 15cm 角程度の超軽量モジュールで 17%を達成する。 ・封止部材のコストを量産時 5 円/W 以下が達成可能な要素技術を構築する ・量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・超軽量基板小面積セルにて変換効率 18.8%達成 (受光 0.1cm²) ・オール R2R プロセスにて作成した 30cm 角超軽量モジュールにて変換効率 11.4%達成 ・量産時 5 円/W 以下が達成可能な内製バリアフィルムにて耐湿熱試験 (85°C85%) 1000h にて相対変換効率低下率 10%未満を達成 ・オール R2R プロセスによる製造プロセス可能性実証し、コスト 15 円/W を示唆 	○ △ (21年3月達成予定) ○ ○	<ul style="list-style-type: none"> ・金属箔基材から PET 基材へ切り替えることによる表面反射率低減。 ・プロセス条件の最適化により PET 基材の伸縮量低減し、加工精度を向上させる。

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【D 高性能・高信頼性確保製造技術の開発】（アイシン精機株式会社）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
①スプレー塗布工法による大面積モジュール製造技術の開発	モジュールサイズ300mm角で、小面積セルの80%以上の変換効率	<ul style="list-style-type: none"> ・スプレー塗布工法の最適化により、従来の高効率セルプロセス（貧溶媒置換）を排除した、大面積均一塗布成膜技術を実現。 ・小面積セルにおける変換効率18%の構成において、100mm角で17.04%、240mm角で16.12%の変換効率を有するモジュールを実現。 （小面積セルの90～95%の変換効率） ・小面積セルにおける変換効率16.22%の構成において、300mm角で14.14%の変換効率を有するモジュールを実現。 （小面積セルの88%の変換効率） 	○	
②塗布型カーボン電極適用による貴金属（Au等）蒸着膜の削減	カーボン電極を用いた小面積セルの変換効率が貴金属電極セルと同等の性能（1pt以内）	<ul style="list-style-type: none"> ・カーボン系塗布材料組成と工法を改良し、金と同等の太陽電池特性が得られる材料と条件を見出した。 ・金電極で変換効率16.51%の構成において、カーボン電極で16.22%（0.3pt）。 ・水系塗料組成適用による環境負荷低減と低コスト化を両立。 	○	
③低コスト・ホール輸送材料の開発	従来材（Spiro-OMeTAD）に迫る変換効率を示す低コスト・ホール輸送材料を提案	<ul style="list-style-type: none"> ・ドーパントレスで高い性能を示す低コスト・フタロシアニン系材料を用いたセルで変換効率16.5%。 ・更なる高性能化を狙い新規合成した有機系材料を用いたセルで変換効率18.2%。（従来材の変換効率は18.7%） 	○	
④電池長寿命化に向けた検討	1sun、1000時間・光照射後の性能維持率が90%以上	<ul style="list-style-type: none"> ・光照射400時間後の性能維持率77% ・ホール輸送層添加成分（Li）のペロブスカイト層内への拡散と混合ハロゲンペロブスカイトの微量成分（Br）の拡散をSIMS分析により明らかにし 	△	発電コスト7円/kWhの算定根拠となる寿命20年以上の確保には、更

		た。		なる耐久性の改善が必要
--	--	----	--	-------------

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【E 高性能材料合成技術の開発】（富士フイルム株式会社）（2017年度で終了）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
正孔輸送材料合成技術開発	HOMO レベル-5.3eV以下で Spiro-MeOTAD 以上の電流値または Spiro-MeOTAD に対し同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ 及び耐湿性を可能とする正孔輸送材料設計を抽出する。	・耐湿性低下の原因となるドーパントを必要としない正孔輸送材料骨格を見出し、新規正孔輸送材料を用いたセルで Spiro-MeOTAD を用いたセルと同等以上の変換効率に到達した。	△	
ペロブスカイト材料技術開発	長波長端 750nm 以上且つ、 $CH_3NH_3PbI_3$ 同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ と耐湿性を可能とするペロブスカイト材料設計を抽出する。	・吸収長波長端 750nm 以上を満たしつつ、変換効率の低下なくペロブスカイト膜の耐湿性が向上するペロブスカイト表面処理技術を見出した。	○	
	セル効率 20%以上	・新規材料を用いて最大変換効率 14.6%に到達。 (同条件における Spiro-MeOTAD (ドーパント有り) の変換効率 14.2%)	△	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【F 基盤材料技術と性能評価技術の開発】（早稲田大学）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
モジュール用ホール輸送材料 (HTM) コスト低減	安価な材料から工程最適化、HTM 材料コスト 100 円/m ²	低コストかつ長寿命 HTM で、材料コスト 80 円/m ² (層厚み 50nm)。酸化剤ドーパントフリーで目標値得る HTM 組成の確立。	○	

製造工程簡易化によるコスト低減	製造工程を簡易化、150 円/m ²	一段塗布用インキと簡便な塗布法の開発。	○	
準位・界面制御によるセル効率向上	高性能な HTM 材料での効率増大、小面積セル 25%	ペロブスカイト界面制御により 22% 超。25%に向けた手順を提示。高分子補強と酸化防止剤添加により耐久性向上。	○	
基盤技術の改良に向けた研究開発	光照射 200hr が可能なデバイス構造要素技術の開発	逆型構造セルを開発し連続光照射 1,000 時間超の耐久性、85°C 耐熱性 500 時間。	○	
認証データ取得に向けた性能測定方法の研究開発	ヒステリシスが 1% 以内に抑える測定方法の開発	認証効率 19% を 2 種セルで取得。遅延時間を最適化し順・逆掃引など 1% 以内となる計測法の提示。	○	
性能評価法の確立	モジュールでの発電性能評価法（不確かさ 5% 以内）	精度向上した MPPT 法および Dynamic/Reduced Span <i>J-V</i> 法の提示。	○	
耐久性評価	連続光照射試験の実施	測定環境槽を設置し、連続光照射による劣化発現因子の解明。	○	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【G 新素材と新構造による高性能化技術の開発】(東京大学)

テーマ名	目標	研究開発成果	達成度*1	備考
G1. 新素材と新構造の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラス基板小面積セル (有効面積約 0.03cm²) で変換効率 25% を達成する。 ・Pb系ペロブスカイト太陽電池で Jsc 26mA/cm² を達成する。 ・1cm²セルで変換効率 22% を達成する。 ・蒸着により 20mm 角でラフネスが ±30nm 以内となる高品位ペロブスカイト薄膜を作成する。 ・ヨウ臭化ペロブスカイトを用いた Voc 1.4V 以上のセルを、低温製膜による低コスト工程で作製する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・I-V ヒステリシスが小さいカリウム添加ペロブスカイトを用いたガラス基板小面積セル (有効面積約 0.18cm²) で変換効率 24.4%。劣化要因となる MA を含まない組成のペロブスカイトを用いた小面積セルで変換効率 24.92% を達成した。 ・カリウム添加ペロブスカイトを用いたセルで Jsc 26.6mA/cm² を達成し、変換効率 24.4% を得た。 ・カリウム添加ペロブスカイトを用いた 1cm² セルで変換効率 21.65%。同組成の 3 直列ミニモジュール (2.76cm²) で効率 20.7% を達成した。 ・ペロブスカイト単結晶試料の構造と物性を検討し、励起子の特殊性を明らかにした。複数の結晶相が混在し、自発的に超格子を形成していることを見出した。 ・真空蒸着膜では 5μm 角内の最大高低差 36nm。レーザー蒸着で 2μm 四方の最大高低差 22nm の MAPbI₃ 膜を作成し、これを用いたセルで効率 16.0%。ハロゲン組成を変えたヘテロ積層に成功。形成した薄膜中のハロゲン比率を正確に決定する方法を確立。 ・低温作製 TiO_x/ZnS 多層膜 (浸漬法で作製) を電子輸送層として、臭素系ペロブスカイトを用い、Voc 1.56V を達成した。CdS 層導入と CsPb(I/Br)₃ の組成調整により、Jsc 向上し、Voc 1.3V。 	<p>○</p> <p>○</p> <p>◎</p> <p>—</p> <p>○</p> <p>○</p>	<p>目標より大きい面積で、ほぼ達成</p> <p>コンソーシアム全体目標のモジュール効率 20% を達成</p> <p>予定外の重要な発見</p>
G2. 界面制御技術	<p>界面制御により、Jsc 26 mA/cm² 以上、Voc 1.2 V 以</p>	<p>電子輸送層/ペロブスカイト層界面へのバッファ材料の導入、ホール輸送層/ペロブスカイト層界面</p>	<p>○</p>	

	上の条件で FF 80%以上を実現する。	への PEAI 処理により Voc が向上し、1.20 V を達成。カリウム添加ペロブスカイトを用い、ホール輸送層/ペロブスカイト層界面を F06 処理、電子輸送層/ペロブスカイト層界面を新規処理することで、Jsc 26.6 mA/cm ² 、FF 82.7% を達成し、変換効率 24.4%。		
G3. 高電流材料技術	Sn 系ペロブスカイト太陽電池で Jsc 34mA/cm ² を達成する。	金属混合 Sn/Pb ペロブスカイトの結晶性を高め、結晶欠陥を少なくすることにより、Jsc 33.1 mA/cm ² 。電圧も改善し、変換効率 20.4% を達成した。	○	電流値はもう一歩だが、電圧も改善し、Sn 系で世界に先駆け変換効率 20% 超
G4. 基板構造制御技術	基板構造制御により、4mm 角セルで、変換効率面内ばらつき ±0.5% 以内に収める。	{001} 面露出 TiO ₂ 粒子を用いたセルで、デバイス内 4×4 点で φ1mm の変換効率のばらつきが標準偏差で 0.5% 以下を確認。{001} 露出板状酸化チタンを基板とする 10×15mm 角のペロブスカイト層に 3mm 角セルを 8 デバイス (4×2) 配置し、それらの効率ばらつき 0.5% 以下 (1σ) を確認した。	○	
G5. 電極材料技術	コスト 150 円/m ² 無機系ホール輸送材で効率 20% を実現する。	無機系ホール輸送材として NiO を用いた逆構造型ペロブスカイト太陽電池で変換効率 19.6%。この NiO 層は膜厚 10nm 以下で、材料ロス等を考慮してもコストは約 100 円/m ² 以下。	○	伸び率 (約 2 倍) から見れば、ほぼ達成
G6. 高純度材料技術	材料の高純度化および広帯域化により Jsc 26~35mA/cm ² 、Voc 1.2~0.9V、および、FF>0.8 を実現するための課題を、素子特性のモデル解析に基づき抽出し、セル変換	混合カチオン型 (Cs _x MA _y FA _z PbI _a Br _b) 用の前駆体材料 FAPbI ₃ (dmf) ₂ を開発し、これを用いて Voc 1.21V (電圧ロス 0.38V) のセルや効率 22.2% (Jsc 25.2 mA/cm ² 、Voc 1.11 V、FF 0.793) のセルを得た。電圧ロスが小さい理由として、Aging により正孔輸送層での酸化が進行し、伝導度が向上するとともに、HOMO 準位がより深くなることを明らかにし	△	全体目標の達成に貢献した

	効率 25%の実現に貢献する。	た。		
G7. 第一原理計算	第一原理計算による解析・予測で、変換効率 25%の達成に貢献（実験結果の解析および材料設計、提案、予測を実施）する。	第一原理計算によってペロブスカイト層の格子欠陥制御と構造制御に関する解析と予測、ホール輸送材料(Spiro 化合物を含む TPA 系化合物、フタロシアニン系化合物)の材料設計を実施。金属ハライドペロブスカイト層の特徴、結晶成長、元素ドーピング、粒界構造に関する分子動力学計算を実施。非結晶領域での構造的特徴を見出した。	○	
G8. デバイス解析	半導体デバイスシミュレーションを用いて効率 25%達成の理論的な要求仕様を明らかにする。	<ul style="list-style-type: none"> ・カリウム添加ペロブスカイト太陽電池の Br 比制御による E_g グレーディングの最適化を行い、表面側 E_g が 1.61eV (Br 比=0.15)、裏面側 E_g が 1.48eV (Br 比=0.00)の時に効率が最も高くなる (25.2%) ことを明示した。 ・PbSn 系ペロブスカイト太陽電池の Sn/(Pb+Sn)比制御による E_g グレーディングの最適化を行い、表面側 E_g が 1.47eV (Sn 比=0.07)、裏面側 E_g が 1.33eV (Sn 比=0.38)の時に効率が最も高くなる (25.5%) ことを明示した。 	○	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

A 塗布製造技術の開発（パナソニック株式会社）

1. 成果詳細

2030年に太陽光発電コスト7円/kWhの実現に向け、革新的低コスト太陽電池「ペロブスカイト太陽電池」の実用化を目指すために、ペロブスカイト太陽電池モジュール変換効率20%、モジュール製造コスト15円/Wを実現しうる新コンセプト太陽電池の開発を行った。本研究開発では、上記目標達成のために、低コスト化が期待できる塗布製造技術をベースとして、ペロブスカイト太陽電池の高効率化技術、高耐久化技術、モジュール化技術の開発を行い、低コスト製造へ向けた要素技術の確立を行った。

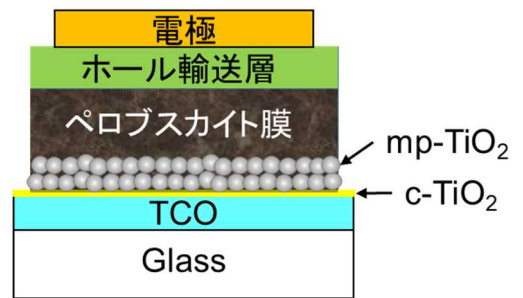
1.1 高効率化技術

ペロブスカイト太陽電池の高効率化を図るために、ペロブスカイト膜（バルク）の高品質化とペロブスカイト膜の界面、特に、ホール輸送層との界面の再結合の低減に取り組んだ。以下に詳細を述べる。

1.1.1 ペロブスカイト膜の組成制御

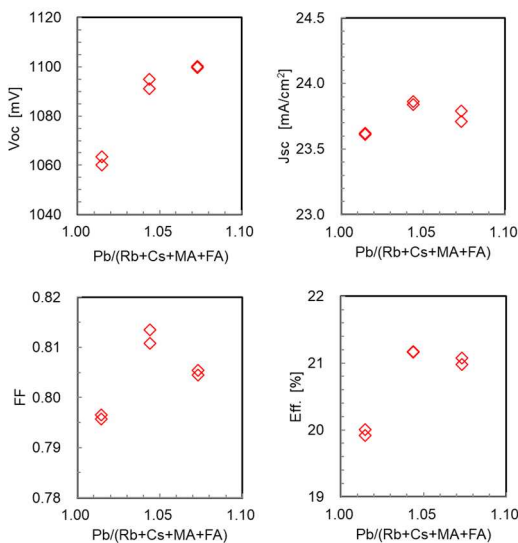
有機無機ハライドペロブスカイト（化学式： ABX_3 ）は、A、BサイトカチオンとXサイトアニオンの組成を制御することで、バンドギャップの制御、結晶相の変化の抑制、結晶成長の促進、欠陥低減を図ることができる。そこで、Aサイトカチオンへの複数元素の添加、Xサイトアニオンのヨウ素I、臭素Brの固溶、AサイトカチオンとBサイトカチオンの組成比の最適化を検討し、高効率化を図った。

図Ⅲ-2-(ハ)-A-1に作製したペロブスカイト太陽電池の断面構造を示す。太陽電池は下から、ガラス基板／透明導電膜（TCO）／酸化チタン薄膜（以下、 $c\text{-TiO}_2$ ）／酸化チタンメソポーラス膜（以下、 $mp\text{-TiO}_2$ ）／ペロブスカイト膜／ホール輸送層／電極の順に積層された構造となっている。ペロブスカイト膜は、構成元素を含む溶液を調製し、 $mp\text{-TiO}_2$ 層上に溶液を滴下・スピンコートし、回転途中に貧溶媒を滴下し前駆体を形成した後、ホットプレート上で加熱し、ペロブスカイト膜を結晶化させた。

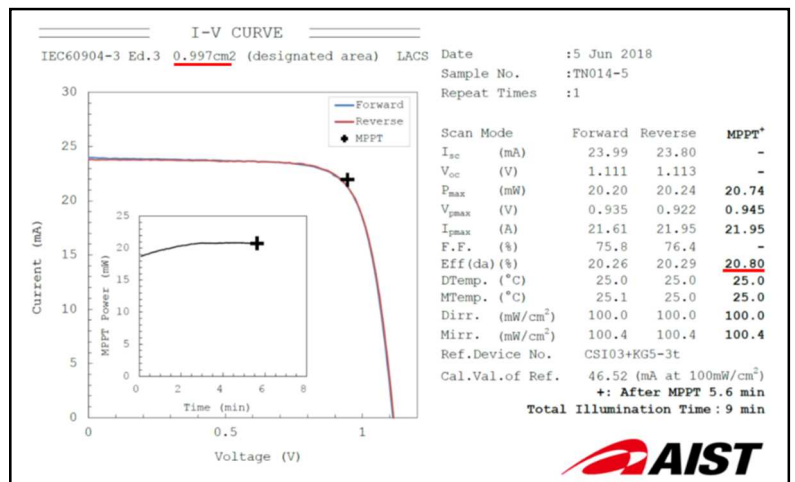


図Ⅲ-2-(ハ)-A-1 ペロブスカイト太陽電池の断面構造

研究開発の初期段階では、Aサイトカチオンにメチルアンモニウム（ CH_3NH_3 （MA））とホルムアミジウム（ $\text{HC}(\text{NH}_2)_2$ （FA））を用い、XサイトアニオンにIとBrを用いた固溶系において、バンドギャップ制御と膜質の改善を行い、変換効率18.5%を達成した。しかしながら、この系の中の FAPbI_3 では、バンドギャップが大きく、光吸収係数が小さい結晶相の δ 相が低温で形成されやすいため、短絡電流密度 J_{sc} 低下の原因の一つとなっている。そこで、 δ 相の形成を抑制するためにAサイトカチオンにCsを添加した（Cs, MA, FA） $\text{Pb}(\text{I}, \text{Br})_3$ ペロブスカイト太陽電池を作製した結果、Cs添加比3~5%で短絡電流密度が



図Ⅲ-2-(ハ)-A-2 ペロブスカイト膜のPb(B/A)比に対する太陽電池特性の変化



図Ⅲ-2-(ハ)-A-3 開口面積 1cm^2 のペロブスカイト太陽電池の電流-電圧特性（産総研測定）

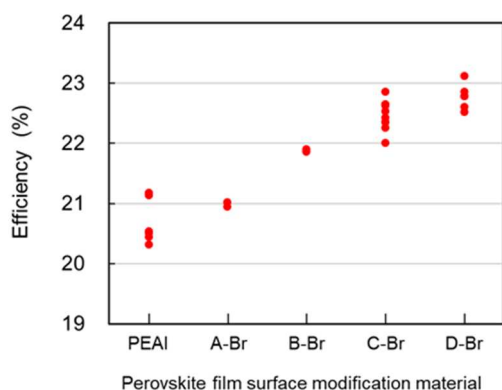
最大となり、変換効率20.0%を達成した。次に、AサイトカチオンへのRbの添加によるペロブスカイト

膜の結晶成長の促進を検討した。RbI を 2.5%添加することで結晶粒が成長し、変換効率 20.5%を達成した。次に、A サイトの 4 つのカチオンと B サイトの Pb との組成比制御によるさらなる結晶成長の促進を図った。図Ⅲ-2-(ハ)-A-2 に A サイトカチオン (Rb+Cs+MA+FA) と B サイトカチオン Pb の組成比 (B/A 比) に対する太陽電池特性の変化を示す。Pb 比の増加に対して開放電圧 V_{oc} は増加、短絡電流密度 J_{sc} は変化なし、曲線因子 FF は B/A 比 1.04 で極大を示すことがわかる。 V_{oc} の増加は、過剰な PbI_2 を介した結晶成長の促進に起因すると考えられる。FF は B/A 比 1.04 までは V_{oc} と同様に結晶成長による再結合低下が要因と考えられ、B/A 比 1.07 では、過剰な PbI_2 の偏析がキャリア輸送を阻害するために低下すると考えられる。 V_{oc} と FF の Pb 組成比依存性から変換効率は Pb リッチ組成 1.04 で最大値が得られた。これらの組成制御技術を用いて作製した面積約 1cm^2 サイズのペロブスカイト太陽電池を産総研で測定した電流-電圧特性を図Ⅲ-2-(ハ)-A-3 に示す。最大出力追尾 (MPPT) 測定で変換効率 20.8% ($V_{oc} = 1.113\text{V}$, $J_{sc} = 23.80\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF = 0.764$, 開口面積: 0.997cm^2) を達成した。 1cm^2 サイズの 2018 年当時の世界最高効率は 20.9%であり、それに匹敵する世界最高レベルの効率が得られた。

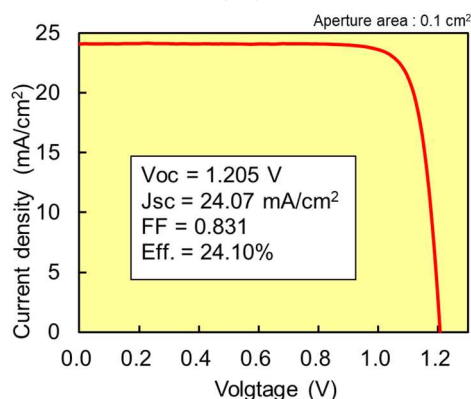
1.1.2 ペロブスカイト膜の界面制御

太陽電池の高効率化には、光吸収層のバルクの欠陥再結合の低減だけでなく光吸収層と p 形層あるいは n 形層との界面の再結合の低減が必要である。そこで、ペロブスカイト/ホール輸送層界面の再結合を低減するためにホール輸送層と接するペロブスカイト膜表面の修飾を検討した。

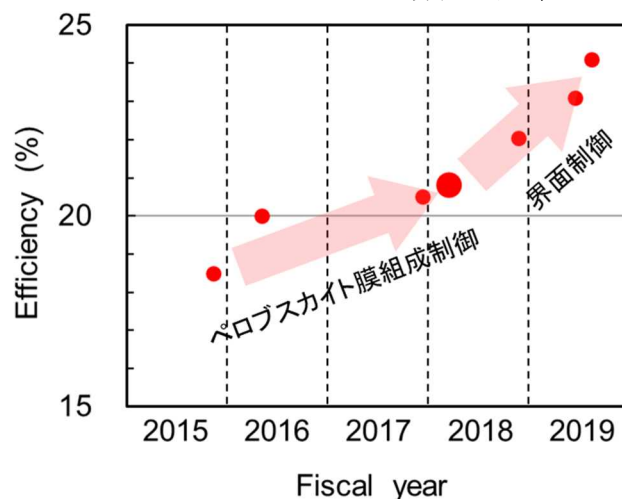
ペロブスカイト膜表面の修飾としてペロブスカイト膜との結合が強いと予想されるアミン系化合物を用いた。(Rb, Cs, FA, MA)Pb(I, Br)₃膜を形成後に IPA にアミン系化合物を溶かした溶液を膜上に滴下しスピンコートすることでペロブスカイト膜表面を修飾した。アミン系化合物としては、ヨウ化物系 PEAI (Phenethylammonium Iodide) とアルキル基 (A, B, C, D で記述) が異なる複数の臭化物系化合物を検討した。図Ⅲ-2-(ハ)-A-4 に修飾化合物に対する変換効率の変化を示す。ヨウ化物系 PEAI に対し臭化物が高い変換効率を示した。臭化物系化合物では、ペロブスカイト膜表面への付着性が高く、結合が強いと考えられる D-Br 化合物で最も高い変換効率を得られた。このセルに反射防止コートした時の太陽電池の電流-電圧特性を図Ⅲ-2-(ハ)-A-5 に示す。変換効率 24.1% ($V_{oc} = 1.205\text{V}$, $J_{sc} = 24.07\text{mA}/\text{cm}^2$, $FF = 0.831$)



図Ⅲ-2-(ハ)-A-4 ペロブスカイト膜表面修飾材料による変換効率の変化



図Ⅲ-2-(ハ)-A-5 臭素系でペロブスカイト界面を修飾した太陽電池の電流-電圧特性



図Ⅲ-2-(ハ)-A-6 ペロブスカイト太陽電池の変換効率の年次推移

0.831, 開口面積:0.1cm², 自社測定) が得られ、世界トップレベル (世界最高効率 25.2%) を達成した。図Ⅲ-2-(ハ)-A-6 に委託開発期間の太陽電池セルの変換効率の推移を示す。開発当初 2015 年度の世界最高効率は 20%であり、差が開いていたが、ペロブスカイト膜の組成制御によるバルクの高品質化によりセル面積 1cm² で 20.8%の効率を達成し、世界最高効率に肉薄した。さらに、界面制御で効率を向上させ、世界最高効率に追随している。セルレベルでの高効率化技術は、モジュール作製工程に適用しており、モジュール高効率化に寄与している。

1.2 高耐久化技術

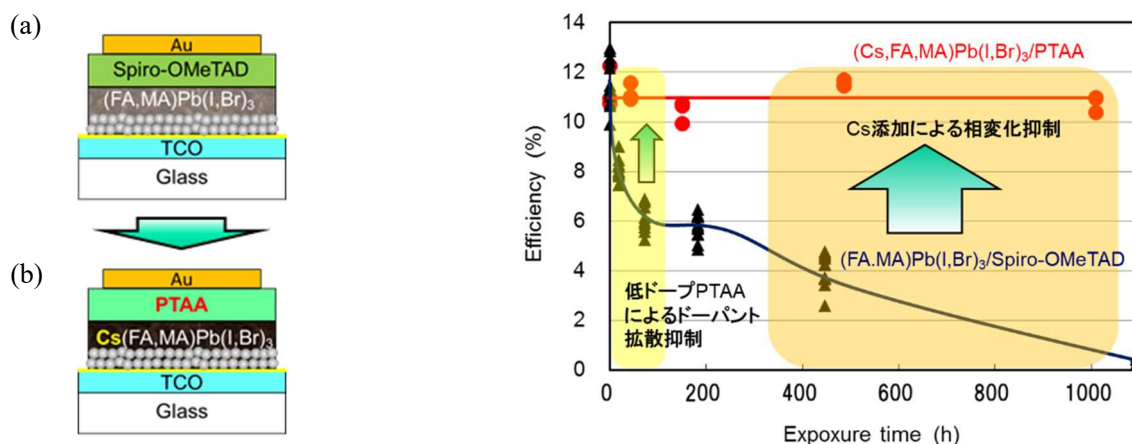
1.2.1 耐熱・耐湿性向上

太陽電池に必要とされる信頼性には、「耐熱性」「耐湿性」「耐光性」など様々なものがあり、それらすべての課題について解決可能な材料・構造が要求される。初めに、これらの解決が必要な信頼性のうち、モジュール・セル構造等では回避不可能であり材料の本質的な課題のひとつとなりうる「耐熱性」に焦点を絞り、劣化特性について調べた。

太陽電池の品質規格 (IEC61215) 中の高温高湿曝露試験 (85°C、85%RH 雰囲気) において、湿度と切り分けて熱的な劣化を調べるため、簡易な封止方法を用いて水分をできる限り除去した状態にして 85°C 雰囲気の恒温槽内に太陽電池を格納し、高温曝露試験を実施した。

図Ⅲ-2-(ハ)-A-7 に耐熱性の改良前後のセル構造を、図Ⅲ-2-(ハ)-A-8 に高温曝露時間に対する太陽電池特性の変化を示す。青線は、図Ⅲ-2-(ハ)-A-7 (a) に示す有機カチオンのみの (FA, MA)Pb(I, Br)₃ 膜を用いたセルの効率の変化であり、赤線は、図Ⅲ-2-(ハ)-A-7 (b) に示す耐熱性を改良したセルの効率の変化を示している。以下、高温曝露による劣化要因の究明と劣化抑制についての詳細を述べる。

改良前の青線で示すセルでは、黄色で示す初期<100h の領域 (以下、初期劣化領域と記述) において急激な劣化が発生した。100~200h は効率を維持するが、橙色で示した 200h 以降の領域 (以下、後期劣化領域) では再度劣化が進行する 3 段階のモードで劣化することを確認した。劣化の要因を調べるために、ペロブスカイト層 ((FA, MA)Pb(I, Br)₃) とホール輸送層 (Spiro-OMeTAD) の各々の単層膜の曝露試験前後での特性変化を分析し、次に、積層したデバイス化により発生する反応や各層間の相互作用による影響について調べた。その結果、初期劣化領域では、各単層の膜では高温曝露後に物性の変化はないが、積層したデバイス構造では TOF-SIMS 分析から高温曝露でホール輸送層のドーパントがペロブスカイト層に拡散していることが観測され、SEM 像からホール輸送層にドーパントを添加したセルでは高温曝露後にペロブスカイト膜中にボイドや PbI₂ の偏析が観測された。これらの結果から、高温曝露によりホール輸送層 Spiro-OMeTAD のドーパントがペロブスカイト膜に拡散し、ボイドの生成や PbI₂ の偏析を誘起し、光吸収量の低下やキャリア再結合の増加が生じ、効率が低下したと考えられる。次に、後期劣化領域においては、ペロブスカイト単層膜でバンドギャップが大きく、光吸収係数が小さい δ 相のペロブスカイト膜の占める割合が増加することが確認された。したがって、後期劣化領域ではペロブスカイト膜で α 相から δ 相への相変化が起こり、これによる光吸収量の低下が変換効率の低下を引き起こしていると考えられる。これらの劣化を抑制するために図Ⅲ-2-(ハ)-A-7 (b) のセル構造に示すように、初期劣化の抑制のために、ホール輸送層として分子量が大きくドーパントの移動を抑制できる PTAA を用い、



図Ⅲ-2-(ハ)-A-7 耐熱性の改良前(a)と後(b)のペロブスカイト太陽電池の構造

図Ⅲ-2-(ハ)-A-8 ペロブスカイト太陽電池の高温曝露における効率の劣化 (改良前: 青線、改良後: 赤線)

後期劣化要因となるペロブスカイト膜の相変化を抑制するために、高効率化技術で述べた δ 相の形成を抑制する Cs を添加した。改良後のセルの高温曝露による効率の変化は、図 III-2-(ハ)-A-8 の赤線に示すとおりである。85°C、1000 時間で効率低下がなく、耐熱性が改良されていることがわかる。

高温曝露での劣化を抑制することができたが、初期の変換効率は 11% と低いため、高耐熱を維持した高効率化の技術開発を行った。図 III-2-(ハ)-A-2 に示すように、若干 Pb リッチ組成で結晶成長が促進し、高い変換効率が得られる。しかしながら、図 III-2-(ハ)-A-9(a) に示すように、Pb リッチの (Cs, FA, MA)Pb(I, Br)₃ 膜では高温曝露 200 時間で PbI₂ の回折ピーク強度が大幅に増加している。高温曝露によりペロブスカイト膜の一部の分解が進み、PbI₂ の生成が促進し、高温曝露後の効率低下を引き起こしていると考えられる。次に、ペロブスカイト膜の結晶粒成長を促進する Rb を添加した (Rb, Cs, FA, MA)Pb(I, Br)₃ 膜の高温曝露前後の X 線回折パターンを図 III-2-(ハ)-A-9 (b) に示す。Rb を添加すると、高温曝露 200 時間後での PbI₂ の回折ピークは小さく、分解は抑制されている。一方、RbPbI₃ の弱い回折ピークが観測される。以上の結果から、図 III-2-(ハ)-A-9 (c) に示すように、Rb を含まない膜では高温曝露によりペロブスカイト膜の粒界で PbI₂ への分解が促進される。これに対し、Rb を添加することで RbPbI₃ が粒界に生成し、PbI₂ への分解が抑制されると考えられる。ここで、RbPbI₃ のバンドギャップは 2.6eV であり、ペロブスカイト膜の 1.5eV より大きく、光励起されたキャリアの RbPbI₃ 層への移動が阻害されるため、粒界再結合の影響は小さいと考えられる。(Rb, Cs, FA, MA)Pb(I, Br)₃ 膜を用いた太陽電池の高温曝露試験結果を図 III-2-(ハ)-A-10 に示す。初期効率 19.5% で高温曝露 1000 時間後に効率維持率 96% の高効率かつ高耐熱を達成した。

太陽電池への水分の侵入を防ぐため、裏面にガラスを用い、太陽電池を作製したガラス基板と貼り合わせ、端面を封止した。この耐湿構造と前述の耐熱技術を適用したセルの高温高湿試験前後での電流-電圧特性を図 III-2-(ハ)-A-11 に示す。初期効率 20.0% において高温高湿試験 1000 時間後で効率 19.0%、

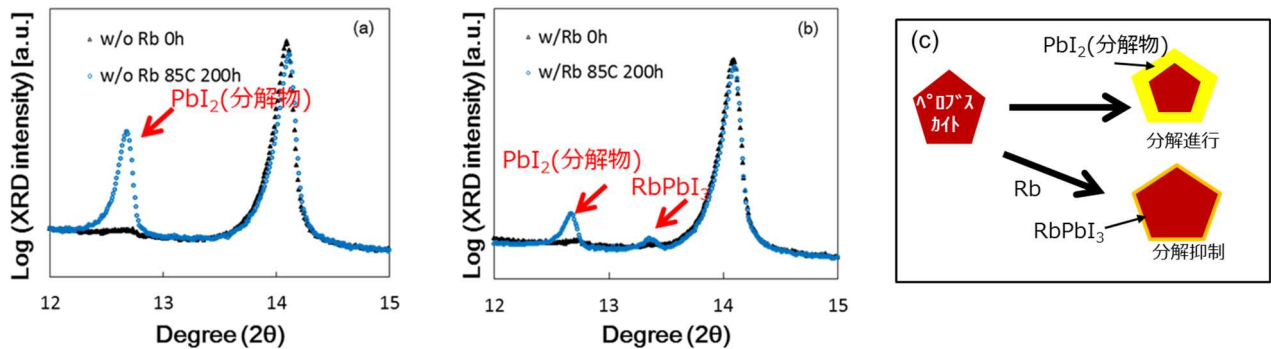


図 III-2-(ハ)-A-9 Rb 添加による高温曝露でのペロブスカイト膜の構造変化
(a) Rb 添加なしの膜の X 線回折パターン、(b) Rb 添加膜の X 線回折パターン、
(c) Rb の添加有無によるペロブスカイト膜の高温曝露での粒界構造変化のモデル

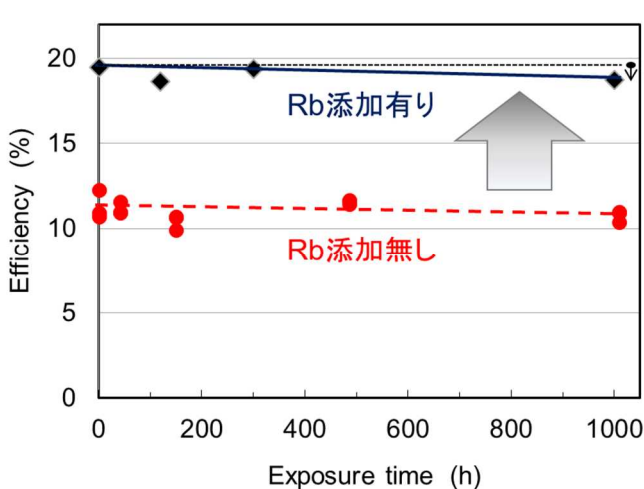


図 III-2-(ハ)-A-10 Rb 添加の有無によるペロブスカイト太陽電池の高温曝露での効率変化

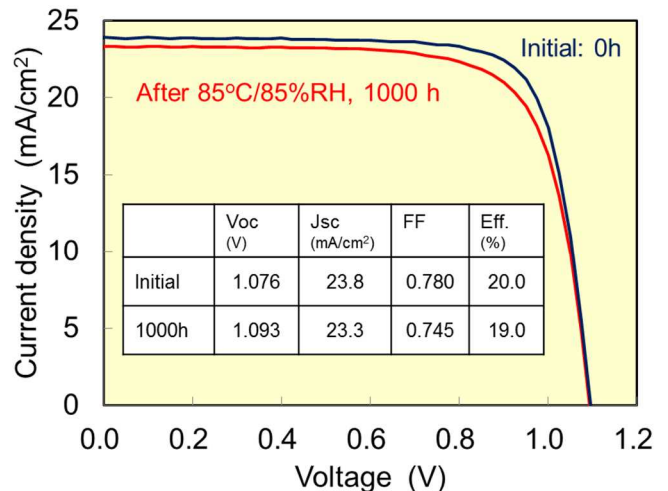


図 III-2-(ハ)-A-11 高温高湿 (85°C, 85%RH) 試験前後の電流-電圧特性

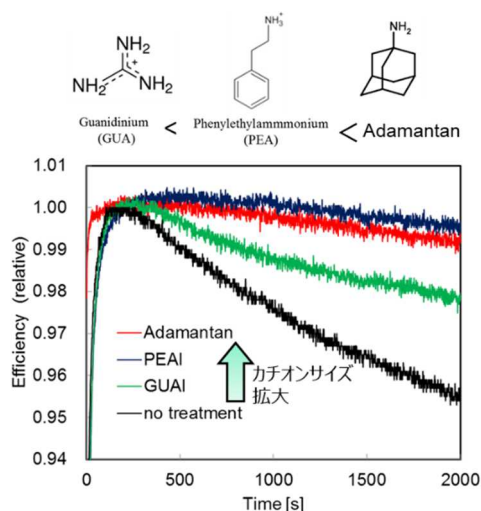
効率維持率 95%を達成し、太陽電池の品質規格 IEC61215 の高温高湿試験を通過する結果が得られた。

1.2.2 耐光性の向上

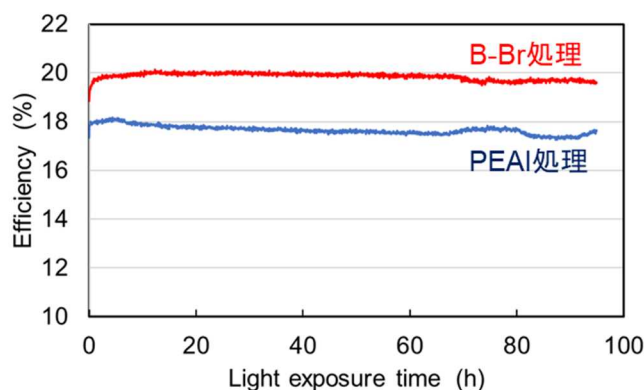
太陽電池において照射における特性の安定性は太陽光発電システムを設計する上で重要な要素である。本研究開発では、照射による特性安定化を図るために、界面制御技術の開発に取り組んだ。

初めに、ホール輸送層による照射特性の違いを測定したところ、Spiro-OMeTAD は比較的安定であるのに対し、PTAA は照射時間に対し、ほぼ直線的に効率が低下した。これは、ペロブスカイト膜と PTAA の界面の光誘起欠陥に起因すると考えられる。そこで、光誘起界面欠陥を抑制するために、ホール輸送層に接する界面をペロブスカイト膜よりカチオンサイズの大きいアミン系化合物で修飾することを試みた。カチオンサイズを大きくすることでペロブスカイト膜内部への拡散を防ぎ、界面のみを修飾できると考えられる。図III-2-(ハ)-A-12 に示すようにアミン系化合物としてカチオンサイズが順に大きい Guanidium (GUA), Phenylethylammonium (PEA), Adamantan を用い、それらを IPA に溶かしてペロブスカイト膜に塗布後、ホール輸送層 PTAA を形成した。図III-2-(ハ)-A-12 に示すアミン系化合物に対する照射での効率変化の結果から、界面修飾を行っていないセルでは 2000 秒後に効率が 5%低下するが、界面修飾のカチオンサイズが大きくなるに従い効率の低下率が改善することがわかる。さらにカチオンサイズが大きい臭素系化合物 B-Br で界面修飾を行った結果を図III-2-(ハ)-A-13 に示す。PEAI 処理に比べ高い変換効率を示し、80 時間以上の光連続照射に対して安定であることを確認した。この結果は、80 時間以内での変動率が±2%以内の品質規格 IEC61215 の照射安定化の要求事項を満足している。

以上の高温高湿試験、照射安定試験の結果から、品質規格 IEC61215 の要求事項をクリアし、ペロブ



図III-2-(ハ)-A-12 ペロブスカイト界面へのアミン化合物修飾による照射での効率変化の違い



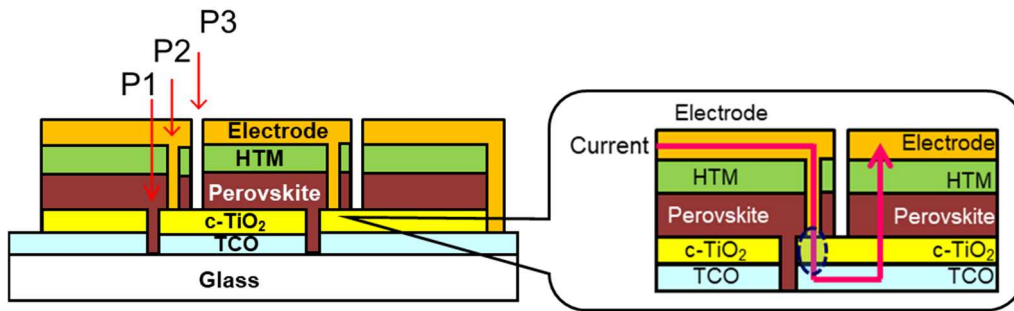
図III-2-(ハ)-A-13 ペロブスカイト膜の界面修飾した太陽電池の光連続照射での効率変動

スカイト太陽電池セルで最終目標を達成した。

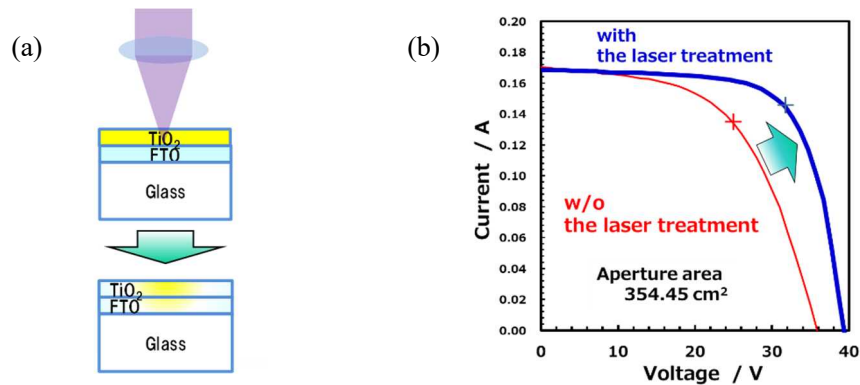
1.3 モジュール化技術

1.3.1 モジュール設計

ペロブスカイト太陽電池の大面积モジュール化には、無機系薄膜太陽電池と同様に基板上で複数セルを直列接続する集積形モジュール構造を適用することができる。図III-2-(ハ)-A-14 にペロブスカイト太陽電池の集積形モジュールの断面構造を示す。右に示す拡大図から典型的な薄膜太陽電池と同様のプロセスでは透明電極 TC0 (FTO) と裏面電極 Au のコンタクト部に高抵抗層 c-TiO₂が残るため、コンタクト抵抗が増大し、曲線因子 FF が低下することになる。そこで、コンタクト抵抗の低減を図るため、図III-2-(ハ)-A-15 (a) に示すように c-TiO₂ 層に紫外線レーザーを照射し下地の FTO との元素ミキシングを試みた。図III-2-(ハ)-A-15 (b) に P2 の紫外線レーザー照射の有無による 20cm 角モジュールの電流-電圧特性を示す。ここでは、ペロブスカイト膜はセルと同様にスピコートで作製している。赤線で示す紫外線レーザー照射のない電流-電圧曲線に対し、紫外線レーザーを照射した青線で示す電圧-電流曲線はシリーズ抵抗が低減し曲線因子 FF が大幅に改善されていることがわかる。なお、断面 TEM の micro-EDX 分析からレーザー照射により FTO の Sn が c-TiO₂ に拡散していることを観測している。P2 への紫外線レーザー照射による元素ミキシングがモジュール高効率化に有効であることを確認した。



図III-2-(ハ)-A-14 ペロブスカイト太陽電池モジュールの断面構造

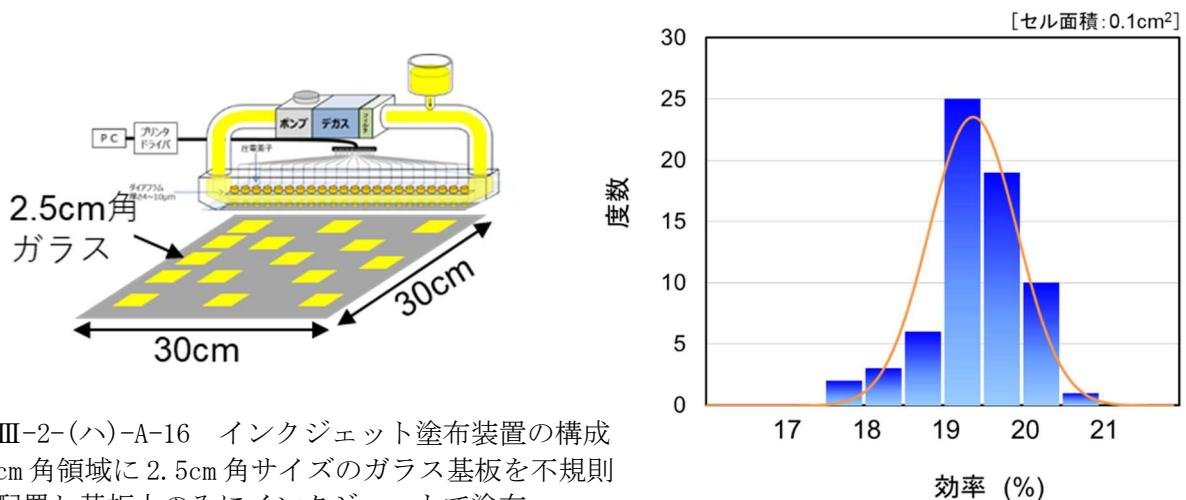


図III-2-(ハ)-A-15 紫外線レーザー照射によるコンタクト抵抗低減の模式図(a)と紫外線レーザー照射有無の20cm角モジュールの電流-電圧特性(b)

1.3.2 インクジェットによる大面積塗布技術

大面積の塗布法としては、ダイ・コート、インクジェット、スプレー法等が挙げられる。我々は、ペロブスカイト膜の大面積塗布法として、高い材料収率、高速の塗布、高い被覆率等の観点からインクジェット法を選択し、均一塗布プロセスの開発を進めた。

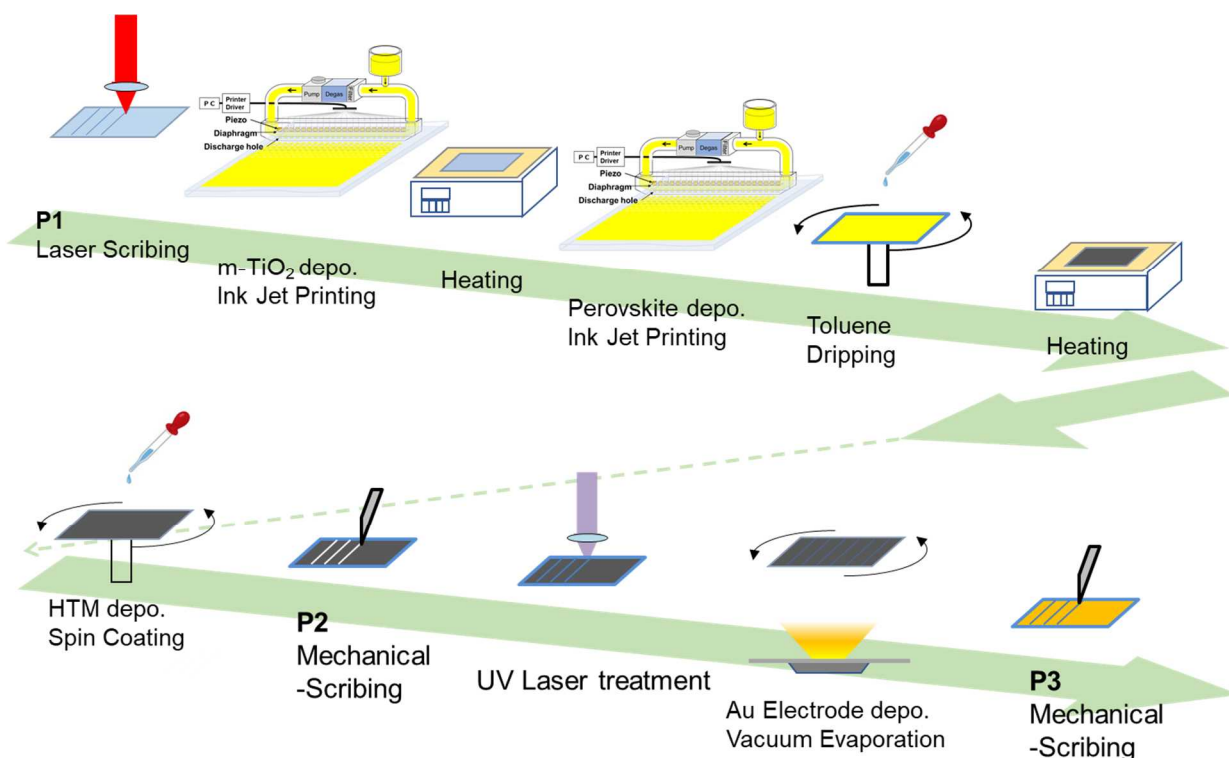
30cm角基板対応のインクジェット装置でのペロブスカイト膜の均一製膜を評価するために、図III-2-(ハ)-A-16に示すように2.5cm角の基板17枚を不規則に30cm角範囲に配置し、2.5cm角基板のみに塗布するようにインクジェットの描画パターンをプログラムし、ペロブスカイト膜溶液塗布後、各基板にスピコートで貧溶媒のトルエンを滴下し、焼成してペロブスカイト膜を形成した。ここで、1枚の基板に面積0.1cm²の4つのセルを試作した。図III-2-(ハ)-A-17に66個のセルの効率分布を示す。セルの平均効率19.4%±1.7%の高効率かつ均一な分布が得られた。また、30cm角内の基板の配置での効率の偏りは観測されなかった。以上の結果からインクジェット塗布によるペロブスカイト膜の大面積均一形



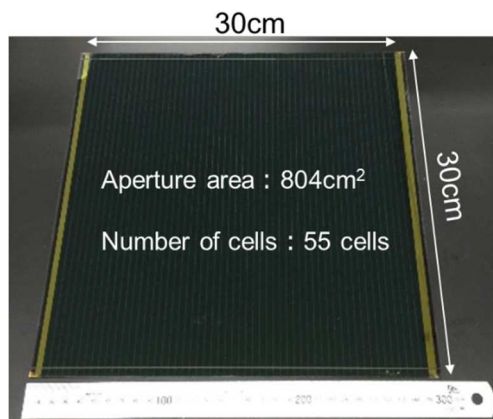
図III-2-(ハ)-A-16 インクジェット塗布装置の構成
30cm角領域に2.5cm角サイズのガラス基板を不規則に配置し基板上のみにインクジェットで塗布

図III-2-(ハ)-A-17 30cm角サイズ内の66個のセルの効率分布

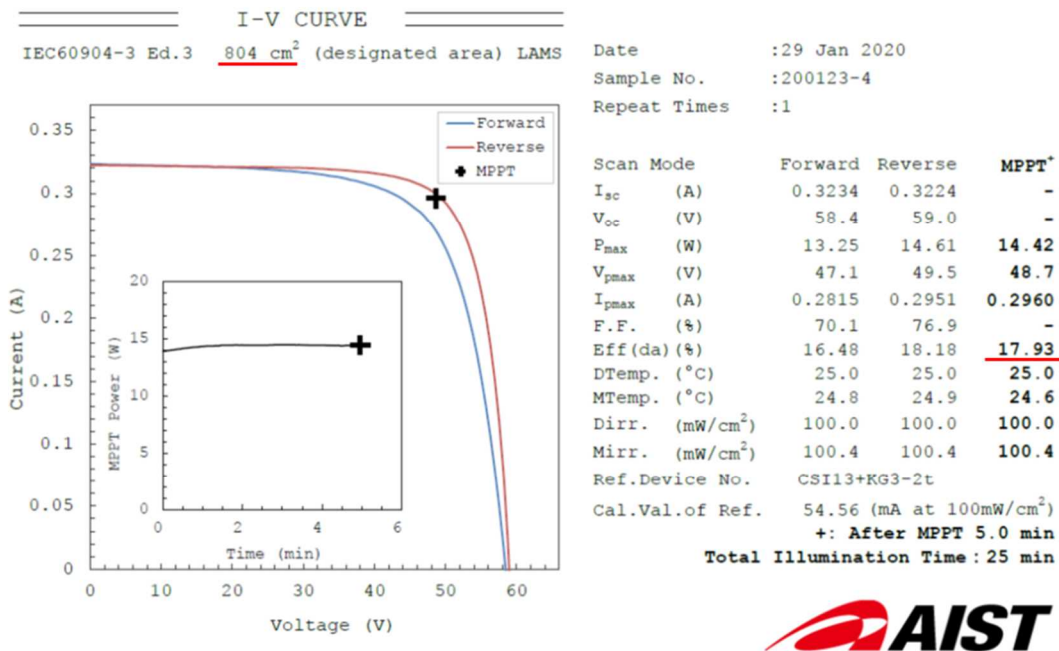
成の見通しを得た。これらの結果を基にインクジェット塗布法を用いて 30cm 角サイズモジュールを製作した。図Ⅲ-2-(ハ)-A-18 にモジュール製造工程を示す。ここで、パターニング工程の P1, P2, P3 では全て紫外線レーザーを用いた。メソポーラス TiO_2 はインクジェットで製膜するプロセスを開発しており、スピコート膜と同等のセル効率が得られることを確認している。ただし、30cm 角サイズのモジュールの作製においてはスピコート法を用いている。ペロブスカイト膜は 30cm 角サイズ全面にインクジェットで塗布した後、スピコートで貧溶媒を滴下した。なお、貧溶媒ドリップ工程のインラインプロセスも開発しており、面内のセル平均効率 19%以上を確認している。その後、加熱してペロブスカイト膜を結晶化し、ホール輸送層 PTAA 膜をスピコートで塗布した。ここで、P2 でのレーザー出力や掃引速度を調整することで、 c-TiO_2 と下地 TCO のコンタクト抵抗を低減した。その後、金属電極 Au 膜を蒸着し、レーザー・スクライブによりセルを分離するパターニング P3 を行った。図Ⅲ-2-(ハ)-A-19 に 30cm 角モジュールの外観を示す。モジュール面積は 804cm^2 であり、直列段数は 55 段である。図Ⅲ-2-(ハ)-A-20 に産総研で測定したモジュールの電流-電圧特性を示す。最大点追従測定 (MPPT) で世界最高の変換効率 17.93% ($V_{oc} = 58.7\text{V}$, $I_{sc} = 322.9\text{mA}$, $FF = 0.761$) を達成した。挿入図は光連続照射における最大出力パワー (効率) の変化を示しており、光照射 5 分以上で出力が安定していることがわかる。



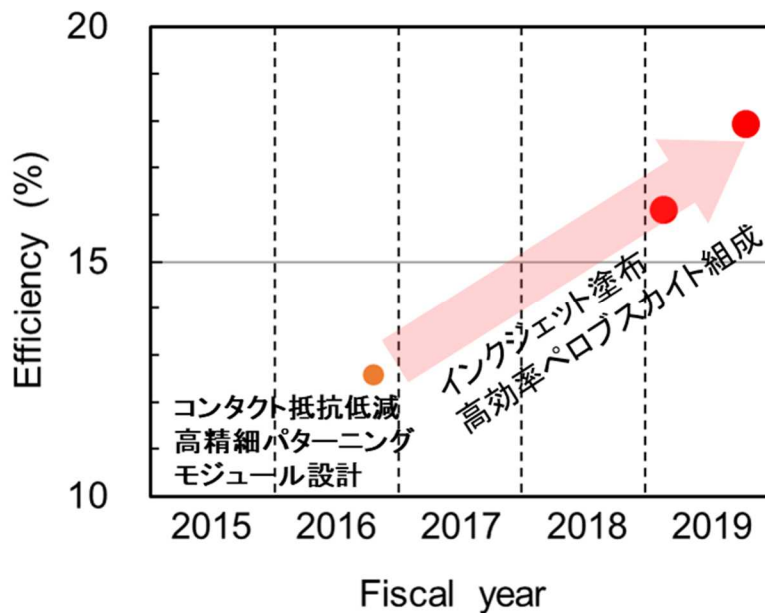
図Ⅲ-2-(ハ)-A-18 ペロブスカイト太陽電池モジュールの製造工程



図Ⅲ-2-(ハ)-A-19 30cm 角サイズモジュールの外観



図Ⅲ-2-(ハ)-A-20 世界最高効率の30cm角サイズモジュールの電流-電圧特性 (産総研測定)



図Ⅲ-2-(ハ)-A-21 ペロブスカイト太陽電池モジュールの変換効率の年次推移

図Ⅲ-2-(ハ)-A-21 にモジュール効率の年次推移を示す。スピコートで作製したモジュール効率12.6%からインクジェット塗布による大面積均一製膜やペロブスカイト膜の組成制御、界面制御等の高効率化技術の応用で急速に効率が向上し、目標の20%に近いレベルに到達した。

2. 実用化・事業化見通し

塗布法を基本としたペロブスカイト太陽電池モジュールの本研究開発において、30cm 角サイズモジュールで変換効率約 18%を達成し、セルレベルではあるが、高温高湿試験、光照射安定化における高耐久性を実証した。さらに、塗布工程が常温・常圧プロセスであることによる設備投資の低減を図れるだけでなく、ペロブスカイト膜の製膜速度 3m/分の実証からプロセスの高速化の可能性を示し、圧倒的な低コスト化が期待できることを確認した。本研究開発により実用化に向けたステップは確実に進展した。

事業化に向けては、本研究開発のインクジェット塗布の利点を活かして建材一体形太陽電池モジュール (BIPV) 市場をターゲットとしている。インクジェット塗布は、塗布パターンの制御が容易であることから、BIPV で要求される様々なサイズや形状 (長尺、台形等) への対応が可能である。Si 太陽電池を用いた BIPV では、Si セルの大きさによる制限から、対応できるサイズが限定的になる、あるいは、間隔を空けて配置することからの損失が生じることから、ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル) への寄与は限定的である。これに対し、塗布プロセスのペロブスカイト太陽電池では、サイズに対しシームレスに対応できることから建築物の適用範囲を大幅に拡大できる。また、コストに関して、BIPV は個々の案件に対応する必要があるため、メガソーラー等に対応する少品種・大量生産による低コスト化というこれまでの太陽電池の市場占有戦略が取りにくい。大量生産の Si 太陽電池モジュールでは、30 円/W 以下の価格 (プライス) まで低価格になっているが、BIPV では 100 円/W の価格が予想されている。この違いは、少量生産による稼働率の違いや流通コストの増加も含まれるが、種々のサイズや形状に対応するための自動化が困難な Si セルのアセンブリ等のモジュールの加工費が占める割合が大きい。これに対し、インクジェット塗布を用いたペロブスカイト太陽電池モジュールの製造プロセスでは、描画パターン制御で対応が可能であるため、大幅に加工費が低減できることから、低コスト化が可能である。さらに、ペロブスカイト太陽電池はプロセスタクトが短いため、オンデマンドでの生産が可能である。従って、ストックの準備を必要としないことから多品種での低コスト化が期待できる。以上から、塗布工程で高効率を実現できるペロブスカイト太陽電池は BIPV 市場の拡大を促進すると期待している。

今後、モジュールでの耐久性と一部の材料・プロセスの低コスト化を実証して製品仕様を確立するとともに、サンプルワークによる顧客ヒアリングを進め、2025 年度を目途に事業化判断に資する製造技術の確立と顧客要望等のデータ収集・市場分析を行う。

3. 波及効果

近年、大量の小型衛星を用いて全世界をカバーしてグローバルにサービスを展開するビジネスが国内外で進展しており、2024 年までに最大 2,400 機近くの小型衛星の打ち上げが予想されている。また、民間企業の小型衛星打ち上げ事業の参入から、2024 年以降も小型衛星の打ち上げが増加すると予想されている。小型衛星の増加から大幅なコストの低減が求められており、これまでの宇宙環境に対応した特殊な太陽電池から地上で使用される安価な太陽電池の宇宙環境への適用の可否が検討されている。ペロブスカイト太陽電池は耐宇宙線に優れていることがいくつかの研究機関から報告されており、本研究開発の高効率化技術を用いたペロブスカイト太陽電池の電子線照射に対する特性の劣化が宇宙用太陽電池として良く用いられる GaAs 太陽電池より大幅に小さいことを確認している。今後、関係機関と協力しながら、次世代宇宙用太陽電池としての実証試験を行い、応用展開を図る。

4. 今後の展開

ペロブスカイト太陽電池における、高効率化技術、高耐久化技術、モジュール化技術の要素技術を確立し、最終目標である製造コスト 15 円/W の指針となる技術仕様の見通しを得た。今後、建材一体形太陽電池 (BIPV) の実用化に向けて、モジュールのさらなる高効率化、モジュールでの耐久性の向上、電極、ホール輸送層等の材料低コスト化を図る技術開発を推進する。また、2020 年度から実施予定の太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発プロジェクトでの高耐久化技術、低コスト化技術の開発成果を迅速にフィードバックすることで、早期の実用化への道筋を明らかにする。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	1 (0)	7 (2)	10 (10)	1 (0)	19 (12)
論文	0	0	2	5	3	10
研究発表・講演 (うち国際会議)	2 (1)	2 (2)	8 (3)	4 (2)	4 (1)	20 (9)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	1	1
その他	0	0	2	0	0	2

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	パナソニック株式会社	特願 2017-126324	国内	2016/08/03	公開	太陽電池モジュールおよびその製造方法	樋口洋, 根上卓之
2	パナソニック株式会社	特願 2018-107922	国内	2017/06/30	公開	太陽電池および太陽電池モジュール	西原孝史, 藤村慎也, 根上卓之
3	パナソニック株式会社	特願 2018-107923	国内	2017/06/30	公開	太陽電池	西原孝史, 藤村慎也, 根上卓之
4	パナソニック株式会社	201710541346.6	中国	2017/07/05	公開	太陽電池モジュールおよびその製造方法	樋口洋, 根上卓之
5	パナソニック株式会社	特願 2018-118404	国内	2017/07/11	公開	太陽電池モジュール	樋口洋
6	パナソニック株式会社	15/655963	米国	2017/07/21	登録	太陽電池モジュールおよびその製造方法	樋口洋, 根上卓之
7	パナソニック株式会社	特願 2018-233194	国内	2018/02/01	公開	太陽電池	松井太佑, 鈴鹿理生
8	パナソニック株式会社	特願 2018-233195	国内	2018/02/01	公開	太陽電池	松井太佑, 根上卓之, 関口隆史
9	パナソニック株式会社	16/000921	米国	2018/06/06	登録	太陽電池	西原孝史, 藤村慎也, 根上卓之
10	パナソニック株式会社	16/000923	米国	2018/06/06	公開	太陽電池	西原孝史, 藤村慎也, 根上卓之
11	パナソニック株式会社	201810584996.3	中国	2018/06/08	公開	太陽電池	西原孝史, 藤村慎也, 根上卓之
12	パナソニック株式会社	201810588206.9	中国	2018/06/08	公開	太陽電池	西原孝史, 藤村慎也, 根上卓之
13	パナソニック株式会社	201810595012.1	中国	2018/06/11	公開	太陽電池モジュール	樋口洋

14	パナソニック株式会社	16/024800	米国	2018/06/30	登録	太陽電池モジュール	樋口洋
15	パナソニック株式会社	16/199649	米国	2018/11/26	公開	太陽電池	松井太佑, 鈴鹿理生
16	パナソニック株式会社	16/199748	米国	2018/11/26	登録	太陽電池	松井太佑, 根上卓之, 関口隆史
17	パナソニック株式会社	201910049165.0	中国	2019/01/18	公開	太陽電池	松井太佑, 鈴鹿理生
18	パナソニック株式会社	201910048481.6	中国	2019/01/18	公開	太陽電池	松井太佑, 根上卓之, 関口隆史
20	パナソニック株式会社	特願 2020-109179	国内	2020/06/24	出願	太陽電池	松井太佑, 関本健之, 西原孝史, 山本輝明, 内田隆介

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	藤村慎也 松下明生 山本輝明 松井太佑 内田隆介 根上卓之	パナソニック株式会社	ペロブスカイト太陽電池の耐久性向上	Panasonic Technical Journal, Vol. 63, No. 1, p. 66 (2017).	有	2017年 5月15日
2	松井太佑 樋口洋 根上卓之	パナソニック株式会社	ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けた高効率・高耐久材料設計	「光アライアンス」誌 2018.3 第29巻第3号, 日本工業出版	無	2018年 3月1日
3	松井太佑 横山智康 根上卓之 関口隆史 M. Saliba M. Gratzel 瀬川浩司	パナソニック株式会社 EPFL, 東京大学	Effect of Rubidium for Thermal Stability of Triple-cation Perovskite Solar Cells	Chemistry Letters, Vol. 47, No. 6, p. 814 (2018).	有	2018年 6月5日
4	根上卓之 松下明生 松井太佑	パナソニック株式会社	ペロブスカイト太陽電池の耐久性向上	月刊ファインケミカル シーエムシー出版 (2018).	無	2018年 8月15日
5	樋口洋 根上卓之	パナソニック株式会社	Largest highly efficient 203×203mm ² CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite solar modules	Japanese Journal of Applied Physics Vol. 57, 08RE11 (2018).	有	2018年 7月20日
6	松下明生 松井太佑 根上卓之	パナソニック株式会社	ペロブスカイト太陽電池実用化へ向けた課題と取り組み	太陽エネルギー, Vol. 45 No. 1, p. 41 (2019).	無	2019年 1月31日

7	松井太佑 山本輝明 西原孝史 森澤涼介 横山智康 関口隆史 根上卓之	パナソニック 株式会社	Compositional Engineering for Thermally Stable, Highly Efficient Perovskite Solar Cells Exceeding 20% Power Conversion Efficiency with 85 ° C/85% 1000h Stability	Advanced Materials, Vol. 31, Issue 10, 18068 23 (2019).	有	2019年 3月8日
8	樋口洋 根上卓之	パナソニック 株式会社	紫外レーザ改質による大面積 ペロブスカイト太陽電池モジ ュールの高効率化	Panasonic Technical Journal, Vol. 65, No. 1, p. 54 (2019).	有	2019年 5月15日
9	関本健之 松井太佑 西原孝史 内田隆介 関口隆史 根上卓之	パナソニック 株式会社	Influence of a Hole- Transport Layer on Light- Induced Degradation of Mixed Organic-Inorganic Halide Perovskite Solar Cells	ACS Applied Energy Materials, 2, 5039 (2019).	有	2019年 6月25日
10	根上卓之 松下明生 松井太佑	パナソニック 株式会社	ペロブスカイト太陽電池の耐 久性向上	「ペロブスカ イト太陽電池 の開発最前線 」, 第16章, p. 147, シー エムシー出版 (2019).	有	2019年 7月31日

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	根上卓之	パナソニック 株式会社	Progress and Challenges of Perovskite Solar Cells	2nd Int' l Symposium on Interactive Materials Science Cadet Program	2015年 11月18日
2	松下明生 藤村慎也 根上卓之	パナソニック 株式会社	ペロブスカイト太陽電池の 初期劣化モデルに関する考 察	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016年 3月22日
3	松下明生 藤村慎也 根上卓之	パナソニック 株式会社	Degradation Mechanism in High-temperature Exposure of Perovskite Solar Cells	26th Int' l Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26)	2016年 10月27日
4	関本健之 鈴鹿理生 横山智康 内田隆介 関口隆史 河野謙司	パナソニック 株式会社	Evaluation of energy level diagram of HC(NH ₂) ₂ PbI ₃ single crystal by electrical and optical analysis	Int' l Conference Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics (AP-HOPV17)	2017年 2月3日
5	根上卓之	パナソニック 株式会社	化合物薄膜太陽電池 (CdTe、CIGS) と ペロブスカイト太陽電池	応用物理学会 第146回結 晶工学分科会研究会	2017年 4月14日
6	根上卓之	パナソニック 株式会社	CIGS系, CdTe系化合物とペ ロブスカイト太陽電池	日本学術振興会 薄膜第 131委員会 第285回研 究会	2017年 6月30日
7	樋口洋 根上卓之	パナソニック 株式会社	203mm×203mm largest sized highly efficient MAPbI ₃ solar module	27th Int' l Photovoltaic Science & Engineering	2017年11月 13日

				Conference (PVSEC-27)	
8	西原孝史 藤村慎也 鈴鹿理生 根上卓之	パナソニック 株式会社	Efficiency Increasing in Inverted Perovskite Solar Cells by TiCl ₄ Surface Treatment of (Ni, Li)O Hole Transport Layers	27th Int' l Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-27)	2017年11月 15日
9	松井太佑 樋口洋 松下明生 藤村慎也 根上卓之	パナソニック 株式会社	ペロブスカイト太陽電池の 最新動向	日本太陽エネルギー 学会 関西支部 2017年度 シンポジウム	2017年11月 22日
10	松井太佑 樋口洋 松下明生 藤村慎也 根上卓之	パナソニック 株式会社	ペロブスカイト太陽電池の 実用化開発	第2回 フロンティア 太陽電池セミナー	2017年 12月1日
11	根上卓之	パナソニック 株式会社	Improvement on Thermal Stability of Perovskite Solar Cells and Fabrication of Modules for Practical Use	2nd Int' l Conference Asia-Pacific Hybrid Organic Photovoltaics (AP-HOPV18)	2018年 1月30日
12	松井太佑 樋口洋 西原孝史 根上卓之	パナソニック株 式会社	ペロブスカイト太陽電池の 実用化開発	日本化学会第98春季年 会 (2018)	2018年 3月22日
13	松下明生 松井太佑 樋口洋	パナソニック 株式会社	ペロブスカイト太陽電池の 実用化へ向けた課題と取り 組み	第18回 GREEN シンポジ ウム (NIMS)	2018年 6月29日
14	根上卓之	パナソニック 株式会社	ペロブスカイト太陽電池の 高効率・高耐久化	薄膜材料デバイス研究会 第15回研究集会	2018年 11月9日
15	松井太佑 樋口洋 西原孝史 根上卓之	パナソニック 株式会社	Development of Perovskite Solar Cells toward Practical Use	Asia-Pacific Int' l Conf. on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP19) Kyoto (2019).	2019年 1月28日
16	関本健之 松井太佑 西原孝史 内田隆介 関口隆史 根上卓之	パナソニック 株式会社	Analysis of light-induced degradation of organic- inorganic halide perovskite solar cell using multiple techniques	Asia-Pacific Int' l Conf. on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP19) Kyoto (2019).	2019年 1月28日
17	関本健之 松井太佑 西原孝史 内田隆介 根上卓之 金子幸広	パナソニック 株式会社	ペロブスカイト太陽電池に おける正孔輸送層の光劣化 への影響	日本学術振興会 第175 委員会 第16回シンポ ジウム	2019年 7月5日
18	関本健之 松井太佑 西原孝史 内田隆介 根上卓之 金子幸広	パナソニック 株式会社	HAXPESによる有機-無機ハ ライド ペロブスカイト太陽 電池の接合界面解析	第16回 SPring-8 産業利 用報告会	2019年 9月5日

	吉川 住和 黒岡 和巳				
19	山本輝明 松井太佑 関本健之 根上卓之 金子幸広	パナソニック株式会社	ペロブスカイト太陽電池の 実用化開発	日本学術振興会 第175 委員会 ペロブスカイト 太陽電池分科会 第8回 研究会	2019年 11月21日
20	根上卓之 樋口洋 西原孝史 内田隆介 山本輝明 松井太佑 金子幸広	パナソニック株式会社	Perovskite Photovoltaic Modules Fabricated by Ink Jet Printing	Asia-Pacific Int' l Conf. on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20) Tsukuba (2020)	2020年 1月22日

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	NEDO パナソニック 株式会社	ペロブスカイト太陽電池大面積モジュールで世界最高変換効率16.09%を達成	ニュースリリース NEDO Webサイト： https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101261.html パナソニック Webサイト： https://news.panasonic.com/jp/press/data/2020/01/jn200120-1/jn200120-1.html	2020年 1月20日

【その他】

番号	年度	タイトル	内容	発表年月
1	2017	20cm角ペロブスカイト 太陽電池モジュール展示	第12回再生可能エネルギー 世界展示会	2017年 7月
2	2017	203mm×203mm largest sized highly efficient MAPbI ₃ solar module	27th Int' l Photovoltaic Science &Engineering Conference (PVSEC- 27) 論文賞	2017年 11月13日

B 超軽量太陽電池モジュール技術の開発（株式会社東芝）

1. 成果詳細

1.1. はじめに

太陽電池をフィルム化すると、結晶シリコン太陽電池が設置しにくい場所、例えば、耐震性の低い既築建築物や、柱や壁が少なく追加の重量物を屋根に乗せられない体育館、倉庫、展示会場、工場にも設置できるようになる。壁・窓・曲面部などにも設置でき、ネット・ゼロ・エネルギー・ビル

(ZEB) やネット・ゼロ・エネルギー・ハウス (ZEH) の普及にもつながる多様な設置形態が可能となる。また、フィルム型太陽電池は Roll-to-Roll 方式で製造するとプロセスコストが低減する。さらに導入コスト中に占めるモジュールコストの割合は 1/3 程度であり他の 2/3 は設置コスト、架台、パワーコンディショナー等が占めるが、フィルム型であると架台費用が不要になり、運搬費や設置コストの低減にも繋がる。しかし、これまでのフレキシブル型太陽電池は製造コストやエネルギー変換効率の改善が必要だった。

本委託研究では、ポリマー製のフィルム基板上に作製したペロブスカイト太陽電池モジュール開発について述べる。

1.2 ペロブスカイト太陽電池の特徴

ポリマーフィルム基板上に作製できる塗布型太陽電池としては、有機薄膜太陽電池、色素増感太陽電池、及びペロブスカイト太陽電池が知られている。その中のペロブスカイト太陽電池は、活性層にヨウ化鉛メチルアンモニウム ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) 結晶などの有機無機ハイブリッド型ペロブスカイト層を用いている。2020年4月時点で25.2%と、単結晶シリコン太陽電池と同程度の変換効率が報告され、塗布型太陽電池の中で最も高効率が期待されている。



図III-2-(ハ)-B-1 ペロブスカイト太陽電池のセル構造。Mesoscopic型は色素増感太陽電池に、Planar型は有機薄膜太陽電池に類似した構造である。

ペロブスカイト太陽電池は、Mesoscopic型とPlanar型に分けられる(図1)。Mesoscopic型は、メソポーラス金属酸化物をベースとしてペロブスカイト層で光電変換することを特徴とした、色素増感太陽電池に近い構造を持ち、透明電極側に電子を、金属電極側にホールを流す順構造型が多い。一方、Planar型は有機薄膜太陽電池と同様の多層構造である。電荷移動の方向が順構造型とは異なる逆構造型の報告が多い。

標準的な活性層材料であるヨウ化鉛メチルアンモニウム $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は、バンドギャップが1.55eVであるが、Pbの一部をSnに置き換えたり、カチオンサイトの CH_3NH_3 をホルムアミジウム $\text{CH}(\text{NH}_2)_2$ に置き換えたり、ハロゲンサイトのIをBrに置き換えたりすることで、バンドギャップをShockley-Queisser limit 限界値30.5%でのバンドギャップに近づけることが出来る。これはシリコンよりも高効率にできるポテンシャルを持っていることを示している。

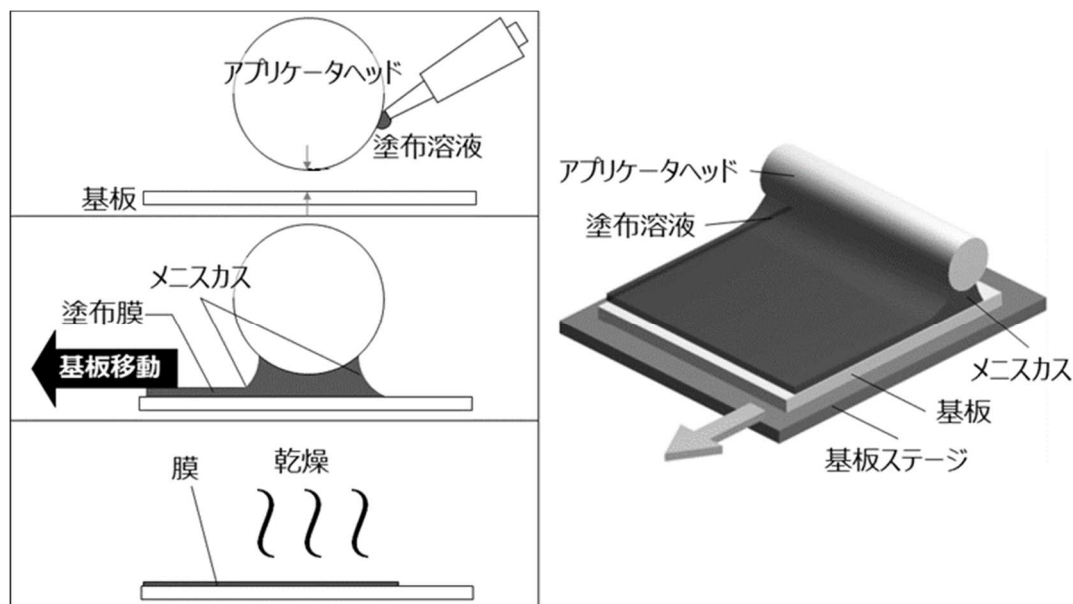
1.3 開発施策と結果

1.3.1. 超軽量太陽電池用塗布印刷/モジュール化技術の開発

東芝はポリマーフィルムを基材に用いることから、150°C以下の低温形成とマッチングが良いプ

レーナ型セル構造を選択した。

ペロブスカイト太陽電池は小面積セルの特性を維持しながら大面積化することが難しい。フィルムモジュールの高効率化技術は、大面積にしても小面積セル効率を落とさないという技術、ということもできる。そのため、ペロブスカイト層の塗布方法の選択や開発が重要な意味を持つ。東芝は独自ノウハウを多く導入したメニスカス塗布技術を有しており、ペロブスカイト太陽電池の開発にも適用した(図Ⅲ-2-(ハ)-B-2)。



図Ⅲ-2-(ハ)-B-2 メニスカス塗布技術

メニスカス塗布は一種の印刷技術であり、フィルム基板とアプリータヘッドの間に設けたギャップに塗布溶液を注入し、表面張力によるメニスカス(円弧状の液面)がギャップに形成された状態で、フィルムを移動して成膜する。従来からのスピコート法に比べて、薄膜をより均一に且つ大面積に塗布できる特長がある。また、モジュールはセルを直列に接続した構造であるため、特性の悪いセルが存在するとモジュールの特性が低下するので、大面積の均一化塗布が非常に重要となる。

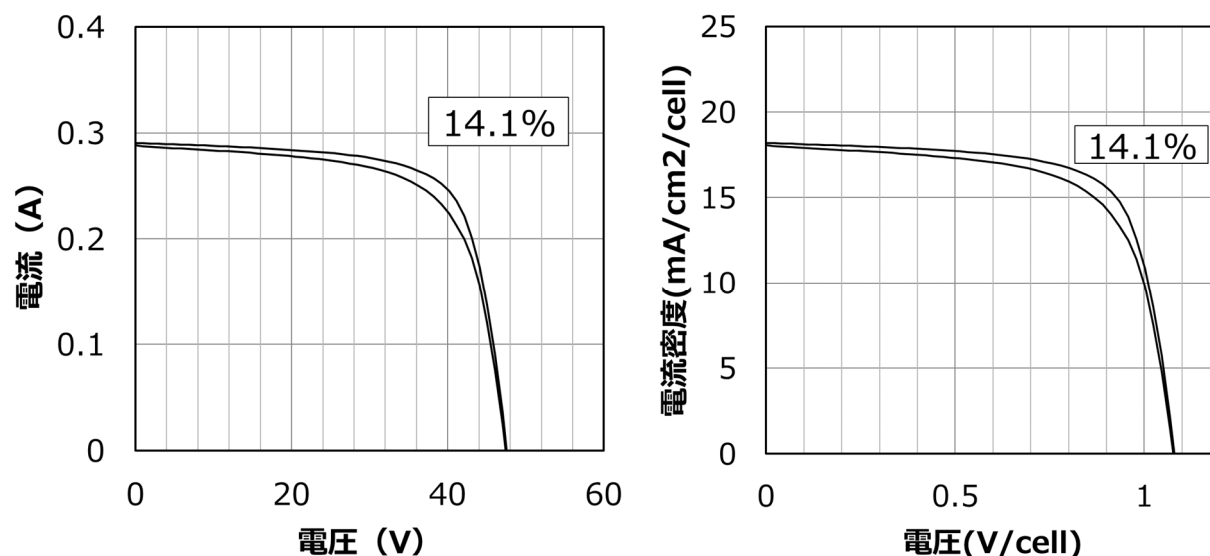
キーとなるペロブスカイト層の成膜は2-step法で行った。MAPbI₃の場合、PbI₂固形膜を形成した後、MAIを塗布し、PbI₂固形膜とMAI溶液を反応させてMAPbI₃を形成する。当初、インクのはじき等で欠陥が生じたが、PbI₂層の塗布印刷条件を改良することによって、PbI₂インクのはじき欠陥を改善することに成功し、発電現象が確認できるサンプルが得られるようになった。また、PbI₂インク条件やPbI₂層の後処理条件の改良、およびMAIインク組成の改良によって500nmより長波長側の吸光度を向上させることができた。さらに、塗布条件や乾燥条件を最適制御することによりペロブスカイト多結晶膜の均一性が向上し、セルごとの特性ばらつきを低減できた。

モジュール構造は、集積化モジュールを選択した。透明電極を用いる場合、そのシート抵抗がモジュール特性に影響を与え、電荷が移動するセル幅を短くする必要があるからである。モジュールを形成するには、P1パターンニングしたITO電極の上に、“べた”で大面積にホール輸送層、ペロブスカイト層、電子輸送層を塗布し、セル分離としてP2スクライブを行う。スクライブ法としては、“製造コストを安く”という観点からメカニカルスクライブを選択した。電荷輸送層とペロブスカイト層を分離するスクライブでは、多層膜を除去してセル間の補助電極を露出させることが重要である。ガラス基板であれば、比較的容易にP2スクライブが可能であるが、柔らかいポリマーフィルムは難しくなる。具体的には、刃圧が強いと補助電極や透明電極、フィルムが破損し、刃圧が弱いと刃が膜上を滑って補助電極上の膜を除去できないという問題である。そこで刃圧の調整に加えて、補助電極材料とその上部のホール輸送層材料の組み合わせを最適化したところ、補助電極上の膜を良好に除去することができ、スクライブ後に形成した金属電極(陰極)と補助電極の接続抵抗は、ガラス基板上で試作した場合と同程度の0.3Ωに低減できた。この値はセルの直列抵抗に比べて十分に低く、接続抵抗の発電特性への影響は無視できる。

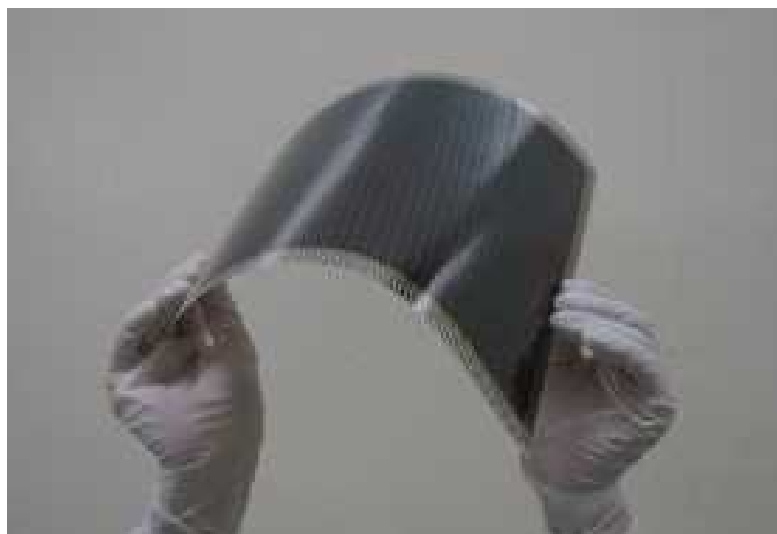
24cm×29cmサイズフィルムモジュールの変換効率が14.1%まで向上した(図Ⅲ-2-(ハ)-B-3)。達

成度は、94%となる。大型のフィルムモジュールの変換効率としては世界トップであり、大きな製品競争力となる。また、5cm×5cmサイズのフィルムモジュールで変換効率16.7%、27cm×29cmサイズのガラスモジュールで16.1%まで到達し、双方の技術を組み合わせれば、24cm×29cmサイズフィルムモジュールの変換効率15%に到達できる技術を開発できた。

フィルムモジュール写真を図III-2-(ハ)-B-4に示す。



図III-2-(ハ)-B-3 24cm×29cmサイズフィルムモジュールのI-V特性。電流—電圧特性と電流密度—セル電圧特性



フィルムモジュール写真

図III-2-(ハ)-B-4 フィルムモジュールの耐久性向上技術の開発

1.3.2 フィルムモジュールの耐久性向上技術の開発

劣化原因はセル構造やモジュール構造で異なる。東芝が開発してきたプレーナ型ペロブスカイト太陽電池の中心となる劣化要因は、以下であることが分かった。

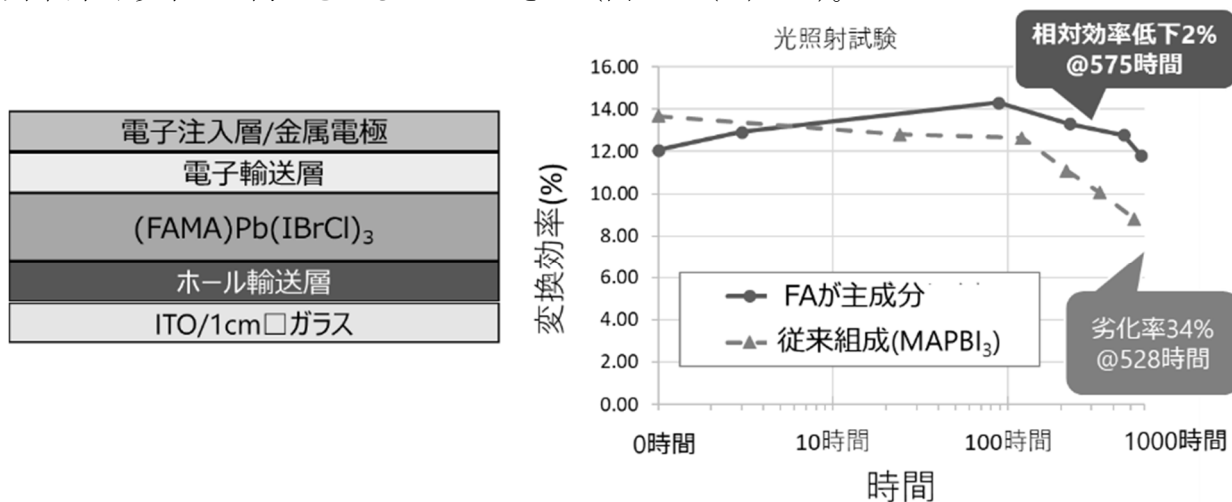
- ① ペロブスカイト層を形成しているハロゲンイオン、カチオンイオンがセル内を移動する
- ② 移動したハロゲンイオンは金属電極と反応し腐食を生じる
- ③ カチオンであるMA⁺イオンが電子と結合してMAとなり、セル外へ揮発する。

①のイオン移動は、ペロブスカイト層の組成を混晶(=Mixペロブスカイト)とすることで抑制され、プレーナ型においても耐久性が向上することが判明した。また、②に関しては、金属電極に当初Agを用いていたが、腐食しにくい金属を用いることで、耐久性が向上することが分かった。③に関しては、Mix系でのカチオン組成であるMAの大部分をFAに置き換えることで、耐久性が向上することが判明した。

東芝は封止技術を開発しないため、セルやモジュールの内部構造にのみ関係する85℃耐熱試験及び1-sun光照射試験で耐久性評価を行った。封止に関しては、同じプロジェクトに参画している

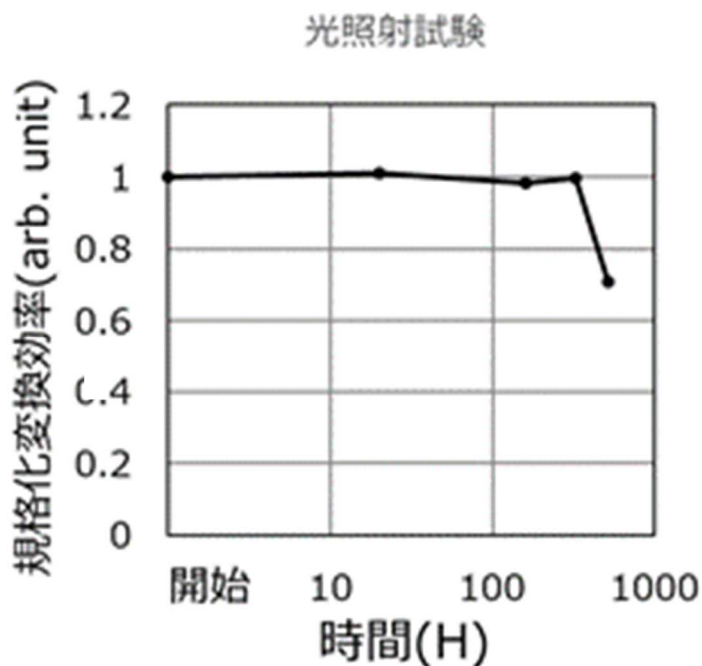
積水化学工業株式会社の封止技術を用いる。

上記①、②、③の対策により、1cm角ガラスセルにおいては、光照射試験、500時間超で相対変換効率低下2%以下まで向上させることができた（図Ⅲ-2-(ハ)-B-5）。



図Ⅲ-2-(ハ)-B-5 1cm×1cmサイズのガラスセルの光照射試験結果

5cm×5cmフィルムモジュールに前記技術を適用した結果、相対変換効率低下10%を超える試験時間が約400時間であった（図Ⅲ-2-(ハ)-B-6）。劣化がLogスケールで生じる現象とすると。達成度は96%となった。



図Ⅲ-2-(ハ)-B-6 5cm×5cmフィルムモジュールの1-sun光照射試験結果

85℃耐熱性に関しても、前記対策を行った結果、相対変換効率低下10%を超える試験時間が約550時間であり、達成度は92%となった（図Ⅲ-2-(ハ)-B-7）。

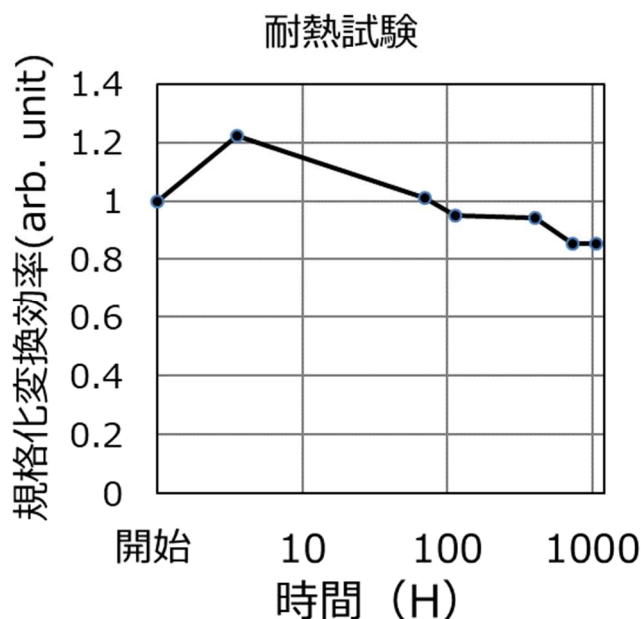


図 III-2-(ハ)-B-7 5cm×5cmフィルムモジュールの85°C耐熱試験結果

1.3.3 結論

約 30cm 角程度のフィルムモジュールへの大面積高効率化、および劣化対策による耐久性向上について技術的な向上を達成した。

2. 実用化・事業化見通し

FIT 終了の影響、及び災害に対する電力レジリエンスへの期待から、自家発電・地産地消型太陽光発電が普及すると考えられる。富士経済の資料では 2030 年の自家発電市場が 4.8GW まで伸長することが試算されている。

また、世界は脱炭素化による再エネ発電へ移行するトレンドになっており、EV の増加予測とそれに伴う国内電力不足の懸念、ヨーロッパで施行されている炭素税の国内導入の可能性があるが、再生可能エネルギーの増加により解決の道が見えてくると考えている。さらに、国内では近年の災害多発化により、電力レジリエンス、すなわち、安心・安全な電力確保の要求が高まっているが、その解決には都市部での地産地消とマイクログリッド化による再エネメガソーラー導入が効果的である。

本プロジェクトで開発した超軽量フィルム型太陽電池は工場の金属折板屋根などとマッチングが良く、また、結晶シリコン太陽電池とは異なりデザイン性に優れるため、特に人口の多い都市部において設置の要求が高くなると考えている。都市部においては Virtual Power Plant (VPP) を活用し、都市部においてもメガソーラーを形成することができる。このシステムにおいては、太陽電池モジュールメーカーのみならず、蓄電池市場も活性化し、災害発生による各種事業の停止を抑制し、地球温暖化による災害規模拡大も低減させることができる。フレームレスで簡便な設置による設置コスト低減が可能であり、設置期間の短縮や、丸めでの運搬や保管による費用の低減で、顧客の初期投資を抑えることができる利点も大きい。

現時点においては、結晶シリコン太陽電池が重量制限・耐震制限のため設置できない工場や公共施設が相当数あり、結晶シリコン太陽電池と市場が住み分けられることも意味しており、生産数が少なくコスト高になりやすい上市初期においても、製品競争力を持つことができる。性能が需要喚起可能な仕様に到達すれば、結晶シリコン太陽電池事業を既に行っているメーカーでも、その事業を損なうことなく売り上げを伸ばすこともできる。さらに、モジュール変換効率 20%以上、実用寿命 15 年以上が低コストで達成されれば、超軽量フィルム型ペロブスカイト太陽電池は、都市部における結晶シリコン太陽電池市場のゲームチェンジを行うことができ、日本の太陽電池事業の再活性化を図れる。

これらの市場におけるビジネスモデルを立案し、事業部門が 2025 年度中をめどに製品化・上市を目指す。

3. 波及効果

学会や講演会で本プロジェクトの成果を講演し、技術の普及に努めた。

4. 今後の展開

本プロジェクトの成果をさらに進化させるために、2020年度から開始される。「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の新市場創造技術開発／フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発（重量制おこのある屋根向け）（超軽量ペロブスカイト系太陽電池の研究開発）（超軽量モジュール技術の研究開発）」に参画し、さらに技術開発をすることとなった。このプロジェクトにおいて、上市における保証効率20%、使用期間15年の使用達成を目指す。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0(0)	6(2)	8(5)	17(13)	1(0)	32(20)
論文	0	1	0	0	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	0	3(1)	4(1)	2(0)	10(4)	19(6)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	4	20	4	28
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】(国内の公開、登録のみ記載)

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	株式会社 東芝	P2016-178505	国内	2016/9/13	登録	光電変換素子	丁香美、 五反田武志
2	株式会社 東芝	P2016-185215	国内	2016/9/23	公開	光電変換素子、光電変換素子の製造方法、および光電変換素子の製造装置	五反田武志、 丁香美
3	株式会社 東芝	P2017-010525	国内	2017/1/24	登録	光電変換素子およびその製造方法	森茂彦、 五反田武志、 大岡青日、 都鳥顕司
4	株式会社 東芝	P2017-042636	国内	2017/3/7	登録	半導体素子およびその製造方法	五反田武志、 大岡青日
5	株式会社 東芝	P2017-155876	国内	2017/8/10	登録	半導体素子およびその製造方法	五反田武志
6	株式会社 東芝	P2017-176774	国内	2017/9/14	登録	光電変換素子とその製造方法	大岡青日、 中尾 英之
7	株式会社 東芝、 東芝エネ ルギーシ ステムズ 株式会 社	P2017-178161	国内	2017/9/15	登録	光電変換素子、その製造方法、およびその製造装置	森茂彦、 中尾英之、 五反田武志、 大岡青日、 都鳥顕司、 藤永賢治
8	株式会社 東芝	P2019-148822	国内	2019/8/14	公開	半導体素子の製造方法	五反田武志

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	T. Gotanda, S. Mori, A. Matsui, H. Oooka	Toshiba Corp.	Effects of gas blowing condition on formation of perovskite layer on organic scaffolds	Chemistry Letters, Volume 45, Issue 7, 2016, Pages 822-824	有	2016/7/5

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	五反田武志	株式会社東芝	有機を下地層とするペロブスカイト形成過程におけるガスブローの影響	2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/16
2	都鳥顕司	株式会社東芝	ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発（超軽量太陽電池モジュール技術の開発）	H28年度 NEDO 新エネルギー一部成果報告会	2016/10/31
3	T. Gotanda	株式会社東芝	Effects of Gas Blowing on the Formation of a Mixed Halide Perovskite Layer on Organic Scaffolds	2016 MRS Fall Meeting	2016/12/2
4	森茂彦	株式会社東芝	ポリマー/ITO基板を用いたペロブスカイト太陽電池の耐熱性評価	2017年 第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/17
5	森茂彦	株式会社東芝	ポリマー/ITO基板を用いたペロブスカイト太陽電池の耐熱性評価	応用物理学会	2017/3/17
6	H. Jung	株式会社東芝	Development of low temperature solution-processed perovskite photovoltaic cells and modules	International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics 2017	2017/5/23
7	都鳥顕司	株式会社東芝	ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発（超軽量太陽電池モジュール技術の開発）	H29年度 NEDO 新エネルギー一部成果報告会	2017/9/22
8	都鳥顕司	株式会社東芝	ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発（超軽量太陽電池モジュール技術の開発）	H30年度 NEDO 新エネルギー一部成果報告会	2018/10/4
9	都鳥顕司	株式会社東芝	フィルム型ペロブスカイト太陽電池の開発	KISTEC Innovation Hub in Ebina 2018 太陽電池フォーラム	2018/10/25
10	都鳥顕司	株式会社東芝	ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発	日本化学会第99回春季年会 ATP 招待講演	2019/3/25
11	Shigehiko Mori	株式会社東芝	Large Size (703 cm ²) and Film Based Perovskite Photovoltaic Module Development with Inverted Device Structure	International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV19)	2019/5/13
12	天野昌朗	株式会社東芝	フィルム型ペロブスカイト太陽電池の開発	(独)学振 175委員会 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/5
13	天野昌朗	株式会社東芝	フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発	応用電子物性分科会7月研究例会	2019/7/26
14	都鳥顕司	株式会社東芝	ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発	電気通信大学 i-PERC シンポジウム	2019/8/2

15	都鳥顕司	株式会社 東芝	ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発（超軽量太陽電池モジュール技術の開発）	2019年度 NEDO 新エネルギー一部成果報告会	2019/10/18
16	Shigehiko Mori	株式会社 東芝	Development of a Large-area Film-based Perovskite Photovoltaic Module	THE 29 TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC SCIENCE & ENGINEERING (PVSEC29)	2019/11/8
17	都鳥顕司	株式会社 東芝	フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発	第4回フロンティア太陽電池セミナー	2019/11/26
18	Shigehiko Mori	株式会社 東芝	Film-Based Large-area Perovskite Photovoltaic Module Development	Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20)	2020/1/21
19	Shigehiko Mori	株式会社 東芝	Process Development of Perovskite Photovoltaic Module on the Polymer Film	2020 International workshop on standardization of measurement protocols for perovskite solar cell	2020/1/23
20	都鳥顕司	株式会社 東芝	ペロブスカイト太陽電池大面積モジュール開発	日本表面真空学会 2020年1月研究例会	2020/1/29

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	株式会社 東芝	5cm×5cm サイズのフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールで世界最高の変換効率 10.5% を達成	東芝 ニュースリリース	2017年9月25日
2	株式会社 東芝	変換効率 10%超を達成	電気新聞	2017年9月26日
3	株式会社 東芝	東芝がフィルム基板を使うペロブスカイト太陽電池で変換効率 10%超え	日経テクノロジーonline(日経BP社)	
	株式会社 東芝		日経電子版等、上記でweb記事が30サイト程度転載	
4	株式会社 東芝	5cm×5cm サイズで変換効率 13.7%を達成したフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール	東芝レビュー Vol173 No2	2018年3月1日
5	NEDO	面積世界最大のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールを開発	NEDO ニュースリリース	2018年6月18日
6	株式会社 東芝	面積世界最大のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールを開発	東芝 ニュースリリース	2018年6月18日
7	株式会社 東芝	次世代太陽電池を大型化	読売新聞 夕刊	2018年6月18日
8	株式会社 東芝	同上	電気新聞	2018年6月19日
9	株式会社 東芝	NEDO・東芝世界最大の面積	日刊工業新聞	2018年6月19日
10	株式会社 東芝	NEDO と共同で世界最大の面積のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール開発	株式新聞	2018年6月19日
11	株式会社 東芝	同上	化学工業日報	2018年6月19日

12	株式会社 東芝	同上	電波新聞	2018年6月20日
13	株式会社 東芝	印刷技術で安価に製造できる「ペロブスカイト型」という次世代太陽電池で大型化につながる技術を開発した。	日経新聞	2018年6月25日
	株式会社 東芝	同上	日経電子版等、上記でweb記事が40サイト以上転載	
14	株式会社 東芝	東芝、世界最大のペロブスカイト太陽電池開発	PVeye	2018年7月25日
15	株式会社 東芝	ペロブスカイト型太陽電池 安くて薄い、次世代電池の本命	日経ビジネス	2018年7月30日
16	株式会社 東芝	「Solar cell efficiency Tables」で当社が開発したペロブスカイト太陽電池モジュールが世界一のエネルギー変換効率として掲載	東芝 ニュースリリース	2018年8月9日
	株式会社 東芝	同上	OPTRONICS等、上記内容でweb記事数サイトが転載	
17	株式会社 東芝	塗って作る、軽くて曲がる電池！？ ペロブスカイト太陽電池の可能性	Toshiba CLIP	2018年9月26日
18	株式会社 東芝	世界を変える素材力 次世代担う4技術 未来の太陽電池	日経ヴェリタス	2018年9月30日
19	株式会社 東芝	未来の太陽電池、石の紙… 世界変える日本の素材力	日経電子版	2018年9月30日
20	株式会社 東芝	5cm×5cmサイズのフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールで世界最高の変換効率10.5%を達成	東芝アニュアルレポート2018(2017年度)事業編(日本語版、英語版)	2018年10月発行
21	株式会社 東芝	脱炭素 日本の実力発揮	日刊工業新聞	2018年12月3日
22	株式会社 東芝	世界最大面積のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール	東芝レビュー Vol174 No2	2019年3月1日
23	株式会社 東芝	東芝・高耐久PSCを開発-電極薄型化で両面受光も	電子デバイス産業新聞	2019年3月21日
24	株式会社 東芝	東芝が狙う次世代太陽電池、ペロブスカイトやタンデム型を商業化	電子デバイス産業新聞	2019年3月29日
25	株式会社 東芝	東芝が狙う次世代太陽電池、ペロブスカイトやタンデム型を商業化	Yahoo	2019年4月1日
26	株式会社 東芝	東芝進める太陽電池の新技術	フジサンケイビジネスアイ	2019年4月29日
27	株式会社 東芝	東芝進める太陽電池の新技術	Yahoo	2019年5月7日
28	株式会社 東芝	塗布技術を用いたフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発	シーエムシー書籍「ペロブスカイト太陽電池の開発最前線」	2019年7月31日

【その他】

なし

C 低コスト R2R 太陽電池製造技術の開発（積水化学株式会社）

1. 成果詳細

以下、中間目標・最終目標とその成果と達成状況について概説する。

【中間目標(2017 年度)】

- ・ JIS 規格 C8938 準拠の耐久性試験 5 項目について、変換効率 10%の 1cm 角程度の超軽量セルの相対低下率 10%以下を達成する。
- ・ 耐久性・コスト等の観点から超軽量モジュールを達成し得る材料選定を行う。
- ・ 太陽電池セル材料・構造に関する要素技術を開発し、量産時に超軽量モジュール製造コスト 15 円/W に必要な条件を明確化する。
- ・ 10cm 角程度の超軽量セルにて変換効率ばらつき $3\sigma < 1\%$ を達成する。
- ・ オール R2R プロセスにて作製した 30cm 角の各領域（特性の均一性評価のためにあらかじめ設定した各領域）において 1cm 角の超軽量セルにて変換効率 5%以上を達成する

【最終目標(2019 年度)】

- ・ JIS 規格 C8938 準拠の耐久性試験 5 項目について、変換効率 17%の 5cm 角程度の超軽量モジュールの相対低下率 10%以下を達成する。
- ・ 超軽量基板を用いた小面積セルで変換効率 18.8% (2mm 角) を達成する。また東芝と連携し、30cm 角程度の超軽量モジュールで 15%、あるいは 15cm 角程度の超軽量モジュールで 17%を達成する。
- ・ 量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現し得る、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術を開発する。
- ・ 封止部材のコストを量産時 5 円/W 以下が達成可能な要素技術を構築する。
- ・ 30cm 角モジュールの屋外設置による実曝評価により、耐久性、設置・施工時の技術的課題を明確にすると共に、耐久性 10 年確保に向けた課題を抽出する。

【研究開発の成果と達成状況】

1. 超軽量太陽電池の耐久性の向上について

最終目標「JIS 規格 C8938 準拠の耐久性試験 5 項目について、変換効率 17%の 5cm 角程度の超軽量モジュールの相対低下率 10%以下を達成する。」に対し、独自の封止材料・プロセスと新規ホール輸送層を開発することにより、JIS 規格 C8938 準拠の耐久性試験 5 項目について、変換効率 13%の 3cm 角超軽量モジュールの相対低下率 10%以下を達成した。

変換効率が 13%と目標の 17%より低いが、 0.1cm^2 の超軽量ミニセルにおいては変換効率 18%と耐久性の両立が出来てきており、この材料を 3cm 角超軽量モジュールに適用することにより、2020 年度末までに達成できる見込みである。

2. R2R プロセス材料・技術の開発

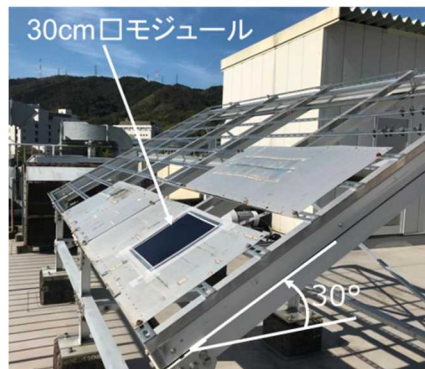
最終目標「超軽量基板小面積セルで変換効率 18.8%(2mm 角)を達成する。」については、PET フィルムを基材として適用することにより、目標値を達成できている。

また、最終目標「30cm 角程度の超軽量モジュールで 15%を達成する」について、金属箔基板を使用し、全層 R2R プロセスで作製した 30cm 角程度の超軽量モジュールで 11.4%まで達成できている。基材を金属箔から高い変換効率が出ている PET 基材に変更することにより、目標値の変換効率を達成しようとしているが、基材変更に伴い製造設備改造が必要になり計画遅れが発生している。修正計画では 2020 年度末までに達成できる見込みである。

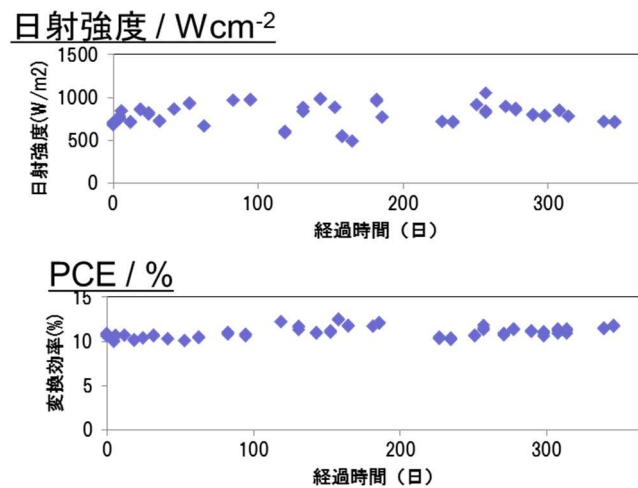
「封止部材のコストを量産時 5 円/W 以下が達成可能な要素技術を構築する」に関しては、独自の封止材料・封止プロセス技術を構築し、ペロブスカイト太陽電池に必要な水蒸気バリア性を明確化し、量産時 5 円/W 以下が達成可能な要素技術を構築できた。

【成果の意義】

上記により得られた高耐久超軽量モジュールを用いて、図Ⅲ-2-(ハ)-C-1 に示すように屋外実証試験を進めている。現在 1 年以上屋外に曝露しているが、図Ⅲ-2-(ハ)-C-2 に示すように性能は安定しており、ペロブスカイト太陽電池の屋外使用の可能性を実証できたと考えている。



図Ⅲ-2-(ハ)-C-1 超軽量ペロブスカイトモジュールを用いた屋外暴露試験風景



図Ⅲ-2-(ハ)-C-2 超軽量ペロブスカイトモジュールを用いた屋外暴露試験結果

2. 実用化・事業化見通し

FIT終了の影響、及び災害に対する電力レジリエンスへの期待から、自家発電・地産地消型太陽光発電が普及すると考えられる。富士経済の資料では2030年の自家発電市場が4.8GWまで伸長することが試算されている。

また、世界は脱炭素化による再エネ発電へ移行するトレンドになっており、EVの増加予測とそれに伴う国内電力不足の懸念、ヨーロッパで施行されている炭素税の国内導入の可能性があるが、再生可能エネルギーの増加により解決の道が見えてくると考えている。さらに、国内では近年の災害多発化により、電力レジリエンス、すなわち、安心・安全な電力確保の要求が高まっているが、その解決には都市部での地産地消とマイクログリッド化による再エネメガソーラー導入が効果的である。

本プロジェクトで開発した超軽量フィルム型太陽電池は工場の金属折板屋根などとマッチングが良く、また、結晶シリコン太陽電池とは異なりデザイン性に優れるため、特に人口の多い都市部において設置の要求が高くなると考えている。都市部においてはVirtual Power Plant (VPP) を活用し、都市部においてもメガソーラーを形成することができる。このシステムにおいては、太陽電池モジュールメーカーのみならず、蓄電池市場も活性化し、災害発生による各種事業の停止を抑制し、地球温暖化による災害規模拡大も低減させることができる。フレームレスで簡便な設置による設置コスト低減が可能であり、設置期間の短縮や、丸めでの運搬や保管による費用の低減で、顧客の初期投資を抑えることができる利点も大きい。

現時点においては、結晶シリコン太陽電池が重量制限・耐震制限のため設置できない工場や公共施設が相当数あり、結晶シリコン太陽電池と市場が住み分けられることも意味しており、生産数が少なくコスト高になりやすい上市初期においても、製品競争力を持つことができる。性能が需要喚起可能な仕様に到達すれば、結晶シリコン太陽電池事業を既に行っているメーカーでも、その事業を損なうことなく売り上げを伸ばすこともできる。さらに、モジュール変換効率20%以上、実用寿命15年以上が低コストで達成されれば、超軽量フィルム型ペロブスカイト太陽電池は、都市部における結晶シリコン太陽電池市場のゲームチェンジを行うことができ、日本の太陽電池事業の再活性化を図れる。

これらの市場におけるビジネスモデルを立案し、事業部門が2025年度中をめどに製品化・上市を目指す。

3. 波及効果

学会や講演会で本プロジェクトの成果を講演し、技術の普及に努めた。

4. 今後の展開

本プロジェクトの成果をさらに進化させるために、2020年度から開始される。「太陽光発電主力電源化推進技術開発／太陽光発電の新市場創造技術開発／フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）（超軽量ペロブスカイト系太陽電池の研究開発）（超軽量モジュール技術の研究開発）」に参画し、さらに技術開発をすることとなった。このプロジェクトにおいて、上市における保証効率20%、使用期間15年の使用達成を目指す。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	2 (0)	4 (0)	3 (0)	2 (0)	0 (0)	11 (0)
論文	0	0	0	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	2	4	3	3	2	14
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	1	1
その他	0	0	0	1	0	1

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	積水化学工業株式会社	特願 2016-018107	国内	2016/2/2	公開	太陽電池	福本雄一郎
2	積水化学工業株式会社	特願 2016-032104	国内	2016/2/23	登録	フレキシブル太陽電池	樽林哲也
3	積水化学工業株式会社	特願 2017-059352	国内	2017/3/24	公開	フレキシブル太陽電池	早川明伸
4	積水化学工業株式会社	特願 2017-061161	国内	2017/3/27	公開	太陽電池	早川明伸
5	積水化学工業株式会社	特願 2017-066008	国内	2017/3/29	公開	太陽電池	樽林哲也
6	積水化学工業株式会社	特願 2017-068919	国内	2017/3/30	公開	太陽電池	樽林哲也
7	積水化学工業株式会社	特願 2018-058482	国内	2018/3/26	放棄	太陽電池	浅野元彦
8	積水化学工業株式会社	特願 2018-056577	国内	2018/3/23	登録	太陽電池の製造方法および太陽電池	宇野智仁
9	積水化学工業株式会社	特願 2018-059748	国内	2018/3/27	公開	フレキシブル太陽電池及びフレキシブル太陽電池の製造方法	早川明伸
10	積水化学工業株式会社	特願 2019-051297	国内	2019/3/19	出願	太陽電池	早川明伸
11	積水化学工業株式会社	特願 2019-068379	国内	2019/3/29	出願	太陽電池の製造方法、及び太陽電池	早川明伸

【論文】

なし

【研究発表・講演】

なし

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

D 高性能・高信頼性確保製造技術の開発（アイシン精機株式会社）

1. 成果詳細

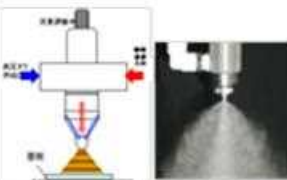

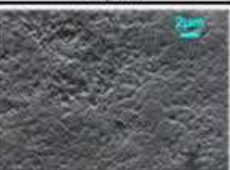

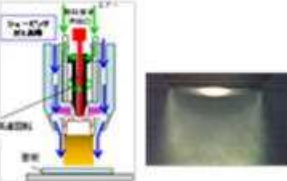

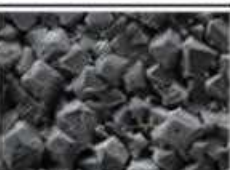

1.1 スプレー塗布工法による大面積モジュール製造技術の開発

1.1.1 ペロブスカイト層の膜質向上と貧溶媒を用いないスプレー法の開発

ペロブスカイトセルを大面積モジュール化するための要素技術として、スピコートに代わる新たな製膜方法とセル分離方法が必要である¹⁾。小型セルはスピコートの繰り返しによりデバイスを作製することが可能であるが、スピコート法では大面積に均一に成膜を行うには設備の限界があるため、大面積モジュールには新たな成膜法を採用する必要がある²⁾。

セルの大型化と大面積モジュール化の開発を進めるに当たり、スピコート法による作製には限界が存在する。特に、大型モジュールにスピコート法を適用する場合、成膜の均質化には限界がある。モジュールサイズによっては、基板を回転させるため、塗布液の歩留り向上や安定性の確保といった課題も想定され、これらの課題を解決できる新たな塗工方法の導入が必要である。ペロブスカイト太陽電池の各層（ブロッキング層、メソポーラス層、ペロブスカイト層、ホール輸送層、背面電極層）の成膜法については、スピコート以外にも種々の方法が提案されているが³⁾、設備コストや材料の歩留り、製膜速度やモジュール形状への対応など総合的に判断し、印刷法、スプレー法の2種を候補とした^{4), 5)}。ペロブスカイト層を成膜するスプレー法については、霧化方式の検討を行い、セルを用いて高性能が得られる適切な方式を選定した。表III-2-(ハ)-D-1に、ペロブスカイト層を二流体方式（方式A）と回転霧化式（方式B）で成膜した場合の膜表面状態の比較を示す。方式Bの場合、20 μm 程度の角型の粗大化した結晶が形成され、粒径が不均一で、10%未満の低い変換効率となるのに対して、方式Aの場合には、2~3 μm 程度の丸みのある微細な結晶が形成され、粒径は比較的均一で緻密な膜になり、13%以上の高い変換効率を得られることがわかった。この結果に基づき、ペロブスカイト層の成膜には、二流体方式のスプレーを選択した。

表III-2-(ハ)-D-1 スプレー方式によるペロブスカイト層の表面状態の比較

スプレー方式	PVK層 表面状態			性能
	$\times 500$	$\times 5,000$	$\times 50,000$	
方式 A 				$\geq 13\%$
2~3 μm 程度の丸みのある微細な結晶 粒径は比較的均一				
方式 B 				$< 10\%$
20 μm 程度の角形の粗大化した結晶 粒径が不均一				

均質な表面を有するペロブスカイト結晶の形成には、スプレー霧化の方式だけではなく、前駆体溶液の組成、すなわち溶質の濃度、溶媒の種類、各種添加剤の配合など、スピコート法とは異なる溶液が必要となった。均質なペロブスカイト結晶層成膜のため、溶液に各種添加剤を配合することにより膜質の改善を行い、平滑で微細なペロブスカイト粒子で構成された膜が作製できることが分かり、この方法で10%程度の性能を示すモジュールを作製できることを示した。しかしながら、添加剤によるモジュールの耐久性への影響が未知であり、懸念が残るため、残留する可能性のある添加剤の使用は回避することが必要であると判断した。そこで、大面積化と製造プロセスのコスト低減に向けて、添加剤を必要とせず、かつスピコートで高性能な膜を成膜するために必要な貧溶媒を用いない（貧溶媒レス）プロセスの検討を進めた。貧溶媒レス化の意義は、大面積化で不安定要素となる工程を削減することでばらつきを低減し、貧溶媒塗布プロセス自体を排除して工程の省略と使用材料を削減することで低コスト化を図るとともに、環境負荷の高い溶媒（クロロベンゼン、トルエン等）を排除してクリーンなプロセスを実現することである。貧溶

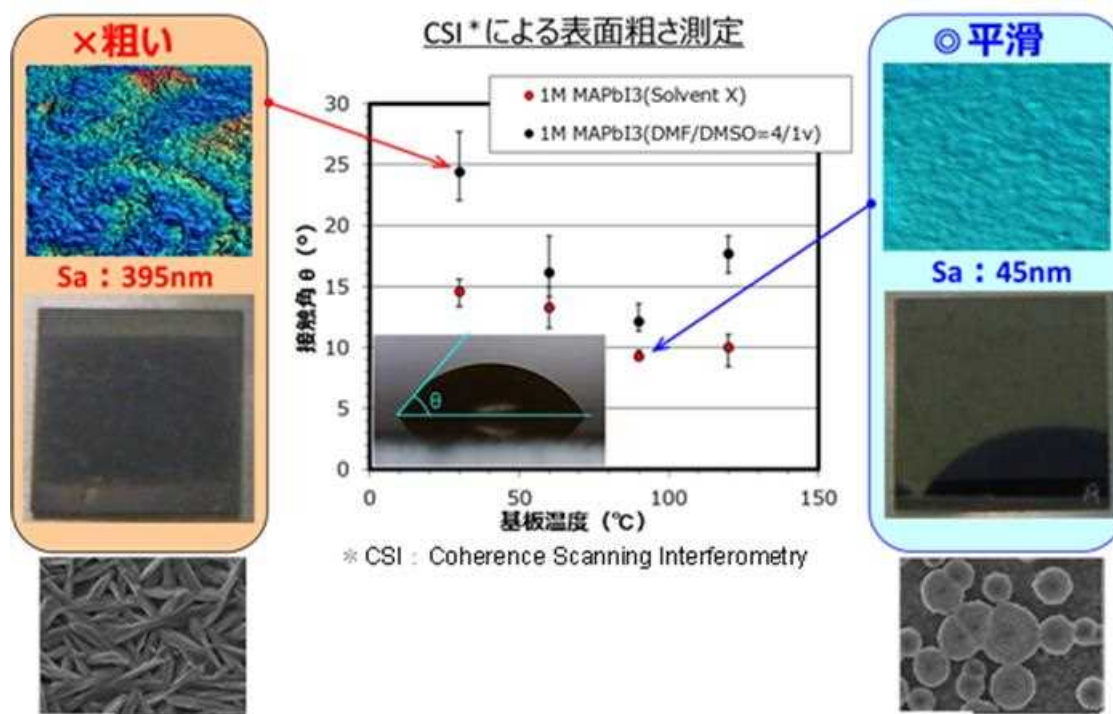
媒を用いないスプレー塗布の溶媒に求められる要件は下記の4項目である。

- ・ヨウ化鉛 (PbI₂)、ヨウ化メチルアンモニウム(MAI)等の塩を高濃度に溶解できること
- ・針状結晶成長が抑制できること
- ・高霧化(微細ミスト化)とメソポーラス層浸透が両立できる適度な蒸気圧であること
- ・大面積に対応するため、安価で入手容易な溶媒であること。

種々の溶媒とそれらの組合せの中から、溶媒の濡れ性を検討し、上記の要件を満たす新規の溶媒として、極性混合溶媒 X を見出した。

図III-2-(ハ)-D-1に、従来の溶媒である DMF/DMSO 混合溶媒と新規の極性混合溶媒 X について、クロロベンゼンやトルエンなどの貧溶媒を用いないで MAPbI₃ 薄膜を直接形成した場合の基板温度と接触角の関係およびスプレー法で形成したペロブスカイト薄膜の表面・結晶の状態を示す。

従来の溶媒では接触角が大きく場合、針状結晶が生成され、表面が粗くなる(図III-2-(ハ)-D-1 左側)のに対して、接触角が小さくなるように最適化した極性混合溶媒 X を用いることで、針状結晶を生成することなく、平板状結晶のみを選択的に生成させることができ、平滑な表面を持つペロブスカイト薄膜(図III-2-(ハ)-D-1 右側)が得られることを見出した。このように、理想の表面をもつペロブスカイト層が得られる溶媒の要件が明らかとなった。



図III-2-(ハ)-D-1 溶媒タイプ、基板温度と接触角の関係とスプレー成膜した薄膜の表面/結晶の状態

1.1.2 スプレー条件の最適化

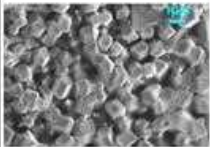
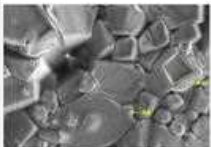
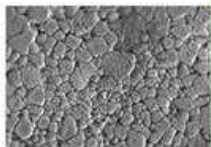
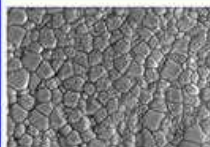
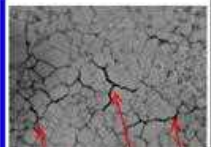
ペロブスカイト層を構成する結晶の状態と性能の関係は非常に密接であることを表III-2-(ハ)-D-1に示した。性能バラツキを抑制し、より高い変換効率を得るため、ペロブスカイト結晶の状態を制御する結晶化時の条件として、スプレー塗布時の基板温度とその後のアニール温度について、それらの最適な組合せを検討した。この二つの温度の組合せは、アニール温度を基板温度よりも高くすることで、スプレー塗布で多数の結晶核を生成させ、その核をより高密度化するため、アニール時に粒成長させるという考え方である。

表III-2-(ハ)-D-2に、スプレー条件としての基板/アニール温度の組合せと得られたペロブスカイト層の表面状態と太陽電池性能を示す。変換効率、J_{sc}、V_{oc}、FFの値は、最も高い性能を示した条件のセルの性能を100とした相対値を示している。

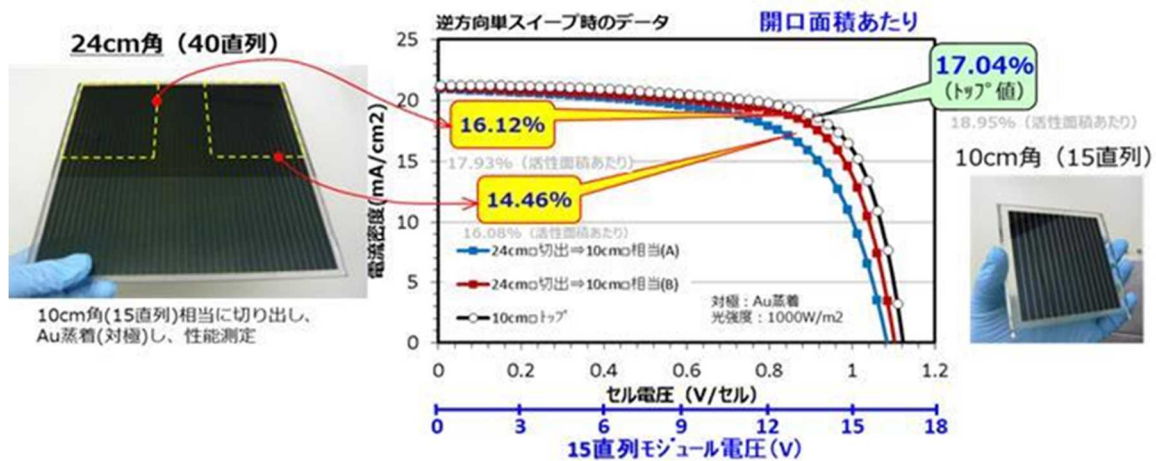
表III-2-(ハ)-D-2中に青枠で示した条件の時に最も高い性能が得られ、ペロブスカイト結晶の状態は微細で均一で、緻密な膜が形成される。基板温度が低い場合、粒子が粗大化し、粒界が明確な状態となり、アニール温度が低い程、その傾向が顕著であった。基板温度が高い場合、結晶は微細となるが、

粒成長が過度に進行するため、クラックが発生し、性能は低下することがわかった。
 このように、種々の基板温度とアニール温度の組合せにおいて、ペロブスカイト層の結晶のモルフォロジと性能の関係を関連付けることにより、理想とする結晶状態が明確となり、スプレー条件の最適化を行うことができた。

表III-2-(ハ)-D-2 基板／アニール温度の組合せと得られたペロブスカイト層の表面状態及び太陽電池性能

基板温度 アニール 温度	低		中		高
	低	高	低	高	高
PVK層 表面 (×10,000)					
状態	粗な膜 粒界が明確	PVK結晶 粗大 粒界が明確	PVK結晶 微細	PVK結晶 微細・均一 緻密な膜	PVK結晶微細化 クラック
変換効率	77	87	94	100	90
Jsc	79	99	99	100	96
Voc	98	97	101	100	102
FF	99	91	94	100	92

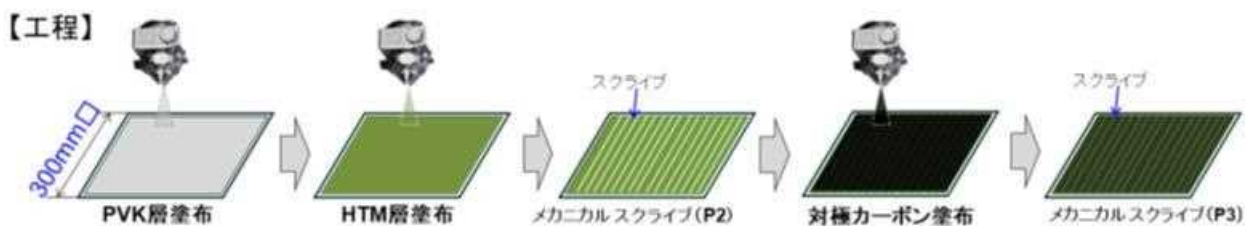
1.1.3 大面積化した時のバラツキ低減策の検討と 240mm角モジュールの作製
 実際にモジュールを大面積化し高い変換効率を得るには、(1)大面積塗布の均一性確保、(2)直列接続時の損失低減、(3)大面積対極の低抵抗化の3つの課題を解決する必要がある。100mm角からさらに大型の240mm角へと面積を拡大するには、面内へ均一な成膜ができるスプレー条件を見出す必要がある。前述の添加剤や貧溶媒を用いないで、新規溶媒を用いて240mm角のモジュールまで大面積化するため、ペロブスカイト層およびホール輸送層の成膜に適用することを目的に、スプレー条件の検討を行った。前述の課題(1)に対しては、240mm角のモジュールを想定し、同サイズの領域に小型セルを配置し、種々の条件でスプレーしてペロブスカイト層とホール輸送層を形成し、対極として金を蒸着してセルを作製した。最も安定で高い変換効率を示したスプレー条件では、1Sun下で測定した各小型セルの性能はどのセルも15%を超える変換効率を示し、変換効率で±0.5%程度の幅に収まる安定した性能となることを確認した。この条件を適用することで、240mm角の大面積モジュールにおいて15%を超える性能が期待できる。課題(2)に対しては、前述の課題(1)の検討で見出したスプレー条件を基に改良を加え、100mm角の15直列モジュールとスケールアップした240mm角の40直列モジュールを、ペロブスカイト層およびホール輸送層をスプレー法で成膜し、メカニカルスクライブを組み合わせて作製した。このサイズまで拡大しても、100mm角と同等のペロブスカイト層が形成できることを確認した。100mm角モジュールとの性能比較するため、240mm角を100mm角相当(15直列)に切り出し、対極として金を蒸着したモジュールの太陽電池特性を測定し、100mm角モジュールと比較した。その結果を図III-2-(ハ)-D-3に示す。240mm角から100mm(15直列)相当に切り出したモジュールの1Sun下での開口面積あたりの変換効率は、逆方向スイープの場合で14.46%~16.12%(活性面積あたりで16.08~17.93%)であり、100mm角のモジュールで確認したトップの性能である17.04%(活性面積あたりで18.95%)に匹敵する高い性能を示すことを確認できた。
 なお、課題(3)に対しては、後述する水系溶媒のカーボン塗料を用いてスプレー塗布したカーボン対極で、蒸着法で成膜した金対極と同等の性能が確認できているため、解決の目処があるものと考えている。



図III-2-(ハ)-D-3 240mm角のペロブスカイトモジュールのJV特性

1.1.4 300mm角モジュールへのカーボン対極の適用

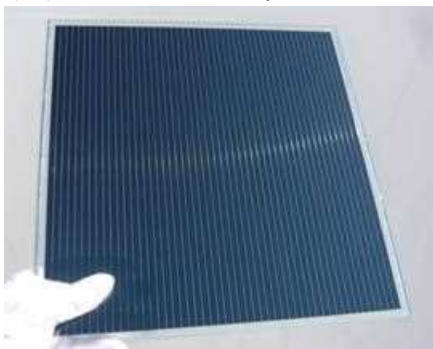
前節で述べてきたように、大面積モジュールを作製するための要素技術が確立できてきた。構築してきた技術を活用し、最終目標のサイズである300mm角モジュールを作製するために、図III-2-(ハ)-D-4に示すように、ペロブスカイト層、ホール輸送層およびカーボン背面電極層の成膜工程にスプレー法を、パターンニングにメカニカルスクライブを適用し、240mm角からさらに大面積化を進め、50直列の300mm角モジュールを作製した。



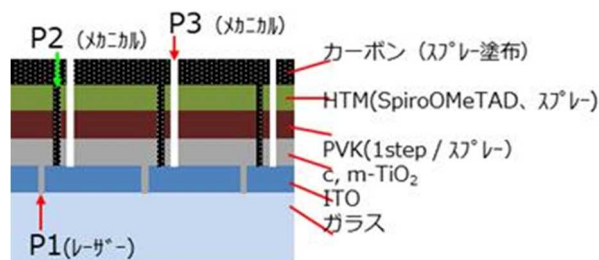
図III-2-(ハ)-D-4 ペロブスカイト太陽電池モジュールのスプレー工程

図III-2-(ハ)-D-5に、ペロブスカイト層、ホール輸送層およびカーボン対極層をスプレー法により成膜して作製した、300mm角50直列のモジュールの外観、断面構造及び性能を示す。試作したモジュールは、図III-2-(ハ)-D-5(b)に示す断面のように、300mm角でホール輸送層塗布後にP2メカニカルスクライブを、カーボン対極層塗布後にP3メカニカルスクライブをそれぞれ形成した50直列化したモノリシック構造である。その変換効率は、図III-2-(ハ)-D-5(c)に示すように、開口面積あたりで12.97~13.08%(活性面積あたり14.43~14.55%)であり、実用的なカーボン対極材料とスプレー法を用いて作製した大面積モジュールで10%を大きく超える変換効率を確認した。さらに、カーボン対極層の塗布成膜条件を見直した結果、図III-2-(ハ)-D-5(d)に示すように、変換効率が開口面積あたりで13.83~14.14%(活性面積あたり15.38~15.73%)へと1ポイントの性能向上が確認できた。各層の塗布成膜条件をさらに見直すことで、さらに性能が向上する余地はあると考えられる。

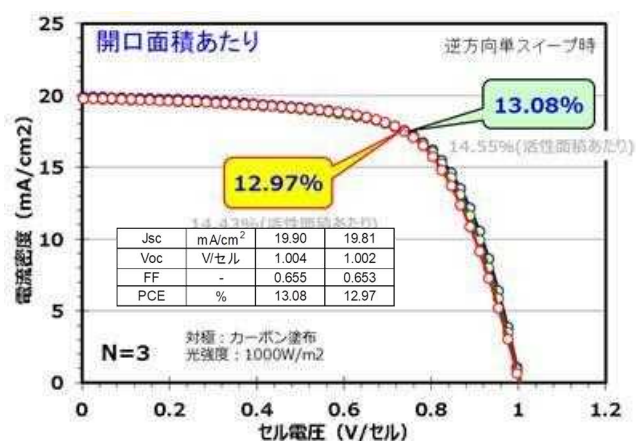
(a) モジュールの外観



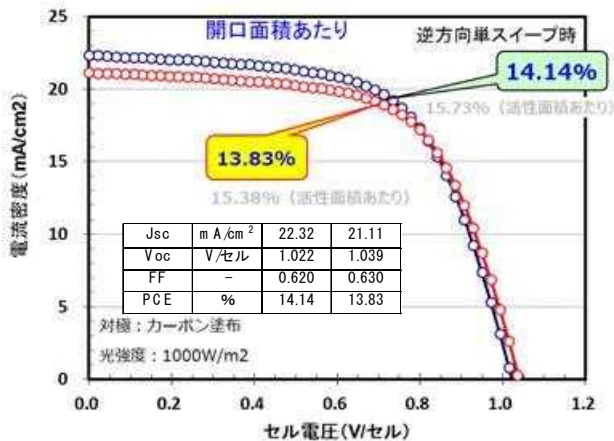
(b) 断面構造



(c) JV、特性



(d) カーボン対極層塗布条件見直し後の特性



図III-2-(ハ)-D-5 試作した300mm角モジュールの外観、断面構造およびJV特性

1.2 塗布型カーボン電極適用による貴金属 (Au 等) 蒸着膜の削減

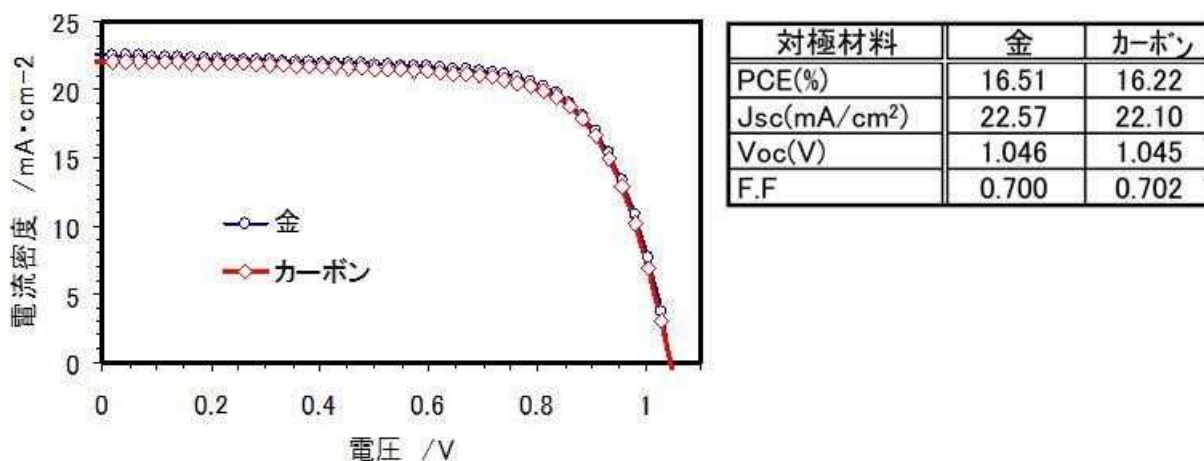
市販のカーボンペーストを用いて背面電極を形成した場合は、蒸着した金電極の場合の約 35%の変換効率しか示さなかった。市販のカーボンペーストは、密着性確保を目的に多量の樹脂バインダを含むため、金よりも高いシート抵抗になることが低い性能の原因と推定された。要因を明らかにするため、1Sun と 0.1Sun の照射下での太陽電池特性を比較すると、相対的に低電流となる 0.1Sun の場合、カーボン電極 (膜厚 37 μ m、塗布) での性能は金対極 (膜厚 100nm、蒸着) に対し 90%以上であったが、相対的に大電流となる 1Sun の場合には、約 70%まで低下することがわかった。交流インピーダンス測定によりカーボン対極と金対極のバルク抵抗を見積もり比較したところ、金に比べてカーボンでは約 5 倍高い抵抗値となることがわかった。これらの結果より、カーボン電極材料のシート抵抗を下げるのが金に匹敵する性能を得るための方策の一つと考えられた。そこで、低いシート抵抗のカーボン電極を得るため、市販のカーボンペーストにグラフェンを添加し特性の向上を試みた。シート抵抗と変換効率の間に明確な相関関係が見られず、これはシート抵抗が主要因ではないことを示唆すると考えられた。

一方、カーボン背面電極層とホール輸送層の間に中間層を挿入することで、金背面電極の約 70%の性能まで向上できることがわかった。これらの結果から総合的に判断すると、ホール輸送層/カーボン背面電極層の界面でのキャリア授受を円滑にすることで、性能向上を図ることが可能と考えられた。そこで、ホール輸送層/カーボン背面電極層の界面に (a) ケッチェンブラック、(b) Zn フタロシアニン、(c) PEDOT/PSS を挿入した場合の太陽電池特性評価を行った。比較として、金のみとカーボンのみの場合についても評価を行った。

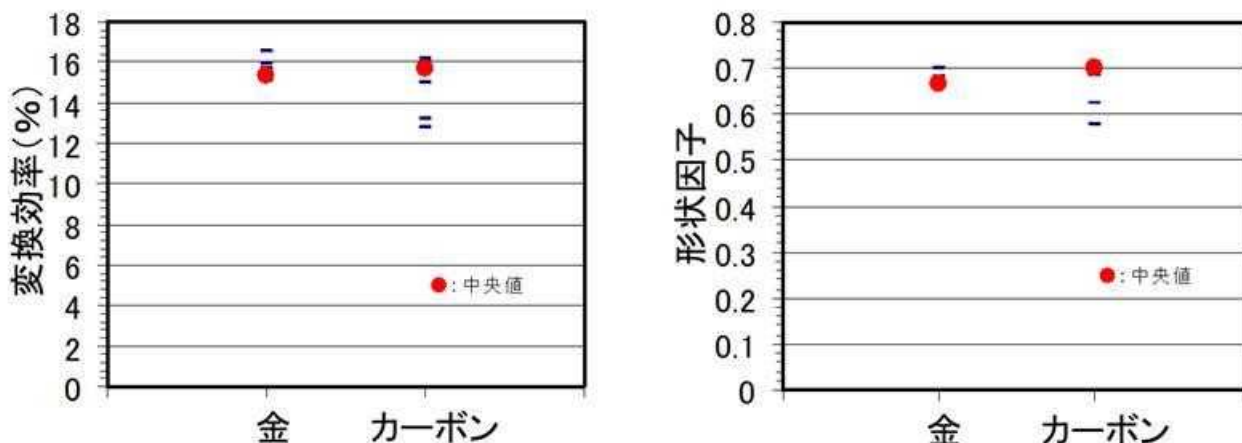
その結果、金 (膜厚 125nm、蒸着) の場合の変換効率に対し、カーボンのみでは金の 52%の性能しか引き出せないが、ホール輸送層/カーボン電極層界面に、(c) PEDOT/PSS を挿入した場合で 67%、(b) Zn フタロシアニンで 76%、(a) ケッチェンブラックで 83%の性能が引き出せることがわかった。これらの界面修飾材料により、ホール輸送層/カーボン電極層間のホール授受の際の整流特性を高める効果が発現し、性能向上につながったものと推察され、整流特性の微調整を行うことで、カーボン対極でも金対極に匹敵する性能を達成することが可能と考えられる結果が得られた。

さらに金背面電極と同等の性能まで引き上げるため、カーボン電極材料組成と塗布方法を改良し、金と

同等の太陽電池特性が得られる材料と条件を見出した。図Ⅲ-2-(ハ)-D-6 に示すように、光照射強度：1Sun 下で、金対極（膜厚 100nm、蒸着法）の場合の変換効率に対し、改良した組成のカーボン電極（膜厚 20 μ m、スプレー法）の場合は、金の 98%の変換効率とほぼ同等の性能を引き出せることがわかった。これは、下地層であるペロブスカイト層およびホール輸送層の損傷を最小限に抑えるため、水系溶媒のカーボン塗料と高霧化スプレーを用いることで、下地層であるホール輸送層の再溶解、結晶化の影響を回避でき、カーボン対極層/ホール輸送層の理想的な界面が形成された結果と考えられる。また、水系溶媒の塗料を使用できることは、クロロベンゼンやトルエンなどの溶媒を排除できるため、低い環境負荷と低コスト化が期待できる溶媒の使用を引き出すことができ、大面積化に対しては極めて有効な方策と考えられる。

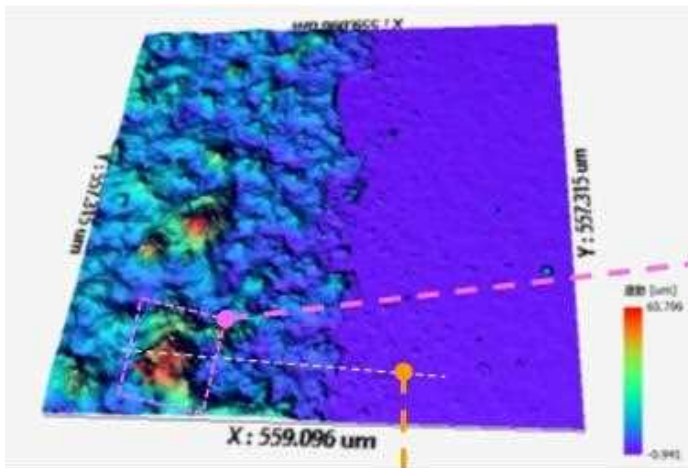


図Ⅲ-2-(ハ)-D-6 カーボン電極の性能向上（金電極とカーボン電極 小型セルの性能比較）

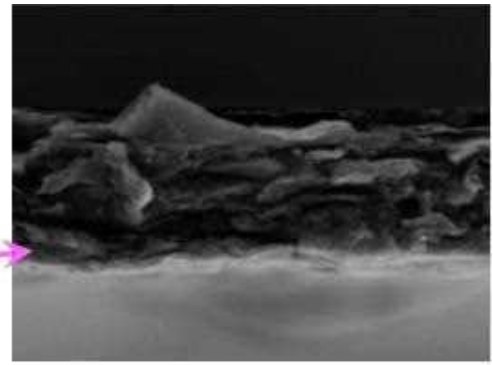


図Ⅲ-2-(ハ)-D-7 金電極とカーボン電極の性能バラツキの比較

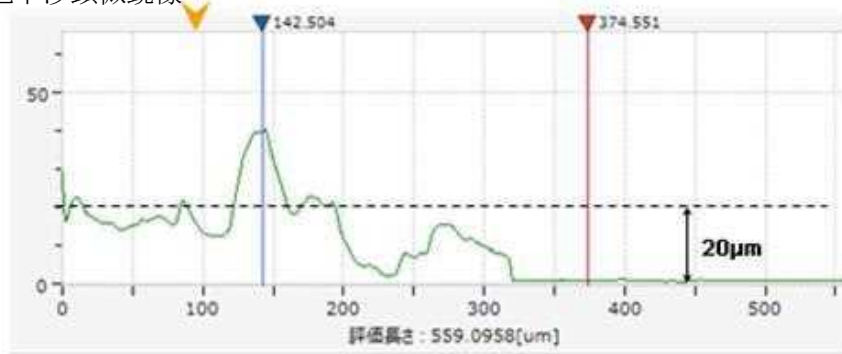
カーボン対極の課題は、図Ⅲ-2-(ハ)-D-7 に示すように、金電極の場合に比べて、性能、特に形状因子のばらつきが大きくなることである。表面観察の結果、カーボン背面電極層の表面形状は、図Ⅲ-2-(ハ)-D-8 に示すように、凹凸が大きく、膜厚が不均一で極端に薄い部分が存在していることがわかった。スプレー条件を最適化するなど、膜の平滑性と膜厚の均質性を向上し、ボトルネックとなり得る部分を解消することでバラつきを低減することは可能になると考えられた。その後、条件の改善を進め 300mm 角サイズのモジュールを作製した結果、前章の図Ⅲ-2-(ハ)-D-5 に示すように、大面積の貴金属・真空蒸着プロセスを必要としない、塗布型カーボン背面電極を用いたモジュールにおいて高い性能を実現することが可能となった。



(a) 白色干渉顕微鏡像



(b) 電子顕微鏡像



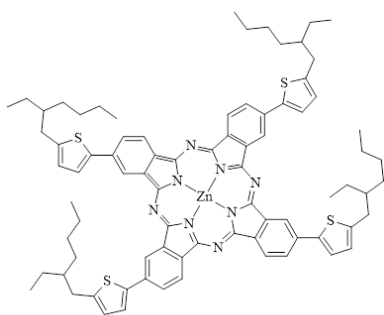
(c) 断面プロファイル

図III-2-(ハ)-D-8 カーボン背面電極の表面形状

1.3 低コスト・ホール輸送材料の開発

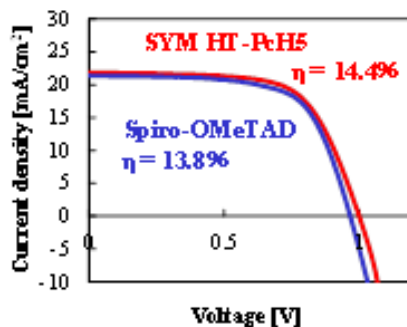
1.3.1 低コスト新規ホール輸送材料の開発

材料コストが高いペロブスカイト太陽電池用の代表的なホール輸送材料である Spiro-OMeTAD を、低コストが期待できる代替の新規ホール輸送材料に置き換え、材料コストを低減するため、原材料や合成ステップの少ない有機系 p 型半導体材料の開発を進めた。材料設計と合成を行い、異なる官能基を持つフタロシアニン誘導体を数種類合成し、その中から Zn 錯体の Sym-HTPcH-5 を見出した。合成後のカラム精製回数 1 回から 3 回に増やし、構造異性体の trans-cis 型と cis-cis 型を除去し、材料純度を 95% から 98% に高めたところ、変換効率が 10.7% から 13.7% まで 3 ポイントの向上がみられた。ホール輸送材料の原料溶液には、Spiro-OMeTAD と同様に、Sym-HTPcH-5 でも Co 錯体の FK209 をドーパント（添加剤）として用いてきた⁶⁾。しかし、この Co 錯体が経時劣化の要因となるとの指摘があり、耐久性を向上するため、ドーパントを使わないホール輸送材料を用いて太陽電池特性を評価した。

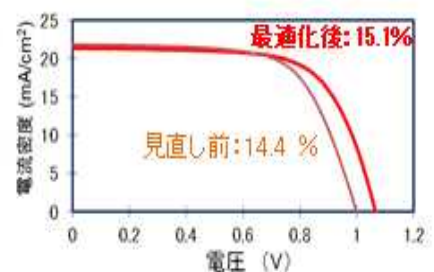


Sym-HTPcH-5

(a) 分子構造



(b) 太陽電池特性



(c) 塗布条件最適化

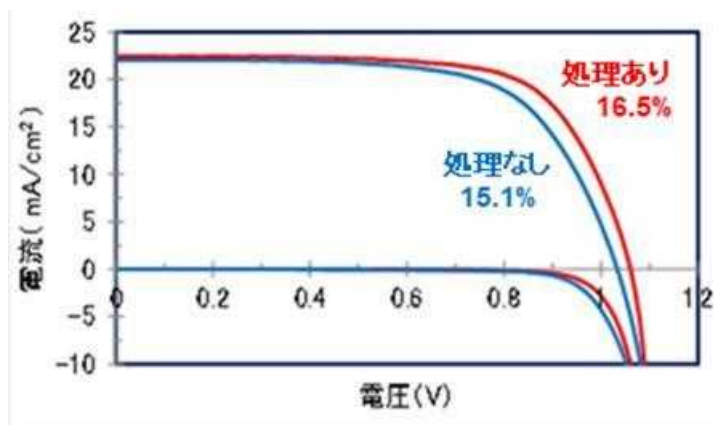
図III-2-(ハ)-D-9 フタロシアニン誘導体の分子構造と太陽電池特性

図III-2-(ハ)-D-9(b)に示すように、ドーパントレスの Spiro-OMeTAD の場合、変換効率が 13.8%(最高値、平均は 13.2%)と本来の性能に比べて低い値にとどまった。一方、ドーパントレスの Sym-HTPcH-5 の

場合は、14.4%（最高値、平均で13.5%）の変換効率を示し、Spiro-OMeTADの場合よりも高い性能を示した。さらにSym-HTPcH-5の、溶液濃度、温度、回転数等、スピノートの塗布条件を見直し、最適化することで、14.4%から15.1%へと0.7ポイントの上昇が確認でき、ドーパントレスでの高い性能を発現できる可能性を示した。（図III-2-(ハ)-D-9(c)）

また、ドーパントレスのSym-HTPcH-5の耐久性についての簡易評価を行った。単独膜で1Sunの光照射試験200時間後でも吸光スペクトルには変化は認められず、光による劣化がないことがわかった。密封したセルの場合では、暗所保存で1500時間を経過してもセル出力には経時劣化が認められず、安定であることが確認された。

次に、ホール輸送層とペロブスカイト層の間に絶縁層(PMMA)を挿入した界面処理により、変換効率は、1.4ポイント向上して、16.5%まで改善されることがわかった（図III-2-(ハ)-D-10）。加えて、表III-2-(ハ)-D-3に示すように、形状因子(FF)の向上と直列抵抗(R_s)の低減とともに、これらのバラツキを低減する効果もあることを見出した。これは、界面欠陥のパッシベーションによる再結合抑制効果によるものと考えている。この効果は、大面積化の際に、ばらつき低減の有効な手法と考えられる⁷⁾



図III-2-(ハ)-D-10 新規ホール輸送材、Sym-HTPcH-5の界面処理による性能向上効果

表III-2-(ハ)-D-3 新規ホール輸送材料での界面処理によるバラツキ低減効果

絶縁層	FF	R_s (Ω)	変換効率 (%)
なし			
あり			

1.3.2 高性能ホール輸送材料の探索とセル性能の向上

前節では、新規ホール輸送材料として、ドーパントレスで高い性能を発現するフタロシアニン誘導体のSym-HTPcH-5について性能向上策を検討してきた。しかし、性能は、界面処理により16.5%の変換効率を確認できたものの、20%を超えるさらなる高性能化には根本的な見直しが必要であると考えられた⁸⁾。そこで、骨格構造や官能基などを抜本的に見直し、加えて、組み合わせるペロブスカイトの組成との相性も検討する必要があると判断し、20%を超える可能性を有するp型半導体材料を設計、合成し、独自のホール輸送材料としての可能性を検討した。

設計・合成した数種類の有機系および錯体系のホール輸送材料を用いたセルで太陽電池性能を評価し、

高い変換効率を示したホール輸送材料のセル性能を表Ⅲ-2-(ハ)-D-4 に示す。

表Ⅲ-2-(ハ)-D-4 新たに設計・合成した独自ホール輸送材料を用いたセルの太陽電池性能

HTM ¹⁾		PVK ²⁾	変換効率 (%)	Jsc (mA/cm ²)	Voc (V)	FF
有機	Spiro-OMeTAD	MA PbI ₃	17.8	22.2	1.11	0.72
		(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	18.7	22.2	1.11	0.76
		(Cs,FA,MA) PbI ₃	20.2	25.1	1.06	0.76
錯体	SYM HT-PcH5	MA PbI ₃	15.1	22.0	1.03	0.66
		(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	16.3	20.4	1.06	0.75
	錯体系A	(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	17.8	21.5	1.08	0.77
	錯体系B	(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	17.8	21.5	1.07	0.78
有機	有機系A	(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	17.2	21.9	1.05	0.75
	有機系B	(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	17.9	22.0	1.06	0.77
	有機系C	(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	18.0	22.1	1.06	0.77
	有機系D	(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	17.5	21.6	1.04	0.78
	有機系E	(Cs,FA,MA) Pb(I,Br) ₃	18.2	22.3	1.09	0.75

セル構成：TCO / 塗布型緻密層 / メソ TiO₂ / PVK²⁾ / HTM¹⁾ / Au

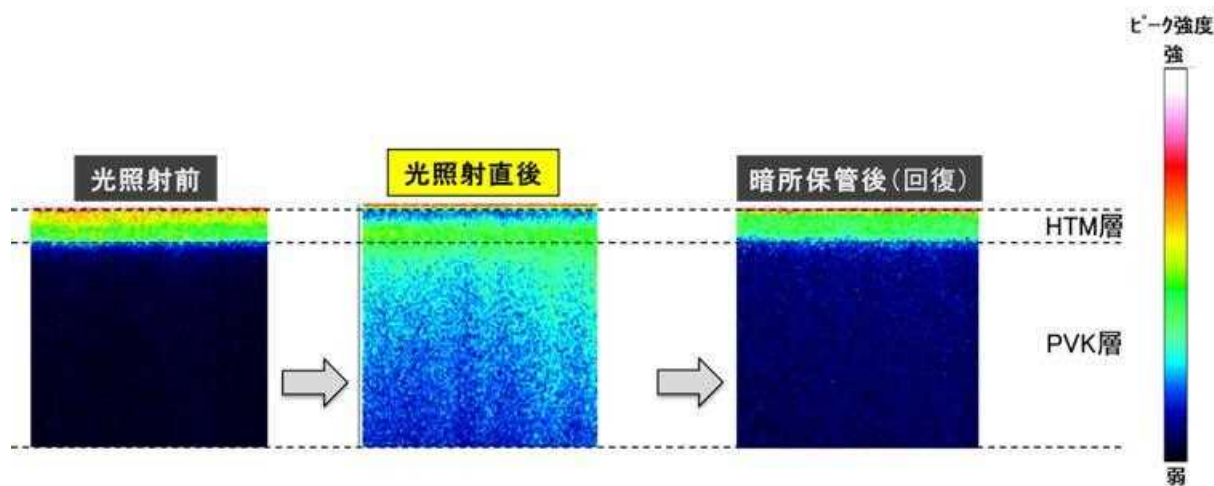
セル構造の改良と相性を考慮して見直したペロブスカイト材料の組成との組合せを検討した結果、混合 A サイト及び混合ハロゲンペロブスカイトで高い変換効率を得られる傾向が明らかとなった。Spiro-OMeTAD の場合、A サイト混合ペロブスカイトとの組合せで、20.2%の変換効率が確認でき、ペロブスカイトが MAPbI₃ の場合に対し、2.4 ポイントの大幅な性能向上を確認した。前述の Sym-HTPcH-5 の場合でも、混合ペロブスカイトと組合せることで、1.2 ポイントの性能向上が確認された。新たに合成した錯体系 2 種及び有機系 5 種の独自ホール輸送材料では、表Ⅲ-2-(ハ)-D-4 に示すように、変換効率 18%を超える材料が見つかった。特に最近新たに合成した新規・有機系 E のホール輸送材料で 18.2%の高い変換効率を確認し、Spiro-OMeTAD に迫る性能を有する材料を見つけることができ、低コスト・ホール輸送材料を用いたペロブスカイト太陽電池での高性能発現に目処付けが出来た。

1.4 電池長寿命化に向けた検討

1.4.1 光照射下での性能低下要因解析と抑制策の検討

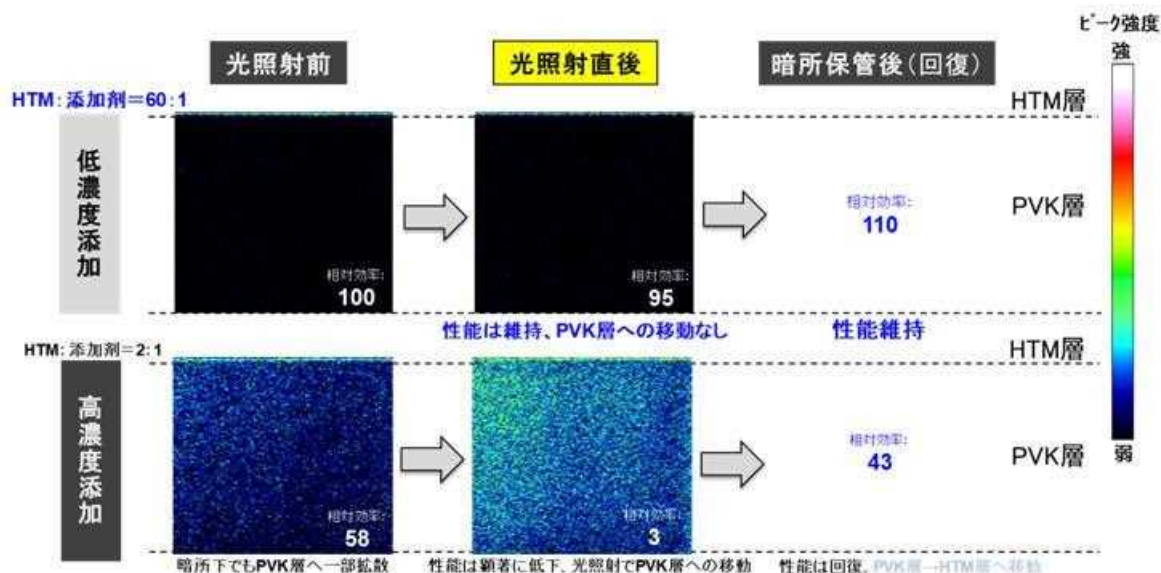
ペロブスカイト太陽電池では光照射下での性能低下の抑制が課題の一つとなっている。ホール輸送材料に新規の独自ホール輸送材料の Sym-HTPcH-5 を用いた場合でも、一般的なペロブスカイト太陽電池と同様な光照射下での性能低下が確認された。そこで、光照射下での性能低下の要因を解明し、光作動耐久性の向上指針を得るために、飛行時間型二次イオン質量分析 (TOF-SIMS) を用い、セルの各層の中で特にペロブスカイト層およびホール輸送層の変化と物質移動の有無を調べた。

独自ホール輸送材料の Sym-HTPcH-5 と Li 系添加剤を用いた場合、図Ⅲ-2-(ハ)-D-11 の TOF-SIMS 分析結果に示すように、Li の分布のみに顕著な変化が認められた。光照射前には Li はホール輸送層 (HTM 層) 内だけに存在し、ペロブスカイト層 (PVK 層) 内には存在しなかったのに対して、光照射後にはペロブスカイト層内にも存在するように変化していることがわかった。その後、光照射を中断し暗所で保管することにより、PVK 層の Li は大幅に減少し、再び光照射前のような Li の分布に戻る回復現象が確認できた。このことから Li の移動が性能低下の要因の一つであると考えられた。



図III-2-(ハ)-D-11 Sym-HTPcH-5 に Li 系添加剤を用いたペロブスカイトセルの光照射前後のホール輸送層/ペロブスカイト層界面近傍の Li の分布状態の変化(SIMS)
(セル構成：TCO/c-TiO₂/m-TiO₂/MAPbI₃/Sym-HTPcH-5/Au)

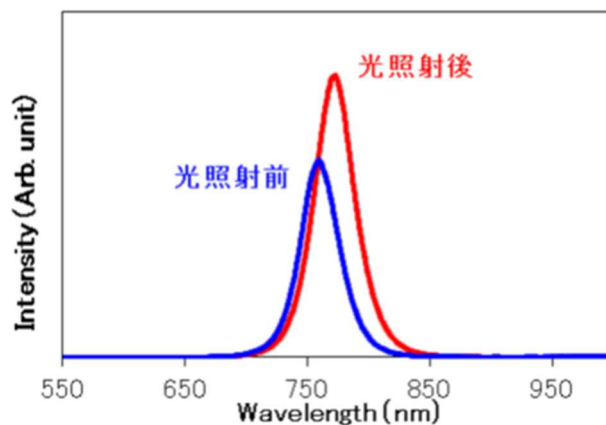
この現象のメカニズムは、光照射に伴う電荷分離によりセル内に電界が生成され、イオンとして存在する Li が生成した電界を駆動力にして PVK 層へ移動し、光を遮断して電界を解除すると、Li 系添加剤の対イオンの静電引力で逆方向の HTM 層側へ移動することで回復したものと推察された。このメカニズムに基づくと、可動イオンを生成する Li 系添加剤のような添加剤を、可動イオン生成のない新たな添加剤へ変更することで、光照射による性能低下が抑制できるものと考えられる。そこで、前述の Li 系添加剤と同じ対の陰イオンを含み、陽イオンのみが異なる 6 種の添加剤 A~F を用いて、その光照射による性能低下の傾向を調べた。添加剤 A~F の比較検討の結果、最も変化の少ない(初期の 90%程度の変換効率を維持できる)添加剤として、A が有望であることがわかった。さらに、性能低下の最も少ない添加剤 A の濃度を最適化するため、添加剤濃度の影響を調べたところ、添加剤が低濃度(ホール輸送材料:添加剤=6:1)の場合には、光照射時間に対する性能低下が顕著に少なくなることがわかった。この結果の裏付けとして、新添加剤 A の濃度が低い(ホール輸送材料:添加剤=60:1)場合と高い場合(2:1)のそれぞれの添加剤の陽イオン元素の変化を観察した。(図III-2-(ハ)-D-12)



図III-2-(ハ)-D-12 新添加剤 A を用いた場合の界面近傍の Li の分布状態の変化(SIMS)

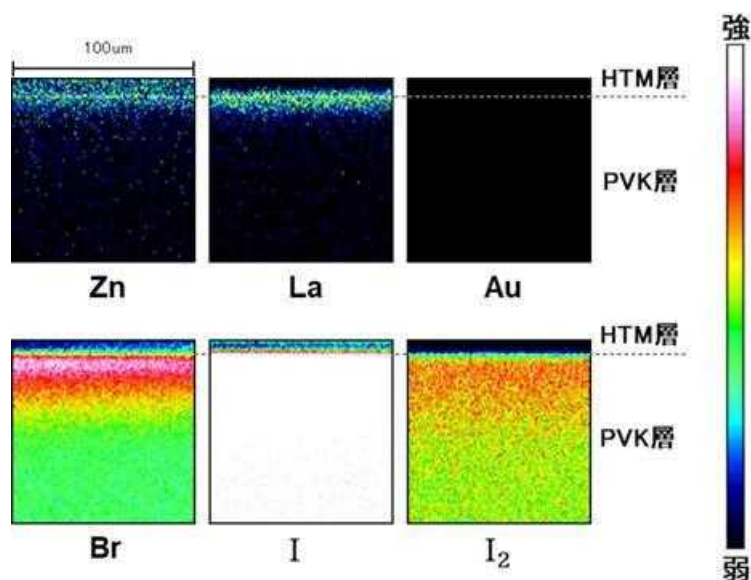
図III-2-(ハ)-D-12 に示すように、低濃度添加の場合、光照射に伴うペロブスカイト層内への陽イオン元素の移動の痕跡はなく、光照射前後で変化しておらず、性能の変化もほとんど発生していない。一方、高濃度添加の場合、光照射によりペロブスカイト層内の陽イオン元素の濃度は増加し、性能も低下している。その後、光を遮断すると性能が回復する兆候が認められた。この結果より、高濃度添加の場合、元素の移動が十分に抑制されていないが、低濃度にするすることで、その抑制効果が高められたと考えられ、

ホール輸送材料の添加剤の指針としては、低濃度で新添加剤 A を用いることを採用した。次に、Li のような拡散しやすいイオンを含まない新添加剤 A を用いた場合と添加剤を用いない場合の両者について、MAPbI₃ ペロブスカイトよりもさらに高い性能が期待できる混合ハロゲンペロブスカイトと独自ホール輸送材料の Sym-HTPcH-5 との組合せで、照射に対する性能低下の抑制効果の有無を確認した。その結果、新添加剤 A の有無に関係なく、Li 系添加剤の場合と類似する、照射に伴う性能低下が認められた。この原因を明らかとするため、照射前後のセルでフォトルミネッセンス法 (PL) と TOF-SIMS を用いて、特にペロブスカイト層とホール輸送層の変化について調べた。



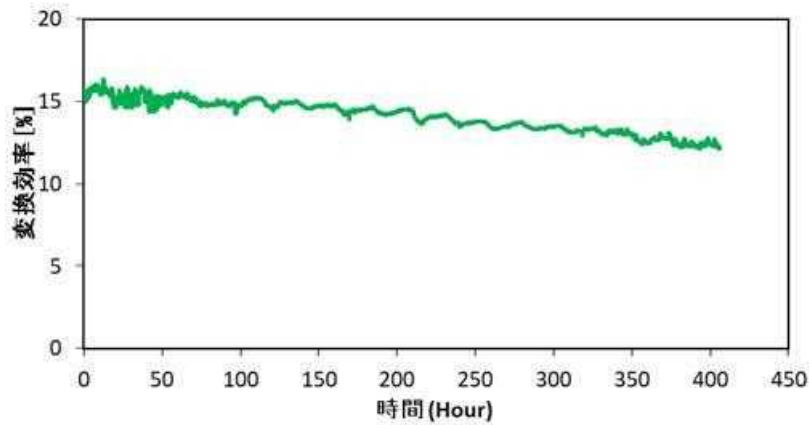
図III-2-(ハ)-D-13 混合ハロゲンペロブスカイトセルの照射前後の PL スペクトル変化

照射前後の PL 分析の結果、発光強度の大幅な増加とピーク波長の長波長シフトが認められた。(図III-2-(ハ)-D-13) これらの変化は、それぞれホール輸送材料のクエンチ機能低下とペロブスカイト組成の変化に起因すると推定された。さらに、図III-2-(ハ)-D-14 に示すように、照射後の TOF-SIMS で観察した元素分布に、ペロブスカイト層/ホール輸送層界面のペロブスカイト層内に著しい臭素 (Br) の偏析が確認された。この結果より、照射により混合ハロゲンペロブスカイトが分解して臭化物イオン (Br⁻) が生成され、誘起された電界を駆動力としてホール輸送層側へ移動することで、上記界面近傍のペロブスカイト層に臭素が集中する層が形成された結果、新たな障壁が生成したものと考えられた。



図III-2-(ハ)-D-14 混合ハロゲンペロブスカイトセルの照射後の元素分布 (SIMS)

これらの対策として、物質移動の要因と推定された臭素を含まない、混合 A サイトヨウ化物ペロブスカイトと新規の独自ホール輸送材料の有機系 B を組み合わせたセルで、1Sun 連続照射下での太陽電池性能の変化を確認した。図III-2-(ハ)-D-15 に示すように、性能低下の抑制効果が認められ、400 時間で初期性能の 77%を維持することを確認した。



図Ⅲ-2-(ハ)-D-15 ペロブスカイト組成の見直しによる光照射下での性能低下の抑制効果

このように、光照射下での性能低下の原因が、セルの各層を構成する材料や添加剤の成分の移動に起因することが判明した。これらの成分を如何に抑制するあるいは含まないようにすることで、光照射下での劣化が抑制できるという知見を得ることが出来た。今回得られた知見を活かし、さらに改善を加えることで、実用耐久性を有するペロブスカイト太陽電池の実現を目指していく。

参考文献

- 1) F. Matteocci, S. Razza, F. D. Giacomo, S. Casaluci, G. Mincuzzi, T. M. Brown, A. D'Epifanio, S. Licocciab, A. Di Carlo, "Solid-state solar modules based on mesoscopic organometal halide perovskite: a route towards the up-scaling process." *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 16, 3918–3923 (2014).
- 2) J. E. Bishop, D. K. Mohamad, M. W. Stringer, A. Smith, D. G. Lidzey, "Spray-cast multilayer perovskite cells with an active-area of 1.5cm²" , *Scientific Reports*, 7: 7962 DOI:10.1038/s41598-017-08642-2 (2017).
- 3) Y. Wu, X. Yang, H. Chen, K. Zhang, C. Qin, J. Liu, W. Peng, A. Islam, E. Bi, F. Ye, M. Yin, P. Zhang, L. Han, "Highly compact TiO₂ layer for efficient hole-blocking in perovskite solar cells" , *Applied Physics Express* 7, 052301 (2014).
- 4) Q. Gao, S. Yang, L. Lei, S. Zhang, Q. Cao, J. Xie, J. Li, Y. Liu, "An Effective TiO₂ Blocking Layer for Perovskite Solar Cells with Enhanced Performance" , *Chem. Lett.*, 44, 624–626 (2015).
- 5) L. Cojocaru, S. Uchida, Y. Sanehira, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa, "Surface Treatment of the Compact TiO₂ Layer for Efficient Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells" , *Chem. Lett.*, 44, 674–676 (2015).
- 6) J. Y. Seo, H. S. Kim, S. Akin, M. Stojanovic, E. Simon, M. Fleischer, A. Hagfeldt, S.M. Zakeeruddin, M. Graetzel, "Novel p-dopant toward highly efficient and stable perovskite solar cells" , *Energy & Environ. Sci.*, 11, 2985–2992 (2018).
- 7) F. Wang, A. Shimazaki, F. Yang, K. Kanahashi, K. Matsuki, Y. Miyauchi, T. Takenobu, A. Wakamiya, "Highly Efficient and Stable Perovskite Solar Cells by Interfacial Engineering using Solution-Processed Polymer Layer" , *J. Phys. Chem. C*, 121, 1562–1568 (2017).
- 8) M. Saliba, S. Orlandi, T. Masui, S. Aghazada, M. Cavazzini, J. P. C. Baena, P. Gao, R. Scopelliti, E. Mosconi, K. H. Dahmen, F. D. Angelis, A. Abate, A. Hagfeldt, G. Pozzi, M. Graetel, M. K. Nazeeruddin, "A molecularly engineered hole-transporting materials for efficient perovskite solar cells" , *Nature Energy* 15017, DOI:10.1038 /NENERGY.2015.17 (2016).

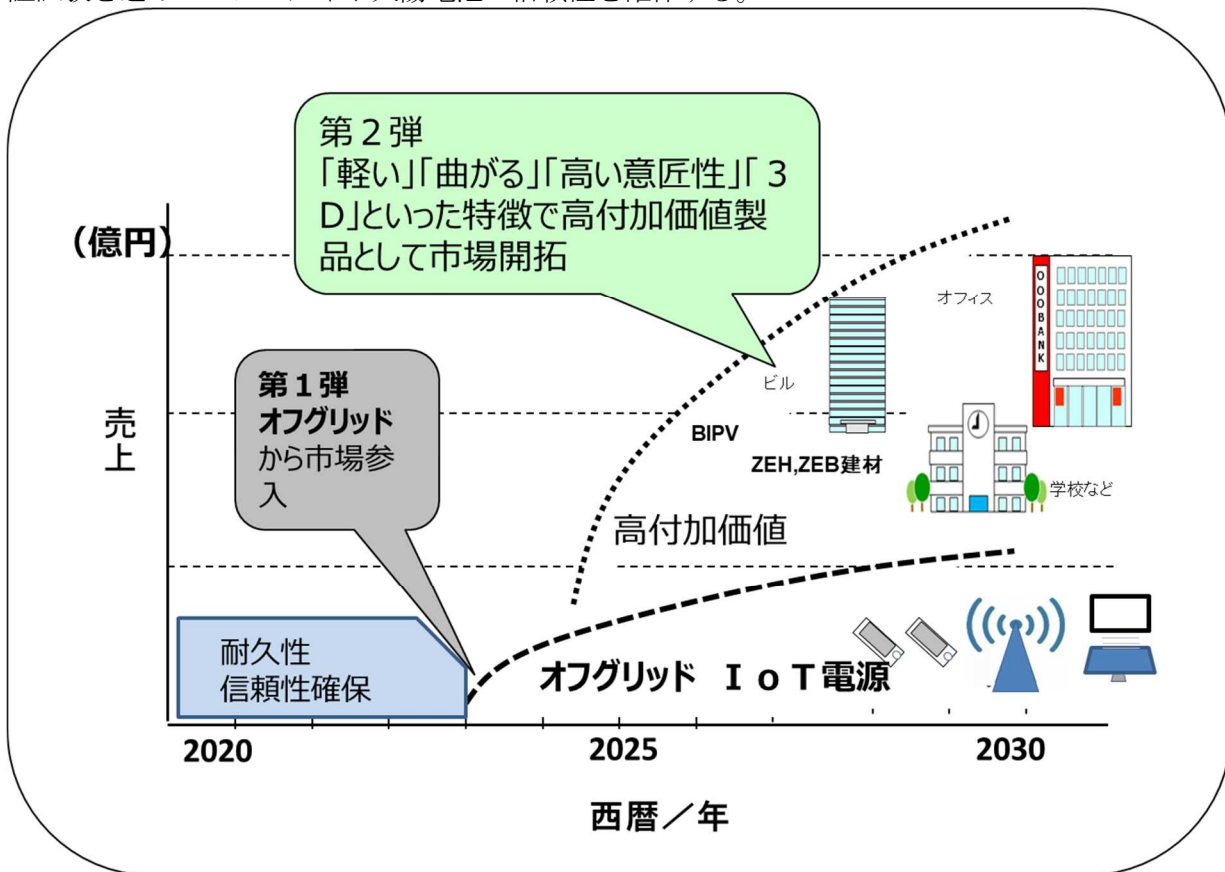
2. 実用化・事業化見通し

本研究開発で得られた技術により、ペロブスカイト太陽電池の低コスト・大面積化が可能になる。特に、大面積ペロブスカイト薄膜の成膜法に関して、スプレー塗工技術には以下の優れた特徴がある。

- ① インクジェット、スロットダイコート等に比べ格段に設備コストが低い
- ② 高速塗工に対応できる。
- ③ 型などが不要な為、大面積化が容易（ノズル数の増加で対応可能）
- ④ 3次元曲面への対応が容易である。（基板とノズル間距離の自由度が高い）

これらの特徴を生かし、従来の太陽電池では実現の難しい製品をターゲットとし技術開発を進める。

一方で、実用化に向けた最大の克服すべき課題が「実用耐久性の確保」であることが分かってきた。歴史が長く、既に実用化されている結晶系シリコン太陽電池や CIGS 太陽電池では、さまざまな耐久試験、信頼性試験が成され、実用上問題ない製品寿命(25年以上)が保証されている。しかしながら、ペロブスカイト太陽電池は、研究歴史がまだ8年程度と短く、現状では高い性能は実現出来てはいるものの、実用耐久性については未知数で、今後の研究開発の進展が待たれるレベルである。そこで、早期実用化に向けて、まずは従来の薄膜太陽電池の設計適格性確認試験および形式認証のための要求事項(JIS C8991)を満足するようなペロブスカイト太陽電池の構成および仕様を明らかにしていきたいと考えている。ペロブスカイト太陽電池の性能劣化メカニズムを明らかにしたうえで対策を講じるとともに、実証試験を進めペロブスカイト太陽電池の信頼性を確保する。

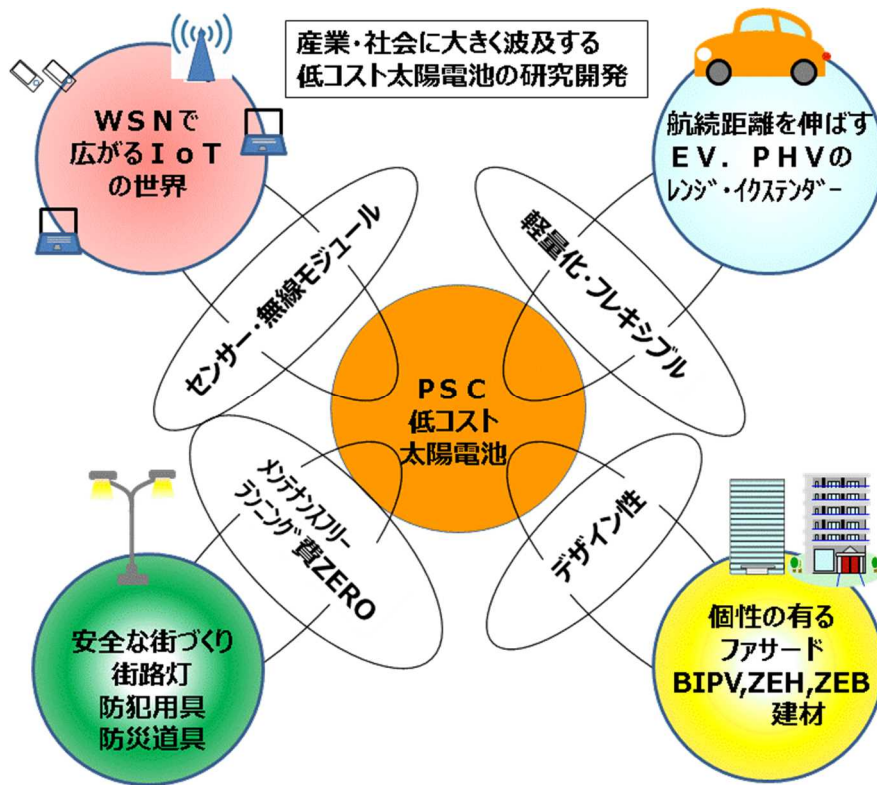


図Ⅲ-2-(ハ)-D-16 ペロブスカイト太陽電池の実用化・事業化

図Ⅲ-2-(ハ)-D-16 に示すように、まずは耐久性・信頼性確保に目処を付け、オフグリッド電源、IoT電源用として市場参入を図りたい。小型製品で実証・実績を重ね、「軽い」、「曲がる」、「高い意匠性(カラフル)」「3D 曲面形状」といった高付加価値製品で市場開拓を図っていききたいと考えている。

3. 波及効果

スプレー塗布で製造できるペロブスカイト太陽電池は2次元平面だけではなく、3次元曲面にも形成可能であることから、太陽電池の新たな価値が創造できると期待している。ペロブスカイト太陽電池はプロセス温度が低く、樹脂基板、フィルム基板が使用できるため、軽くて曲がる太陽電池が実現でき、スプレー塗布は設備コストも安価であるため、低コスト化が可能である。図Ⅲ-2-(ハ)-D-17 に示す通り、軽くて低コストの太陽電池は産業・社会に大きく波及するデバイスとなり得る。



図Ⅲ-2-(ハ)-D-17 ペロブスカイト太陽電池の波及効果

オフグリッド利用の例では、IoTの無線センサネットワークの電源、通信モジュールの電源、公共施設の防犯灯、防災機器の電源などの利用が考えられ、さらに最近急加速している自動車の電動化にあわせ、電気自動車(EV)用電源、プラグインハイブリッド車(PHV)の走行距離延長装置(レンジ・エクステンダー)への利用が期待できる。特に後者の車載用途に関しては、車体形状が3次元曲面になるため、ボデー曲面へのスプレー塗布による太陽電池形成法の独壇場になり得ると考えている。曲面塗布形成が可能になると、様々なデザイン性に優れた建材、例えば個性のあるファサード、ビル用(BIPV、ZEB)、住宅用(ZEH)への利用が期待できる。

さらなる高性能化に向けた取り組みとして、近年タンデム(積層)太陽電池の研究が盛んになってきている。結晶シリコンの受光面に真空蒸着プロセスによりペロブスカイト薄膜を積層形成して高性能化を実現しているが、真空蒸着ではなくスプレー塗布での形成も可能と考えられる。既存のシリコン太陽電池製造工程にスプレー成膜装置をアドオンするだけで、高性能なペロブスカイト・結晶シリコンのタンデム太陽電池製造が実現できる日も近いかもしれない。

4. 今後の展開

「2. 実用化・事業化の見通し」において記載した通り、まずは今後の研究開発において解決すべき重要な課題であるペロブスカイト太陽電池の実用耐久性の確保に向け取り組んでいく必要がある。この太陽電池は、サブミクロンレベルの薄膜積層構造で形成されており、材料の使用量が格段に少なく、各層の材料コストも安価なもので構成することが可能である。スプレー塗布により形成することで、安価な設備で大面積のデバイスを作製できる可能性も見えてきた。一方で、サブミクロン薄膜で形成されるが故に極めて高い膜の均質性が要求され、材料の純度も高いものが必要とされる。特に、長期安定性を有するデバイスの実現には、プロセス、材料の高度化のみならず、ロバスト性を有するデバイス構造への変革が必要であると考えている。

長期安定性を論じる上では、ペロブスカイト太陽電池の耐久性、信頼性評価に関する標準の整備も不可欠であると考えられる。ペロブスカイト太陽電池は従前の発電方式とは異なり、軽量でフレキシブルなデバイスの実現が期待できるが、これまで大量導入されてきた地上設置とは利活用形態が異なることが想定される。そのため、求められる信頼性、耐久性に関して要求事項が異なることが想定される。この点は現在でも十分明らかになっておらず、これからの国際標準化活動などの進展に期待するところである。

今後は、ペロブスカイト太陽電池の耐久性課題をいち早くブレイクスルーし、安価で軽量で設計自由

度の高い太陽電池を実現することで、これまで設置が困難であった、重量制約のある建造物の屋根、ビルの壁面、車載用途への活用を促進し、再生可能エネルギーの普及による低炭素社会の実現に向け貢献していきたいと考えている。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	0	0	0	1(0)	1(0)
論文	0	0	0	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	0	0	1(1)	3(3)	2(1)	6(5)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	1	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	アイシン精機株式会社	特願 2019-222659	国内	2019年12月 10日	出願	ホール輸送層材料及びホール輸送層材料を用いた太陽電池	土本勝也、マリードゥ・スリニバス、デボジュ・チャリイ、サティシュ・ヴィッカム、鈴木晃

【論文】

該当なし

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	安達充浩、鈴木晃、清水隆行、渡辺理恵、マリードゥ・スリニバス、デボジュ・チャリイ、サティシュ・ヴィッカム、土本勝也、豊田竜生、別所毅隆、ZeguoTang、多田圭志、瀬川浩司	株式会社アイシン・コスモス研究所、アイシン精機株式会社、東京大学	ペロブスカイト型太陽電池における改良フタロシアニン系ホール輸送材料の効果	Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference (AP-HOPV18) 北九州国際会議場	2018年1月29日
2	佐野利行、中島淳二、土井将一、	アイシン精機株式会社	スプレーコーティングによるペロブスカイト太陽電池モジュールの開発	グランド再生可能エネルギー 2018 国際会議 (GRE2018)	2018年6月19日

	水元克芳、 豊田竜生			パシフィコ横浜	
3	中島淳二、 佐野利行、 土井将一、 水元克芳	アイシン精機 株式会社	スプレーコーティングによる大 型ペロブスカイト太陽電池の作 製技術	12th Aseanian Conference on Nano- hybrid Solar Cells (NHSC-12) 中国 深圳 北京大学 深 圳研究生院	2018年12月 18日
4	清水隆行、 安達充浩、 鈴木晃、 渡辺理恵、 マリード ウ・スリニ バス、 デボジュ・ チャリイ、 サティシ ユ・ヴィツ カム、 土本勝也、 中島淳二、 佐野利行、 土井将一、 水元克芳	株式会社アイ シン・コスモス 研究所、アイシ ン精機株式会 社	スプレーコーティングによる大 型ペロブスカイト太陽電池の作 製技術	Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP19) 京都リサーチパーク	2019年1月28 日
5	清水隆行、 安達充浩、 鈴木晃、 渡辺理恵、 マリード ウ・スリニ バス、 デボジュ・ チャリイ、 サティシ ユ・ヴィツ カム、 土本勝也、 中島淳二、 佐野利行、 水元克芳	株式会社アイ シン・コスモス 研究所、アイシ ン精機株式会 社	Effects of Modified Phthalocyanine as Hole- Transporting Materials in Perovskite Solar Cells	11th International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV19) イタリア ローマ	2019年5月15 日
6	佐野利行、 能地康徳、 中島淳二、 水元克芳、 鈴木晃、 清水隆行、 安達充浩、 近藤和博	アイシン精機 株式会社、株式 会社アイシン・ コスモス研究 所	スプレーコーティングによる大 型ペロブスカイト太陽電池製造 技術の開発	第4回フロンティア太陽 電池セミナー 広島市文化交流館	2019年11月 25日

【新聞・雑誌等への掲載】

該当なし

【その他】 プレス発表等

(1) 展示会出展

番号	年度	展示会名称	開催場所	内容
1	2018	日印エネルギーフォーラム 2018 “エキシビション” (REI2018)	インド・グレート ノーイダ	展示会出展

E 高性能材料合成技術の開発（富士フイルム株式会社）

1. 成果詳細

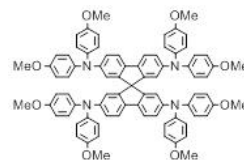
本プロジェクトにおける中間目標：セル効率 20%以上、最終目標：モジュール効率 20%以上、またはセル効率 25%を達成するために、富士フイルムでは正孔輸送材料合成技術及びペロブスカイト材料技術の開発を行った。正孔輸送材料合成技術開発では 2015 年 7 月 22 日から 2018 年 3 月 20 日の期間において中間目標である「HOMO レベル-5.3eV 以下と Spiro-MeOTAD 以上の電流値または Spiro-MeOTAD に対し同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ 及び耐湿性を可能とする正孔輸送材料設計を抽出する」を達成すべく、耐湿性低下の原因となる親水性ドーパントを用いずとも高い発電特性を示すドーパントフリー正孔輸送材料の開発を行い、ペロブスカイト材料技術開発では中間目標の「長波長端 750nm 以上且つ、 $CH_3NH_3PbI_3$ 同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ と耐湿性を可能とするペロブスカイト材料設計を抽出する」を達成するために、疎水性材料を用いたペロブスカイト層および層表面の疎水化技術開発を行った。以下に具体的な研究内容について記載する。

1. 正孔輸送材料合成技術開発

耐湿性低下の原因となる親水性のドーパントを用いずとも良好な発電特性を示す、ドーパントフリー適性の高い正孔輸送材料骨格を 2 種見出した。その内 1 種では、現在主に用いられている正孔輸送材料である Spiro-MeOTAD（ドーパント有り）の変換効率 14.2%に対し 14.6%と同等以上の値に到達した。以下詳細を記す。

(i) ドーパントフリー適性の高い基本骨格の抽出

正孔輸送層中に含まれる親水性ドーパントはペロブスカイト太陽電池の耐湿性を低下させる一因である。しかし、Spiro-MeOTAD(図III-2-(ハ)-E-1)等、多くの正孔輸送材料ではドーパントを用いなければキャリアが不足して導電率が低下し、十分な光電変換効率を得られない事が知られている。この問題に対し、我々は平面性が高く分子同士の重なりが大きい分子を用いれば電荷輸送に好適に寄与し、ドーパントを用いなくとも高い変換効率を得られるのではないかと仮説を立てた。そこで、正孔輸送材料を、基本骨格により、アリアルアミン型、縮環型、錯体型、ポリマー型、ドナー-アクセプター型等に分類し、それらを正孔輸送層に用いた電池の性能を評価することにより、仮説検証と同時にドーパントフリー化に有望な分子構造の抽出を行った。



図III-2-(ハ)-E-1. リファレンス (Spiro-MeOTAD)

同日に作成した Spiro-MeOTAD（ドーパント有り）を用いたセルを基準として、変換効率が 0.8 倍以上 ($\eta > 10\%$) であれば、その後の改良により効率で上回ることが可能であるという仮定の下に有望骨格を抽出した。その結果、ドナー-アクセプター型に分類される骨格から、2 種の骨格 A および骨格 B がドーパントフリー条件において良好な発電特性を有することを見出した。骨格 A の正孔輸送材料 HTM-T2 が変換効率 11.2% ($J_{sc}=18.0\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=0.96\text{V}$, $FF=0.65$)、骨格 B の正孔輸送材料 HTM-F35 が変換効率 11.4% ($J_{sc}=18.9\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=0.91\text{V}$, $FF=0.66$) を示し、いずれも Spiro-MeOTAD（ドーパント有り）の変換効率 13.4% ($J_{sc}=19.5\text{mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc}=0.98\text{V}$, $FF=0.70$) に対し 0.8 倍以上であった。これらは平面性の高い分子構造をしており、前述の仮説を支持する結果である。一方で、Spiro-MeOTAD のドーパントフリー条件における変換効率はドーパント有りの条件に対し約 0.5 倍であり、ドーパントフリー適性がないことを確認した。導電率を測定したところ HTM-T2 の導電率は $5.8 \times 10^{-2} \mu\text{S}/\text{m}$ であり、ドーパントを含む Spiro-MeOTAD の導電率 ($2.65 \mu\text{S}/\text{m}$) には及ばないが、ドーパントを含まない Spiro-MeOTAD の導電率 ($8.3 \times 10^{-4} \mu\text{S}/\text{m}$) に対し、およそ 2 桁高い値を示した。さらに、HTM-F35 はドーパントを含む Spiro-MeOTAD に匹敵する高い導電率 ($1.28 \mu\text{S}/\text{m}$) を示した。この結果からも HTM-T2 および HTM-F35 がドーパントフリー化に適した材料であることがわかった。

(ii) 電位調整技術の構築及び高効率を得られる HOMO レベル領域の抽出

正孔輸送材料の HOMO レベルは変換効率に大きく影響する。例えば一般に、HOMO レベルが深いほど変換効率の因子である V_{oc} が向上する。ただし、ペロブスカイトの価電子帯とのエネルギー差が小さくなると電荷分離と電荷捕集の非効率化を招くため繊細な設計が必要である。好適な HOMO レベルの範囲を抽出するために、(i) で見出した 2 種の骨格について、適当な HOMO レベルを有する材料を合成し、HOMO レベルの電池性能への影響を確認した (図 III-2-(ハ)-E-2、セル構成: FTO ガラス/TiO₂ 緻密層/TiO₂ 多孔質層/ペロブスカイト層/ドーパントフリー正孔輸送層/MoO₃ 層/Au 対極)。

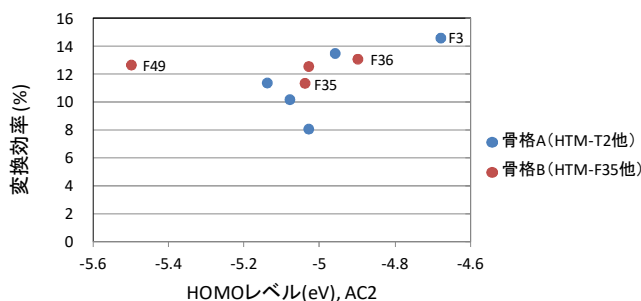


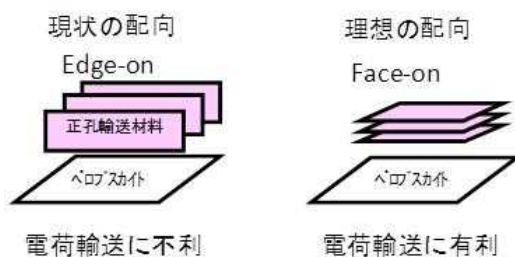
図 III-2-(ハ)-E-2. 正孔輸送材料の HOMO レベルと光電変換効率の関係

その結果、骨格 A と骨格 B で異なった結果が得られた。骨格 A では HOMO レベルを浅くすると光電変換効率が高くなるという、予測に反する傾向が明らかとなった。最も HOMO レベルの浅い HTM-F3 を用いたセルは、フィルファクタ (FF) が高く、同日に作成した Spiro-MeOTAD (ドーパント有り) を用いたセル ($\eta = 14.2\%$ 、 $J_{sc} = 19.9 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 1.02 \text{ V}$ 、 $FF = 0.70$) 以上の光電変換効率 14.6% ($J_{sc} = 18.7 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 1.02 \text{ V}$ 、 $FF = 0.79$) まで到達した。しかし、原理的には深い HOMO レベルを有する正孔輸送材料を用いたセルの方が高い V_{oc} が得られるはずであり、HOMO レベルが深い正孔輸送材料で V_{oc} が低い要因を解析し、改善することが出来れば、さらに高い光電変換効率を発現する正孔輸送材料を開発出来ると考えている。

一方、骨格 B では、骨格 A と同様に HOMO レベルの浅い HTM-F36 を用いたセルが、 13.1% ($J_{sc} = 18.4 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 0.99 \text{ V}$ 、 $FF = 0.72$) と最も高い光電変換効率を示したが、HOMO レベルと光電変換効率の明らかな相関は見られなかった。しかし、HOMO レベルの深い HTM-F49 を用いたセルでも、HTM-F36 と同等の光電変換効率が見られている点が骨格 A とは異なっている。 V_{oc} に着目すると、当初の狙い通り、深い HOMO レベルを有する HTM-F49の方が HTM-F36 よりも高いことがわかった。この材料を用いて、セル作製条件の最適化を進めた結果、光電変換効率は 15.2% ($J_{sc} = 20.4 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 1.04 \text{ V}$ 、 $FF = 0.72$) まで到達した。

(iii) 高効率化に関する今後の展開

HTM-F3 の J_{sc} が低い原因を解析するためにペロブスカイト膜上の正孔輸送材料の配向を調べたところ、骨格 A の正孔輸送材料は基板に対し分子平面が垂直に立つ Edge-on 配向を取ることが明らかとなった。この状態では電流の方向と正孔輸送材料の π スタック方向が直交しているため電荷輸送には不利であり、ペロブスカイト-正孔輸送層界面の電荷捕集効率や正孔輸送層中の電荷輸送能を低下させてしまう。もし、基板に並行な Face-on 配向をとることができれば J_{sc} 等の電池性能が向上すると可能性がある (図 III-2-(ハ)-E-3)。ペロブスカイト表面を特定の材料で表面処理することにより、Face-on 配向を誘起させる方法等を検討している。その他の課題として、ドーパントフリー化による正孔輸送層の疎水化が、ペロブスカイト-正孔輸送層界面の欠陥を引き起こすことが示唆されている。これに対し界面安定化を狙った新規の製膜プロセスを見出し、従来の製膜プロセスでは効率 11.9% ($J_{sc} = 18.5 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 0.97 \text{ V}$ 、 $FF = 0.66$) であった正孔輸送材料を用いたセルについて、新しい製膜プロセスを用いることにより 13.5% ($J_{sc} = 18.7 \text{ mA/cm}^2$ 、 $V_{oc} = 0.99 \text{ V}$ 、 $FF = 0.73$) まで向上させることができた。これらの技術開発を進めてさらなる高効率化を狙う。

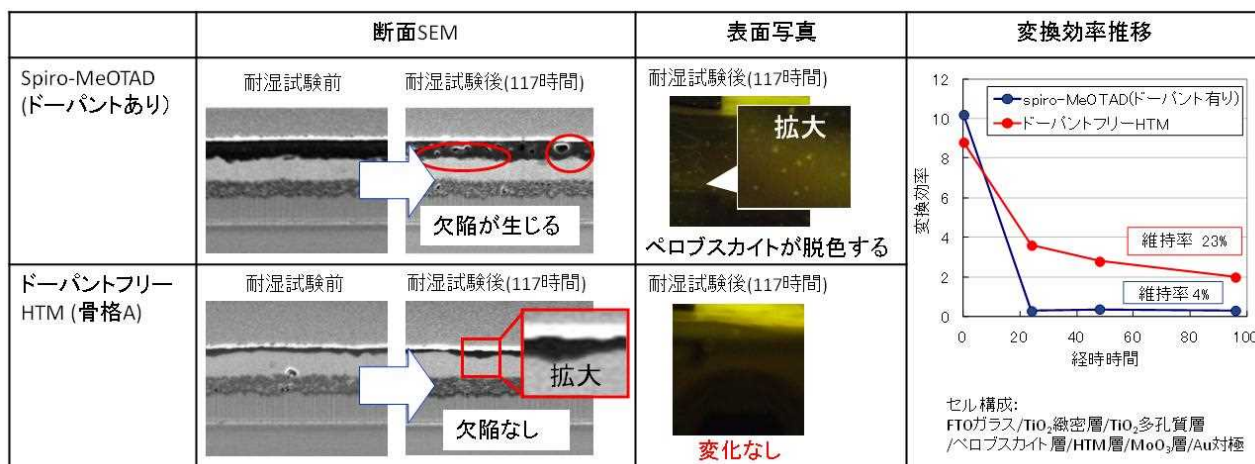


図Ⅲ-2-(ハ)-E-3. 正孔輸送材料が取る配向のイメージ図

また、現在当機関では、Spiro-MeOTAD を用いた標準的なセルでも 15%程度の効率しか得られておらず、セル作製技術が不足している。効率 20%の達成に向けたセル作製技術の向上にも検討余地がある。

(iv) 耐湿性向上効果の確認

HTM-F3 を用いたセルの耐湿性試験 (条件: 40°C、80%RH、非封止セル) を実施した。その結果、Spiro-MeOTAD を用いたリファレンスセルと比較し、層界面の欠陥や、ペロブスカイト膜の脱色が抑えられ、効率維持率 (式 1) が高いことが確認でき、正孔輸送材料のドーパントフリー化が耐湿性向上に有効であることがわかった (図Ⅲ-2-(ハ)-E-4)。



図Ⅲ-2-(ハ)-E-4. ドーパントフリー正孔輸送材料の耐湿性向上効果

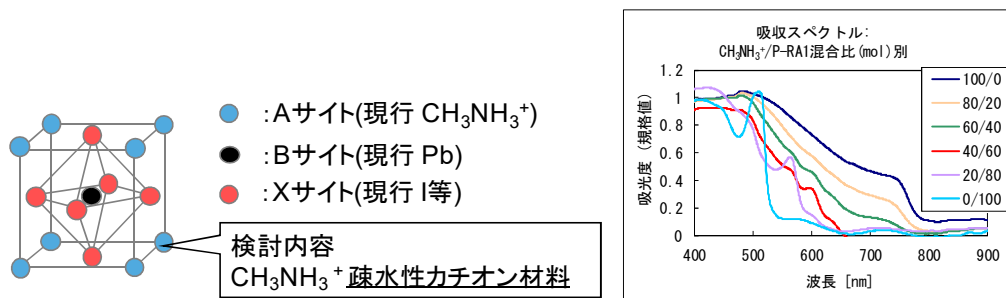
$$\text{式 1: 効率維持率 (\%)} = \frac{\text{耐湿性試験後の効率}}{\text{耐湿性試験前後の初期効率}} \times 100$$

2. ペロブスカイト材料技術開発

光吸収特性を低下させることなく耐湿性を向上させる技術として、疎水性の A サイトカチオン材料を微量混合する技術を見出した。さらに、ペロブスカイト膜品質低下の影響を最小限に抑えるため、ペロブスカイト膜表面のみの疎水化を狙った表面処理技術を開発し、効率と耐湿性の両立が可能であることを明らかにした。以下詳細を記す。

(i) A サイトカチオン組成が光吸収特性に与える影響

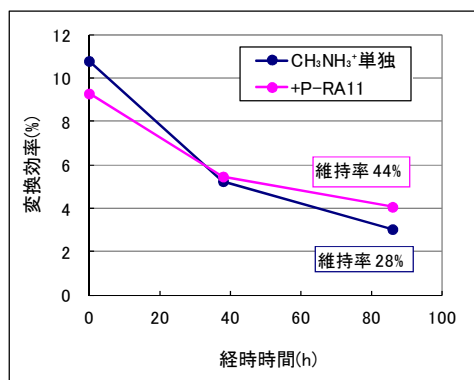
ペロブスカイトの A サイト材料を疎水的な材料に変えることにより高耐湿化が可能であると考えた。しかし、A サイト材料の変更は、結晶構造の変化や、それに伴うバンド構造の変化によって、光電変換効率の重要因子である光吸収特性を悪化させる懸念がある。そこで、ペロブスカイト膜中のメチルアンモニウムカチオン全てではなく一部のみを置き換えることによる耐湿性と光吸収特性の両立を狙い、疎水性カチオン材料 P-RA1 を用いて、メチルアンモニウムカチオンに対する混合比率とペロブスカイト膜の光吸収特性の相関を調べた。その結果、20mol%以上混合した場合は短波長化を引き起こすが、10mol%以下であれば高い吸収特性を維持出来ることがわかった (図Ⅲ-2-(ハ)-E-5)。



図III-2-(ハ)-E-5. P-RA1 混合による吸収スペクトルの変化

(ii) 高疎水化材料の抽出と耐湿性試験

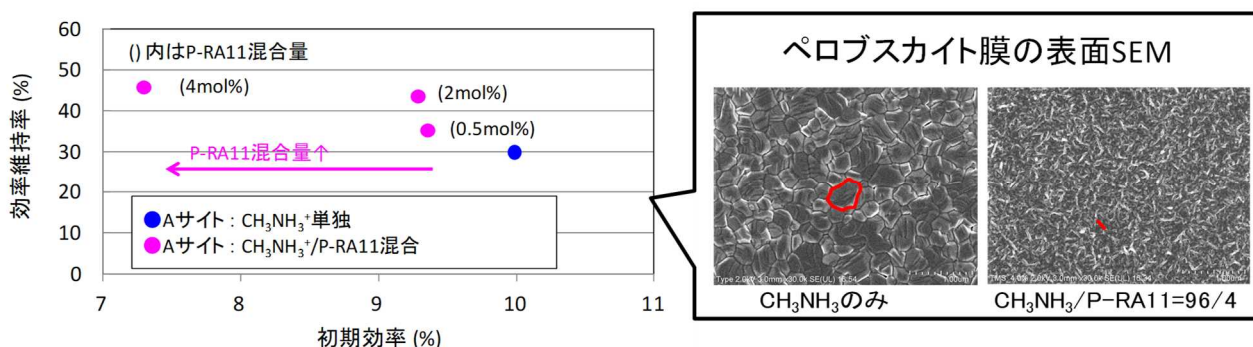
(i)の結果を基に、種々の疎水性 A サイト材料をメチルアンモニウムカチオンに対して 2mol%混合したペロブスカイト膜の接触角を測定し、疎水化効果の高い A サイト材料を探索した結果、P-RA11 を見出した。P-RA11 を混合したペロブスカイト膜の接触角は 66° であり、メチルアンモニウムカチオンのみのペロブスカイト膜 (接触角= 33°) に比べて大きく疎水化した (接触角はジヨードメタンで測定)。続いて P-RA11 を混合したペロブスカイト層を有するセルを作成し、耐湿性試験 (条件: 40°C 、80%RH、86hr、非封止セル) を行ったところ、リファレンスセル(A サイトカチオン: CH_3NH_3 単独) に対し効率維持率が向上しており (図III-2-(ハ)-E-6)、疎水性 A サイト材料の混合による膜の疎水化および耐湿性向上効果を確認した。



図III-2-(ハ)-E-6. P-RA11 混合太陽電池セルの耐湿性試験

(iii) 疎水性 A サイトカチオン材料を用いた表面処理による耐湿性向上検討

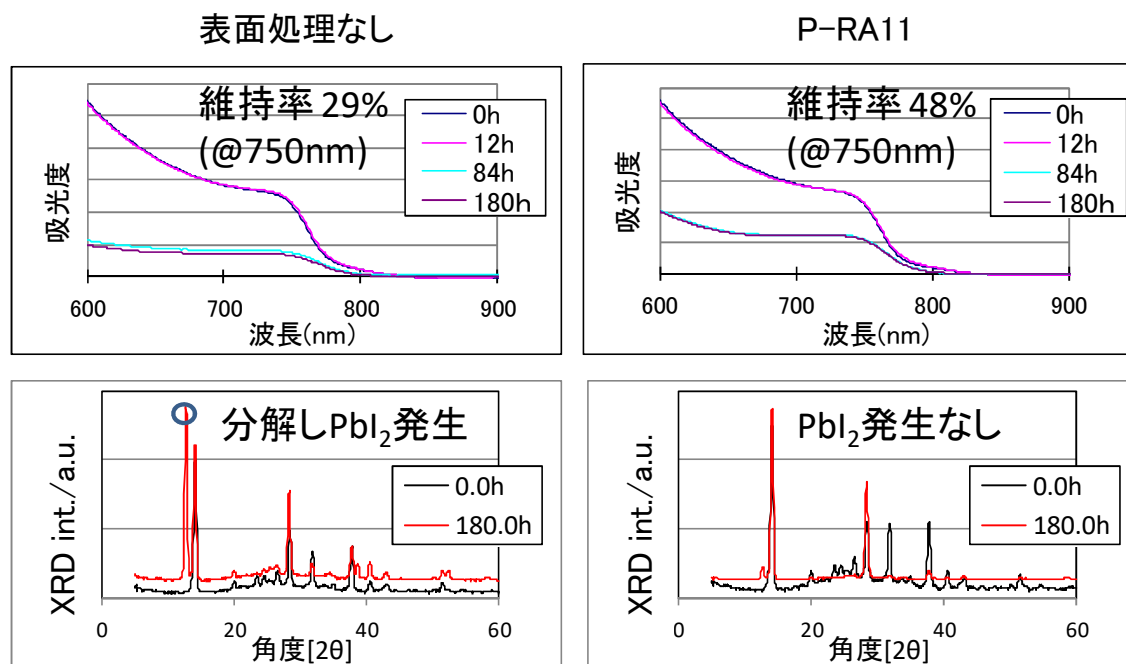
(i) で見出した疎水性 A サイトカチオン材料混合技術は、光吸収特性は維持できるが混合量を増やすにつれて初期変換効率が低下する傾向が明らかとなった。混合量を増やすとペロブスカイト粒径が小さく変化していることから、粒径の微細化により、粒子間での電荷輸送パスが増えたことで抵抗率が上昇していると推測される (図III-2-(ハ)-E-7)。



図III-2-(ハ)-E-7. 初期効率-効率維持率への混合量の影響

他にも、疎水性材料の混合では、ペロブスカイト結晶構造そのものが変化することによる性能低下の懸念があり、技術の汎用性が無いと考えられる。耐湿性の向上にクリティカルに効果があると考えられるペロブスカイト膜の表面のみに疎水性カチオン材料を偏在させることができれば、技術の汎用性および耐湿性の面で有利である。そこで、これを実現するために新たな表面処理方法を考案した。具体的なプロセスは、はじめに疎水性材料を含まないペロブスカイト膜を作製し、続いて疎水性材料を有機溶媒に

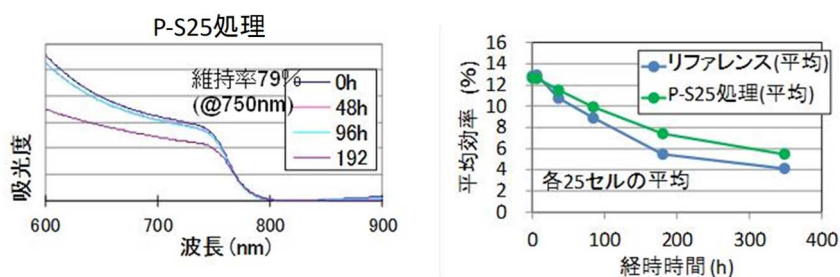
溶解させた塗布液を塗布し、乾燥させる方法である。



図III-2-(ハ)-E-8. P-RA11 処理を行ったペロブスカイト膜光吸収特性及び XRD における耐湿試験結果

図III-2-(ハ)-E-8 に膜光吸収および XRD を用いた耐湿性試験において、疎水性 A サイトカチオン材料 P-RA11 による表面処理を行った膜と処理を行わなかった膜を比較した結果を示す。P-RA11 で処理を行った膜の方が光吸収能の維持率が高く、分解生成物である PbI₂ の発生量が激減している事が分かる。よって、この表面処理はペロブスカイト層の安定化に効果があると判断できる。P-RA11 を用いた表面処理では、ペロブスカイト結晶表面の A サイトが疎水性カチオンで置換されることによって表面および層全体の耐湿性が改善されたと考えている。

ペロブスカイト層の耐湿性をさらに高めるために、種々の疎水性カチオン材料による表面処理を検討した。検討範囲を拡大し、疎水性基および A サイトへの置換もしくは吸着効果のある官能基を有する材料を探索した結果、最も高い耐湿性向上効果を示す P-S25 を見出した。



図III-2-(ハ)-E-9. P-S25 処理を行ったペロブスカイト膜光吸収特性およびセル性能における耐湿試験結果

図III-2-(ハ)-E-9 に、P-S25 を用いた表面処理による耐湿性向上効果を、ペロブスカイト膜の光吸収の変化とペロブスカイト太陽電池セルの光電変換効率の変化から評価した結果を示す。P-S25 による処理を行った膜は高温高湿下における光吸収の維持率が 79%と高く、また、セルの初期性能は表面処理を行っていないセルと同等の光電変換効率を示すと同時に耐湿性が向上している。本技術はペロブスカイト層の組成や正孔輸送材料層の構成を変えずに、種々のセルに適用できる汎用性のある技術であると考えている。

2. 実用化・事業化見通し

2.1 成果の実用化・事業化に向けた戦略

富士フィルムでは、成長を続ける再生可能エネルギー市場は、社会貢献と事業性の両観点で非常に重要な市場と考えている。中でもペロブスカイト太陽電池は低発電コストと高効率化が実現可能であり、既存の他方式太陽電池を置き換えることができる次世代太陽電池として高く期待しており、ペロブスカイト太陽電池用のペロブスカイト材料や正孔輸送材料を提供する事業を考えている。

現在主に用いられている材料は耐湿性が低く、実用化には高耐湿化が必要であることに加えて、さらなる高効率化が求められている。早期にこれらを満たす材料を開発し、高いマーケットシェアの獲得を目指す。開発において、材料の電位制御技術や塗布適性の付与が重要課題であるが、富士フィルムは銀塩写真で培った分光増感技術及び塗布液調製技術と技術的類似点が多い色素増感型太陽電池に黎明期から取り組んでおり、そこで蓄積してきた技術やノウハウを用いて課題を解決することが可能であると考えている。また、実用化段階で求められる量産技術の確立においても、多くの機能性材料の製造化実績を有しており、この点でも高い実現性と競争力を有している。

実用化後はプロジェクト参画機関を含む国内モジュールメーカーにペロブスカイト材料や正孔輸送材料を提供するとともに、知財戦略を立てながら中国、韓国、台湾、インドなどのアジア諸国、北米、及びヨーロッパにも販売を展開し、事業を拡大する。

2.2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組みと見通し

当プロジェクトにおいて、実用化に必要なセルの高耐湿化、高効率化が可能な材料開発を行った。正孔輸送材料開発においては、低耐湿性の原因である、親水性ドーパントを用いずとも高い発電能を発現させることができる、ドーパントフリーの正孔輸送材料を目標に開発を行い、ドーパントフリーで Spiro-MeOTAD(ドーパント有り： $\eta=14.2\%$) 同等の変換効率($\eta=14.6\%$)に到達した。ペロブスカイト材料開発においても、初期効率の低下を起さずに耐久性を向上させるペロブスカイト膜の表面処理技術を見出しており、これらの新規材料技術が、ペロブスカイト太陽電池の耐湿性向上に有望であることを確認している。

開発した材料技術はペロブスカイト太陽電池の高耐湿化、高効率化のニーズと整合しており、完成すれば事業化の可能性が高いと考えている。一方で材料には改善の余地が残っており、さらなる性能向上が必要だと考えている。今後は、材料の改良を行った後、高い評価技術を有するプロジェクト参画モジュールメーカーを含む国内モジュールメーカーへサンプル提供を行い、連携することで、実用レベルの材料開発を行うとともに低コスト化、大量生産プロセスを構築し、モジュールメーカーでの量産に対し材料提供が行えるように準備を進める。

3. 波及効果

本研究開発で得られる正孔輸送材料技術は、有機トランジスタ、有機薄膜太陽電池、有機EL等の他分野にも応用可能であり、これらの技術的レベルアップが期待できる。また、ペロブスカイト太陽電池で採用された材料が他分野でも採用された場合、生産量増加によるコストダウンが可能となり、ペロブスカイト太陽電池のさらなる低コスト化が期待できる。ペロブスカイト材料技術に関しても同様に、ペロブスカイト材料を用いた発光素子、トランジスタ等においても耐湿性向上効果が期待できる。

4. 今後の展開

プロジェクト参画機関を含むモジュールメーカーでの実証試験用材料または製品への採用を目指す。そのためには、既存材料に対する開発材料の優位性をさらに明確に示す必要があると考えている。2.3に記載した通り、高効率化、高耐湿化を目的とした材料技術開発と並行し、他機関での評価、自社評価レベル向上による高効率域での材料技術評価を進める。特に自社評価レベル向上は材料開発において正確な課題抽出を行うためにも重要と考えている。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	3	18(9)	17(10)	10(7)	0	48(26)
論文	0	0	0	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	0	1	1	1	0	3
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	富士フイルム(株)	特願 2016-068690	国内	2016/3/30	取下 (国内 優先)	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤および表面処 理用組成物	佐藤寛敬 他
2	富士フイルム(株)	特願 016-068784	国内	2016/3/30	取下 (国内 優先)	光電変換素子、 太陽電池および 組成物	佐藤寛敬 他
3	富士フイルム(株)	特願 2016-072734	国内	2016/3/31	取下 (PCT 出願)	光電変換素子、 太陽電池及び化 合物	佐藤寛敬 他
4	富士フイルム(株)	特願 2016-107853	国内	2016/5/30	取下 (国内 優先)	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤および表面処 理用組成物	佐藤寛敬 他
5	富士フイルム(株)	特願 2016-107661	国内	2016/5/30	取下 (PCT 出願)	光電変換素子、 太陽電池および 組成物	佐藤寛敬 他
6	富士フイルム(株)	特願 2016-107096	国内	2016/5/30	出願	光電変換素子の 製造方法	佐藤寛敬 他
7	富士フイルム(株)	特願 2016-140828	国内	2016/7/15	取下 (PCT 出願)	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤、表面処理用 組成物および表 面処理液	佐藤寛敬 他
8	富士フイルム(株)	特願 2016-168769	国内	2016/8/31	取下 (PCT 出願)	光電変換素子、 及び太陽電池	佐藤寛敬 他
9	富士フイルム(株)	特願 2016-168770	国内	2016/8/31	取下 (PCT 出願)	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、及びペロ ブスカイト型結 晶膜の表面処理 剤	佐藤寛敬 他

10	富士フイルム(株)	PCT /JP2017/004596	PCT	2017/2/8	各国移行	光電変換素子、 太陽電池および 組成物	佐藤寛敬 他
11	富士フイルム(株)	特願 2018-508508	国内	2017/2/8	登録	光電変換素子、 太陽電池および 組成物	佐藤寛敬 他
12	富士フイルム(株)	PCT /JP2017/005126	PCT	2017/2/13	各国移行	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤および表面処 理用組成物	佐藤寛敬 他
13	富士フイルム(株)	201780019654	CN	2017/2/13	出願	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤、表面処理用 組成物および表 面処理液	佐藤寛敬 他
14	富士フイルム(株)	17773739	EP	2017/2/13	出願放棄	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤、表面処理用 組成物および表 面処理液	佐藤寛敬 他
15	富士フイルム(株)	特願 2018-508528	国内	2017/2/13	登録	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤、表面処理用 組成物および表 面処理液	佐藤寛敬 他
16	富士フイルム(株)	16/141254	US	2017/2/13	出願放棄	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤、表面処理用 組成物および表 面処理液	佐藤寛敬 他
17	富士フイルム(株)	PCT JP2017/005393	PCT	2017/2/15	各国移行	光電変換素子、 太陽電池及び化 合物	佐藤寛敬 他
18	富士フイルム(株)	特願 2018-508539	国内	2017/2/15	登録	光電変換素子、 太陽電池及び化 合物	佐藤寛敬 他
19	富士フイルム(株)	201780015827.1	CN	2017/2/15	出願放棄	光電変換素子、 太陽電池及び化 合物	佐藤寛敬 他
20	富士フイルム(株)	17773763	EP	2017/2/15	出願放棄	光電変換素子、 太陽電池及び化 合物	佐藤寛敬 他
21	富士フイルム(株)	16/125970	US	2017/2/15	出願放棄	光電変換素子、 太陽電池及び化 合物	佐藤寛敬 他
22	富士フイルム(株)	特願 2017-100282	国内	2017/5/19	取下 (PCT)	光電変換素子、 太陽電池、光電	佐藤寛敬 他

					出願)	変換素子の製造方法及び感光層形成用組成物	
23	富士フイルム(株)	特願 2017-100283	国内	2017/5/19	出願放棄	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法及び光電変換素子用組成物	佐藤寛敬 他
24	富士フイルム(株)	PCT /JP2017/030699	PCT	2017/8/28	各国移行	光電変換素子、及び太陽電池	佐藤寛敬 他
25	富士フイルム(株)	201780052043.6	CN	2017/8/28	出願	光電変換素子、及び太陽電池	佐藤寛敬 他
26	富士フイルム(株)	17846389.9	EP	2017/8/28	出願放棄	光電変換素子、及び太陽電池	佐藤寛敬 他
27	富士フイルム(株)	特願 2018-537249	国内	2017/8/28	登録	光電変換素子、及び太陽電池	佐藤寛敬 他
28	富士フイルム(株)	10- 2019-7006773	KR	2017/8/28	出願放棄	光電変換素子、及び太陽電池	佐藤寛敬 他
29	富士フイルム(株)	16/285846	US	2017/8/28	出願放棄	光電変換素子、及び太陽電池	佐藤寛敬 他
30	富士フイルム(株)	PCT /JP2017/030700	PCT	2017/8/28	各国移行	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法、及びペロブスカイト型結晶膜の表面処理剤	佐藤寛敬 他
31	富士フイルム(株)	201780052165.5	CN	2017/8/28	出願	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法、及びペロブスカイト型結晶膜の表面処理剤	佐藤寛敬 他
32	富士フイルム(株)	17846390.7	EP	2017/8/28	出願放棄	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法、及びペロブスカイト型結晶膜の表面処理剤	佐藤寛敬 他
33	富士フイルム(株)	特願 2018-537250	国内	2017/8/28	登録	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法、及びペロブスカイト型結晶膜の表面処理剤	佐藤寛敬 他
34	富士フイルム(株)	10- 2019-7006774	KR	2017/8/28	出願放棄	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法、及びペロブスカイト型結晶膜の表面処理剤	佐藤寛敬 他

35	富士フィルム(株)	16/285752	US	2017/8/28	出願放棄	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法、及びペロブスカイト型結晶膜の表面処理剤	佐藤寛敬 他
36	富士フィルム(株)	特願 2017-176229	国内	2017/9/13	取下 (国内優先)	光電変換素子、太陽電池及び正孔輸送材料	佐藤寛敬
37	富士フィルム(株)	特願 2017-176230	国内	2017/9/13	取下 (国内優先)	光電変換素子の製造方法及び太陽電池の製造方法	佐藤寛敬
38	富士フィルム(株)	特願 2018-041971	国内	2018/3/8	取下 (PCT出願)	光電変換素子、太陽電池及び正孔輸送材料	佐藤寛敬
39	富士フィルム(株)	PCT /JP2018/014503	PCT	2018/4/5	各国移行	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法及び感光層形成用組成物	佐藤寛敬 他
40	富士フィルム(株)	201880024862.4	CN	2018/4/5	出願	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法及び感光層形成用組成物	佐藤寛敬 他
41	富士フィルム(株)	18801636.4	EP	2018/4/5	出願放棄	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法及び感光層形成用組成物	佐藤寛敬 他
42	富士フィルム(株)	特願 2019-519107	国内	2018/4/5	出願	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法及び感光層形成用組成物	佐藤寛敬 他
43	富士フィルム(株)	16/590400	US	2018/4/5	出願	光電変換素子、太陽電池、光電変換素子の製造方法及び感光層形成用組成物	佐藤寛敬 他
44	富士フィルム(株)	PCT /JP2018/021614	PCT	2018/6/5	各国移行	光電変換素子、太陽電池及び正孔輸送材料	佐藤寛敬
45	富士フィルム(株)	201880050424.5	CN	2018/6/5	出願	光電変換素子、太陽電池及び正孔輸送材料	佐藤寛敬
46	富士フィルム(株)	特願 2019-541651	国内	2018/6/5	出願	光電変換素子、太陽電池及び正孔輸送材料	佐藤寛敬
47	富士フィルム(株)	PCT /JP2018/021608	PCT	2018/6/5	各国移行	光電変換素子の製造方法及び太陽電池の製造方法	佐藤寛敬

48	富士フィルム(株)	特願 2019-541650	国内	2018/6/5	出願	光電変換素子の製造方法及び太陽電池の製造方法	佐藤寛敬
----	-----------	-------------------	----	----------	----	------------------------	------

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	佐藤 寛敬	富士フィルム株式会社	ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発－高性能材料合成技術の開発	NEDO 新エネルギー成果報告会ポスター発表	2016/10/31
2	佐藤 寛敬	富士フィルム株式会社	ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発－高性能材料合成技術の開発	NEDO 新エネルギー成果報告会ポスター発表	2017/9/22
3	佐藤 寛敬	富士フィルム株式会社	ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発－高性能材料合成技術の開発	NEDO 新エネルギー成果報告会ポスター発表	2018/10/4

F 基盤材料技術と性能評価技術の開発（早稲田大学、物質・材料研究開発機構、神奈川県立産業技術総合研究所）

1. 成果詳細

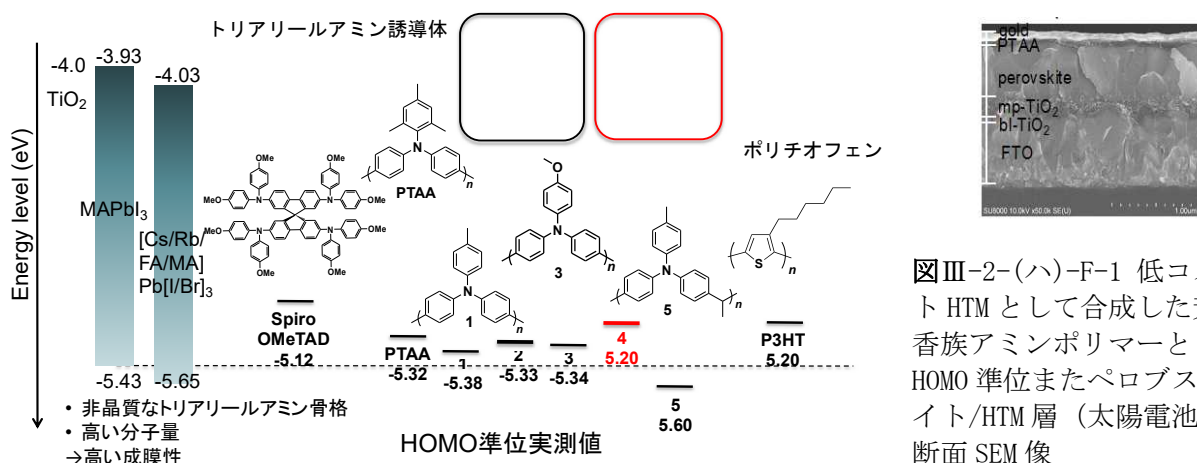
本開発項目では新構造太陽電池として革新的低製造コストが見込める日本発の太陽電池であるペロブスカイト太陽電池について 2030 年までに 7 円/kWh を実現する要素技術の確立を目指した。本テーマでは、早稲田大学にて東京大学集中研と連携して 高性能基盤材料技術の研究開発、再委託先である物質材料研究機構(NIMS)と連携して基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発、また再委託先である神奈川県立産業総合研究所(KISTEC)と連携して信頼性の高い性能評価手法の確立、を実施した。以下、委託先、再委託先ごとに開発成果を記述した。

(1) 高性能基盤材料技術の研究開発(早稲田大学)

本研究開発では、(1.1) モジュール用の低コストかつロバストなホール輸送材料(HTM)の開発、(1.2) 簡便な塗布工程をはじめ製造工程簡易化技術の開発、および(1.3) 準位・界面制御によるセル効率の向上と材料劣化抑制法の開発を実施した。

(1.1) モジュール用の低コストかつロバストなホール輸送材料 (HTM) の開発

順型メソポーラス素子における HTM の代表例であるスピロ環芳香族アミン(Spiro-OMeTAD, 市販例例えば 4 万円/g)を代替する、耐久性高く、低コストな HTM の開発を第一目標とした。また、酸化剤ドーピング無しで材料・セル寿命を担保しながらホール輸送性能が発現し得ることも要件として 20 種類余りの芳香族アミンポリマーを設計・合成した。なお類似構造では、PTAA(ポリトリルアールアミン)が市販されているがクロスカップリングによる還元重合で合成され、さらに極めて高価である。簡便・低コストな合成手法である化学酸化重合を従来知見活用のもと適用した。出発物となるモノマーは 1-2 ステップの工程で簡便に合成でき、精製方法も量合成に適した再結晶とした。汎用キャスト溶媒に易溶であるよう置換基の位置と数を変えた各ポリマーは非晶性で容易に均質な膜を与えた。電子供与性置換基、例えばメトキシ基の数、位置を変えペロブスカイト層に適した最高占有軌道(HOMO)準位(-5.2~-5.6eV)に調整できた(図III-2-(ハ)-F-1)。



代表例であるジメトキシ置換芳香族アミンポリマー4の合成では、一段階の酸化重合による高い収率で、1-3万と適当な分子量、高い溶媒溶解性をあわせもった HTM ポリマーとしてグラムスケールで得て、一部はパナソニック(株)、東大、桐蔭横浜大に提供した。HOMO 準位が-5.2eV で耐熱性もあり、広い面積での均質薄層の形成が可能で、約 40-100nm 厚の中を選択して薄く且つ均一な HTM 層を形成できた(図III-2-(ハ)-F-1 右)。混合カチオンのペロブスカイト層と組み合わせたセルで当時、Spiro-

OMeTAD と同等の変換効率 19.6% ($J_{sc} = 22.2 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 1.10 \text{ V}$, $FF = 0.81$) を示した。

特にペロブスカイト層の表面凸凹によらず均一に成膜可能な厚み、適切な溶媒と濃度、スピンコート、スプレー、バーコートなど各塗布法を含め、良質な成膜条件を最適化してマニュアル作成し、プロジェクト内で参画企業に提示し、HTM 成膜のノウハウとして個別相談にも応じた。

層の厚みが 50 nm として低い材料コスト 80 円/m² 以下が見込め、開発目標を達成した。 パナソニック㈱が開発のモジュールに適用した場合の性能、コスト計算について同社と共同し知財確立も進めた。

HTM 層への酸化剤・添加剤の役割を検証し、報告するとともに、無ドープ HTM の可能性を提示した。Spiro-OMeTAD を用いた HTM 層 (400-500nm 厚) では通常酸化ドーパント (FK209)、LiTFSI 塩、*t*-ブチルピリジンなどが添加される。酸化ドープによる濃度~5%アミニウムカチオンラジカルの生成 (ホールキャリアに相当)、芳香族アミノポリマーでも酸化ドーパントの添加でキャリア濃度が向上し、HTM 層の最適膜厚と相関性を示した。FK209 代替として TEMPO カチオン塩を用いた微ドープでは、酸化剤残渣の昇華完全除去も可能で、HTM 層厚みも 40nm から 100nm まで対応でき、凸凹したペロブスカイト層でも欠陥なく塗布できた、セル寿命も向上した。なお Li⁺ではなく TFSI アニオンの共存が発電特性へ寄与することも示した。HTM ドーパントの役割と劣化機構に絞った実験と解釈は初めての知見で、性能向上・寿命担保のため意義は極めて大きい。

その他、ホール移動度が極めて高いジケトピロロピロールポリチオフェンなど巾広く共役高分子についてペロブスカイト太陽電池向け HTM としての適用可否を選別し、次世代のペロブスカイト層への対応材料としてプロジェクト内で関心を得ている。

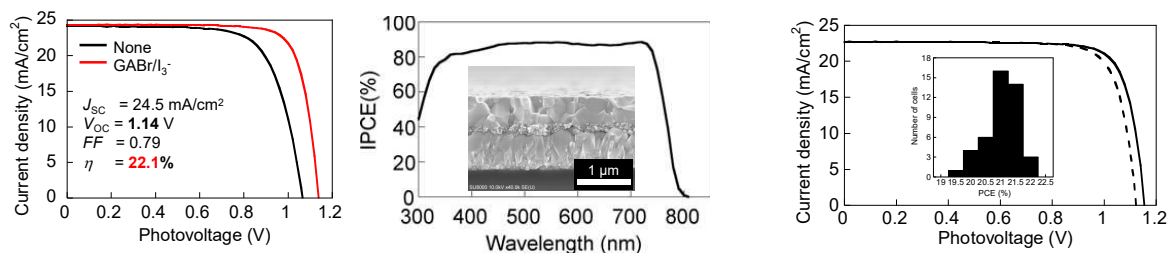
(1.2) 簡便な塗布工程はじめ製造工程簡易化によるコスト低減

ペロブスカイトの一段塗布に向けたインキの調製法をはじめて開発した。 ペロブスカイト前駆体懸濁液にメチルアミンガスを吹き込み可溶化した黄色透明溶液を一段塗布用インキとして調製した。これを基板上に塗布、加熱アニーリング (100-150°C 程度) して、黒色ペロブスカイト層を形成した。3 カチオン混合ペロブスカイト組成 $\text{Cs}_{0.05}(\text{MA}_{0.83}\text{FA}_{0.17})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$ に、界面活性剤ドデシルトリメチルアンモニウムクロリドとポリメチルメタクリレート少量添加によるインキの粘性調整により、5×5cm をバーコーターで均質塗布、作製したセルで変換効率 17.2% を達成した。

セル製造工程で安全・作業環境担保で優位ある無溶剤ペロブスカイト作製法としての共蒸着法も真空蒸着装置を改良し開発した。 ITO/ATO 基板に形成したチタニア ($c\text{-TiO}_2$) + フラーレン誘導体 (PCBM) 下地層に対し、ヨウ化鉛と有機アンモニウム塩の共蒸着によりペロブスカイト層を形成した。例えば蒸着速度 $\text{MAI}:\text{PbI}_2 = 4:1$ に調整した共蒸着により残存 PbI_2 のないペロブスカイト層 (100nm) が形成され、光電変換効率 11.5% を示した。続けて蒸着法により臭化ホルムアミジニウム (FABr) を 5nm 厚で境界面無く積層でき、変換効率 11.8% まで向上した。さらにヨウ化ホルムアミジニウム (FAI) と PbI_2 、ヨウ化メチルアンモニウム (MAI) と PbI_2 をそれぞれ共蒸着、積層タンデム形成したセルも作製した。無溶剤で質を担保しながらそれぞれ層厚みの向上を図ることで更なる特性の向上が期待できる。

(1.3) 準位・界面制御によるセル効率の向上と材料劣化抑制法の開発

まずペロブスカイト/HTM 層界面の修飾により効率向上した。貧溶媒滴下法によりペロブスカイト層を形成後、ポリ (4-ビニルフェノール) / 臭化グアニジニウム (GABr) 溶液を塗布、加熱乾燥を経てペロブスカイト層の表面改質・界面修飾したセルにおいて、変換効率 21.8% を示した。ポリビニルフェノールは Pb イオンと弱い相互作用し、ペロブスカイト層表面に偏在し電荷再結合を抑制し、 V_{oc} と効率向上に寄与していると解析した。さらに三ヨウ化物イオン (I_3^-) を添加することで、ヨウ素欠陥を埋め当時世界水準の変換効率 22.1% を達成した (図 III-2-(ハ)-F-2 左)。界面修飾のノウハウはアイシン精機㈱に実地立会いで提示した。

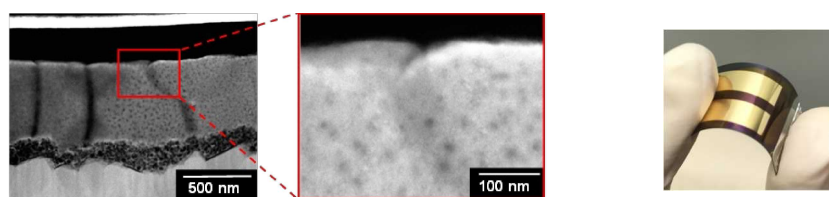


図III-2-(ハ)-F-2 ポリ(ビニルフェノール)/グアニジニウム塩によるペロブスカイト層の界面修飾 (左) と m-TiO₂ をポリビニルカルバゾール/PCBM 処理したセルの光電変換特性 (右)

一方、ペロブスカイト/電子輸送層界面の修飾によっても効率向上を計った。m-TiO₂ 電子輸送層とペロブスカイト層の界面の欠陥改善に、ポリビニルカルバゾールと PCBM の組み合せた修飾が有効であることを見出し、4 カチオン系ペロブスカイト組成等の最適化と合わせて、V_{oc} の向上 (1.16 V)、当時世界水準の効率 21.1% (トップ数セルでは 22%) を達成した (図III-2-(ハ)-F-2 右, J_{sc} = 22.7 mA/cm², FF = 0.80)。ポリビニルカルバゾールは m-TiO₂ 層表面に PCBM を分子分散する足場となり、かつ抵抗層とならず、逆電子移動を抑制する機作を明らかにした。

以上、ペロブスカイト界面修飾による改善を両側界面で実施すれば、計算上は>23%が見込めるので、相乗効果を試験するための要件を整理した。

ペロブスカイト層およびセル耐久性の向上に関わる要素技術としては、まず高分子添加による補強に成功した。ペロブスカイト層の形成時に微〜少量の高分子を添加すると、良質なペロブスカイト粒塊の形成が促進され、効率と耐久性の向上に寄与することを見出した。分子量 1~10 万のポリメチルメタクリレートの溶液を 0.1wt%前後でペロブスカイト層の形成時に添加すると、結晶核の生成が制御され、結果として結晶が密に形成されペロブスカイト層内の抵抗が減少し、再現性高く変換効率が向上した。この手順はパナソニック㈱に開示した。一般的な有機高分子、例えばポリ(N-ビニルピロリドン)の添加は抵抗となり電流値は激減する。しかし、ポリフッ化ビニリデン (PVdF) など限られた高分子の添加では効率 19%は低減せず、セルの耐水性や耐久性が向上した。



図III-2-(ハ)-F-3 PVdF添加ペロブスカイト層の断面分析とフレキシブル基板上に作製した太陽電池

これら高分子補強ペロブスカイト層について一般性と機作を検討した。PVdFは無機粒子の結着作用あり、電池電極のバインダとしても汎用されているが、PVdF添加ペロブスカイト層でも結晶粒塊の界面に偏在していた (図3)。フレキシブル基板上に形成したPVdF添加ペロブスカイト層は、繰り返しの折り曲げでも崩壊せず、性能を保持した (図III-2-(ハ)-F-3右)。

光照射下での劣化機構の一つを解明しその抑制法を開発し、新たな技術として開拓した。大気下で光励起したペロブスカイトがセル内に残存する酸素と反応して活性酸素を生成し、ペロブスカイト自身は有機アミンとヨウ素、ヨウ化鉛に分解する経路が報告されている。ペロブスカイト層に大気下、1 Sun 照射し、活性酸素量とペロブスカイトが数時間で分解して生成してくるメチルアミ

ン量をはじめて定量した。光照射下での活性酸素による劣化の抑制方法として、酸化還元能ある TEMPO ポリマー (図 III-2-(ハ)-F-4) をペロブスカイト層形成時に少量 (0.3%程度) 添加し、TEMPO により活性酸素をクエンチする方法を見出した。添加によりペロブスカイトの分解劣化は 1/3 以下に抑制された。TEMPO ポリマーは電荷輸送性あり、セルの J_{sc} は低下せず効率 19% を保持した。さらに汎用性の高い酸化防止剤 (ヒンダードアミン、ヒンダードフェノール) を 0.1wt% 添加したセルにおいても、ペロブスカイト層の形成を阻害することなくセル特性を維持し、大気中連続光照射しても PbI_2 の副生が減少し、光酸化劣化を抑制する効果を明らかにした。

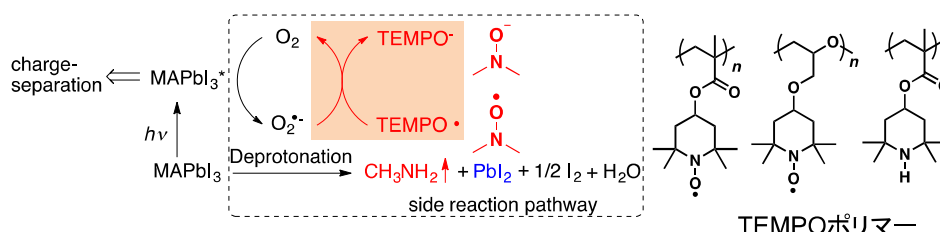


図 III-2-(ハ)-F-4 光照射・活性酸素によるペロブスカイトの劣化分解反応と TEMPOポリマー添加による抑制

以上、開発目的の要素技術を以下のように確立した。

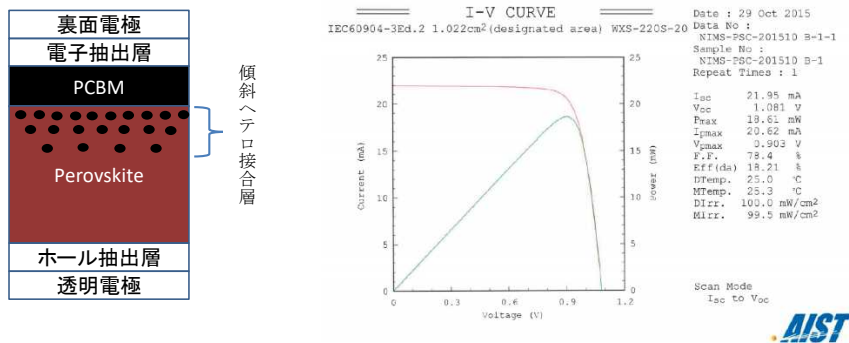
- ・ HTM をより安価な原料と工程から合成し、効率 20%以上達成可能な材料としてコスト 100 円/m²以下を実現した。
- ・ 製造工程コスト 150 円/m²以下となり得る簡易な工程の候補を提示した。
- ・ 小面積セル効率 22%超を実証し、その要素技術との組み合わせにより 25%を達成し得ることを明示した。

(2) 基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発 (物質材料研究機構, NIMS)

本研究開発では、(2.1)基盤技術の改良に向けた研究開発、(2.2) 認証データ取得に向けた性能計測技術を実施した。

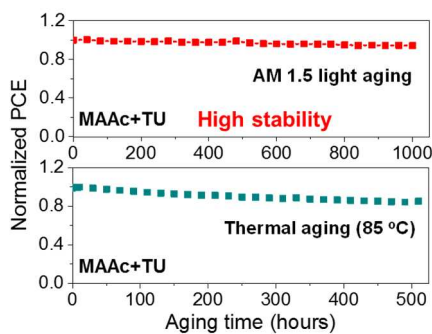
(2.1) 基盤技術の改良に向けた研究開発

光電変換効率の向上にまず逆型構造セルで成功した。電子輸送層である PCBM の一部がペロブスカイト層に入り込む傾斜ヘテロ接合構造を電子収集効率の向上のため開発した (図 III-2-(ハ)-F-5)。ホール抽出 (輸送) 層 (NiO) 上に 1 段法でペロブスカイトを形成する際、PCBM のトルエン溶液を滴下することで傾斜型構造を形成後、PCBM 層を積層、逆型セルを作製した。傾斜型構造により電子が容易に PCBM 層に到達でき、 J_{sc} は約 4mA/cm² 増大し、電子とホールの再結合の低減により V_{oc} も約 0.15V と大幅に向上した。産総研 (AIST) による変換効率 18.2%が認証され、当時、逆型ペロブスカイト太陽電池の世界最高変換効率 (認証値) を示した (図 III-2-(ハ)-F-5)。また連続照射試験では実用化の目安となる光強度 1Sun 下で 1000 時間の耐久性も達成した。



図III-2-(ハ)-F-5 傾斜ヘテロ接合構造ペロブスカイト太陽電池のセル構成とAISTによる認証変換効率

温度85° C、500時間での耐熱試験でも初期変換効率の80%以上を維持した(図III-2-(ハ)-F-6)。耐熱試験後のセルを分解し解析したところ、裏面電極層でヨウ素を検出し、ペロブスカイトのヨウ化メチルアンモニウムの拡散と裏面電極の酸化を示唆した。n型の窒素ドーピンググラフェンのPCBM層への添加でペロブスカイトの耐湿性が向上し、ヨウ化メチルアンモニウムの電極層への拡散も低減され、耐熱試験500時間後も変換効率の低下を抑制できた。



図III-2-(ハ)-F-6 ペロブスカイト太陽電池の光連続照射試験(上)及び耐熱試験(下)

次に、ペロブスカイト組成としてコスト低減の観点から最も単純なMAPbI₃および簡単な1段法で、変換効率と安定性の向上余地を検証した。酢酸メチルアンモニウムおよびチオセミカルバジド両者を添加剤とすると、ペロブスカイト層の電子寿命の向上と欠陥密度の低減が示され、AIST認証変換効率は世界最高水準19.2%であった。さらにドナー・アクセプター共役分子によるペロブスカイト層の界面処理により欠陥密度が減少し、最適化したセルの効率は20.43%まで向上した。

光電荷分離の機構解明では、ケルビンプローブフォース顕微鏡によるセル断面のポテンシャル計測から、メソポーラス構造セルではTiO₂/ペロブスカイト界面、平面構造セルでは、p型ペロブスカイト層でTiO₂との界面、n型ペロブスカイト層でHTMとの界面が、pn接合面となることを明らかにした。

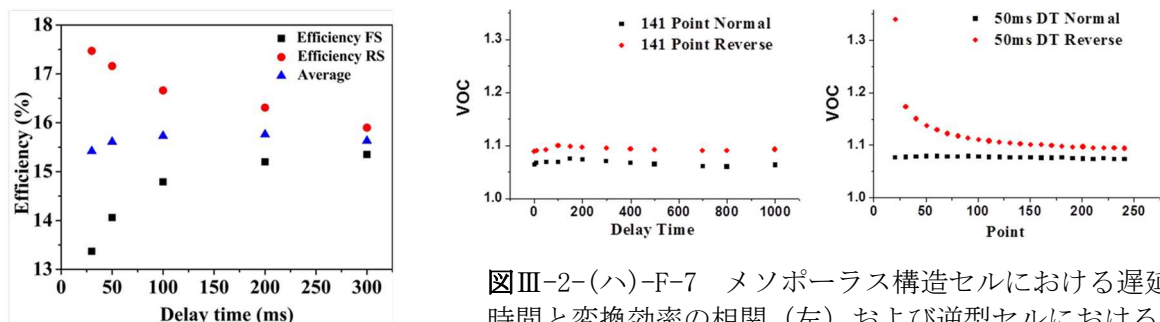
非鉛Sn系ペロブスカイトでは、ポリビニルアルコール、有機系ルイス塩基など添加剤の適用で、欠陥密度の低減、結晶の垂直配向により非鉛Sn系で世界最高の認証変換効率10.16%(Newport)を達成した。またペロブスカイト表面に還元性層の形成で、酸素濃度高い雰囲気下でも9%以上の変換効率を得た。

(2.2) 認証データ取得に向けた性能計測技術

比較的大きなヒステリシス特性を有するペロブスカイト太陽電池の変換効率を信頼性高く計測する方法として、メソポーラス構造と逆型構造セルを対象に測定条件を最適化し提示した(遅延時間、電圧スキャン方法等)。

電流-電圧(J-V)測定における信頼性向上:メソポーラス構造セルでは順方向(FS)と逆方向(RS)スキャ

ンにより得られる変換効率の差(ヒステリシス)が遅延時間の延長により小さくなった。遅延時間を 50 ms 以上に設定することで、両スキャンで得られる効率の平均値が一定となり高精度でセル効率を計測できた(図III-2-(ハ)-F-7)。一方、逆型セルでは、両スキャンで得られる V_{oc} の差は遅延時間の延長によらずほぼ同じで(図III-2-(ハ)-F-7 中央)、ヒステリシスを抑制できなかった。遅延時間を固定し、印加電圧幅を 5 mV と小でヒステリシスの影響が無視できる(V_{oc} の差小)ことを見出した(図III-2-(ハ)-F-7 右)。高精度(誤差>1%)でペロブスカイト太陽電池の変換効率を測定できる利点がある。



図III-2-(ハ)-F-7 メソポーラス構造セルにおける遅延時間と変換効率の相関(左)および逆型セルにおける遅延時間(中央)と電圧印加幅(右)によるヒステリシスへの影響

外部量子効率(IPCE)測定における信頼性向上: IPCE 測定では AC と DC モード、さらに白色バイアス光の有無などの測定条件がある。逆型構造セルを対象に J-V、IPCE 測定した。白色バイアス光無しで IPCE から得られた積分電流密度は 22.19(DC)および 22.44mA/cm²(AC モード)となり、J-V 測定で得られた平均電流密度 21.70mA/cm² よりそれぞれ 2.26%および 3.41%過大評価された。一方、AM 1.5G 白色バイアス光下では積分電流密度は 21.71mA/cm²(AC モード)で J-V 測定の平均電流密度とよく一致した。なお白色バイアス光下 DC モードでの IPCE 値は全波長範囲でノイズ信号があった。以上より、正確な IPCE 測定には白色光バイアスの AC モードを推奨した。また AC モードのチョッピング周波数(4~64Hz)の影響は小さいが積分電流値が徐々に増加するため、低い周波数での測定が適した。

以上、信頼性高い測定方法として下記を提案した。(i) メソポーラス構造セルでは、遅延時間を 100 ms 以上に設定し、順方向および逆方向で電圧掃引し、得られた変換効率の平均値をとる。(ii) 逆型構造セルでは、電圧印加幅をなるべく小さく(10mV 未満)、遅延時間は 100ms に設定する。(iii) IPCE 測定は低周波数 AC モードで AM1.5G 白色バイアス光照射下での測定で J-V 結果と一致した正確な値が得られる。

以上、以下の要素技術を確立した。

- ・連続光照射 1000 時間超えても安定なセル(構成)をいくつか実証提示した。
- ・ヒステリシスを効率 1%以内にするセル構造と計測法をまとめた。
- ・逆型セルを中心に認証効率 19%超を先導して実証するとともに、セル構造・光電変換の機作を解明した。

(3) 信頼性の高い性能評価手法の確立(神奈川県産業技術総合研究所, KISTEC)

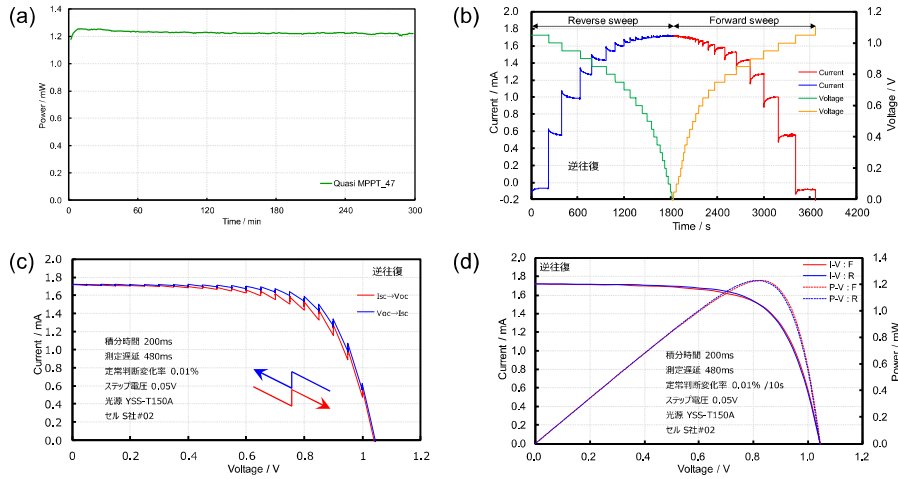
環境制御下での発電性能の決定因子を整理し、信頼性、再現性高いセル性能評価手法を確立することを目的とした。

まずセル測定環境を整備した。市販のグローブボックスに追加加工を施して、湿度・酸素濃度を制御した状態で光照射、特性計測ができる試験槽を新たに設計、作製した。セルを4枚固定できる固定具およびセル作製場所から KISTEC まで、真空置換した状態で搬送できる容器を作製した。12個のセルを同時に測定できる 12ch 同時測定ソースメーターを作製した(特許出願)。より大きな面積の太陽電池セル・モジュールに対応できるよう、まず 25mm 角に対応したセル固定具を設計、設置した。背面電極の本数を増やすことにより、異なる形状のセルにも対応できる。環境制御型グローブボックスに酸素濃度・湿度のオートページ機能を追加するとともに、一定酸素濃度ガス供給装置を作製し、分光感度測定用小型密封ボックスに併設した。

プロジェクト内の東京大学、御国色素株、京都大学のセルの光電変換特性を測定した。環境制御測定槽での長期間の連続測定での性能変動を分析し、セルの冷却やセル封止の時期などを提案した。順次受入れセル数、セル構造、形状を拡げてデータを蓄積するとともに、AIST との意見交換も含め、標準となる測定手順の提示、測定方法の改良と信頼性向上を計った。積水化学工業株の封止済みセルで、温度特性および J-V 測定以外の手法との比較、不確かさ算出を行った。測定温度上昇(10~65°C)に伴い J_{sc} 、 V_{oc} とともに低下するが、これらは順掃引で上昇、逆掃引で低下してヒステリシスが小さくなった。J-V 測定の条件を変えてもヒステリシスが解消できないセルに対しては、定電圧法と MPPT 法との比較により、真値と思われる P_{max} 導出を明らかにした。

MPPT 法のアルゴリズム最適化により、往復掃引(開放電圧側からの掃引と短絡電流側からの掃引)による不一致を低減し、高い再現性を確保できた。MPPT 測定機を所有しない機関に向け、通常のソースメーターでも対応できる電圧固定法(最大出力を発生する電圧付近に電圧を固定し電流値変化を計測)を検討し、MPPT 法と同程度の再現性を確認できた。パナソニック株のセルも対象にし、最適化プログラムが適用できることを明らかにした。セルの測定標準化事業を通じ AIST、電気安全環境研究所との連携により、同一セルによるラウンドロビン試験を実施し、測定方法の改良と信頼性の向上も進めた。

異なる種類のデバイスに対しても安定した性能評価を実施できる測定法の確立を目的として、J-V 測定法以外に MPPT 法、Dynamic J-V 法、Reduced J-V Span 法、定電圧保持法を比較検討した。市販の MPPT 測定装置(SPD 研究所製)では最大出力点を見失い発振現象を引き起こすなど安定した測定が実現できないため、プログラムを内製し MPPT 法と Dynamic J-V 法のアルゴリズムを検討した。設定した電圧変化に対して常に同じ掃引方向で変化させるアルゴリズムへの改良で、積水化学工業株およびパナソニック株セルを対象に有効性を明らかにした(図 III-2-(ハ)-F-8)。同時に開発を進めた Dynamic J-V 法のプログラムも電流値の定常判断を重視した。検証結果は再現性が高かったが、MPPT 法と比較すると測定時間が長くなるという課題があった。MPPT 法であれば比較的短時間、デバイスの種類によっては数分で定常値に達し、その後は安定して最大出力を追尾できた。なお、同一セルを使用して産総研との比較試験では、MPPT 法による結果の差は約 4%に収まった。以上、MPPT 法を最有力な測定法として結論づけた。



図Ⅲ-2-(ハ)-F-8 MPPT 法のアルゴリズム改良による信頼度向上 (a) MPPT 法による長時間計測, (b) 元データへ変換, (c) J - V 曲線への変換, (d) (c) の収束値で近似 (ヒステリシスの解消)

以上、測定環境槽を設置し、各種計測法の比較から、信頼性ある MPPT 法の精度を高め、測定手順を示した。

以上の成果は国際学術誌に、NEDO 本プロジェクトの成果である旨を謝辞に明記のもと、34 報印刷発表した。それらはペロブスカイト太陽電池に関して世界的に先導する論文として引用・評価は高い。関連国際学会での成果発表では、多く表彰されており、NEDO プロジェクトとしての水準の高さとインパクトを映している。

2. 実用化・事業化見通し

本研究開発はプロジェクト内で特にパナソニック(株)と緊密に打合せして、その実用化に向け開発要素技術のチューニングまで踏み込んで実施した。具体的には、(1) ホール輸送材料(HTM)の開発では当該開発のインクジェット塗布法に適した特注の HTM の提供と塗布液条件(HTM 濃度、溶剤、粘性)、(2) セル劣化を誘発する第一原因である HTM へのドーパント剤につき、残査無しのドーパント剤またドーパントフリーでの活性 HTM 層調整法の提示である。これらはパナソニック(株)が実用化を目指すペロブスカイト太陽電池に部分的に組み込まれるものと理解している。また 2020 年度より発足の NEDO「太陽光発電の新市場創造技術開発/壁面設置太陽光発電システム技術開発 (開口部)」にパナソニック(株)と共同提案し、「高性能化に向けた BIPV(建材一体型太陽電池)材料技術開発」として採択され、引き続き研究開発を開始している。

本研究開発の目標である低い材料コスト 80 円/㎡以下を達成し、かつロバスタな HTM 材料である芳香族アミンポリマーは、パナソニック(株)が開発中のモジュールに適用して性能を確認した後、現在引き続き、依頼合成先候補である東京化成(株)と、同社販売のエネルギー機能試薬の一つとして協議中である。

なお、(i) 微量のポリメチルメタクリレート(PMMA)をペロブスカイト層形成時に添加して、密で揃ったペロブスカイト結晶層を生成させる手法はパナソニック(株)、(ii) ペロブスカイト/HTM 層界面の改質・修飾とセル作製して変換効率 22%を再現性良く得る手順はアイシン精機(株)に、共に両社の研究員複数が実地立会いで教示、実験ノウハウとして提示した。(iii) HTM ドーパントの役割と劣化機構の解明、(iv) 照射下での劣化機構の一つの解明と抑制添加剤の開発は、セル性能と寿命担保としてプロジェクト参画企業で評価され、共有された。これらは参画各社が実用化進めるなかで咀嚼して利活用されると想定している。

再委託先 NIMS は基盤技術として、特に逆型構造セルで独自の構成法を開発し、当時、世界最高効率

(認証データ)もアピールしている。(株)東芝にセル構成手順を開示している。連続光照射 1000 時間超えのためのセル構成要件と劣化因子を提示し、プロジェクト内で共有した。共通基盤技術である、信頼性高い性能評価技術の開発では、再委託先 NIMS、KISTEC において、(i) ヒステリシスを効率 1%以内にす計測法、(ii) IPCE 測定モード条件、(iii) プロジェクト内各社製セルを対象に測定法の長短をまとめ MPPT 法を改良、などを提示し、実用化に向けた共通技術とした。

3. 波及効果

(1) 我が国発の太陽電池であるペロブスカイト太陽電池の学術的な切り口においても、国際誌・学会での水準高い多くの発表により、世界トップを併走していることをアピールできた。

(2) 光電変換性能の計測・評価技術の開発成果は、ペロブスカイト太陽電池に留まらず、有機太陽電池(バルクヘテロ型、色素増感型)にも共通するもので、これら電池の性能評価の標準化に寄与した。

(3) 鉛 Pb 有機アミンハロゲン化物から成るペロブスカイトを光電変換層とする太陽電池を対象とするプロジェクトであったが、錫 Sn 系ペロブスカイトでの工夫により世界最高の認証変換効率 10.2%を実証し、非鉛ペロブスカイト太陽電池に波及した。また良質なペロブスカイト結晶層の形成には、安全性高くない極性高沸点溶剤を多用するが、無溶剤・共蒸着法によるペロブスカイト層作成法も確立したことは、太陽電池の簡易・環境負担少ない製造プロセスとして一つの知見となった。

(4) 開発された低コストでロバストなホール輸送材料 (HTM) は、ペロブスカイト太陽電池以外にも、広く電子デバイスの HTM として用途が見込まれ、量合成依頼先も市販を目論んでいる。

(5) 開発された高分子補強されたペロブスカイト層の形成方法は、耐水性ありフレキシブルで一定厚みもつ同フィルムの出現に繋がり、広く電子物性が基礎研究されてきた鉛有機アミンハロゲン化物ペロブスカイトの用途拡張に波及する。

(6) PV EXPO での基調講演など、一般向けの情報発信にも努めた。

(7) ペロブスカイト太陽電池の発見者である、宮坂力・横浜桐蔭大学・名誉教授を早稲田大学客員教授に嘱任し、集中講義を通して本 NEDO プロジェクト成果も含め学生・若手研究者を啓蒙し、人材育成にも成果を得た。

4. 今後の展開

本 NEDO プロジェクトでの研究開発成果と実績を起点に、令 2020 年度発足の NEDO「太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発/壁面設置太陽光発電システム技術開発(壁面設置太陽光発電システムの技術開発(開口部))」にパナソニック(株)と共同で提案し、早稲田大学(担当:須賀健雄・専任講師)は同プロジェクト内の「高性能化に向けた BIPV 材料技術開発」として採択された。

本プロジェクトでの開発成果、低コスト・ロバストなホール輸送材料およびペロブスカイトインキの一段塗布によるセル・モジュール作成工程は、次期プロジェクトでさらに実用化目標物を絞った開発における鍵材料として計画されている。変換効率 25%超のタンデム型ペロブスカイト太陽電池のモジュールで、壁面開口部(窓)に設置実用化を、共同提案者であるパナソニック(株)は 5 年計画の出口に据えている。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	1	0	0	0	0	1
論文	0	6	7	7	14	34
研究発表・講演 (うち国際会議)	6	12	25	18	16	77
新聞・雑誌等への掲載	2	2	0	0	0	4
その他(受賞実績)	0	0	1	6	2	9

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	神奈川科学 技術アカデ ミー、 株式会社セ ルシステム	特願 2016-057127	国内	2016/03/22	審査中	電流電圧測定 システム及び 電流電圧測定 方法	斎藤英純, 渡脩, 田村裕

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	丸尾浩史, 西出宏之	早大	高分子電荷輸送材料とペロブス カイト太陽電池	光触媒, 49, 40	無	2016/6
2	H. Maruo, S. Tanaka, M. Takamura, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda U. /U. Tokyo	Oxoammonium cation of 2, 2, 6, 6- tetramethylpiperidin-1-oxyl: a very efficient dopant for hole-transporting triaryl amines in a perovskite solar cell	MRS Communications, 8, 122.	有	2018/1/29
3	K. Suwa, S. Tanaka, K. Oyaizu, H. Nishide	Waseda U.	Arylamine Polymers Prepared via Facile Paraldehyde Addition Condensation: an Effective Hole-transporting Material for Perovskite Solar Cells	Polymer International, 67, 670-674	有	2018/4/1
4	W. Okada, T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda U. /U. Tokyo	Perovskite/TiO ₂ Interface Passivation Using Poly(vinylcarbazole) and Fullerene for the Photovoltaic Conversion Efficiency of 21%	ACS Appl. Energy Mater., 2, 2848	有	2019/3/6
5	H. Maruo, Y. Sasaki, K. Harada, K. Suwa, K. Oyaizu, H. Segawa, K. Carter, H. Nishide	Waseda U. /U. Tokyo	Hole-transporting Diketopyrrolopyrrole- thiophene Polymers and Their Additive-free Application for a Perovskite-type Solar Cell with an Efficiency of 16.3%	Polymer J., 51, 91-96	有	2019/10
6	K. Suwa, K. Oyaizu, H. Segawa,	Waseda U. /U. Tokyo	Anti-Oxidizing Radical Polymer-Incorporated Perovskite Layers and their	ChemSusChem, 12, 5207 -5212	有	2019/10

	H. Nishide		Photovoltaic Characteristics in Solar Cells			
7	K. Suwa, L. Cojocar, K. Wienands, C. Hofmann, P. S. C. Schulze, A. J. Bett, K. Winkler, J. C. Goldschmidt, S. W. Glunz, H. Nishide	Waseda U.	Vapor-Phase Formation of a Hole-Transporting Thiophene Polymer layer for Evaporated Perovskite Solar Cells	ACS Applied Materials & Interfaces, 12 , 6496-6502	有	2020/2
8	K. Suwa, T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda U. /U. Tokyo	Phenolic antioxidant-incorporated durable perovskite layers and their application for a solar cell	MRS Communications, DOI: 10.155/mrc.2020.25	有	2020/4/15
9	M. Yin, F. Xie, H. Chen, X. Yang, F. Ye, E. Bi, Y. Wu, M. Cai, L. Han	NIMS	Annealing-free perovskite films by instant crystallization for efficient solar cells	Journal of Materials Chemistry A, 4 , 8548-8553	有	2016/5/4
10	F. Ye, H. Chen, F. Xie, W. Tang, M. Yin, J. He, E. Bi, Y. Wang, X. Yang, L. Han	NIMS	Soft-cover deposition of scaling-up uniform perovskite thin films for high cost-performance solar cells	Energy & Environmental Science, 9 , 2295-2301	有	2016/6/17
11	M. Cai, Y. Wu, H. Chen, X. Yang, Y. Qiang, L. Han	NIMS	Cost-Performance Analysis of Perovskite Solar Modules	Advanced Science, 4 , 1600269	有	2016/9/15
12	Y. Wu, X. Yang, C. Wei, Y. You, C. Cai, F. Xia, E. Bi, A. Islam, L. Han	NIMS	Perovskite solar cells with 18.21% efficiency and area over 1 cm ² fabricated by heterojunction engineering	Nature Energy, 1 , 16148	有	2016/9/19
13	Y. Yue, N. T. Salim, Y. Wu, X. Yang, A. Islam,	NIMS	Enhanced Stability of Perovskite Solar Cells through Corrosion-Free Pyridine Derivatives in Hole-Transporting Materials	Advanced Materials, 28 , 10738-10743	有	2016/10/5

	W. Chen, J. Liu, E. Bi, F. Xie, M. Cai, L. Han					
14	Y. Wu, F. Xie, H. Chen, X. Yang, H. Su, M. Cai, Z. Zhou, T. Noda, L. Han	NIMS	Thermally Stable MAPbI ₃ Perovskite Solar Cells with Efficiency of 19.19% and Area over 1 cm ² achieved by Additive Engineering	Advanced Materials, 29 , 1701073	有	2017/5/19
15	M. Yin, F. Xie, X. Li, Y. Wu, X. Yang, F. Ye, Y. Wang, J. He, W. Tang, E. Bi, H. Chen, L. Han	NIMS	Accurate and fast evaluation of perovskite solar cells with least hysteresis	Applied Physics Express, 10 , 076601	有	2017/6/7
16	F. Ye, F. Xie, M. Yin, J. He, Y. Wang, W. Tang, H. Chen, X. Yang, L. Han	NIMS	Effect of thermal-convection-induced defects on the performance of perovskite solar cells	Applied Physics Express, 10 , 075502	有	2017/6/7
17	E. Bi, H. Chen, F. Xie, Y. Wu, W. Chen, Y. Su, A. Islam, M. Gratzel, X. Yang, L. Han	NIMS	Diffusion engineering of ions and charge carriers for stable efficient perovskite solar cells	Nature Communications, 8 , 15330	有	2017/6/12
18	F. Ye, W. Tang, F. Xie, M. Yin, J. He, Y. Wang, H. Chen, Y. Qiang, X. Yang, L. Han	NIMS	Low-Temperature Soft-Cover Deposition of Uniform Large-Scale Perovskite Films for High-Performance Solar Cells	Advanced Materials, 29 , 1701440	有	2017/7/14
19	Z. Zhou, X. Li,	NIMS	Stable Inverted Planar Perovskite Solar Cells with	Advanced Energy Materials,	有	2017/8/25

	M. Cai, F. Xie, Y. Wu, Z. Lan, X. Yang, Y. Qiang, A. Islam, L. Han		Low-Temperature-Processed Hole-Transport Bilayer	7, 1700763		
20	X. Liu, Y. Wang, F. Xie, X. Yang, L. Han	NIMS	Improving the Performance of Inverted Formamidinium Tin Iodide Perovskite Solar Cells by Reducing the Energy-Level Mismatch	ACS Energy Letters, 3, 1116-1121	有	2018/4/11
21	X. Li, C. C. Chen, M. Cai, X. Hua, F. Xie, X. Liu, J. Hua, Y. Long, H. Tian, L. Han	NIMS	Efficient Passivation of Hybrid Perovskite Solar Cells Using Organic Dyes with -COOH Functional Group	Advanced Energy Materials, 8, 1800715	有	2018/4/16
22	韓礼元	NIMS	新構造ペロブスカイト太陽電池	応用物理, 87, 7, 501	無	2018/7/1
23	Y. Wang, X. Liu, Z. Zhou, P. Ru, H. Chen, X. Yang, L. Han	NIMS	Reliable Measurement of Perovskite Solar Cells	Advanced Materials, 31, 1803231	有	2019/1/21
24	T. Wu, Y. Wang, X. Li, Y. Wu, X. Meng, D. Cui, X. Yang, L. Han	NIMS	Efficient Defect Passivation for Perovskite Solar Cells by Controlling the Electron Density Distribution of Donor- π -Acceptor Molecules	Advanced Energy Materials, 9, 1803766	有	2019/3/6
25	Y. Wang, L. Han	NIMS	Research activities on perovskite solar cells in China	Science China Chemistry, 62, 822-828		2019/4/2
26	T. Wu, Y. Wang, Z. Dai, D. Cui, T. Wang, X. Meng, E. Bi, X. Yang, L. Han	NIMS	Efficient and Stable CsPbI ₃ Solar Cells via Regulating Lattice Distortion with Surface Organic Terminal Groups	Advanced Materials, 24, 1900605		2019/4/18
27	Y. Wan, T. Wu, J. Barbaud, W. Kong, D. Cui, H. Chen,	NIMS	Stabilizing heterostructures of soft perovskite semiconductors	Science, 365, 687-691		2019/8/16

	X. Yang, L. Han					
28	X. Meng, J. Lin, X. Liu, X. He, Y. Wang, T. Noda, T. Wu, X. Yang, L. Han	NIMS	Highly Stable and Efficient FASnI ₃ -Based Perovskite Solar Cells by Introducing Hydrogen Bonding	Advanced Materials, 31 , 1903721	有	2019/10/15
29	E. Bi, W. Tang, H. Chen, Y. Wang, J. Barbaud, T. Wu, W. Kong, P. Tu, H. Zhu, X. Zeng, J. He, S. Kan, X. Yang, M. Gratzel, L. Han	NIMS	Efficient Perovskite Solar Cell Modules with High Stability Enabled by Iodide Diffusion Barriers	Joule, 3 , 2748-2760	有	2019/11/20
30	T. Wu, X. Liu, X. He, Y. Wang, X. Meng, T. Noda, X. Yang, L. Han	NIMS	Efficient and stable tin- based perovskite solar cells by introducing π - conjugated Lewis base	Science China Chemistry, 63 , 107-115	有	2019/12/11
31	X. He, T. Wu, X. Liu, Y. Wang, X. Meng, J. Wu, T. Noda, X. Yang, Y. Moritomo, H. Segawa, L. Han	NIMS	Highly efficient tin perovskite solar cells achieved in a wide oxygen concentration range	Journal of Material Chemistry A, 8 , 2760-2768	有	2020/1/7
32	P. Ru, E. Bi, Y. Zhang, Y. Wang, W. Kong, Y. Sha, W. Tang, P. Zhang, Y. Wu, W. Chen, X. Yang, H. Chen, L. Han	NIMS	High Electron Affinity Enables Fast Hole Extraction for Efficient Flexible Inverted Perovskite Solar Cells	Advanced Energy Materials, 10 , 1903487	有	2020/1/30

33	X. Meng, T. Wu, X. Liu, X. He, T. Noda, Y. Wang, H. Segawa, L. Han	NIMS	Highly Reproducible and Efficient FASnI ₃ Perovskite Solar Cells Fabricated with Volatilizable Reducing Solvent	Journal of Physical Chemistry Letters, 11 , 2965-2971	有	2020/3/27
34	H. Saito, D. Aoki, T. Tobe, S. Magaino	KISTEC	Development of a new maximum power point tracking method for power conversion efficiency measurement of metastable perovskite solar cells.	Electrochemistry, 88 (3), (2020). 218-223	有	2020

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	T. Konishi, T. Suga, H. Nishide	Waseda Univ.	Conjugated Polymers via Vapor-Phase Polymerization and Their Application to a Perovskite Solar Cell	16th IUPAC International Symposium on Macromolecular Complexes	2015 /8
2	K. Harada, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Nishide	Waseda Univ.	Diketopyrrolopyrrole Polymer and a Perovskite Type Solar Cell	Energy Materials Nanotechnology Meetings on Photovoltaics	2016 /1
3	T. Konishi, T. Suga, H. Nishide	Waseda Univ.	In-situ Formation of Polythiophene Films via Vapor-Phase Polymerization and Their Application to an Inverted Planar Perovskite Solar Cell	Energy Materials Nanotechnology Meetings on Photovoltaics	2016 /1
4	M. Takamura, R. Nakajima, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Nishide	Waseda Univ.	Oxoammonium Cation of TEMPO as a Dopant for Hole-transporting Aryl Amines and its Application to a Perovskite Solar Cell	Energy Materials Nanotechnology Meetings on Photovoltaics	2016 /1
5	西出宏之	早大	ペロブスカイト太陽電池： 高分子電荷輸送材料の開発*	光機能材料研究会	2016 /6
6	S. Tanaka, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Oxidizing Dopant-Free Spiro-OMeTAD to Improve the Performance of Perovskite Solar Cells	Conf. Perovskite Solar Cells and Optoelectronics	2016 /9
7	Y. Sasaki, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Oxidizing Dopant-Free Diketopyrrolo pyrrole Polymer as a Hole-Transporting Layer of Perovskite Solar Cells	Conf. Perovskite Solar Cells and Optoelectronics	2016 /9
8	西出宏之	早大	高性能ペロブスカイト太陽電池に向けた有機材料開発*	PV EXP02017	2017 /3
9	佐々木勇輔 諏訪康貴、 丸尾浩史、 小柳津研一 西出宏之	早大	高分子複合ペロブスカイト層の形成と太陽電池の特性	第 66 回高分子学会年次大会	2017/5/29

10	H. Nishide	Waseda Univ.	Polymer-Perovskite Hybrids for a Highly Efficient Solar Cell*	11th East Asian Symposium on Polymers for Advanced Technology, Nantong	2017/6/2
11	H. Nishide	Waseda Univ.	Polymer-Perovskite Hybrids: their Structure and Photovoltaic Performance (Plenary)	8th International Symposium on Macro- and Supramolecular Materials	2017/6/7
12	H. Nishide	Waseda Univ.	Polymer-Perovskite Hybrids for a Sustainable Solar Cell (Keynote)	8th International Conference on Green and Sustainable Chemistry	2017/7/25
13	K. Suwa, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Highly Durable Perovskite Layer Compositied with Radical Polymer and its Application for a Solar Cell	IUPAC 17th International Symposium on Macromolecular Complexes	2017/8/29
14	M. Yamaguchi H. Maruo, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Arylamine Polymer as the Hole-Transporting Material for a Perovskite Solar Cell with 1 cm ² Active Area	IUPAC 17th International Symposium on Macromolecular Complexes	2017/8/29
15	W. Okada, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Methoxy-substituted Triphenylamine Polymers as the Hole-transporting Layer of Perovskite Solar Cell	PSCO2017	2017/9/18
16	S. Tanaka, Y. Shirogane T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Perovskite Layers Formed with Fluorocarbon Polymer-Scaffold and the High Cell Efficiency	Asia-Pacific Solar Research Conference 2017	2017/12/05
17	Y. Sasaki, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Polymer-Assisted High-Quality Perovskite Formation and the Improved Cell Performance	Asia-Pacific Solar Research Conference 2017	2017/12/05
18	Y. Shirogane S. Tanaka, T. Suga, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Perovskite Layer Formation with Polymer-Scaffold: Grain Structure Analysis and in-situ Conductive AFM Characterization	AP-HOPV18	2018/1/29
19	M. Yamaguchi K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Arylamine Polymer as the Hole-Transporting Material for a Perovskite Solar Cell with 1 cm ² Active Area	AP-HOPV18	2018/1/29
20	K. Sugai, T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Effect of Polymer/Alkyl Ammonium Salt Solution on the Perovskite Layer	12th Aseanian Conference on Nano-hybrid Solar Cells	2018/12/17
21	W. Okada, T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Interface Passivation Using Poly(vinylcarbazole) and Fullerene Layer for the Conversion Efficiency of 21%	12th Aseanian Conference on Nano-hybrid Solar Cells	2018/12/17
22	M. Yamaguchi T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa,	Waseda Univ. /U. Tokyo	Perovskite Precursor Solution Tuned with Polymer Addition for Effective Formation of the Photovoltaic Layer	Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic	2019/1/27

	H. Nishide			Photovoltaics and Optoelectronics	
23	Y. Shirogane T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	A Flexible Perovskite Solar Cell Enabled by Perovskite Layer with Polymer-Scaffold	Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics	2019/1/27
24	大和田 毬加 岡田明洋 白金佑太 須賀健雄 小柳津研一 瀬川浩司 西出宏之	早大, 東大	高分子添加インキの調製とバークコート製膜によるペロブスカイト太陽電池の作製	日本化学会第99春季年会(2019)	2019/3/16
25	神守広一郎 岡太航 須賀健雄 小柳津研一 瀬川浩司 西出宏之	早大, 東大	ペロブスカイト層表面処理とポリトリアールアミンを正孔輸送層とする素子の光電変換特性	日本化学会第99春季年会(2019)	2019/3/16
26	神守広一郎 菅井啓介 須賀健雄 小柳津研一 瀬川浩司 西出宏之	早大, 東大	ポリトリフェニルアミンをホール輸送層とする光電変換素子でのペロブスカイト層表面改質	第9回CSJ化学フェスタ2019	2019/10/17
27	大和田 毬加 岡田明洋 須賀健雄 小柳津研一 瀬川浩司 西出宏之	早大, 東大	一段塗布可能な高分子添加インキを用いたバークコートによるペロブスカイト層の形成	第9回CSJ化学フェスタ2019	2019/10/17
28	K. Sugai, T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Poly(vinylphenol)/Ammonium Bromide Passivation for a High Performance Perovskite Solar Cell	The 29th International PV Science and Engineering Conference	2019/11/04
29	K. Kamimori, K. Suwa, T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Dopant-free Poly(triarylamine)s as the Hole-transporting Layer for a Robust Perovskite Solar Cell	The 29th International PV Science and Engineering Conference	2019/11/04
30	M. Owada, K. Suwa, T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Perovskite Layer Formation by a Co-evaporation Method and its Application for Surface Modification	Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20)	2020/01/21
31	K. Kamimori K. Suwa, T. Suga, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ. /U. Tokyo	Metal-dopant-free Hole-transporting Poly(triarylamine)s for a Durable Perovskite Solar Cell	Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20)	2020/01/21

32	杉山遥香 神守広一郎 諏訪康貴 須賀健雄 小柳津研一 瀬川浩司 西出宏之	早大, 東大	高分子添加剤によるペロブスカイト層の表面改質と高い光電変換特性	日本化学会 第100春季年会	2020/03/23
33	韓礼元	NIMS	高効率と高信頼性を両立するペロブスカイト太陽電池	PV EXPO 2016	2016/3/3
34	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	The 26 th IUPAC symposium Photochemistry	2016/4/3-8
35	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	3 rd Conference on New Generation Solar Cells 中国科学アカデミー	2016/5/21-22
36	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	Hybrid Electronic & Photonic Materials and Phenomena GRC	2016/6/19-24
37	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	ISC 2016	2016/6/26-30
38	韓礼元	NIMS	ペロブスカイト太陽電池の高性能化技術	有機太陽電池シンポジウム、有機太陽電池研究会	2016/7/14
39	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	The 37 th PIERS in shanghai	2016/8/8-11
40	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	The 5 th SFSC, Dalian University of Technology	2016/10/11-14
41	韓礼元	NIMS	High Performance of Perovskite Solar Cells	HOPV17	2017/5/20-25
42	韓礼元	NIMS	Key issues for future application of perovskite solar cells	4 th Conference on New Generation solar cells	2017/5/27-29
43	韓礼元	NIMS	高性能逆型ペロブスカイト太陽電池の開発	光機能材料研究会	2017/6/14
44	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	10 th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOE010)	2017/7/7
45	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	11 th Aseanian Conference on Nano-Hybrid Solar Cells (NHSC11)	2017/10/8-10
46	F. Xie, L. Han	NIMS	Vertical Recrystallization for Highly Efficient and Stable Formamidinium based Perovskite Solar cells	11 th Aseanian Conference on Nano-Hybrid Solar Cells (NHSC11)	2017/10/8-10
47	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	PVSEC27	2017/11/12-16
48	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells	The 2017 MRS Fall Meeting and Exhibition	2017/11/26-12/1
49	韓礼元	NIMS	High Performance of Perovskite Solar Cells	International Symposium on Energy Science and Technology (ISEST 2018)	2018/1/21-26
50	韓礼元	NIMS	New Approaches for Large Area Perovskite Solar cells	AP-HOPV2018	2018/1/28-30
51	M. Cai,	NIMS	Electrical Potential	AP-HOPV2018	2018/1/28-

	T. Noda, L. Han		Distribution for High Performance Perovskite Solar Cells		30
52	韓礼元	NIMS	High Performance of Perovskite Solar cells	5 th Conference on New Generation Solar Cells	2018/5/26-27
53	韓礼元	NIMS	High Performance of Perovskite Solar cells: From cell to module	22 nd International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy (IPS-22)	2018/7/30-8/2
54	X. Liu, L. Han	NIMS	Efficient and Stable FASnI ₃ Perovskite Solar Cells via Reducing the Energy-Level Mismatch	22 nd International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy (IPS-22)	2018/7/30-8/2
55	韓礼元	NIMS	High Performance of PSCs—from Cells to Modules	11 th International Summit on Organic and Hybrid Solar Cells Stability (ISOS-11)	2018/10/21-25
56	韓礼元	NIMS	High Performance Perovskite Solar Cells - from Cells to Module	12 th Aseanian Conference on Nano-hybrid Solar Cells (NHSC12)	2018/12/17-20
57	X. Liu, L. Han	NIMS	Highly Stable Lead Free Perovskite Solar Cells by Additive Engineering	International Conference on Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP19)	2019/1/27-29
58	韓礼元	NIMS	Towards Commercialization of Perovskite Solar Cells	6 th Conference on New Generation Solar Cells	2019/5/26-2019/5/26
59	韓礼元	NIMS	Efficient and Stable Perovskite Solar Cell and Module	The 29 th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering (PVSEC 29)	2019/11/4-2019/11/8
60	韓礼元	NIMS	Towards commercialization of perovskite solar cells: from high efficiency to stability	15 th China SoG Silicon and PV Power Conference (15 th CSPV)	2019/11/21-2019/11/23
61	斎藤英純 青木大輔 馬飼野信一 高木克彦	KISTEC	再現性の高い測定法を確立するための取り組み	RATO 主催「有機系太陽電池の高度利用に向けた評価・標準化ワークショップ」	2016/3
62	斎藤英純 青木大輔 馬飼野信一 高木克彦	KISTEC	再現性の高いペロブスカイト太陽電池の性能評価法に関する検討	光化学協会 光化学討論会	2016 /9
63	H. Saito, D. Aoki, S. Magaino, K. Takagi	KISTEC	Stability and durability evaluation of Perovskite solar cell performance under the controlled atmosphere conditions.	P-HOPV17	2017 /2
64	D. Aoki, K. Andou, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi	KISTEC	Study on Evaluation Methods of Perovskite Solar Cells	AP-HOPV2018	2018/1/28-2018/1/30
65	H. Saito, D. Aoki,	KISTEC	Photoelectric conversion performance, stability and	AP-HOPV2018	2018/1/28-2018/1/30

	S. Magaino, K. Takagi, S. Hayase		durability evaluation of Perovskite solar cell performance under the controlled atmosphere conditions		
66	H. Saito, D. Aoki, S. Magaino, K. Takagi, S. Hayase	KISTEC	Optimization of performance evaluation method for Perovskite solar cell	Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition (GRE2018)	2018/6/17- 2018/6/22
67	D. Aoki, K. Ando, H. Saito, S. Magaino, K. Takagi	KISTEC	Study on Development of Evaluation Methods of Perovskite Solar Cells	Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition (GRE2018)	2018/6/17- 2018/6/22
68	H. Saito, D. Aoki, S. Magaino, K. Takagi, S. Hayase	KISTEC	Power generation behavior of Perovskite solar cell under the various conditions	International Conference on Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP19)	2019/1/28- 2019/1/29
69	D. Aoki, K. Ando, H. Saito, S. Magaino	KISTEC	Optimal Procedure of MPPT method for Perovskite solar cells	International Conference on Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP19)	2019/1/28- 2019/1/29
70	S. Magaino, H. Saito	KISTEC	Technical report for measurement protocols of organic solar cells and activities of KISTEC	International Workshop on Evaluation Method for Perovskite Solar Cells	2019/1/30
71	斎藤英純 青木大輔 馬飼野信一 高木克彦 早瀬修二	KISTEC	様々な状態におけるペロブスカイト太陽電池の発電挙動について	電気化学会第86回大会	2019/3/27- 2019/3/29
72	馬飼野信一 斎藤英純 青木大輔	KISTEC	ペロブスカイト太陽電池の評価法に関する国際標準化	2019年 光化学討論会	2019/9/12
73	青木大輔 安藤啓太 斎藤英純 馬飼野信一	KISTEC	ペロブスカイト太陽電池のラウンドロビンテストにおける実施手順の検討	2019年 光化学討論会	2019/9/12
74	H. Saito, D. Aoki, T. Tobe, S. Magaino	KISTEC	Development of the measurement method for maximum power of metastable Perovskite solar cells.	International Conference on Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20)	2020/1/21
75	D. Aoki, H. Saito, T. TOBE, S. MAGAINO	KISTEC	Steady-state measurement of maximum power for perovskite solar cell	International Conference on Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20)	2020/1/21
76	S. Magaino, H. Saito, D. Aoki, T. Tobe	KISTEC	Standardization of Measurement Protocols for Photovoltaic Devices Exhibiting Complex Current Response to Applied Voltage	International Conference on Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20)	2020/1/22

77	S. Magaino, H. Saito, D. Aoki, T. Tobe	KISTEC	Standardization of Measurement Protocols for Slow Responding and Metastable Photovoltaic Devices	2020 International workshop on standardization of measurement protocols for perovskite solar cells	2020/1/23
----	---	--------	--	---	-----------

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	韓礼元 NIMS	ペロブスカイト太陽電池で変換効率18%超を 達成 - 標準面積(1cm ²)のセルで世界初 -	NEDOニュースリ リース	2016年3月28日
2	韓礼元 NIMS	ペロブスカイト太陽電池の変換効率 18.2%を 達成	NIMSプレスリリ ース	2016年3月28日
3	韓礼元 NIMS	ペロブスカイト太陽電池の新添加剤	日刊工業新聞	2016年10月6日
4	韓礼元 NIMS	印刷で作れる太陽電池	日本経済新聞	2016年11月21日

【その他(受賞実績)】

番号	年度	タイトル	学会名	発表者、所属
1	2017	The Wal Read Memorial Award (Best Poster)	Asia-Pacific Solar Research Conference 2017	Y. Sasaki Waseda U.
2	2018	Best Poster Award	2nd Asia- Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference (AP-HOPV18)	M. Yamaguchi Waseda U.
3	2018	Poster Award	2nd Asia- Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference (AP-HOPV18)	Y. Shirogane Waseda U.
4	2018	Poster Award	2nd Asia- Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference (AP-HOPV18)	M. Cai NIMS
5	2018	Best Poster Award	12th Aseanian Conference on Nano-hybrid Solar Cells	K. Sugai Waseda U.
6	2018	Best Poster Award	12th Aseanian Conference on Nano-hybrid Solar Cells	W. Okada Waseda U.
7	2018	Poster Award	Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and	M. Yamaguchi Waseda U.

			Optoelectronics	
8	2019	優秀ポスター発表賞	第9回CSJ化学フェスタ2019	神守広一郎 早大
9	2019	Poster Award	Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics (IPEROP20)	K. Kamimori Waseda U.

G 新素材と新構造による高性能化技術の開発

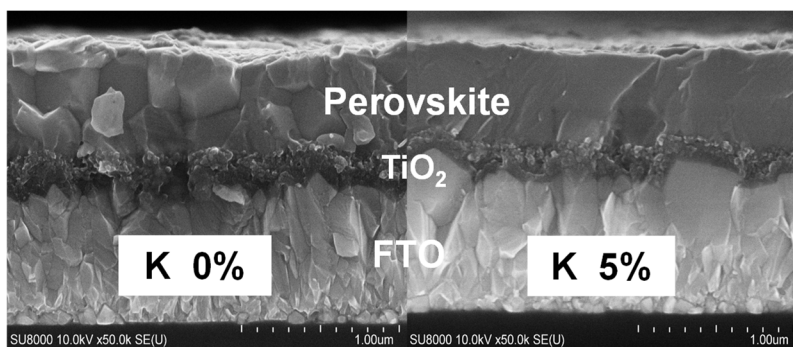
(東京大学、産業技術総合研究所(再)、九州工業大学(再)、電気通信大学(再)、東京工業大学(再)、兵庫県立大学(再)、京都大学(再)、熊本大学(再)、立命館大学(再))

1. 成果詳細

本研究開発では、産官学連携による集中研体制で、中間目標：セル効率 20%、最終目標：モジュール効率 20%の達成を目指した。本実施項目では、モジュール効率 20%の基盤技術として必要なセル効率 25%も最終目標として、新素材と新構造の基礎研究を進めた。その結果、セル効率ではほぼ目標通りの 24.9%を達成した。また、面積を 1cm^2 に拡大したセルでは効率 21.65%が得られ、既報の世界最高認証値 21.6%を上回ることができた。さらに、面積 2.76cm^2 のモノリシック 3 直列ミニモジュールで効率 20.7%を達成し、最終目標であるモジュール効率 20%をクリアすることができた。これらの成果は、並行して展開された物性解析や理論的考察、材料開発とプロセス条件検討など、基礎研究から技術開発に至る様々な知見の積み重ねによって達成されており、本研究開発の目標達成にとどまらず、今後のペロブスカイト太陽電池実用化や発電コスト低減に大きく寄与するものとなっている。

①新素材と新構造の開発

ペロブスカイト層を構成する材料を検討し、世界に先駆けカリウムイオン(K^+)を添加したペロブスカイトを用いた太陽電池を開発した。「電流-電圧特性ヒステリシス」の大幅な低減に成功し、面積 0.18cm^2 のセルで変換効率 20.5% (V_{oc} 1.15V、 J_{sc} 22.9mA/cm²、FF 0.777) を達成、中間目標をクリアした。 K^+ 添加量が 5%の $\text{K}_{0.05}\text{MA}_{0.16}\text{FA}_{0.79}\text{PbI}_{2.49}\text{Br}_{0.51}$ の組成となるように、MA (メチルアンモニウム： CH_3NH_3^+) や FA (ホルムアミジニウム： $\text{NH}_2\text{CHNH}_2^+$)、鉛(Pb)、ヨウ素(I)、臭素(Br)を含む原料を混合してデバイスを作製した際に最も高い性能が得られ、膜厚方向に結晶粒界のない高品質のペロブスカイト層が形成されていた(図Ⅲ-2-(ハ)-G-1)。また、吸収端が長波長化し、光吸収能も高くなった。さらに、伝導帯下端が浅くなり(高エネルギー化)、酸化チタン層への電子移動に有利な状況となっていることも判明した。この組成で良好なデバイスを作製するにはいくつかのノウハウが必要だが、ポイントを掴めば、高効率デバイスを再現性良く作製可能である。このデバイスには、並行して検討した酸化物半導体層や正孔輸送層の最適化の結果も反映されており、各部位における改良が、中間目標効率達成につながった。



図Ⅲ-2-(ハ)-G-1. K^+ 添加の有無によるペロブスカイト膜の質の違いを示す断面 SEM 画像

本プロジェクト後半に紫外線レーザー加工装置が導入され、精度の高い加工が可能になった。さらにプロセス条件の細かな見直しを重ねた結果、上記と同じ組成のペロブスカイトを用いた面積 0.18cm^2 のセルで変換効率を 22.3% (V_{oc} 1.16V、 J_{sc} 24.1mA/cm²、FF 0.800) まで向上させることができた。

これと同様の材料およびプロセスで、面積を約 1cm^2 に拡大したセルを作製・評価したところ、変換効率 21.3% (V_{oc} 1.16V、 J_{sc} 23.5mA/cm²、FF 0.779) が得られ、当時の 1cm^2 セルの世界最高認証値 20.9% を大きく上回った。特に V_{oc} と FF の寄与が大きい。さらに TiO_2 多孔質層の材料を改良し、反射防止膜の性能を上げることで、変換効率が 21.65% (V_{oc} 1.186V、 J_{sc} 23.7mA/cm²、FF 0.770) まで向上し、22%には届かなかったが、最新の 1cm^2 セル変換効率の世界最高認証値 21.6%を上回った。

本実施事項はセル性能向上が主題だが、レーザーエッチングによる高精度な加工が可能になったため、モノリシック構造モジュールの作製も検討した。作製したモジュールの外観を図Ⅲ-2-(ハ)-G-2 に示す。各セルは $20\text{mm} \times 4.6\text{mm}$ で、これが 3 直列となり、全体で面積 2.76cm^2 となっている。セル間のギャップは $0.4 \sim 0.5\text{mm}$ である。変換効率 20.7% (V_{oc} 3.49V、 J_{sc} 7.67mA/cm²、FF 0.773) が得られ(図Ⅲ-2-(ハ)-G-3(右))、本研究開発の最終目標であるモジュール効率 20%をクリアすることができた。既報ペ

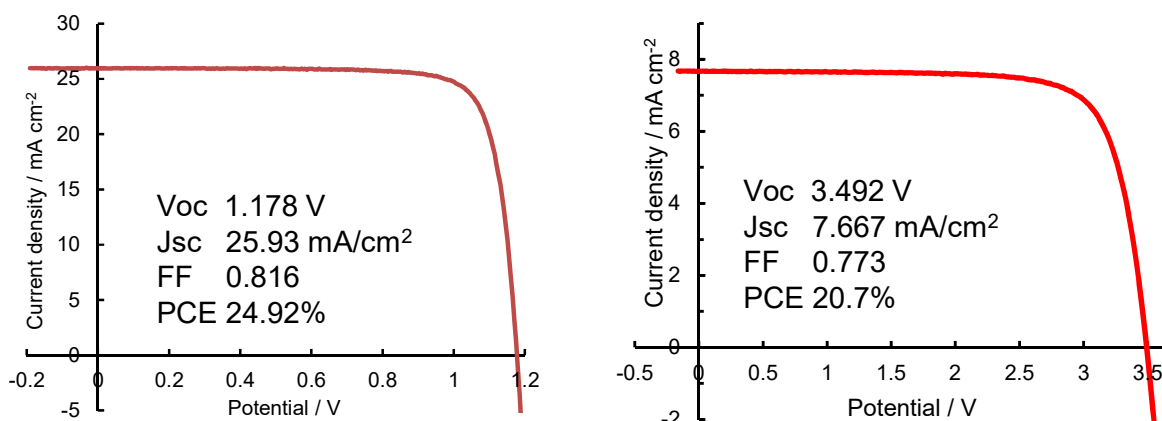
ロブスカイト太陽電池モジュールの変換効率は最高でも 18%であり、2019 年 7 月にプレス発表した本成果は、世界に先駆けるものとなった。



図III-2-(ハ)-G-2. 作製したデバイスの外観：左から 0.18cm²セル、1cm²セル、2.76cm²モジュール

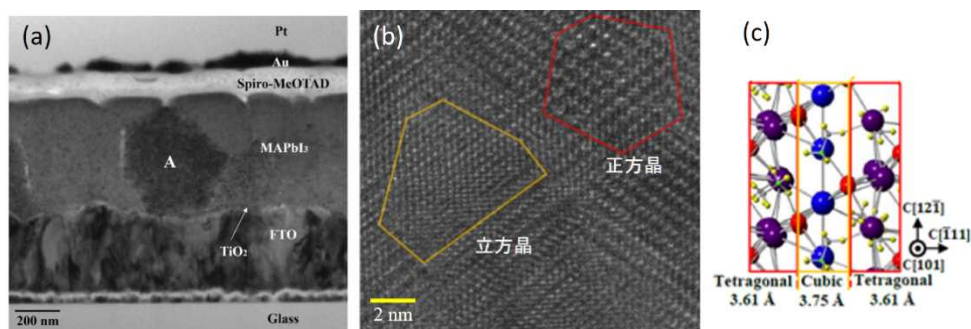
さらなる性能向上に向け、Br を含まない組成 (K_aMA_bFA_cPbI_dCl_e) のペロブスカイトを開発した。このペロブスカイトは、上述のカリウム添加ペロブスカイトに比べ吸収端が長波長化した。デバイス作製に際し、電子輸送層に SnO₂ 緻密層および SnO₂ 多孔質層を用い、その表面を新規開発した方法で処理した。また、ペロブスカイト層表面を産総研で開発された F06 で処理した。さらに、入射側に反射防止膜 (AR film) を加えた。AR film が加わると 400nm 以下の短波長側の感度が低下するかわりに、それより長波長側で EQE が高くなる。この結果、J_{sc} が 26.6mA/cm² まで向上し、変換効率が 24.4% まで向上した。

さらに、劣化の原因になりやすい MA を含まない組成のペロブスカイト (MA フリーペロブスカイト) を開発した。これまでに検討してきた製膜条件、デバイス内の各材料の選択、界面処理を含めたプロセス条件設定、セル構造の制御などの知見を組み合わせることで、変換効率 24.92% が得られた (図III-2-(ハ)-G-3(左))。25% には届いていないが、目標設定の約 0.03cm² より大きいデバイス面積であり、事業開始時の 17.3% からの伸びを考慮すると、ほぼ達成したと言える。



図III-2-(ハ)-G-3. 作製したデバイスの電流-電圧特性：(左)0.18cm²セル、(右)2.76cm²モジュール

材料物性を検討する過程で、予定外の重要な発見が得られた。従来、良質な MAPbI₃ 多結晶は数百 nm サイズの結晶粒から構成されていると考えられてきたが、MAPbI₃ 多結晶を透過電子顕微鏡 (TEM) 観察によって詳細に調べたところ、多くの (見かけの) 結晶粒が内部構造を有していることが明らかとなった。図III-2-(ハ)-G-4(a) の低倍率 TEM 像に示した溶液法で作製した太陽電池セル試料中の MAPbI₃ 多結晶の結晶粒を詳細に調べたところ、この「結晶粒」には数 nm サイズの様相の異なる領域が分布していることがわかった。図III-2-(ハ)-G-4(b) の高分解能 TEM 像に示したように、室温相である正方晶領域と高温安定相である立方晶領域が混在している。これに加えて、立方晶層と正方晶層が交互に積層した自然超格子 (図III-2-(ハ)-G-4(c)) も形成されていることも明らかとなった。このような結晶構造の柔軟性が、この材料の色々な意味での robustness (粒界や欠陥が致命的な再結合中心とならないことや、自己修復的なふるまいを示すこと) の一因となっている可能性があると考えている。



図III-2-(ハ)-G-4. MAPbI₃多結晶試料の(a)低倍率TEM像、(b)高分解能TEM像、(c)超格子構造の模式図

蒸着系ペロブスカイト太陽電池では、高品位ペロブスカイト薄膜の作製と、ハロゲン組成を変えたヘテロ積層に取り組んだ。FAPbI₃の真空蒸着では、溶液法と異なり、室温でアニールなしでペロブスカイト相が得られ、しかも溶液法のように短時間で非ペロブスカイト相に転移することなく、五ヶ月以上にわたってペロブスカイト相が安定であることを見いだした。しかし、真空蒸着膜における5 μ m四方での最大高低差は37nm(MAPbI₃)と36nm(FAPbI₃)で、ピンホールの影響がみられた。一方、レーザ蒸着法で作製したMAPbI₃膜における最大高低差は、2 μ m四方の中で22nmであり、高品位ペロブスカイト薄膜の作製に成功した。ハロゲン組成の傾斜構造は、後述する「デバイス解析」で性能向上に寄与することが示唆されているが、真空蒸着MAPbI₃/MAPbBr₃ヘテロ積層膜は、室温で自発的に混晶化するという特異な現象を示した。一方、MAPbCl₃とMAPbI₃の組み合わせで順次積層膜を作製したところ、多結晶ヘテロ積層構造ができた。さらに、ハロゲン化鉛ペロブスカイト単結晶基板上へのエピタキシーに関する検討を行い、世界で初めてヘテロエピタキシャル成長に成功した。MAPbBr₃(001)単結晶基板上にMAIとPbI₂を共蒸着した場合、形成された膜はMAPb(IBr)₃混晶となっており、X線回折逆格子マップなどから、エピタキシャル成長していることがわかった。同様に、MAPbBr₃(001)基板上にMAClとPbCl₂を共蒸着した場合には、MAPb(BrCl)₃混晶膜がエピタキシャルに形成された。格子不整合が小さく膜厚が薄い場合にはスードモルフィック(コヒーレント)に、格子不整合が大きく膜厚が厚い場合には緩和してエピタキシャル成長していることが確認できた。

セル出力の高電圧化を目指し、熱安定性の高いFAを用いた臭化ペロブスカイトFAPbBr₃を、四塩化チタン処理チタニア多孔膜に製膜してセルを作製したところ、開放電圧1.37Vを得た。さらにペロブスカイト層と正孔輸送層の間にブロッキング層としてPMMAを挿入したセルで開放電圧1.42Vが得られ、高電圧化の中間目標を達成した。臭素系ペロブスカイトは溶媒への溶解度が低く、平坦な膜を得ることが一般的に困難である。高品質なFAPbBr₃膜を作製するために様々な検討を行った結果、テトラメチレンスルホキシド(TMSO)をPbBr₂前駆体溶液に混合し、高濃度のFABr溶液をスピコート中のPbBr₂膜に滴下するダイナミックキャスト法を組み合わせることで、ピンホールが少なく結晶性の高いFAPbBr₃膜を作製できた。途中で形成されるPbBr₂·nTMSO膜は通常のPbBr₂膜と比較してFABrに対して高い反応性を示し、高品質かつ厚膜のFAPbBr₃を作製することが可能となった。その結果、J_{sc}、V_{oc}、FFの全てを改善することができ、デバイス作製条件を最適化した結果、V_{oc} 1.52Vが得られた。さらにこのデバイスは乾燥条件下でエージング処理することでV_{oc}が1.56Vまで向上し、変換効率は最大7.8%に達した。

②界面制御技術

高効率化に向けて、ペロブスカイト層で電荷分離したエネルギーを可能な限り損失無く抽出することが重要である。このため、ペロブスカイト太陽電池内部に存在する材料界面を物理的および化学的に制御し、界面における電荷移動効率を向上させることで光電変換効率を向上させる計画で研究開発を行った。2015年度において、電子輸送層であるチタニア緻密層とペロブスカイト界面、またホール輸送層であるSpiro-OMeTADとペロブスカイト界面との間に有機および無機材料を修飾させることで太陽電池性能が向上することを見出した。2016年度においては各材料界面の修飾と影響をあたえる因子について、更に詳細な検討を進めた。界面修飾が効率向上に寄与する条件を探索した。2017年度においては中間目標であるJ_{sc} 23mA/cm²以上、およびV_{oc} 1.2V以上で且つFF 0.75以上を達成することにこれまでの知見を注力し、従来のペロブスカイト結晶組成MAPbI₃を変更し、より高効率且つ再現性の高い異種カチオンおよび異種ハロゲン混合ペロブスカイト(Cs/FA/MA)Pb(I/Br)₃を用いて、各材料界面の制御およびペロブスカイト層内部粒界の界面制御を行い、光電変換効率を向上させる技術を見出した。2018年度においてはこれまでの開発技術を精査し、モジュールへ転用するための基盤技術としてペロブスカイト層成膜

後に界面処理を施すことで効率向上させる技術を開発し光電変換効率 20.7%を達成した。またカリウムを導入したペロブスカイト組成 (K/FA/MA)Pb(I/Br)₃ を導入し、界面制御技術を試みた。2019 年度においては最終目標である Jsc 26mA/cm² 以上、Voc 1.2V 以上および FF 0.80 以上を達成するために注力した。まず、(K/FA/MA)Pb(I/Br)₃ 組成のペロブスカイト層上に、フェネチルアンモニウムヨード (PEAI) で界面修飾することにより Voc が向上し、1.2V を達成した。また、Jsc 向上のため、Br を除いたペロブスカイト組成を検討し、Jsc 26mA/cm² 以上を達成した。さらに、電子輸送層を SnO₂ として表面処理を行い、東京大学で開発された組成のペロブスカイト層上を産総研独自開発の界面修飾材料 F06 で処理したセルでは、Jsc 26mA/cm² 以上と FF 0.80 以上を同時に達成し、光電変換効率 24.4% を記録した。

③高電流材料技術

可視光から近赤外領域まで光電変換できる SnPb 混合金属ペロブスカイトを用いた高電流型ペロブスカイト太陽電池の高効率化を検討した。TiO₂ 表面に SnI₂ が作用するとトラップ密度が増加し、Ti-O-Sn という結合が Voc 低下につながるということが分かったため、この結合を含まない逆構造デバイスを作製した。赤外域での光電変換を有効にするために、ITO 基板に代えて、赤外域で光透過性の良い FTO 基板を用いてデバイスを作製した。XRD から得られる格子ひずみと A サイトカチオンの相関を調べ、格子ひずみが小さいほど電荷寿命が伸びることを見出した。格子ひずみが電荷再結合点の一つである可能性が示唆された。ひずみを小さくするためにイオンサイズの小さい Cs イオンをペロブスカイト層に添加し、スパイク型バンド構造を有する (ITO/PEDOT-PSS/SnPb ペロブスカイト/C₆₀/PCBM/BCP/Ag/Au) セルを作製したところ、効率は 20.4% に向上した (図 III-2-(ハ)-G-5)。Jsc 33mA/cm², Voc 0.81V であり、Voc のロスが 0.4 V 程度となり Pb ペロブスカイトと同程度まで Voc ロスを小さくすることができた。目標まで Jsc として 1mA/cm² の上昇が必要であった。そこで光学物性を中心に検討を進めた。LiF 系反射防止膜をガラス表面に形成することにより 1-2mA/cm² の Jsc 向上が可能であることを実証できた。また、IPCE 値が低かった 800-1000nm の領域で内部量子収率を測定したところ、吸収されたフォトンが電子に変換される効率はほぼ 100% であり、ペロブスカイト層の光吸収を増やせば、2-3mA/cm² の Jsc 向上が期待できることを明らかにした。また、開放電圧として努力目標 Voc 0.85V を目指していたが、界面パッシベーションにより、これまで最高であった 0.81V から 0.83V まで電圧を上げることに成功した。

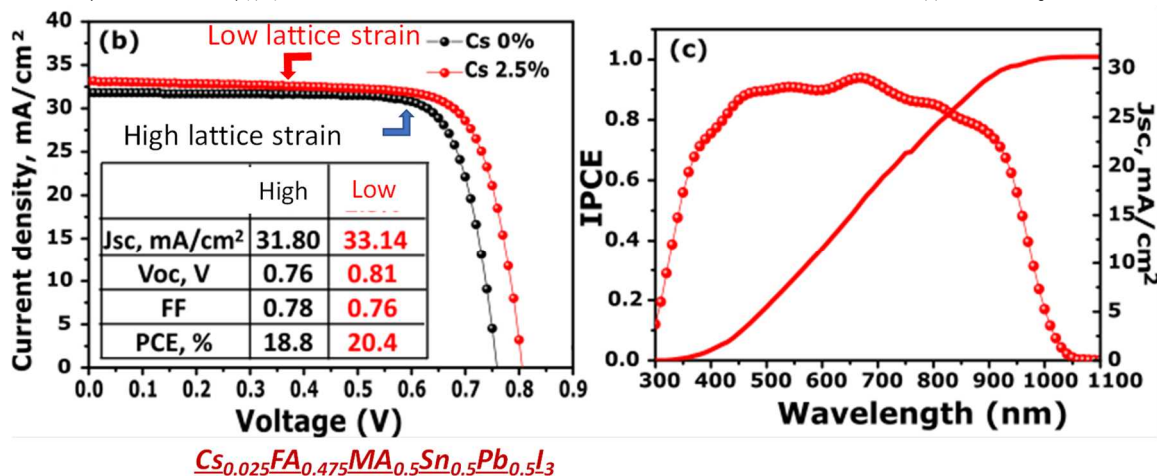


図 III-2-(ハ)-G-5. Sn/Pb 系ペロブスカイトを用いた結晶ひずみを低下させた太陽電池の特性

④基板構造制御技術

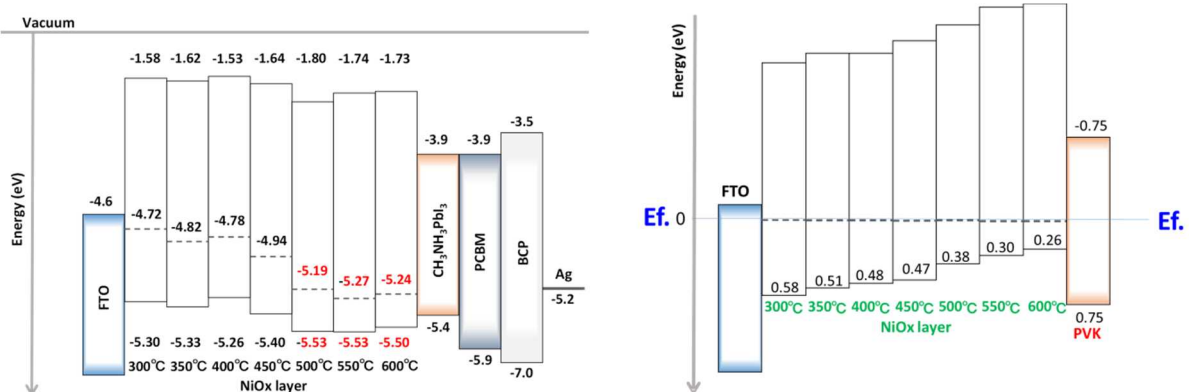
一般的な TiO₂ ナノ粒子の表面は、アナターゼ型 TiO₂ で安定な {101} 面の割合が高い。ナノ粒子の形状を制御し、準安定な {001} 面を大きく露出するようにしたところ、伝導帯位置の違いにより、電子注入特性の向上と、界面抵抗に起因する逆電子移動過程の障害が確認された。この {001} 面露出 TiO₂ を用いた (Cs/FA/MA)Pb(I/Br)₃ ペロブスカイト系デバイスにおける特性の面内ばらつきを、市販の酸化チタン (日揮触媒化成 18NRT) を用いたものと比較した。ペロブスカイト層の微小な領域でのバンド端発光 (ピーク波長 770nm) 強度を、10 μm 刻みで 20×20 箇所の 400 データポイントについて調べたマッピングデータを取得し、基板が 18NRT の場合と {001} 面露出 TiO₂ の場合とで、像に現れるばらつきが明確に違うことを確認した。レーザー照射で生成する短絡状態光電流を、50 μm 刻みで 5×5 箇所の 25 データポイントについて、複数のデバイスで調べたところ、18NRT を用いた場合の短絡電流密度は 1σ 2.98% であったが、{001} 面露出 TiO₂ 粒子を用いた場合、1σ 1.7% 以内に収まった。変換効率の面内ばらつきを調べるため、φ 1mm のピンホールを通した擬似太陽光照射下で、変換効率を 4×4 箇所の 16 データポイントに

て測定したところ、いずれの酸化チタンを用いた場合でも、ばらつき標準偏差で0.5%以下(1 σ)であることを確認した。さらに、10×15mm角のペロブスカイト層に3mm角セルを8デバイス(4×2)配置し、それらの効率ばらつきを調べたところ、0.5%(1 σ)以下に収まっていた。更なる面内均一化とデバイス再現性の向上を目指した検討の中で、酸化チタンの各結晶面の配位不飽和チタンの密度に依存してCl等がPbに吸着する状況が変化することを明らかにした。

⑤電極材料技術

ペロブスカイト太陽電池の有機正孔輸送材料を置き換える安定・安価な無機正孔輸送材料として酸化ニッケル(NiO)を検討した。NiOは300~600度の高温処理が必要であるため、順構造セルでは、先に他の材料と共に多孔質構造として積層・高温焼結をしておき、最後にペロブスカイト層を多孔質内部に構築する手法をとる。FTOガラス上に、スクリーン印刷を用いてTiO₂層、ZrO₂層、NiO層、カーボン層を順次積層した後、ペロブスカイト層を形成し、NiO層の有無による変換効率の変化を確認した。NiO層を導入することで変換効率が6%から11%まで向上し、NiO層の有用性が示された。これらのペロブスカイト太陽電池は、1000h以上たっても性能が低下しなかった。

続いて、NiOを用いた逆構造セル(glass/FTO/NiO/MAPbI₃/PCBM/BCP/Ag)を作製した。NiOの作製温度を300~600℃まで変えてセルを作製したところ、作製温度が高いほど変換効率は向上し、550℃で変換効率16.1%を得た。600℃では、ガラス基材からのNaイオン移動のため、変換効率が低下した。軟X線放射光(兵庫県立大学ニュースバル放射光施設 BL07b)を利用した真空紫外光電子分光(PES)法を用いてNiO_xの組成の変化が価電子帯に与える影響を調査したところ、NiO_x層を作製する際の熱分解温度が高いほど、価電子帯端とフェルミレベルのエネルギーギャップが小さくなっていることが明らかになった(図III-2-(ハ)-G-6)。これは、真空準位基準では見えてこなかった傾向である。さらにMAPbI₃の膜厚を増加し(平均400nm)、J_{sc}改善して変換効率18.3%を得た。V_{oc}改善に向け3カチオン系にしてBrを加えたところ、Cs_{0.05}FA_{0.825}MA_{0.125}Pb(I_{0.85}Br_{0.15})₃の組成では逆に電圧が低下し、変換効率は16.5%と減少した。これはバンドアライメントの不整合によるものと仮定し、組成をCs_{0.05}FA_{0.825}MA_{0.125}Pb(I_{0.9}Br_{0.1})₃とすることで、変換効率19.6%を達成することができた。この結果、コスト150円/m²無機系ホール輸送材NiO_x層を用いて、最終目標である20%まであと僅かのところまで達成した。



図III-2-(ハ)-G-6. 反応温度を変えて作製したNiOを使用した逆構造ペロブスカイト太陽電池材料の真空準位からのエネルギーレベル(左)と、各フェルミレベルからのエネルギーレベル(右)

⑥高純度材料技術

本項目ではペロブスカイト材料の高純度化という視点で高効率化の実現に取り組んだ。まず、最もシンプルなMAPbI₃に焦点を当て、前駆体材料MAPbI₃(dmf)を開発した。本錯体はICP-MS測定により99.998%以上の純度をもつことが分かり、ペロブスカイト前駆体材料として、試薬としての販売が開始された。このMAPbI₃(dmf)は、PbI₂(精製品)とMAI(再結晶品)を1:1で用いる従来のペロブスカイト材料(飽和濃度1.2M in DMSO)に比べて、DMFおよびDMSOの溶媒に対して溶解速度が早く、また、特にDMSOに対しては飽和濃度(2.0M)が著しく高いことが明らかになった。これらの特性を生かしたプロセスウィンドウが広い塗布法により、再現性よく変換効率約20%のセルを作製できるようになった。さらに、Sn系ペロブスカイト用の高純度化材料として、SnI₂(dmf)、SnI₂(dms)錯体など一連のSn錯体を新たに開発し、「高電流材料技術」において活用された。また、FAPbI₃・2DMF錯体を開発し、これを高純度化前駆体材料に用いて混合カチオン型ペロブスカイト太陽電池を作製したところ、J_{sc} 21.4mA/cm²、V_{oc} 1.21V、FF 0.79、PCE 20.3%が得られた。IPCEスペクトルの吸収端から見積もったバンドギャップは1.58eVであり、電圧ロスが0.38Vと著しく小さい。最適化によりPCE 21.2%が得られた。電圧ロスが小さい原因

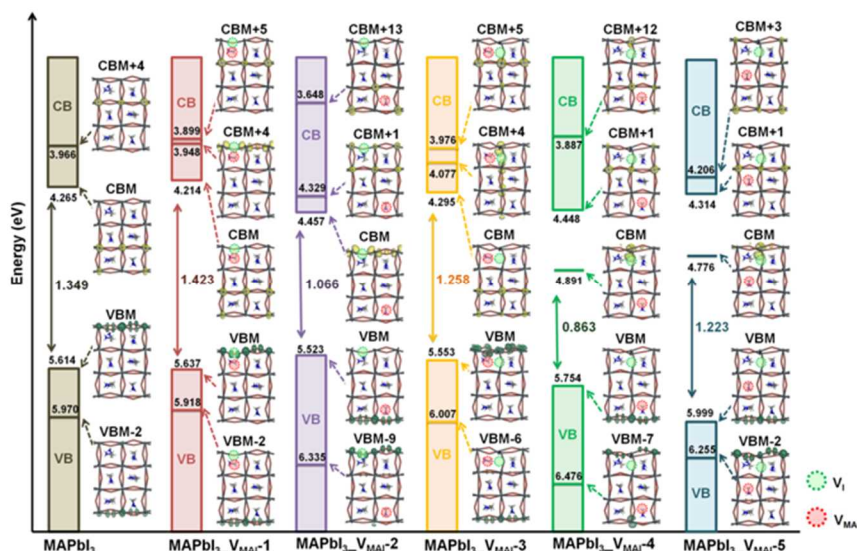
を明らかにするため、Aging 経過時間とともに開放電圧の異なる種々の素子に対してトラップ濃度の解析を行った結果、トラップ濃度の低下とともに開放電圧が増加する傾向を明らかにした。開放電圧 1.3V を実現するために必要な条件を検討したところ、トラップ濃度を 10^{14}cm^{-3} 以下にまで低減することが必要となった。次に、トラップの起源を探求するために、FAI および iBAI の混合溶液を用いたパッシベーション効果を検討した。その結果、作製直後の素子では表面再結合損失が支配的であり、パッシベーションにより効果的に表面再結合が抑制されることを明らかにした。太陽電池を構成する各層について詳細に検討した結果、Aging により Spiro-OMeTAD 層はキャリア濃度の増加とともに HOMO 準位が低下し、ペロブスカイト層の価電子帯準位との整合性が改善することで表面再結合が抑制されていた。ペロブスカイト層については電子準位の変化はほぼ見られないものの、トラップ濃度の低下により再結合が抑制されている。さらなるトラップ濃度低減を目指して最適化を行い、 J_{sc} 25.2mA/cm²、 V_{oc} 1.11V、FF 0.793、PCE 22.2%が得られた。

⑦第一原理計算

ペロブスカイト太陽電池の変換効率向上に貢献すべく、第一原理電子状態計算に基づく数値シミュレーションを用い、ペロブスカイト(PVK)層の電子状態、およびPVK層とホール輸送材料(HTM)層や電子輸送材料(ETM)層界面でのキャリア注入特性、HTM層でのキャリア輸送特性に注目した解析を行った。

カリウム(K)添加ペロブスカイト結晶の構造推定のため、モデル結晶に関する第一原理計算を行った。MAPbI₃において、(a)K⁺がPb²⁺の位置を占有するK_{Pb}と、I⁻が失われた原子空孔V_Iが隣接して対になっているモデル(paired K_{Pb}+V_I)、(b)K_{Pb}とV_Iの対が空間的に離れて位置するモデル(separated K_{Pb}+V_I)、(c)複数のK_{Pb}とV_Iが存在し、かつ両者が分離して層状になっているモデル(layered K_{Pb}+V_I)、(d)KがMAの位置を占有するモデル(K_{MA})、(e)Kが格子間位置にあり(K_{int})かつMAの位置に原子空孔V_{MA}が存在するモデル、の5つのモデルについて、結晶が立方晶であると仮定して結晶構造の構造最適化並びにバンドギャップの評価を行った。これらの結果の中で、実験結果(Kの導入量とともに結晶格子が広がり、バンドギャップが小さくなる)のは(c)と(e)のモデルであることがわかった。Kの偏析が認められるのであればモデル(c)が、Kの分布が均一であればモデル(e)が妥当なモデルと結論できると思われる。

また、第一原理計算によって、ペロブスカイトの表面近傍における点欠陥の効果について検討した。ペロブスカイトは比較的格子欠陥による影響が小さいとされてきたが、表面近傍の格子欠陥についてはV_{oc}低下などの原因となることが本プロジェクトでも明らかにされている。ペロブスカイト中のショットキー欠陥について、様々な構造モデルで検討したところ、図III-2-(ハ)-G-7に示すように、カチオンサイトの原子空孔とアニオンサイトの原子空孔が隣接している(対を形成している)場合にトラップ準位は形成されないが、熱拡散あるいは結晶成長時の条件によって空孔対が空間的に離れた状況になり、しかもその一方が表面近傍に存在していると、局所的な格子歪みが生じてトラップ準位が発生することがわかった。このような状況は、表面近傍に孤立した原子空孔を有するモデルでも再現できた。



図III-2-(ハ)-G-7. MA と I の位置の原子空孔からなるショットキー欠陥を含む MAPbI₃ の電子状態。右側にある二つのモデルでバンドギャップ内にトラップ準位の形成が予測された。

実験的にはペロブスカイト層と電子輸送層の界面にグラフェンを挿入するとデバイス特性が改善されるとの報告があったため、表面近傍に原子空孔があるモデルの表面にグラフェンをコートした構造で

第一原理計算を行ったところ、局所的な格子歪みが抑制され、トラップ準位が消失することがわかった。この計算結果から、ペロブスカイト層とキャリア輸送層の間の界面にグラフェンのような π 電子系化合物を挿入すると、表面近傍の原子空孔に由来するデバイス特性劣化因子を抑制できると考えられる。

⑧デバイス解析

本研究では、半導体デバイスシミュレーションを用いてペロブスカイト太陽電池の構造・物性パラメータと性能の相関の解析を行った。太陽電池用一次元デバイスシミュレータ (SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator)、ベルギーGent 大開発) を用いて、デバイス理論解析を実施した。K 添加ペロブスカイト太陽電池をシミュレータ上で模擬し、バンドギャップ (E_g) およびハロゲン比 (=Br 比 ($Br/(I+Br)$)) の傾斜 (グレーディング) が表面で 1.63eV と 17%、裏面で 1.55eV と 8% の場合に精度良く再現できることを示した。さらに、ペロブスカイトの光入射側 (表面側) をワイドギャップ化することで高い開放電圧 (V_{oc}) を実現できることで高効率化可能であることを定量的に示した。さらに、K 添加ペロブスカイト太陽電池の Br 比制御による E_g グレーディングの最適化を行った。 E_g グレーディングにより、比較的高い短絡電流密度 (= J_{sc}) を維持しつつ、高い V_{oc} を実現できるメカニズムを理論的にして、具体的な数値 (図 III-2-(ハ)-G-8 左) としては、図 III-2-(ハ)-G-8 右の模式図に示すように、表面側 E_g が 1.61eV (Br 比=0.15)、裏面側 E_g が 1.48eV (Br 比=0.00) の時に効率が最も高くなり、効率 25.2% が達成可能であることが試算され、最終目標を達成した。

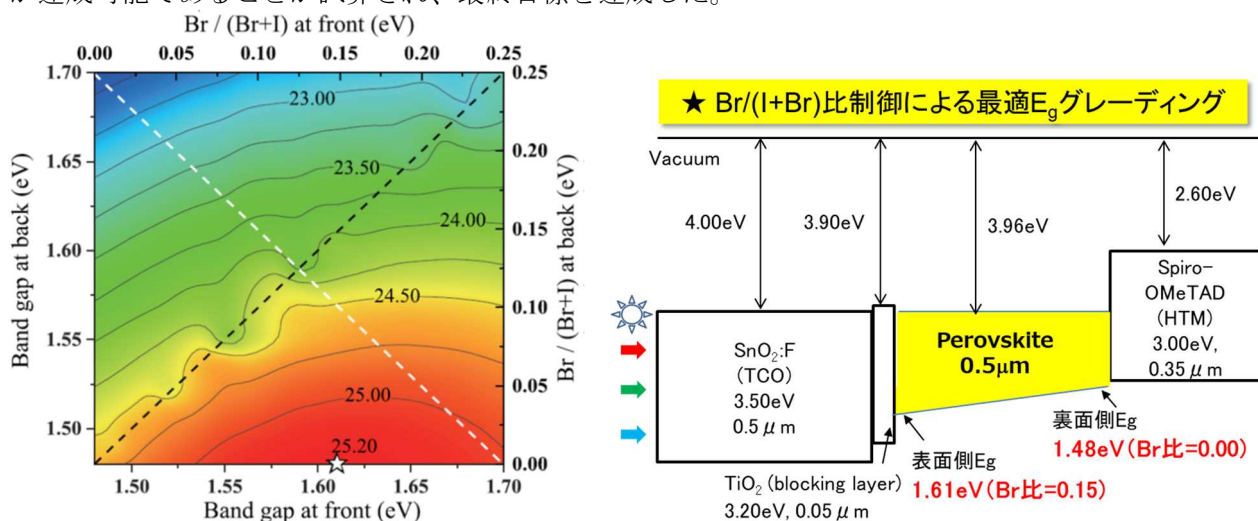


図 III-2-(ハ)-G-8. (左) SCAPS によって計算した最適 E_g グレーディングの模式図 (右) 最適 E_g グレーディングを有するペロブスカイト太陽電池の模式図

2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトの成果として得られたペロブスカイト太陽電池の小面積セルの変換効率は、CIGS 太陽電池や CdTe 太陽電池を上回るレベルになった。しかも、安価な材料と塗布などの簡便な方法により製造できるため、高性能かつ低製造コストの太陽電池の実用化に道が開けた。加えて、特殊な溶剤処理により材料を容易に分離しリサイクルできることもわかった。今後、事業化スケールでの生産に向けてはプロセスの自動化や歩留まりの改善など解決すべき課題も残っている。

一方企業では、今年度中のサンプル出荷開始と 2 年後の本格生産を見据えた準備を開始している。これらの企業の太陽電池製造に関し、東京大学において開発した新規組成のペロブスカイトや新しいデバイス構造は、高いデバイス性能を再現できる点が特長であり、技術移転によって実用化を加速できると考えている。再現性の高い作製条件は、自動化プロセスに適合しており、高効率大面積セルならびにモジュールの作製とその実用化に大きく貢献すると期待される。すでに東京大学先端科学技術研究センター附属産学連携新エネルギー研究施設に置いた集中研では、本研究開発に参加している各企業・各大学の研究者に対し、集中研で開発した高効率デバイスの作製方法を詳細に公開してきた。集中研の技術がこれらの企業を通じて事業化に進んでいくことが期待される。また、各企業や各大学において開発された高純度材料、新規正孔輸送材料、カーボン材料などが集中研に持ち込まれ、それらの持つポテンシャルを引き出す検討も進んだ。一部の材料は既に実用化されている。

一方、ペロブスカイト太陽電池に関する研究は解明されていない現象が多い。現状からさらに変換効率を向上するためには、基礎的な現象解明も重要である。現状の問題点の分析が進まなければ、今後の

改善すべき点も見えてこない。本研究開発の中で、電流-電圧特性ヒステリシスの起源の解明、単結晶と微結晶の励起子挙動の違いの解明、微結晶薄膜中における複数結晶相共存状態の発見など、発電機構解明や安定的なデバイス作製条件設定に寄与する重要な発見ができており、これらの積み重ねにより、高性能化と実用化への道が拓かれるものと期待される。

今後既存の太陽電池より高い変換効率を実現できれば、事業化の動きがスピードアップすると期待される。また、低照度特性なども検討し、年間総発電量で既存太陽電池を上回ることが示されるレベルになれば、事業化を後押しできる。このような観点から、本事業において達成した小面積セルでの変換効率 24.9%やミニモジュールでの変換効率 20.7%の技術をモジュール製造に繋げることは、事業化に向けた動機づけとして大きな意味を持つものと考えられる。

3. 波及効果

ペロブスカイト太陽電池の発電層の厚さは、一般的シリコン太陽電池と比べて僅か 500 分の 1 以下であり、超薄膜化を実現できる。このため、従来の太陽電池では設置できなかった、ビルの壁面、窓、工場の屋根等への設置が可能になり、市場拡大の波及効果は大きい。

ペロブスカイト太陽電池の製造に必須なキーマテリアルのヨウ素は日本が生産量世界 2 位で、そのシェアは約 3 割である。またもう一つの、キーマテリアルの鉛は極めて少量であり、普通乗用車に使われる標準的鉛蓄電池 1 個分の鉛 (約 8kg) で 1 ha (100m×100m) のペロブスカイト太陽電池が製造できる。こうした観点で、エネルギー資源に関わる資源戦略上も波及効果が大きい。

また、日本企業は潜在的に高い塗布プロセス技術を持っており、数 nm の精度が必要なペロブスカイト太陽電池の製造に必要な塗布の技術は、厳格な知財管理で他国の追随を許さないものにでき、製造設備企業への波及効果も大きい。

さらに、ペロブスカイト太陽電池の材料は、特殊な溶剤を使用することで、用意かつ完全に分離することができるため、その廃棄とリサイクルのコストは、シリコン系太陽電池に比べると極めて低くでき、太陽光発電設備のバックエンドコストの低減に大きな波及効果がある。

このような、ペロブスカイト太陽電池の実用化が達成されれば、メガソーラー向け PV、住宅向け PV・BIPV、車載・移動体 PV、IoT 向け超小型 PV など、大きな市場形成が期待できる。

4. 今後の展開

今後の展開としては、以下の 4 項目が考えられる。

- (1) ペロブスカイト超格子構造の自発形成と高効率ペロブスカイト太陽電池製造への応用
無機の超格子の製造方法 (MBE 等) とは全く異なり、塗布しただけで超格子構造ができることを東京大学が発見している。Type II 超格子構造によりさらに高効率な太陽電池が目指せる。
- (2) ペロブスカイト太陽電池をベースにしたフレキシブルタンデム太陽電池
フレキシブル太陽電池でタンデム化を達成し軽量薄膜・高効率の実現を目指す研究が進んでいる。ペロブスカイト on CIGS は東京大学で開発中である。
- (3) Pb 減量化ペロブスカイト、Pb フリーペロブスカイト
Pb の減量化に向けた研究開発が日本の大学 (東京大学、電気通信大学、京都大学) で進んでいる。この研究を組織的に発展させる。
- (4) 低バックエンドコストを実現するペロブスカイト太陽電池のリサイクル
東京大学では、1 ステップの特殊溶剤処理で基板ガラス、ペロブスカイト、金属電極の分離に成功している。太陽光発電のバックエンドコストの提言は必須であり、廃棄・リサイクルコストの激的な低減が可能なペロブスカイト太陽電池材料のリサイクルを確立できる。
この他、高電圧化では、 V_{oc} 1.56V を実現している。一方、高電流化では、 J_{sc} 33mA/cm² 以上を実現している。このように、有機金属ハライドペロブスカイトには材料の多様性があり、それぞれの長所をうまく組み合わせることができれば、効率を大幅に改善できると期待される。
また、ペロブスカイト太陽電池の特長は、結晶シリコンなどと比べて光吸収領域が少し狭く、出力電圧が高い点である。この特長を活かし、シリコン太陽電池などと組み合わせたタンデム太陽電池のトップセルとすることで、既存シリコン太陽電池を大きく上回る性能を実現できる。こうした、異種太陽電池のタンデムも高効率メガソーラーに向けて研究が進むと考えられる。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	1 (0)	3 (1)	2 (0)	1 (1)	1 (0)	8 (2)
論文	23	44	39	58	29	193
研究発表・講演 (うち国際会議)	117 (43)	168 (82)	142 (90)	126 (77)	105 (61)	658 (353)
新聞・雑誌等への掲載	9	2	19	15	20	65
その他(受賞)	5	10	8	8	3	34

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人 京都大学	特願 2015 - 245525	国内	2015/12/16	出願	錯体及びそれを用いたペロブスカイト型太陽電池	若宮淳志、 廣瀬由美、 嶋崎愛
2	国立大学法人 京都大学	PCT/JP2016 /87529	PCT	2016/12/16	出願	錯体及びペロブスカイト材料、 並びに該錯体若しくはペロブスカイト材料を用いたペロブスカイト型太陽電池	若宮淳志、 廣瀬由美、 嶋崎愛
3	国立大学法人 京都大学	特願 2017 -013651	国内	2017/1/27	出願	錯体及びその製造方法	若宮淳志、 尾崎雅司、 村田靖次郎
4	国立大学法人 東京工業大学 国立大学法人 東京大学	特願 2017 -039556	国内	2017/3/2	出願	複合体の加熱方法、複合体の加熱装置及び光電変換素子	米谷真人、 瀬川浩司、 椿俊太郎、 和田雄二
5	国立大学法人 東京大学	特願 2017 -093656	国内	2017/5/10	出願	有機無機ハイブリッド材料なら びにこれを用いた太陽電池	瀬川浩司、 別所毅隆、 唐 澤国
6	国立研究開発 法人産業技術 総合研究所	特願 2017 -216195	国内	2017/11/9	出願	有機カチオン部分を持つ芳香族 アミン誘導体及びそれを用いた ペロブスカイト型太陽電池	船木敬、 近松真之、 小野澤伸子 村上拓郎
7	国立大学法人 東京大学	PCT/JP2018 /018060	PCT	2018/5/10	出願	有機無機ハイブリッド材料なら びにこれを用いたペロブスカイ ト型太陽電池	瀬川浩司、 別所毅隆、 唐 澤国
8	国立研究開発 法人産業技術 総合研究所	特願 2019 -078390	国内	2019/4/17	出願	トリフェニルベンゼン骨格を持 つ新規芳香族アミン誘導体及び それを用いたペロブスカイト型 太陽電池	船木敬、 小野澤伸子 村上拓郎、 近松真之

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	H. Kunugita, T. Hashimoto, Y. Kiyota, Y. Udagawa, Y. Takeoka, Y. Nakamura,	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Excitonic feature in hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ single crystals	Chemistry Letters 2015, 44(6), 852-854	有	2015/6/15

	J. Sano, T. Matsushita, T. Kondo, T. Miyasaka, K. Ema					
2	K. Zhu, T. Miyasaka, J. Y. Kim, I. Mora-Sero	東京大学、 桐蔭横浜大学	Trend of perovskite solar cells: Dig deeper to build higher	Journal of Physical Chemistry Letters 2015, 6(12), 2315-2317	有	2015/6/18
3	宮坂力	東京大学、 桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池と光エレクトロニクス素子	オプトロニクス 2015年7月号, 403, 59-65	無	2015/7/1
4	中崎城太郎, 瀬川浩司	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けて	オプトロニクス 2015年7月号, 403, 66-70	無	2015/7/1
5	近藤高志	東京大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイト型半導体の物性	オプトロニクス 2015年7月号, 403, 71-75	無	2015/7/1
6	T.-Y. Hsieh, T.-C. Wei, K.-L. Wu, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学、 桐蔭横浜大学	Efficient perovskite solar cells fabricated using an aqueous lead nitrate precursor	Chemical Communications 2015, 51(68), 13294-13297	有	2015/7/10
7	E. Zheng, X.-F. Wang, J. Song, L. Yan, W. Tian, T. Miyasaka	東京大学、 桐蔭横浜大学	PbI ₂ -based dipping-controlled material conversion for compact layer free perovskite solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2015, 7, 18156-18162	有	2015/7/29
8	A. Alberti, I. Deretzis, G. Pellegrino, C. Bongiorno, E. Smecca, G. Mannino, F. Giannazzo, G. G. Condorelli, N. Sakai, T. Miyasaka, C. Spinella, A. La Magna	東京大学、 桐蔭横浜大学	Similar structural dynamics for the degradation of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ in air and in vacuum	ChemPhysChem 2015, 16, 3064-3071	有	2015/9/2
9	A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学、 桐蔭横浜大学	Brookite TiO ₂ as a low-temperature solution-processed mesoporous layer for hybrid perovskite solar cells	Journal of Materials Chemistry A 2015, 3(42), 20952-20957	有	2015/9/7
10	L. Cojocaru, S. Uchida, Y. Sanehira, V. Gonzalez-Pedro, J. Bisquert, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Temperature effects on the photovoltaic performance of planar structure perovskite solar cells	Chemistry Letters 2015, 44(11), 1557-1559	有	2015/9/10
11	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V.	東京大学	Origin of the hysteresis in I-V curves for planar structure perovskite solar	Chemistry Letters 2015, 44(12), 1750-1752	有	2015/10/22

	Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa		cells rationalized with a surface boundary induced capacitance model			
12	宮坂力	東京大学、 桐蔭横浜大学	高効率ペロブスカイト光電変換の応用展開と環境対応	光触媒 2015, 47, 48-59	無	2015/10/22
13	T. S. Ripolles, K. Nishinaka, Y. Ogomi, Y. Miyata, S. Hayase	九州工業大学	Efficiency enhancement by changing perovskite crystal phase and adding a charge extraction interlayer in organic amine free-perovskite solar cells based on cesium	Solar Energy Materials and Solar Cells 2016, 144, 532-536	有	2015/10/23
14	J. Song, E. Zheng, X.-F. Wang, W. Tian, T. Miyasaka	東京大学、 桐蔭横浜大学	Low-temperature-processed ZnO-SnO ₂ nanocomposite for efficient planar perovskite solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells 2016, 144, 623-630	有	2015/10/23
15	宮坂力	東京大学、 桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池の特徴とエネルギーハーベストへの応用	エネルギーハーベストインダストリーの設計と応用展開 (桑野, 竹内 監修, シーエムシー出版) pp.101-109	無	2015/10/23
16	T. Kinoshita, K. Nonomura, N. J. Jeon, F. Giordano, A. Abate, S. Uchida, T. Kubo, S. I. Seok, M. K. Nazeeruddin, A. Hagfeldt, M. Grätzel, H. Segawa	東京大学	Spectral splitting photovoltaics using perovskite and wideband dye-sensitized solar cells	Nature Communications 2015, 6, 8834	有	2015/11/5
17	V. Murugan, Y. Ogomi, S. S. Pandey, T. Toyoda, Q. Shen, S. Hayase	九州工業大学	Effects of different chloride precursors on crystal growth of lead halide perovskites	Applied Physics Express 2015, 8, 125501	有	2015/11/5
18	A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学、 桐蔭横浜大学	Anatase and brookite electron collectors from binder-free precursor pastes for low-temperature solution-processed perovskite solar cells	Chemistry Letters 2016, 45, 143-145	有	2015/11/26
19	Y. Numata, Y. Sanehira, T. Miyasaka	東京大学、 桐蔭横浜大学	Impacts of heterogeneous TiO ₂ and Al ₂ O ₃ composite mesoporous scaffold on formamidinium lead trihalide perovskite solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2016, 8(7), 4608-4615	有	2016/1/26
20	A. K. Jena,	東京大	Steady state performance,	Journal of Power Sources	有	2016/2/5

	A. Kulkarni, M. Ikegami, T. Miyasaka	学、 桐蔭横 浜大学	photo-induced performance degradation and their relation to transient hysteresis in perovskite solar cells	2016, 309, 1-10		
21	宮坂力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の実力と将来ポテンシャル	化学工業 2016年3月号, 67(3), 60-66	無	2016/3/1
22	T. Singh, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	High performance perovskite solar cell via multi-cycle low temperature processing of lead acetate precursor solutions	Chemical Communications 2016, 52, 4784-4787	有	2016/3/2
23	N. Sakai, S. Pathak, H.-W. Chen, A. A. Haghighirad, S. D. Stranks, T. Miyasaka, H. J. Snaith	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	The mechanism of toluene-assisted crystallization of organic-inorganic perovskites for highly efficient solar cells	Journal of Materials Chemistry A 2016, 4, 4464-4471	有	2016/3/2
24	E. Smecca, Y. Numata, I. Deretzi, G. Pellegrino, S. Boninelli, T. Miyasaka, A. La Magna, A. Alberti	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Stability of solution-processed MAPbI ₃ and FAPbI ₃ layers	Physical Chemistry Chemical Physics 2016, 18, 13413-13422	有	2016/4/15
25	J. Song, W. Hu, X.-F. Wang, G. Chen, W. Tian, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	HC(NH ₂) ₂ PbI ₃ as a thermally stable absorber for efficient ZnO-based perovskite solar cells	Journal of Materials Chemistry A 2016, 4, 8435-8443	有	2016/4/26
26	T. S. Ripolles, A. K. Baranwal, K. Nishinaka, Y. Ogomi, G. Garcia- Belmonte, S. Hayase	九州工 業大学	Mechanisms of charge accumulation in the dark operation of perovskite solar cells	Physical Chemistry Chemical Physics 2016, 18, 14970-14975	有	2016/4/28
27	宮坂力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の開発と研究動向	化学と工業 2016年5月号, 90(5), 137-142	無	2016/5/1
28	早瀬修二	九州工 業大学	鉛フリーペロブスカイト太陽電池の開発に向けて	化学と工業 2016年5月号, 90(5), 143-149	無	2016/5/1
29	T. Singh, A. Kulkarni, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Effect of electron transporting layer on bismuth-based lead-free perovskite (CH ₃ NH ₃) ₃ Bi ₂ I ₉ for photovoltaic applications	ACS Applied Materials and Interfaces 2016, 8, 14542-14547	有	2016/5/26
30	A. Kogo, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横	A SnO _x -brookite TiO ₂ bilayer electron collector for hysteresis-less high	Chemical Communications 2016, 52, 8119-8122	有	2016/5/31

		浜大学	efficiency plastic perovskite solar cells fabricated at low process temperature			
31	宮坂力	東京大学、桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池の可能性と求められる材料設計	エネルギーデバイス 2016年6月号, 70-75	無	2016/6/1
32	宮坂力	東京大学、桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向	Electrochemistry 2016, 84(6), 439-444	無	2016/6/5
33	中崎城太郎、内田聡、瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の実用化に向けて	Electrochemistry 2016, 84(6), 445-448	無	2016/6/5
34	L. Cojocaru, S. Uchida, D. Matsubara, H. Matsumoto, K. Ito, Y. Otsu, P. Chapon, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Direct confirmation of distribution for Cl ⁻ in CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x layer of perovskite solar cells	Chemistry Letters 2016, 45, 884-886	有	2016/6/11
35	宮坂力	東京大学、桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池の研究開発最新動向	光触媒 2016, 49, 4-15	無	2016/6/20
36	近藤高志	東京大学	ペロブスカイト型半導体 CH ₃ NH ₃ PbI ₃ の基礎物性	光触媒 2016, 49, 16-19	無	2016/6/20
37	米谷真人	東京大学、東京工業大学	ペロブスカイト太陽電池の基板電極構造と界面制御	光触媒 2016, 49, 48-53	無	2016/6/20
38	尾込祐平、早瀬修二	九州工業大学	Sn系ペロブスカイト太陽電池と界面制御	光触媒 2016, 49, 54-61	無	2016/6/20
39	内田聡、ルドミラ コジヨカル、瀬川浩司	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の界面エンジニアリング	光触媒 2016, 49, 78-83	無	2016/6/20
40	沼田陽平、宮坂力	東京大学、桐蔭横浜大学	カチオン-ハロゲン混合型ペロブスカイト太陽電池における溶媒蒸気アシスト熱アニール法による高効率化	光触媒 2016, 49, 84-87	無	2016/6/20
41	古郷敦史、池上和志、宮坂力	東京大学、桐蔭横浜大学	ブルッカイト TiO ₂ 電子収集層を用いたフレキシブルペロブスカイト太陽電池	光触媒 2016, 49, 88-91	無	2016/6/20
42	中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の実用化最新動向	光触媒 2016, 49, 92-99	無	2016/6/20
43	A. Kulkarni, A. K. Jena, H.-W. Chen, Y. Sanehira,	東京大学、桐蔭横浜大学	Revealing and reducing the possible recombination loss within TiO ₂ compact layer by incorporating MgO layer	Solar Energy 2016, 136, 379-384	有	2016/7/19

	M. Ikegami, T. Miyasaka		in perovskite solar cells			
44	内田聡、 コジヨカル ル ドミラ、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大 学	有機金属ハライドペロブスカ イト太陽電池の現状と展望	応用物理 2016, 85(8), 676-683	無	2016/8/10
45	J. Song, E. Zheng, L. Liu, X.-F. Wang, G. Chen, W. Tian, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Magnesium-doped zinc oxide as electron selective contact layers for efficient perovskite solar cells	ChemSusChem 2016, 9, 2640-2647	有	2016/8/11
46	M. Vigneshwaran, T. Ohta, S. Iikubo, G. Kapil, T. S. Ripolles, Y. Ogomi, T. Ma, S. S. Pandey, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase	九州工 業大学	Facile synthesis and characterization of sulfur doped low bandgap bismuth based perovskites by soluble precursor route	Chemistry of Materials 2016, 28, 6436-6440	有	2016/8/30
47	M. Moriya, D. Hirotani, T. Ohta, Y. Ogomi, Q. Shen, T. S. Ripolles, K. Yoshino, T. Toyoda, T. Minemoto, S. Hayase	九州工 業大学	Architecture of the interface between the perovskite and hole- transport layers in perovskite solar cells	ChemSusChem 2016, 9, 2634-2639	有	2016/9/1
48	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技 術総合 研究所	Highly controlled codeposition rate of organolead halide perovskite by laser evaporation method	ACS Applied Materials and Interfaces 2016, 8, 26013-26018	有	2016/9/9
49	A. K. Baranwal, S. Kanaya, T. A. Nirmal Peiris, G. Mizuta, T. Nishina, H. Kanda, T. Miyasaka, H. Segawa, S. Ito	兵庫県 立大 学、 東京大 学、 桐蔭横 浜大学	100°C thermal stability of printable perovskite solar cells using porous carbon counter electrodes	ChemSusChem 2016, 9, 2604-2608	有	2016/9/15
50	M. Li, Y. Li, S. Sasaki, J. Song, C. Wang, H. Tamiaki, W. Tian,	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Dopant-free zinc chlorophyll aggregates as an efficient biocompatible hole transporter for perovskite solar cells	ChemSusChem 2016, 9, 2862-2869	有	2016/9/15

	G. Chen, T. Miyasaka, X.-F. Wang					
51	H.-W. Chen, T.-Y. Huang, T.-H. Chang, Y. Sanehira, C.-W. Kung, C.-W. Chu, M. Ikegami, T. Miyasaka, K.-C. Ho	東京大学、 桐蔭横 浜大学	Efficiency enhancement of hybrid perovskite solar cells with MEH-PPV hole- transporting layers	Scientific Reports 2016, 6, 34319	有	2016/10/4
52	N.-G. Park, M. Grätzel, T. Miyasaka, K. Zhu, K. Emery	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Towards stable and commercially available perovskite solar cells	Nature Energy 2016, 1, 16152	有	2016/10/17
53	Q.-H. Zhang, W.-D. Hu, X.-F. Wang, G. Chen, J.-P. Zhang, L.-X. Xiao, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Fullerene multiadducts as electron collection layers for perovskite solar cells	Chemistry Letters 2017, 46, 101-103	有	2016/11/1
54	宮寺哲彦	産業技 術総合 研究所	蒸着法によるハロゲン化有機 金属ペロブスカイト作製	応用物理学会 有機分子・ハ イエレクトロニクス分科会誌 2016, Vol. 26, No. 4	無	2016/11/1
55	早瀬修二	九州工 業大学	ペロブスカイト太陽電池の現 状と将来展望	応用物理学会 有機分子・ハ イエレクトロニクス分科会誌 2016, Vol. 27, No. 4	無	2016/11/1
56	H. Kanda, A. Uzum, A. K. Baranwal, T. A. Nirmal Peiris, T. Umeyama, H. Imahori, H. Segawa, T. Miyasaka, S. Ito	兵庫県 立大 学、 東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Analysis of sputtering damage on I-V curves for perovskite solar cells and simulation with reversed diode model	Journal of Physical Chemistry C 2016, 120, 28441-28447	有	2016/11/10
57	P. Pinpithak, H.-W. Chen, A. Kulkarni, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Low-temperature and ambient air processes of amorphous SnO _x -based mixed halide perovskite planar solar cell	Chemistry Letters 2017, 46, 382-384	有	2016/12/29
58	中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大 学	世界を席卷する有機金属ハラ イド太陽電池	WEB Journal 2017年1月 号, 32-35	無	2017/1/1
59	T. Singh, Y. Udagawa, M. Ikegami, H. Kunugita, K. Ema, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Tuning of perovskite solar cell performance via low- temperature brookite scaffolds surface modifications	APL Materials 2017, 5, 016103	有	2017/1/10
60	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V.	東京大 学	Simulation of current- voltage curves for inverted planar structure perovskite	Applied Physics Express 2017, 10, 025701	有	2017/1/13

	Jayaweera, S. Kaneko, Y. Toyoshima, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa		solar cells using equivalent circuit model with inductance			
61	A. Kulkarni, T. Singh, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Photovoltaic enhancement of bismuth halide hybrid perovskite by <i>N</i> -methyl pyrrolidone-assisted morphology conversion	RSC Advances 2017, 7, 9456-9460	有	2017/1/31
62	A. Kogo, S. Iwasaki, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	An ultrathin sputtered TiO ₂ compact layer for mesoporous brookite-based plastic CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x solar cells	Chemistry Letters 2017, 46, 530-532	有	2017/2/1
63	T.A.Nimal Peiris, A. K. Baranwal, H. Kanda, S. Fukumoto, S. Kanaya, T. Bessho, L. Cojocar, u, T. Miyasaka, H. Segawa, S. Ito	兵庫 県立 大 学、 東京 大 学、 桐蔭 横 浜 大 学	Effect of electrochemically deposited MgO coating on printable perovskite solar cell performance	Coatings 2017, 7, 36	有	2017/2/27
64	K. Motoki, Y. Miyazawa, D. Kobayashi, M. Ikegami, T. Miyasaka, T. Yamamoto, K. Hirose	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Degradation of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite due to soft x- ray irradiation as analyzed by an x-ray photoelectron spectroscopy time-dependent measurement method	Journal of Applied Physics 2017, 121, 085501	有	2017/2/27
65	T.A.Nimal Peiris, A. K. Baranwal, H. Kanda, S. Fukumoto, S. Kanaya, L. Cojocar, u, T. Bessho, T. Miyasaka, H. Segawa, S. Ito	兵庫 県立 大 学、 東京 大 学、 桐蔭 横 浜 大 学	Enhancement of the hole conducting effect of NiO by a N ₂ blow drying method in printable perovskite solar cells with low-temperature carbon as the counter electrode	Nanoscale 2017, 9, 5475- 5482	有	2017/3/31
66	中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大 学	有機金属ハライド太陽電池の 現状と展望	日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす 2017年3月 号, 96(2), 148-155	無	2017/3/31
67	中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大 学	有機金属ハライド太陽電池の 現状と展望	太陽エネルギー 2017, 43(2), 3-14	無	2017/3/31
68	L. Cojocar, u, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, Y. Toyoshima, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Reply to "Comment on 'Simulation of current- voltage curves for inverted structure perovskite solar cells using equivalent circuit model with inductance' "	Applied Physics 2017, 10, 059102	有	2017/4/19

69	瀬川浩司	東京大学	未来の社会を彩る再生可能エネルギー技術の挑戦	燃料電池 2017, 16(4), 50-53	無	2017/4/30
70	T. Miyasaka	東京大学、桐蔭横浜大学	Evolution of organic and hybrid photovoltaics on interdisciplinary of science	Electrochemistry 2017, 85, 221	無	2017/5/5
71	S. Hayase	九州工業大学	Research following Pb perovskite solar cells	Electrochemistry 2017, 85, 222-225	有	2017/5/5
72	N. Onozawa-Komatsuzaki, T. Funaki, T. N. Murakami, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, K. Sayama	産業技術総合研究所	Novel cobalt complexes as a dopant for hole-transporting material in perovskite solar cells	Electrochemistry 2017, 85, 226-230	有	2017/5/5
73	M. M. Maitani, D. Iso, J. Kim, S. Tsubaki, Y. Wada	東京大学、東京工業大学	Microwave application to efficient annealing process of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite crystalline films	Electrochemistry 2017, 85, 236-240	有	2017/5/5
74	T. Miyadera, T. Sugita, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Hysteresis analysis of organolead halide perovskite solar cells by transient current measurement	Electrochemistry 2017, 85, 276-279	有	2017/5/5
75	Y. Numata, A. Kogo, Y. Udagawa, H. Kunugita, K. Ema, Y. Sanehira, T. Miyasaka	東京大学、桐蔭横浜大学	Controlled crystal grain growth in mixed cation-halide perovskite by evaporated solvent vapor recycling method for high efficiency solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2017, 9, 18739-18747	有	2017/5/11
76	H. D. Kim, N. Yanagawa, A. Shimazaki, M. Endo, A. Wakamiya, H. Ohkita, H. Benten, S. Ito	京都大学	Origin of open-circuit voltage loss in polymer solar cells and perovskite solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2017, 9, 19988-19997	有	2017/5/29
77	A. Alberti, I. Deretzis, G. Mannino, E. Smecca, S. Sanzaro, Y. Numata, T. Miyasaka, A. La Magna	東京大学、桐蔭横浜大学	Revealing a discontinuity in the degradation behavior of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ during thermal operation	Journal of Physical Chemistry C 2017, 121, 13577-13585	有	2017/5/31
78	G. Kapil, T. Ohta, T. Koyanagi, M. Vigneshwaran, Y. Zhang, Y. Ogomi, S. S. Pandey,	九州工業大学、東京大学、立命館大学	Investigation of interfacial charge transfer in solution processed Cs_2SnI_6 thin films	Journal of Physical Chemistry C 2017, 121, 13092-13100	有	2017/6/1

	K. Yoshino, Q. Shen, T. Toyoda, M. M. Rahman, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase					
79	J. Nakazaki, H. Segawa	東京大 学	Recent progress of organometal halide perovskite solar cells	AAPPS Bulletin 2017, 27(3), 9-21	有	2017/6/1
80	J. Song, L. Liu, X.-F. Wang, G. Chen, W. Tian, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Highly efficient and stable low-temperature processed ZnO solar cells with triple cation perovskite absorber	Journal of Materials Chemistry A 2017, 5, 13439-13447	有	2017/6/2
81	S. Almosni, L. Cojocar, u, D. Li, S. Uchida, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Tunneling-assisted trapping as one of the possible mechanisms for the origin of hysteresis in perovskite solar cells	Energy Technology 2017, 5, 1767-1774	有	2017/7/3
82	L. Cojocar, u, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, H. Wang, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Effect of TiO ₂ surface treatment on the current- voltage hysteresis of planar-structure perovskite solar cells prepared on rough and flat fluorine- doped tin oxide substrates	Energy Technology 2017, 5, 1762-1766	有	2017/7/14
83	A. K. Jena, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Severe morphological deformation of Spiro-OMeTAD in (CH ₃ NH ₃)PbI ₃ solar cells at high temperature	ACS Energy Letters 2017, 2, 1760-1761	有	2017/7/14
84	M. M. Maitani, H. Satou, A. Ohmura, S. Tsubaki, Y. Wada	東京大 学、 東京工 業大学	Crystalline orientation control using self- assembled TiO ₂ nanosheet scaffold to improve CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 2017, 56, 08MC17	有	2017/7/25
85	N. Shibayama, H. Kanda, S. Yusa, S. Fukumoto, A. K. Baranwal, H. Segawa, T. Miyasaka, S. Ito	兵庫 県立 大 学、 東京大 学、 桐蔭横 浜大学	All-inorganic inverse perovskite solar cells using zinc oxide nanocolloids on spin coated perovskite layer	Nano Convergence 2017, 4, 18	有	2017/7/28
86	T. Singh, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Stabilizing the efficiency beyond 20% with a mixed cation perovskite solar cell fabricated in ambient	Advanced Energy Materials 2017, 8, 1700677	有	2017/9/14

			air under controlled humidity			
87	L. Cojocar, S. Uchida, K. Tamaki, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Determination of unique power conversion efficiency of solar cell showing hysteresis in the I-V curve under various light intensities	Scientific Reports 2017, 7, 11790	有	2017/9/18
88	Z. Tang, T. Bessho, F. Awai, T. Kinoshita, M. M. Maitani, R. Jono, T. N. Murakami, H. Wang, T. Kubo, S. Uchida, H. Segawa	東京大学	Hysteresis-free perovskite solar cells made of potassium-doped organometal halide perovskite	Scientific Reports 2017, 7, 12183	有	2017/9/22
89	T. N. Murakami, T. Miyadera, T. Funaki, L. Cojocar, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業技術総合研究所、東京大学	Adjustment of conduction band edge of compact TiO ₂ layer in perovskite solar cells through TiCl ₄ treatment	ACS Applied Materials and Interfaces 2017, 9, 36708-36714	有	2017/10/5
90	M. Ozaki, Y. Katsuki, J. Liu, T. Handa, R. Nishikubo, S. Yakumaru, Y. Hashikawa, Y. Murata, T. Saito, Y. Shimakawa, Y. Kanemitsu, A. Saeki, A. Wakamiya	京都大学	Solvent-coordinated tin halide complexes as purified precursors for tin-based perovskites	ACS Omega 2017, 2, 7016-7021	有	2017/10/20
91	K. Yamamoto, S. Iikubo, J. Yamasaki, Y. Ogomi, S. Hayase	九州工業大学	Structural stability of iodide perovskite: A combined cluster expansion method and first-principles study	Journal of Physical Chemistry C 2017, 121, 27797-27804	有	2017/11/30
92	F. Yang, H. E. Lim, F. Wang, M. Ozaki, A. Shimazaki, J. Liu, N. B. Mohamed, K. Shinokita,	京都大学	Roles of polymer layer in enhanced photovoltaic performance of perovskite solar cells via interface engineering	Advanced Materials Interfaces 2018, 5, 1701256	有	2017/12/21

	Y. Miyauchi, A. Wakamiya, Y. Murata, K. Matsuda					
93	Z. Tang, S. Uchida, T. Bessho, T. Kinoshita, H. Wang, F. Awai, R. Jono, M. M. Maitani, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Modulations of various alkali metal cations on organometal halide perovskites and their influence on photovoltaic performance	Nano Energy 2018, 45, 184-192	有	2017/12/30
94	A. Kogo, Y. Sanehira, Y. Numata, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Amorphous metal oxide blocking layers for highly efficient low temperature brookite TiO ₂ -based perovskite solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2018, 10, 2224-2229	有	2018/1/4
95	T. W. Kim, S. Uchida, T. Matsushita, L. Cojocar, R. Jono, K. Kimura, D. Matsubara, M. Shirai, K. Ito, H. Matsumoto, T. Kondo, H. Segawa	東京大 学	Self-organized superlattice and phase coexistence inside thin film organometal halide perovskite	Advanced Materials 2018, 30, 1705230	有	2018/1/10
96	T. Singh, S. Öz, A. Sasinska, R. Frohnhoven, S. Mathur, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Sulfate-assisted interfacial engineering for high yield and efficiency of triple cation perovskite solar cells with alkali- doped TiO ₂ electron- transporting layers	Advanced Functional Materials 2018, 28, 1706287	有	2018/1/22
97	O. A. Lozhkina, A. A. Murashkina, M. S. Elizarov, V. V. Shilovskikh, A. A. Zolotarev, Y. V. Kapitonov, R. Kevorkyants, A. V. Emeline, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Microstructural analysis and optical properties of the halide double perovskite Cs ₂ BiAgBr ₆ single crystals	Chemical Physics Letters 2018, 694, 18-22	有	2018/1/31
98	W. -D. Hu, C. Dall' Agnese, X. -F. Wang, G. Chen, M. -Z. Li, J. -X. Song,	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Copper iodide-PEDOT:PSS double hole transport layers for improved efficiency and stability in perovskite solar cells	Journal of Photochemistry and Photobiology A 2018, 357, 36-40	有	2018/2/15

	Y.-J. Wei, T. Miyasaka					
99	P. Pinpithak, A. Kulkarni, H.-W. Chen, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Solid-state thin-film dye- sensitized solar cell co- sensitized with methylammonium lead bromide perovskite	Bulletin of the Chemical Society of Japan 2018, 91, 754-760	有	2018/2/20
100	W.-W. Wang, J.-S. Dang, R. Jono, H. Segawa, M. Sugimoto	熊本大 学、 東京大 学	A first-principles prediction on the "healing effect" of graphene preventing carrier trapping near the surface of metal halide perovskites	Chemical Science 2018, 9, 3341-3353	有	2018/2/22
101	宮坂力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の研 究の背景と産業展開	光アライアンス 2018, 29(3), 1-5	無	2018/3/1
102	瀬川浩司、 中崎城太郎	東京大 学	有機金属ハライドペロブスカ イト太陽電池の高性能化に向 けた最新技術	光アライアンス 2018, 29(3), 6-10	無	2018/3/1
103	J. Nakazaki, H. Segawa	東京大 学	Evolution of organometal halide solar cells	Journal of Photochemistry and Photobiology C 2018, 35, 74-107	有	2018/3/2
104	A. Kulkarni, T. Singh, A. K. Jena, P. Pinpithak, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Vapor annealing controlled crystal growth and photovoltaic performance of bismuth triiodide embedded in mesostructured configurations	ACS Applied Materials and Interfaces 2018, 10, 9547-9554	有	2018/3/6
105	Z. Hu, T. Ma, S. Hayase	九州工 業大学	Interparticle coupling effect of silver-gold heterodimer to enhance light harvesting in ultrathin perovskite solar cell	Journal of Photonics for Energy 2018, 8, 015502	有	2018/3/9
106	Y. Nishihara, M. Chikamatsu, S. Kazaoui, T. Miyadera, Y. Yoshida	産業技 術総合 研究所	Influence of O ₂ plasma treatment on NiOx layer in perovskite solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 2018, 57, 04FS07	有	2018/3/14
107	T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Lead halide perovskites in thin film photovoltaics: backgrounds and perspectives	Bulletin of the Chemical Society of Japan 2018, 91, 1058-1068	有	2018/4/5
108	S. Almosni, A. Delamarre, Z. Jehl, D. Suchet, L. Cojocaru, M. Giteau, B. Behaghel, A. Julian, C. Ibrahim,	東京大 学	Material challenges for solar cells in the twenty- first century: Directions in emerging technologies	Science and Technology of Advanced Materials 2018, 19, 336-369	有	2018/4/10

	L. Tatry, H. Wang, T. Kubo, S. Uchida, H. Segawa, N. Miyashita, R. Tamaki, Y. Shoji, K. Yoshida, N. Ahsan, K. Watanabe, T. Inoue, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Hamamura, T. Toupance, C. Olivier, S. Chambon, L. Vignau, C. Geffroy, E. Cloutet, G. Hadziioannou, N. Cavassilas, P. Rale, A. Cattoni, S. Collin, F. Gibelli, M. Paire, L. Lombez, D. Aureau, M. Bouttemy, A. Etcheberry, Y. Okada, J.-F. Guillemoles					
109	Y. Numata, R. Ishikawa, Y. Sanehira, A. Kogo, H. Shirai, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Nb-doped amorphous titanium oxide compact layer for formamidinium- based high efficiency perovskite solar cells by low-temperature fabrication	Journal of Materials Chemistry A 2018, 6, 9583-9591	有	2018/4/24
110	T. Matsui, T. Yokoyama, T. Negami, T. Sekiguchi, M. Saliba, M. Grätzel, H. Segawa	東京大 学、 パナソ ニック	Effect of rubidium for thermal stability of triple-cation perovskite solar cells	Chemistry Letters 2018, 47, 814-816	有	2018/4/24
111	G. Kapil, T. S. Ripolles, K. Hamada, Y. Ogomi, T. Bessho, T. Kinoshita, J. Chantana, K. Yoshino,	東京大 学、 九州工 業大 学、 産業技 術総合 研究	Highly efficient 17.6% tin- lead mixed perovskite solar cells realized through spike structure	Nano Letters 2018, 18, 3600-3607	有	2018/4/27

	Q. Shen, T. Toyoda, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	所、 立命館 大学				
112	Y. Miyazawa, M. Ikegami, H.-W. Chen, T. Ohshima, M. Imaizumi, K. Hirose, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Tolerance of perovskite solar cell to high-energy particle irradiations in space environment	iScience 2018, 2, 148-155	有	2018/4/27
113	S. Yamanaka, K. Hayakawa, L. Cojocar, R. Tsuruta, T. Sato, K. Mase, S. Uchida, Y. Nakayama	東京大 学	Electronic structures and chemical states of methylammonium lead triiodide thin films and the impact of annealing and moisture exposure	Journal of Applied Physics 2018, 123, 165501	有	2018/4/30
114	I. Deretzis, E. Smecca, G. Mannino, A. La Magna, T. Miyasaka, A. Alberti	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Stability and degradation in hybrid perovskites: Is the glass half empty or half-full?	Journal of Physical Chemistry Letters 2018, 9, 3000-3007	有	2018/5/15
115	N. Shibayama, S. Fukumoto, H. Sugita, H. Kanda, S. Ito	兵庫 県立 大 学、 東京 大 学	Influence of transparent conductive oxide layer on the inverted perovskite solar cell using PEDOT:PSS for hole transport layer	Materials Research Bulletin 2018, 106, 433- 438	有	2018/6/28
116	N.-G. Park, H. Segawa	東京 大 学	Research direction toward theoretical efficiency in perovskite solar cells	ACS Photonics 2018, 5, 2970-2977	有	2018/7/2
117	A. K. Baranwal, H. Kanda, N. Shibayama, H. Masutani, T.A. NimalPeiris, S. Kanaya, H. Segawa, T. Miyasaka, S. Ito	兵庫 県立 大 学、 東京 大 学、 桐蔭 横 浜 大 学	Thermal degradation analysis of sealed perovskite solar cell with porous carbon electrode at 100 °C for 7000 h	Energy Technology 2019, 7, 245-252	有	2018/7/4
118	H. D. Kim, H. Ohkita	京 都 大 学	Charge traps in lead-halide perovskites with different grain sizes	Japanese Journal of Applied Physics 2018, 57, 08RE03	有	2018/7/4
119	M. Liu, M. Endo, A. Shimazaki, A. Wakamiya, Y. Tachibana	京 都 大 学	Identifying an optimum perovskite solar cell structure by kinetic analysis: planar, mesoporous based, or extremely thin absorber	ACS Applied Energy Materials 2018, 1, 3722- 3732	有	2018/7/6

			structure			
120	L. Cojocaru, K. Wienands, T. W. Kim, S. Uchida, A. J. Bett, S. Rafizadeh, J. C. Goldschmidt, S. W. Glunz	東京大 学	Detailed investigation of evaporated perovskite absorbers with high crystal quality on different substrates	ACS Applied Materials and Interfaces 2018, 10, 26293-26302	有	2018/7/17
121	F. Yang, J. Liu, H. E. Lim, Y. Ishikura, K. Shinokita, Y. Miyauchi, A. Wakamiya, Y. Murata, K. Matsuda	京都大 学	High bending durability of efficient flexible perovskite solar cells using metal oxide electron transport layer	Journal of Physical Chemistry C 2018, 122, 17088-17095	有	2018/7/23
122	X. Zhang, M. Li, C. Dall'Agnese, G. Chen, X.-F. Wang, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Thermo-evaporated pentacene and perylene as hole transport materials for perovskite solar cells	Dyes and Pigments 2018, 160, 285-291	有	2018/7/31
123	N. Onozawa- Komatsuzaki, T. N. Murakami, T. Funaki, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, H. Tampo, W.-W. Wang, M. Sugimoto	産業技 術総合 研究 所、 東京大 学、 熊本大 学	Effect of aromatic nitrogen heterocycle treatment on the performance of perovskite solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 2018, 57, 08RE08	有	2018/8/1
124	F. Yang, D. Hirotoni, G. Kapil, M. A. Kamarudin, C. H. Ng, Y. Zhang, Q. Shen, Shuzi Hayase	九州工 業大 学、 東京大 学	All-inorganic CsPb _{1-x} Ge _x I ₂ Br perovskite with enhanced phase stability and photovoltaic performance	Angewandte Chemie International Edition 2018, 57, 12745-12749	有	2018/8/1
125	J. Liu, M. Ozaki, S. Yakumaru, T. Handa, R. Nishikubo, Y. Kanemitsu, A. Saeki, Y. Murata, R. Murdey, A. Wakamiya	京都大 学	Lead-free solar cells based on tin halide perovskite films with high coverage and improved aggregation	Angewandte Chemie International Edition 2018, 57, 13221-13225	有	2018/8/15
126	P. Zhang, F. Yang, M. A. Kamarudin,	九州工 業大 学、	Performance enhancement of mesoporous TiO ₂ -based perovskite solar cells by	ACS Applied Materials and Interfaces 2018, 10, 29630-29637	有	2018/8/16

	C. H. Ng, G. Kapil, T. Ma, S. Hayase	東京大 学	SbI ₃ interfacial modification layer			
127	H. Maruo, Y. Sasaki, K. Harada, K. Suwa, K. Oyaizu, H. Segawa, K. Carter, H. Nishide	東京大 学、 早稲田 大学	Hole-transporting diketopyrrolo- pyrrole- thiophene polymers and their additive-free application for a perovskite-type solar cell with an efficiency of 16.3%	Polymer Journal 2019, 51, 91-96	有	2018/8/23
128	M. Kim, T. N. Murakami, T. W. Kim, S. Kim, H. Tampo, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業技 術総合 研究 所、 東京大 学	Ultra-thin cadmium sulfide electron-transporting layer for planar perovskite solar cell	Chemistry Letters 2018, 47, 1350-1353	有	2018/8/31
129	A. Kogo, T. N. Murakami, M. Chikamatsu	産業技 術総合 研究所	CH ₃ NH ₃ I post-treatment of organometal halide perovskite crystals for photovoltaic performance enhancement	Chemistry Letters 2018, 47, 1399-1401	有	2018/9/1
130	T. W. Kim, N. Shibayama, L. Cojocar, u, S. Uchida, T. Kondo, H. Segawa	東京大 学	Real-time in situ observation of microstructural change in organometal halide perovskite induced by thermal degradation	Advanced Functional Materials 2018, 28, 1804039	有	2018/9/2
131	A. K. Jena, A. Kulkarni, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Stabilization of α -CsPbI ₃ in ambient room temperature conditions by incorporating Eu into CsPbI ₃	Chemistry of Materials 2018, 30, 6668-6674.	有	2018/9/16
132	Z. Wang, M. A. Kamarudin, N. C. Huey, F. Yang, M. Pandey, G. Kapil, T. Ma, S. Hayase	九州工 業大 学、 東京大 学	Interfacial sulfur functionalization anchoring SnO ₂ and CH ₃ NH ₃ PbI ₃ for enhanced stability and trap passivation in perovskite solar cells	ChemSusChem 2018, 11, 3941-3948	有	2018/9/17
133	F. Yang, P. Zhang, M. A. Kamarudin, G. Kapil, T. Ma, S. Hayase	九州工 業大 学、 東京大 学	Addition effect of pyreneammonium iodide to methylammonium lead halide perovskite-2D/3D heterostructured perovskite with enhanced stability	Advanced Functional Materials 2018, 28, 1804856	有	2018/9/27
134	T. W. Kim, T. Matsushita, S. Uchida, T. Kondo,	東京大 学	Quantitative fraction analysis of coexisting phases in a polycrystalline CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite	Applied Physics Express 2018, 11, 101401	有	2018/10/1

	H. Segawa					
135	瀬川浩司、 中崎城太郎	東京大 学	有機金属ハライドペロブスカ イト太陽電池の現状と展望	電気ガラス 2018年10月号, 59, 13-19	無	2018/10/1
136	T. W. Kim, M. Kim, L. Cojocar, u, S. Uchida, H. Segawa	東京大 学	Direct observation of the tunneling phenomenon in organometal halide perovskite solar cells and its influence on hysteresis	ACS Energy Letters 2018, 3, 2743-2749	有	2018/10/16
137	A. K. Baranwal, H. Kanda, N. Shibayama, S. Ito	兵庫県 立大学	Fabrication of fully non- vacuum processed perovskite solar cells using an inorganic CuSCN hole- transporting material and carbon-back contact	Sustainable Energy and Fuels 2018, 2, 2778-2787	有	2018/10/23
138	T. S. Ripolles, D. Yamasuso, Y. Zhang, M. A. Kamarudin, C. Ding, D. Hirotsani, Q. Shen, S. Hayase	九州工 業大学	New tin(II) fluoride derivative as a precursor for enhancing the efficiency of inverted planar tin/lead perovskite solar cells	Journal of Physical Chemistry C 2018, 122, 27284-27291	有	2018/10/31
139	Shuzi Hayase	九州工 業大学	Perovskite solar cells with narrow band gap	Current Opinion in Electrochemistry 2018, 11, 146-150	有	2018/11/3
140	L. Cojocar, u, T. W. Kim, S. Uchida, H. Segawa	東京大 学	Robust PbI ₆ framework of organometal halide CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite observed by high resolution transmission electron microscopy	Chemistry Letters 2019, 48, 26-27	有	2018/11/13
141	Y. Numata, Y. Sanehira, R. Ishikawa, H. Shirai, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Thiocyanate containing two- dimensional cesium lead iodide perovskite, Cs ₂ PbI ₂ (SCN) ₂ : Characterization, photovoltaic application, and degradation mechanism	ACS Applied Materials and Interfaces 2018, 10, 42363-42371	有	2018/11/14
142	T. N. Murakami, N. Koumura	産業技 術総合 研究所	Development of next- generation organic-based solar cells: Studies on dye-sensitized and perovskite solar cells	Advanced Energy Materials 2018, 1802967	有	2018/11/23
143	A. Alberti, G. Mannino, I. Dreretzis, E. Smecca, S. Sanzaro, A. La Magna, Y. Numata, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Structural and optical behaviour of MAPbI ₃ layers in nitrogen and humid air	2018 IEEE 4th International Forum on Research and Technology for Society and Industry 2018, 1-5	有	2018/11/29

144	宮坂力	東京大学、桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池の進展	パリティ 2019, 34, 15-17	無	2018/12/1
145	若宮淳志	京都大学	高性能塗布型ペロブスカイト太陽電池のための材料化学	京都大学物性科学センター誌 33号, pp3-9	無	2018/12/1
146	宮坂力	東京大学、桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池とエネルギーハーベスティングへの応用	ケミカルエンジニアリング, 2018, 63, 7-13	無	2018
147	L. Cojocaru, S. Uchida	東京大学	Boundary Engineering of Counter Electrodes for Dye-sensitized and Perovskite Solar Cells	Counter Electrodes for Dye-sensitized and Perovskite Solar Cells, 2018, 511-519	有	2018
148	宮坂力	東京大学、桐蔭横浜大学	常識を超える太陽電池 ペロブスカイト型太陽電池	Building maintenance & management 2018, 201, 38-41	無	2018
149	T. Miyasaka	東京大学、桐蔭横浜大学	Spotlight on perovskite photovoltaics	Impact 2018, 11, 63-65	無	2018
150	別所毅隆	東京大学	カリウムドーパされた有機金属ハライドペロブスカイト半導体によるヒステリシスフリー太陽電池特性	太陽エネルギー 2019, 45(1), 21-26	無	2019/1
151	別所毅隆	東京大学	カリウムドーパ有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池による低材料コスト化と低ヒステリシス光電変換特性	日本写真学会誌 2019, 82(1), 49-53	無	2019/1
152	P. Zhang, F. Yang, G. Kapil, C. H. Ng, T. Ma, S. Hayase	九州工業大学、東京大学	Preparation of perovskite films under liquid nitrogen atmosphere for high efficiency perovskite solar cells	ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2019, 7, 3956-3961	有	2019/1/11
153	A. Koedtruad, M. Goto, M. Amano Patino, Z. Tan, H. Guo, T. Nakamura, T. Handa, W.-t. Chen, Y.-C. Chuang, H.-S. Sheu, T. Saito, D. Kan, Y. Kanemitsu, A. Wakamiya, Y. Shimakawa	京都大学	Structure-property relations in Ag-Bi-I compounds: potential Pb-free absorbers in solar cells	Journal of Materials Chemistry A 2019, 7, 5583-5588	有	2019/2/5
154	L. Yang, Y. Dall'Agnese,	東京大学、	SnO ₂ -Ti ₃ C ₂ MXene electron transport layers for	Journal of Materials Chemistry A 2019, 7,	有	2019/2/5

	K. Hanasirakul, C. E. Shuck, K. Maleski, M. Alhabeb, G. Chen, Y. Gao, Y. Sanehira, A. K. Jena, L. Shen, C. Dall'Agnesse, X.-F. Wang, Y. Gogotsi, T. Miyasaka	桐蔭横 浜大学	perovskite solar cells	5635-5642		
156	Z. Wang, M. A. Kamarudin, N. C. Huey, F. Yang, M. Pandey, G. Kapil, T. Ma, S. Hayase	九州工 業大 学、 東京大 学	Passivation of grain boundary by squaraine zwitterions for defect passivation and efficient perovskite solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2019, 11, 10012-10020	有	2019/2/18
157	Z. Wang, A. K. Baranwal, M. A. Kamarudin, C. H. Ng, M. Pandey, T. Ma, S. Hayase	九州工 業大 学	Xanthate-induced sulfur doped all-inorganic perovskite with superior phase stability and enhanced performance	Nano Energy 2019, 59, 258-267	有	2019/2/19
158	K. Kimura, Y. Nakamura, T. Matsushita, T. Kondo	東京大 学	Epitaxial $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ thin films on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ single crystal substrates formed by physical vapor deposition	Japanese Journal of Applied Physics 2019, 58, SBBF04	有	2019/2/22
159	M. A. Truong, J. Lee, T. Nakamura, J.-Y. Seo, M. Jung, M. Ozaki, A. Shimazaki, N. Shioya, T. Hasegawa, Y. Murata, S. M. Zakeeruddin, M. Gratzel, R. Murdey, A. Wakamiya	京都大 学	Influence of alkoxy chain length on the properties of two-dimensionally expanded azulene core-based hole- transporting materials for efficient perovskite solar cells	Chemistry A European Journal 2019, 25, 6741- 6752	有	2019/2/25
160	A. K. Jena, A. Kulkarni, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Halide perovskite photovoltaics: background, status, and future prospects	Chemical Reviews 2019, 119, 3036-3103	有	2019/3/1
161	W. Okada, T. Suga, K. Oyaizu,	東京大 学、 早稲田	Perovskite/ TiO_2 interface passivation using poly(vinylcarbazole) and	ACS Applied Energy Materials 2019, 2, 2848- 2853	有	2019/3/6

	H. Segawa, H. Nishide	大学	fullerene for the photovoltaic conversion efficiency of 21%			
162	T. Nakamura, N. Shioya, T. Shimoaka, R. Nishikubo, T. Hasegawa, A. Saeki, Y. Murata, R. Murdey, A. Wakamiya	京都大学	Molecular orientation change in naphthalene diimide thin films induced by removal of thermally cleavable substituents	Chemistry of Materials 2019, 31, 1729-1737	有	2019/3/12
163	A. Kulkarni, A. K. Jena, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学、 桐蔭横 浜大学	Performance enhancement of AgBi ₂ I ₇ solar cells by modulating a solvent-mediated adduct and tuning remnant BiI ₃ in one-step crystallization	Chemical Communications 2019, 55, 4031-4034	有	2019/3/14
164	N. Shibayama, H. Kanda, T. W. Kim, H. Segawa, S. Ito	兵庫県 立大学、 東京大 学	Design of BCP buffer layer for inverted perovskite solar cells using ideal factor	APL Materials 2019, 7, 031117	有	2019/3/27
165	T. Minemoto, Y. Kawano, T. Nishimura, J. Chantana	立命館 大学	Numerical reproduction of a perovskite solar cell by device simulation considering band gap grading	Optical Materials 2019, 92, 60-66	有	2019/4/13
166	M. Ozaki, A. Shimazaki, M. Jung, Y. Nakaike, N. Maruyama, S. Yakumaru, A. Imanah Rafieh, T. Sasamori, N. Tokitoh, P. Ekanayake, Y. Murata, R. Murdey, A. Wakamiya	京都大 学	A purified, solvent-intercalated precursor complex for wide process window fabrication of efficient perovskite solar cells and modules	Angewandte Chemie International Edition 2019, 58, 9389-9393	有	2019/4/29
167	F. Yang, J. Liu, X. Wang, K. Tanaka, K. Shinokita, Y. Miyauchi, A. Wakamiya, K. Matsuda	京都大 学	Planar perovskite solar cells with high efficiency and fill factor obtained using two-step growth process	ACS Applied Materials and Interfaces 2019, 11, 15680-15687	有	2019/5/1
168	R. Jono, H. Segawa	東京大 学	Theoretical study of the band-gap differences among lead triiodide perovskite materials: CsPbI ₃ , MAPbI ₃ , and FAPbI ₃	Chemistry Letters 2019, 48, 877-880	有	2019/5/31

169	T. Nakamura, N. Shioya, T. Hasegawa, Y. Murata, R. Murdey, A. Wakamiya	京都大 学	Phthalimide-based transparent electron- transport materials with oriented-amorphous structures: Preparation from solution-processed precursor films	ChemPlusChem 2019, 84, 1396-1404	有	2019/6/1
170	Y. Cho, H. Ohkita, Y. Li, J. Bing, J. Zheng, S. Huang, A. Ho-Baillie	京都大 学	The effect of 4-tert- butylpyridine removal on efficiency and thermal stability in perovskite solar cells	Journal of Photopolymer Science and Technology 2019, 32[5], 715-720	有	2019/6/24
171	M. Ozaki, Y. Ishikura, M. A. Truong, J. Liu, I. Okada, T. Tanabe, S. Sekimoto, T. Ohtsuki, Y. Murata, R. Murdey, A. Wakamiya	京都大 学	Iodine-rich mixed composition perovskites optimised for tin(IV) oxide transport layers: The influence of halide ion ratio, annealing time, and ambient air aging on solar cell performance	Journal of Materials Chemistry A 2019, 7, 16947-16953	有	2019/7/2
172	G. Kapil, T. Bessho, C. H. Ng, K. Hamada, M. Pandey, M. A. Kamarudin, D. Hirotoni, T. Kinoshita, T. Minemoto, Q. Shen, T. Toyoda, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	電気通 信大 学、 東京大 学、 産業技 術総合 研究 所、 立命館 大学	Strain relaxation and light management in tin-lead perovskite solar cells to achieve high efficiencies	ACS Energy Letters 2019, 4, 1991-1998	有	2019/7/17
173	宮坂力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の開 発史と光電変換素子への展開	ペロブスカイト太陽電池の 開発最前線(CMC)第1章	無	2019/7/31
174	瀬川浩司、 中崎城太郎	東京大 学	ペロブスカイト太陽電池の高 性能化と最新技術	ペロブスカイト太陽電池の 開発最前線(CMC)第2章	無	2019/7/31
175	近藤高志	東京大 学	ハロゲン化金属ペロブスカイ トの結晶工学	ペロブスカイト太陽電池の 開発最前線(CMC)第3章	無	2019/7/31
176	若宮淳志	京都大 学	高効率ペロブスカイト太陽電 池のための材料開発と塗布技 術	ペロブスカイト太陽電池の 開発最前線(CMC)第6章	無	2019/7/31
177	別所毅隆	東京大 学	カリウム添加有機金属ハライド ペロブスカイト半導体材料 開発とヒステリシスフリー太	ペロブスカイト太陽電池の 開発最前線(CMC)第7章	無	2019/7/31

			陽電池			
178	L. Cojocar, 内田 聡	東京大学	ペロブスカイト太陽電池のヒステリシスと性能評価技術	ペロブスカイト太陽電池の開発最前線(CMC)第14章	無	2019/7/31
179	T. W. Kim, S. Uchida, T. Kondo, H. Segawa	東京大学	Microstructural investigation of a compact TiO ₂ layer for improvement of perovskite solar cells	Applied Physics Letters 2019, 115, 053902	有	2019/8/2
180	Z. Wang, A. K. Baranwal, M. A. Kamarudin, C. H. Ng, M. Pandey, T. Ma, S. Hayase	電気通信大学	Structured crystallization for efficient all-inorganic perovskite solar cells with high phase stability	Journal of Materials Chemistry A 2019, 7, 20390-20397	有	2019/8/12
181	V. S. Murugesan, R. R. Michael, A. K. Jena, J.-W. Kang, N. H. Kim, H. Segawa, T. Miyasaka, J. H. Lee	東京大学、桐蔭横浜大学	Benzodithiophene-thienopyrroledione-thienothiophene-based random copolymeric hole transporting material for perovskite solar cell	Chemical Engineering Journal 2020, 382, 122830	有	2019/9/13
182	A. Kogo, T. Miyadera, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Tuning methylammonium iodide amount in organolead halide perovskite materials by post-treatment for high-efficiency solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2019, 11, 38683-38688	有	2019/9/25
183	M. Ozaki, Y. Nakaike, A. Shimazaki, M. Jung, N. Maruyama, S. Yakumar, A. Imanah Rafieh, P. Ekanayake, T. Saito, Y. Shimakawa, T. Sasamori, Y. Murata, R. Murdey, A. Wakamiya	京都大学	How to make dense and flat perovskite layers for >20% efficient solar cells: oriented, crystalline perovskite intermediates and their thermal conversion	Bulletin of the Chemical Society of Japan 2019, 92, 1972-1979	有	2019/10/2
184	Z. Wang, A. K. Baranwal, M. A. Kamarudin, P. Zhang, G. Kapil, T. Ma, S. Hayase	電気通信大学、東京大学	Delocalized molecule surface electronic modification for enhanced performance and high environmental stability of CsPbI ₂ Br perovskite solar cells	Nano Energy 2019, 66, 104180	有	2019/10/10
185	K. Suwa, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	東京大学、早稲田大学	Anti-oxidizing radical polymer-incorporated perovskite layers and their photovoltaic characteristics in solar	ChemSusChem 2019, 12, 5207-5212	有	2019/10/17

			cells			
186	C. Geffroy, E. Grana, M. Mumtaz, L. Cojocaru, E. Cloutet, C. Olivier, S. Uchida, T. Toupance, H. Segawa, G. Hadziioannou	東京大 学	Post-functionalization of polyvinylcarbazoles: An open route towards hole transporting materials for perovskite solar cells	Solar Energy 2019, 193, 878-884	有	2019/10/23
187	T. W. Kim, S. Uchida, T. Kondo, H. Segawa	東京大 学	Optimization of TiO ₂ compact layer formed by atomic layer deposition for efficient perovskite solar cells	Applied Physics Letters 2019, 115, 203902	有	2019/11/11
188	Y. Kawano, J. Chantana, T. Nishimura, T. Minemoto	立命館 大学	Influence of halogen content in mixed halide perovskite solar cells on cell performances through device simulation	Solar Energy Materials and Solar Cells 2020, 205, 110252	有	2019/11/12
189	A. Kogo, M. Chikamatsu	産業技 術総合 研究所	Electron band tuning of organolead halide perovskite materials by methylammonium and formamidinium halide post-treatment for high-efficiency solar cells	Chemical Communications 2019, 56, 1235	有	2019/12/18
190	X. He, T. Wu, X. Liu, Y. Wang, X. Meng, J. Wu, T. Noda, X. Yang, Y. Moritomo, H. Segawa, L. Han	東京大 学、 物質・ 材料研 究機構	Highly efficient tin perovskite solar cells achieved under wide oxygen concentration range	Journal of Materials Chemistry A 2020, 8, 2760-2768	有	2020/1/7
191	C. Geffroy, E. Grana, T. Bessho, S. Almosni, Z. Tang, A. Sharma, T. Kinoshita, F. Awai, E. Cloutet, T. Toupance, H. Segawa, G. Hadziioannou	東京大 学	p-Doping of a hole transport material via a poly(ionic liquid) for over 20% efficiency and hysteresis-free perovskite solar cells	ACS Applied Energy Materials 2020, 3, 1393-1401	有	2020/1/14
192	F. Yang, J. Liu, Z. Lu, P. Dai, T. Nakamura,	京都大 学	Recycled utilization of a nanoporous Au electrode for reduced fabrication cost of perovskite solar cells	Advanced Science 2020, 7, 1902474	有	2020/1/30

	S. Wang, L. Chen, A. Wakamiya, K. Matsuda					
193	Y. Nishihara, N. Onozawa- Komatsuzaki, H. Tachibana, M. Chikamatsu, Y. Yoshida	産業技 術総合 研究所	Influence of p-type doping on perovskite solar cells fabricated with dithiophene-benzene copolymer as the hole transporting layer	Japanese Journal of Applied Physics 2020, 59, SGGF08	有	2020/2/28

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Hiroshi Segawa	東京 大学	Hybrid solar cells for next generation photovoltaics	PVTC(Photovoltaic Technical Conference) - from advanced materials and processes to innovative applications (Aix-en-Provence, France)	2015/5/27
2	Takumi Kinoshita	東京 大学	Wideband ruthenium sensitizers for multi- junction photovoltaics using lead halide perovskite solar cells	SNCPP15 (11th International Workshop on Supramolecular Nanoscience of Chemically Programmed Pigments) (Kusatsu, Shiga)	2015/5/30
3	西中浩二、宮田陽平、 Teresa Ripolles. S、 尾込裕平、沈青、 吉野賢二、 Shyam. S. Pandey、 馬廷麗、豊田太郎、 早瀬修二	九州 工業 大学	CsPbI ₃ を用いたペロブスカ イト太陽電池	第 52 回化学関連支部合同九 州大会（北九州）	2015/6/27
4	森谷昌平、濱園康司、 藤川直耕、尾込裕平、 沈青、吉野賢二、 豊田太郎、早瀬修二	九州 工業 大学	一括塗布による自己組織化 中間層を形成したペロブス カイト太陽電池	第 52 回化学関連支部合同九 州大会（北九州）	2015/6/27
5	宮田陽平、西中浩二、 尾込裕平、 Teresa S. Ripolles、 早瀬修二	九州 工業 大学	CsPbI ₃ ペロブスカイト太陽 電池のヒステリシスの起源 に関する考察	第 52 回化学関連支部合同九 州大会（北九州）	2015/6/27
6	瀬川浩司	東京 大学	高効率有機系多接合太陽電 池	第 11 回有機太陽電池シンポ ジウム（京都大学・宇治）	2015/7/17
7	宮寺哲彦	産業 技術 総合 研究 所	有機薄膜太陽電池・ペロブ スカイト太陽電池の結晶成 長制御	第 11 回有機太陽電池シンポ ジウム（京都大学・宇治）	2015/7/17
8	早瀬修二	九州 工業 大学	二元 SnPb 太陽電池の性能 向上に向けて	第 11 回有機太陽電池シンポ ジウム（京都大学・宇治）	2015/7/17
9	若宮淳志	京都 大学	高効率ペロブスカイト太陽 電池への挑戦	豊田工業大学研究懇話会（豊 田工業大学）	2015/7/30
10	Hiroshi Segawa	東京 大学	Hybrid solar cells for next generation photovoltaics	IUPAC2015- 45th World Chemistry Congress (Busan, Korea)	2015/8/10

11	Shuzi Hayase	九州工業大学	Sn/Pb binary perovskite solar cells with IR sensitivity and architecture of charge injection interfaces	IUPAC2015- 45th World Chemistry Congress (Busan, Korea)	2015/8/10
12	M. Kawaraya, T. Miyasaka, H. Segawa	東京大学 桐蔭横浜大学 御国色素	Characteristics of TiO ₂ nano particles and pastes for new solar cell	IUPAC2015- 45th World Chemistry Congress (Busan, Korea)	2015/8/11
13	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト系太陽電池：高効率化にむけた取り組み	日本学術振興会「先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会」2015年度第2回研究会 ハイスループット材料分科会研究会 合同研究会「ハライドペロブスカイト材料の基礎とスーパー太陽電池開発戦略」(東京大学)	2015/8/20
14	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池への挑戦	近大若手シンポジウム-光と化学のフロンティア-(近畿大)	2015/9/3
15	Hiroshi Segawa	東京大学	Organic and hybrid solar cells for next generation photovoltaics	EAS7 (7th East Asia Symposium on Functional Dyes and Advanced Materials) (Sakai, Osaka)	2015/9/4
16	A. Wakamiya, H. Nishimura, M. Endo, Y. Murata	京都大学	Printable solar cells: Recent progress on perovskite solar cells	EAS7 (Sakai, Osaka)	2015/9/4
17	Shuzi Hayase	九州工業大学	Crystalline defect and interface structure for Sn/Pb binary perovskite solar cells	KJF2015 (Jeju, Korea)	2015/9/7
18	和田雄二	東京工業大学	Control of photoinduced electron transfer by highly-ordered nanostructure	2015年光化学討論会シンポジウム「太陽光エネルギーと触媒が織りなす物質変換のための人工光合成」(大阪市大)	2015/9/9
19	木下卓巳、内田 聡、Graetzel Michael、瀬川浩司	東京大学	有機ハライド鉛ペロブスカイトセルと広帯域金属錯体色素を用いた高効率ハイブリッド多接合太陽電池	2015年光化学討論会(大阪市大) 3B10	2015/9/11
20	レポレス サンチス テレサ、西中浩二、尾込裕平、宮田陽平、早瀬修二	九州工業大学	Absorber crystallinity and nature of the charge extraction electrode play an important role on amine free-lead perovskite solar cells.	2015年電気化学秋季大会(埼玉工大) 2F07	2015/9/12
21	古郷敦史、實平義隆、池上和志、宮坂力	東京大学 桐蔭横浜大学	ブルッカイト酸化チタンを用いた低温プロセスペロブスカイト太陽電池	2015年電気化学秋季大会(埼玉工大) 2F09	2015/9/12
22	陳 信偉、Jena Ajay、池上和志、宮坂力	東京大学 桐蔭横浜	ペロブスカイト太陽電池構造を用いる超高感度光検出素子の創製	2015年電気化学秋季大会(埼玉工大) 2F10	2015/9/12

		大学			
23	内田 聡、Cojocar Ludmila、久保貴哉、 瀬川浩司	東京 大学	ペロブスカイト太陽電池の 結晶化学と界面エンジニア リング	2015年電気化学秋季大会 (埼玉工大) 2F11	2015/9/12
24	内田 聡、Cojocar Ludmila、中崎城太郎、 久保貴哉、瀬川浩司	東京 大学	High efficiency planar $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ based solar cells with determined amount of chloride ion	2015年電気化学秋季大会 (埼玉工大) 2F12	2015/9/12
25	大賀 光、尾込裕平、 早瀬修二、佐伯昭紀	九州 工業 大学	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{I}_3$ ペロブスカ イトの局所電荷キャリア移 動度	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 13p-PB9- 22	2015/9/13
26	西村昭美、村崎賢太郎、 Gururaj Shivashimpi、 藤川直耕、田中宏典、 尾込祐平、吉野賢二、 早瀬修二	九州 工業 大学	フルオレン構造を有するP 型半導体を用いたペロブス カイト太陽電池	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14a-1G-1	2015/9/14
27	T. Ripolles, K. Nishinaka, Y. Ogomi, Y. Miyata, S. Hayase	九州 工業 大学	High-efficient cesium perovskite solar cells influenced by alterations in current- voltage hysteresis	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14a-1G-4	2015/9/14
28	瀬川浩司	東京 大学	次世代低コスト光電変換素 子としてのペロブスカイト 太陽電池	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14a-1G-9	2015/9/14
29	近藤高志、江馬一弘	東京 大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイ ト型半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ の電 子状態と励起子	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14a-1G- 10	2015/9/14
30	早瀬修二	九州 工業 大学	赤外光電変換ペロブスカイ ト太陽電池の効率向上につ いて	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14a-1G- 11	2015/9/14
31	宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	有機無機ペロブスカイトを 用いる高効率光電変換と高 感度光センシング	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14p-1G-1	2015/9/14
32	内田 聡、コジョカル ルドミラ、久保貴哉、 瀬川浩司	東京 大学	ペロブスカイト太陽電池の 結晶化学と界面エンジニア リング	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14p-1G-3	2015/9/14
33	佐野惇郎、中村唯我、 松下智紀、近藤高志	東京 大学	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ ヘテ ロ積層真空蒸着膜の自発的 混晶化	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14p-1G-6	2015/9/14
34	L. Cojocar, S. Uchida, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京 大学	High efficiency planar $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ based solar cells with determined amount of chloride ion	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14p-1G-8	2015/9/14
35	實平義隆、沼田陽平、 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	二次元ペロブスカイト結晶 の配向性制御に向けた十面 体酸化チタン膜の構造制御 と太陽電池特性	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14p-1G-9	2015/9/14
36	沼田陽平、實平義隆、 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜	FAPbI ₃ ペロブスカイト太陽 電池の光電変換特性におけ るメソポーラス層のナノ粒 子サイズ効果	第76回応用物理学会秋季学 術講演会(名古屋) 14p-1G- 10	2015/9/14

		大学			
37	尾込裕平、廣谷太佑、渡部直弥、戸野本久朗、沈 青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	有機スズ錯体を使用したペロブスカイト太陽電池	第76回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋) 15a-1F-3	2015/9/15
38	宮寺哲彦、杉田武、近松真之	産業技術総合研究所	レーザ蒸着法による有機鉛ペロブスカイトの製膜制御	第76回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋) 15a-1F-4	2015/9/15
39	清田祐貴、宇田川洋祐、中村唯我、佐野惇郎、松下智紀、櫻田英之、竹岡裕子、近藤高志、江馬一弘	東京大学	有機無機ペロブスカイト化合物の励起子物性	日本物理学会 2015年秋季大会(関西大学・千里山) 18pPSA-32	2015/9/18
40	Y. Kiyota, Y. Udagawa, H. Kunuigta, Y. Takeoka, Y. Nakamura, T. Matsushita, T. Kondo, T. Miyasaka, K. Ema	東京大学 桐蔭横浜大学	Excitonic properties and carrier dynamics of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ single crystals	PSCO 2015 (International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics) (Lausanne, Switzerland)	2015/9/27
41	Shuzi Hayase	九州工業大学	Crystalline defect and interface structure for Sn/Pb binary perovskite solar cells	PSCO 2015 (Lausanne, Switzerland)	2015/9/29
42	S. Uchida, L. Cojocar, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Temperature effects on the photovoltaic performance of planar structure perovskite solar cells	PSCO 2015 (Lausanne, Switzerland)	2015/9/29
43	A. K. Jena, A. Kulkarni, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Is hysteresis a practical problem for the power output of perovskite solar cells?	PSCO 2015 (Lausanne, Switzerland)	2015/9/29
44	Y. Nakamura, J. Sano, T. Matsushita, Y. Kiyota, Y. Udagawa, H. Kunugita, K. Ema, T. Kondo	東京大学	Exciton and bandgap energies of hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	SSDM 2015 (International Conference on Solid State Devices and Materials) (Sapporo) PS-15-1	2015/9/29
45	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池：高効率化を目指した材料開発	有機太陽電池研究コンソーシアム 第15回 定例研究会/第3回プリンテッド・エレクトロニクス研究会 (PE研究会) (大阪大学)	2015/10/7
46	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト型太陽電池-課題と展望-	第40回高分子同友会総合講演会(化学会館ホール)	2015/10/22
47	若宮淳志	京都大学	有機無機ハイブリッド型太陽電池 -合成化学からのアプローチ-	第47回有機合成セミナー (大阪市立工業研究所)	2015/10/28
48	若宮淳志	京都大学	新型プリンタブル太陽電池：ペロブスカイト太陽電池の研究最前線	京都グリーンケミカル・ネットワーク～先進的創電システム～(京都市成長産業創造センター)	2015/10/29

49	S. Uchida, L. Cojocaru, T. Kubo, H. Segawa	東京 大学	Perovskite solar cell research	4th NextPV International Workshop (東京・駒場)	2015/11/9
50	Hiroshi Segawa	東京 大学	Organic and hybrid solar cells for next generation photovoltaics	IASSF (Inter-academy Seoul Science Forum) 2015 (Seoul, Korea)	2015/11/11
51	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide engineering for high performance lead halide perovskite solar cells and optoelectronic devices	ACTSEA 2015 (Advanced Ceramics and Technologies for Sustainable Energy Applications toward a Low Carbon Society) (NCKU, Taiwan)	2015/11/11
52	Shuzi Hayase	九州 工業 大学	Crystalline defect and interfacial structure for Sn/Pb binary perovskite solar cells	PVSEC-25 (International Photovoltaic Science and Engineering Conference) (Busan, Korea) PRV-I-02	2015/11/16
53	T. Nishina, S. Kanaya, G. Mizuta, H. Kanda, H. Nishino, S. Ito	兵庫 県立 大学	Perovskite solar cells using NiO inorganic hole-conductor material fabricated by spin- coating method	PVSEC-25 (Busan, Korea) PRV-P-07	2015/11/17
54	S. Fukumoto, S. Kanaya, G. Mizuta, H. Kanda, H. Nishino, S. Ito	兵庫 県立 大学	Sandwich-structured CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite solar cells using NiO and TiO ₂ electrodes	PVSEC-25 (Busan, Korea) PRV-P-09	2015/11/17
55	M. Maitani, A. Tateyama, Y. Wada	東京 工業 大学	Effects of crystalline facet of oxide scaffold on CH ₃ NH ₃ PbI ₃ in perovskite solar cells	PVSEC-25 (Busan, Korea) PRV-O-12	2015/11/20
56	宮寺哲彦	産業 技術 総合 研究所	有機鉛ペロブスカイト太陽 電池の共蒸着制御	学振 175 委員会「次世代の太 陽光発電システム」有機系太 陽電池分科会・第三回研究会 (九工大)	2015/11/27
57	若宮淳志	京都 大学	ペロブスカイト薄膜材料	日本学術振興会第 161 委員会 第 93 回研究会「太陽電池用 材料と結晶成長技術の新展 開」(名城大学 名駅サテラ イト)	2015/11/27
58	内田 聡	東京 大学	ペロブスカイト太陽電池の 結晶化学と界面エンジニア リング	2015 年電気化学会関東支部 セミナー「ペロブスカイト型 太陽電池の最新技術と開発動 向」(東京)	2015/12/3
59	近藤高志	東京 大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイ ト型半導体の基礎物性	2015 年電気化学会関東支部 セミナー「ペロブスカイト型 太陽電池の最新技術と開発動 向」(東京)	2015/12/3
60	若宮淳志	京都 大学	高性能化に向けた新規材料 開発と構造解析	2015 年電気化学会関東支部 セミナー「ペロブスカイト型 太陽電池の最新技術と開発動 向」(東京)	2015/12/3
61	Satoshi Uchida	東京 大学	Perovskite solar cell - crystal structure and interface architecture	Organic/dye- sensitized/perovskite solar cell workshop 2015 (Xi'an, China)	2015/12/5
62	Shuzi Hayase	九州	Sn Perovskite	Pacificchem2015 (Hawaii,	2015/12/17

		工業 大学	photoconversion devices with infrared sensitivity	USA) 1208	
63	A. Jena, A. Kulkarni, A. Kogo, Y. Numata, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Is hysteresis truly a problem for perovskite solar cells?	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1231	2015/12/17
64	Y. Wada, E. Suzuki, M. Maitani, D. Mochizuki	東京 工業 大学	Microwave special effects observed for interfaces	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 847	2015/12/18
65	A. Wakamiya, H. Nishimura, N. Maruyama, A. Shimazaki, Y. Nakaïke, M. Endo, T. Aharen, Y. Murata	京都 大学	Toward efficient perovskite solar cells: Development of new charge-transporting materials and surface treatment of lead halide perovskite layer	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1825	2015/12/18
66	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Organo lead halide perovskite for high efficiency solar cells and optoelectronic devices	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1827	2015/12/18
67	L. Cojocar, S. Uchida, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京 大学	Investigation of surface treatment for stable and efficient planar heterojunction perovskite solar cells	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1829	2015/12/18
68	Shuzi Hayase	九州 工業 大学	Perovskite solar cells with IR photoelectric conversion (Printable solar cells)	IEMEJGB (India-Japan Expert Group Meeting on Biomolecular Electronics & Organic Nanotechnology for Environment Preservation) (Kitakyushu)	2015/12/23
69	Shuzi Hayase	九州 工業 大学	Sn-based perovskite solar cells (Printable solar cells)	EMN (Energy Materials and Nanotechnology) (Hong Kong)	2015/1/18
70	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide management in high performance photovoltaics and optoelectronics of hybrid perovskite devices	ISFM2016 (International Symposium on Functional Materials) (Okinawa Institute of Science and Technology (OIST))	2016/1/26
71	近松真之、カザウイサイ、 村上拓郎、 宮寺哲彦、小野澤伸子	産業 技術 総合 研究所	有機-無機ハイブリッド太 陽電池の開発	未来 ICT シンポジウム 2016 (東京ビックサイト)	2016/1/27
72	S. Uchida, L. Cojocar, T. Kubo, H. Segawa	東京 大学	Perovskite solar cells - crystal structure and interface architecture	12th Workshop on the Future Direction of Photovoltaics (Tokyo Tech Front)	2016/1/28
73	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Present status and future prospects in perovskite solar cells	12th Workshop on the Future Direction of Photovoltaics (Tokyo Tech Front)	2016/1/28

74	Shuzi Hayase	九州工業大学	Perovskite solar cells - Enhancement of efficiency from the viewpoint of new perovskite materials and interface architecture	12th Workshop on the Future Direction of Photovoltaics (Tokyo Tech Front)	2016/1/28
75	若宮淳志	京都大学	塗って作製できる新型太陽電池～ペロブスカイト太陽電池の開発最前線～	第9回日本電磁波エネルギー応用学会研究会（産総研 臨海副都心センター別館）	2016/1/29
76	若宮淳志	京都大学	有機合成の視点から挑むペロブスカイト型太陽電池の高効率化	有機合成のニュートレンド2016（大阪科学技術センター）	2016/2/3
77	早瀬修二	九州工業大学	ハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の現状、問題点、および将来性について	CREST「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域（豊田工大）	2016/2/4
78	若宮淳志	京都大学	次世代低コスト太陽電池：ペロブスカイト太陽電池研究の最前線	第8回太陽エネルギー利用関連技術分科会（三重県工業研究所）	2016/2/23
79	宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の最新動向と将来展望	PV Expo 専門技術セミナー（東京）	2016/3/3
80	内田 聡	東京大学	高効率ペロブスカイト太陽電池が切り拓く薄膜エレクトロニクス	PV Expo 専門技術セミナー（東京）	2016/3/3
81	Shuzi Hayase	九州工業大学	Sn based perovskite solar cells - Interface architecture and Sn/Pb binary perovskite	ABX PV (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Barcelona, Spain)	2016/3/3
82	Satoshi Uchida	東京大学	The origin of hysteresis in I-V curve for planar structure perovskite solar cells rationalized with surface boundary induced capacitance model	ABX PV (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Barcelona, Spain)	2016/3/4
83	瀬川浩司	東京大学	進化する有機無機ハイブリッド太陽電池	近畿化学協会 機能性色素部会/エレクトロニクス部会 合同 公開講演会「有機エレクトロニクスの最前線」（大阪・千里）	2016/3/7
84	Tetsuhiko Miyadera	産業技術総合研究所	Co-evaporation control of organolead halide perovskite solar cells	Energy Materials Nanotechnology Spring Meeting 2016 (Taipei, Taiwan)	2016/3/8
85	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向	第7回薄膜太陽電池セミナー（山形大学工学部）	2016/3/15
86	T. Singh, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜大学	Effect of non-halide lead precursors on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite for photovoltaic applications	第63回応用物理学会春季学術講演会（東工大）19a-S224-9	2016/3/19

87	若宮淳志、西村秀隆、 中池由美、嶋崎 愛、 村田靖次郎	京都 大学	ペロブスカイト太陽電池高 効率化のための材料開発	第 63 回応用物理学会春季学 術講演会 化合物薄膜太陽電 池の高効率化の技術の現在と 未来 (東工大) 19p-W541-14	2016/3/19
88	古郷敦史、實平義隆、 池上和志、宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	低温製膜 SnO _x -Brookite TiO ₂ 電子収集層を用いたフ レキシブルペロブスカイト 太陽電池	第 63 回応用物理学会春季学 術講演会 (東工大) 20a- W531-3	2016/3/20
89	實平義隆、沼田陽平、 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	結晶配向性を制御した酸化 チタン膜上における二次元 ペロブスカイト結晶の太陽 電池特性	第 63 回応用物理学会春季学 術講演会 (東工大) 21a- W531-1	2016/3/21
90	沼田陽平、實平義隆、 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	チオシアネートを有する 2 次元擬ペロブスカイトを用 いたペロブスカイト太陽電 池に関する研究	第 63 回応用物理学会春季学 術講演会 (東工大) 21a- W531-2	2016/3/21
91	尾込裕平、沈 青、 吉野賢二、豊田太郎、 早瀬修二	九州 工業 大学	有機スズ化合物を使用した ペロブスカイト太陽電池の 特性向上	第 63 回応用物理学会春季学 術講演会 (東工大) 22a- W531-6	2016/3/22
92	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyonagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州 工業 大学	Material characterization of lead free air stable Cs ₂ SnI ₆ and its quantum dot for perovskite solar cells	第 63 回応用物理学会春季学 術講演会 (東工大) 22a- W531-11	2016/3/22
93	沈 青, Ripolles Teresa, 尾込裕平, 西中浩二, 出石拓也, 片山建二, 豊田太郎, 吉野賢二, 早瀬修二	九州 工業 大学	ペロブスカイト CsPbI ₃ の遅 いホットキャリア緩和と P3HT への高速ホール移動	第 63 回応用物理学会春季学 術講演会 (東工大) 22p- W531-2	2016/3/22
94	米谷真人、堅山 瑛人、 大村 葵、椿 俊太郎、 鈴木榮一、瀬川浩司、 和田雄二	東京 工業 大学	有機-無機ハイブリッドペ ロブスカイト太陽電池の Scaffold 酸化物の結晶面 効果	第 63 回応用物理学会春季学 術講演会 (東工大) 22p- W531-6	2016/3/22
95	内田 聡	東京 大学	高キャパシタンス太陽電池 の計測評価	RATO「有機系太陽電池の高度 利用に向けた評価・標準化ワ ークショップ」(東京)	2016/3/23
96	瀬川浩司	東京 大学	次世代エネルギー供給デバ イスとしての光発電素子	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大・京田辺) ATP 基 調講演 1J4-26	2016/3/24
97	宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	ヒステリシスのない高性能 ペロブスカイト太陽電池の 開発に向けて	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 1J4- 31	2016/3/24
98	T. Ripolles, K. Hamada, Y. Ogomi, Q. Shen, S. Hayase	九州 工業 大学	Opto-electronic considerations for high performance cesium lead halide perovskite solar cells	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 1D2- 42	2016/3/24
99	Y. Ogomi, Q. Shen, S. Iikubo, K. Yoshino, S. Hayase	九州 工業 大学	Crystal growth control of near-infrared perovskite solar cells consisting of tin halide complex	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 1PC- 007	2016/3/24

100	宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	太陽電池の新潮流、有機無機ハライドペロブスカイト	日本化学会第96春季年会 (同志社大学・京田辺) 2S7-04	2016/3/25
101	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池：中間体の構造解明と新規有機半導体材料開発	日本化学会第96春季年会 (同志社大学・京田辺) 2J4-04	2016/3/25
102	尾込祐平, 早瀬修二	九州工業大学	Sn系ペロブスカイト太陽電池の現状と今後の展開	日本化学会第96春季年会 (同志社大学・京田辺) 2J4-07	2016/3/25
103	木下卓巳、内田 聡、 瀬川浩司	東京大学	広帯域色素増感太陽電池とペロブスカイトセルを用いた分光型タンデムセルの開発	日本化学会第96春季年会 (同志社大学・京田辺) 2A3-48	2016/3/25
104	小野澤伸子、船木敬、 カザウイサイ、 村上拓郎、佐山和弘	産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池ホール輸送層への新規コバルト錯体の添加効果	日本化学会第96春季年会 (同志社大学・京田辺) 2PC-014	2016/3/25
105	豎山瑛人、米谷真人、 大村 葵、椿 俊太郎、 MULMUDI Kumar Hemant、 BOIX P. Pablo、 MATHEWS Nripan、 和田雄二	東京工業大学	有機-無機ハイブリッドペロブスカイト太陽電池特性への酸化チタン結晶面の効果	日本化学会第96春季年会 (同志社大学・京田辺) 3A3-29	2016/3/26
106	大村 葵、豎山瑛人、 椿 俊太郎、米谷真人、 瀬川浩司、和田雄二	東京工業大学	有機-無機ハイブリッドペロブスカイト太陽電池の異形状 Scaffold の適用とモルフォロジ効果	日本化学会第96春季年会 (同志社大学・京田辺) 3A3-30	2016/3/26
107	T. Singh, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Lead acetate based perovskite hybrid solar cells with very low hysteresis and high efficiency	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/29
108	豎山瑛人、米谷真人、 大村葵、椿俊太郎、 Mulumudi Hemant Kumar、 Pablo P. Boix、 Nripan Mathews、 和田雄二	東京工業大学	酸化チタン結晶面の特性を利用したペロブスカイト太陽電池の界面制御	電気化学会第83回大会(大阪大学・吹田) 2J04	2016/3/30
109	ピンピタック ピラタット、 陳 信偉、 池上 和志、宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	低温製膜 SnO _x 緻密層を用いる FA/MA 混合ペロブスカイト太陽電池の高性能化	電気化学会第83回大会(大阪大学・吹田) 2J09	2016/3/30
110	チャウダリ ブミカ、クルカニ アシシ、 ジェナ アジェイ、池上 和志、 宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Incorporation of interfacial modifiers to boost the performance and stability of perovskite solar cell	電気化学会第83回大会(大阪大学・吹田) 2J10	2016/3/30
111	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide management for low-cost and durable lead halide perovskite solar cells	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30

112	A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Low-temperature processed brookite TiO ₂ electron collector for hysteresis-less and high efficiency flexible perovskite solar cells	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
113	A. Jena, H.-W. Chen, A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Reversible and irreversible performance degradation in perovskite solar cells	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
114	T. Singh, T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Lead free (CH ₃ NH ₃) ₃ Bi ₂ I ₉ perovskite for optoelectronic applications	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
115	A. Kulkarni, A. Jena, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Role of thin MgO layer in suppressing interfacial recombination loss at FTO- TiO ₂ interface in perovskite solar cells	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
116	瀬川浩司	東京 大学	ハイブリッド太陽電池開発 の新展開	電気化学会第83回大会(大 阪大学・吹田)特3J10	2016/3/31
117	S. Uchida, L. Cojocar, V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京 大学	The origin of hysteresis in I-V curve for planar structure perovskite solar cells with surface boundary induced capacitance model	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/31
118	M. Maitani, H. Segawa, Y. Wada	東京 大学 東京 工業 大学	Facet effect of titania nanoparticles on interfacial electron transfer and applications to printable solar cells	26th IUPAC Symposium on Photochemistry (大阪)	2016/4/5
119	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Materials design for highly efficient perovskite solar cells	福井謙一センター講演会(京 都大学)	2016/4/13
120	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Recent progresses in hybrid perovskite devices in photovoltaics and optoelectronics	New Trends in Solar Cells 2016 (Bratislava, Slovak)	2016/4/19
121	Satoshi Uchida	東京 大学	Origin of the hysteresis in I-V curve for planar structure perovskite solar cells rationalized with a surface boundary induced capacitance model	New Trends in Solar Cells 2016 (Bratislava, Slovak)	2016/4/19
122	瀬川浩司	東京 大学	有機金属ハライドペロブス カイト太陽電池の現状と展 望	高分子同友会「環境及びエネ ルギーに関する最新の技術及 び市場を勉強する会」(東 京)	2016/4/19

123	Tetsuhiko Miyadera	産業技術総合研究所	Development of coevaporation technique for the organic solar cells	Energy Materials Nanotechnology East Meeting (Beijing, China)	2016/4/1
124	若宮淳志	京都大学	化学の視点で挑む「ペロブスカイト太陽電池の高効率化」	第 263 回分子工学コロキウム (京都大学)	2016/5/13
125	L. Cojocar, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	One solar cell with two efficiencies with hysteresis for planar CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
126	内田聡、コジョカルルドミラ、久保貴哉、瀬川浩司	東京大学	高キャパシタンス・ペロブスカイト太陽電池の計測評価と界面エンジニアリング	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
127	松下智紀、紺野晃央、佐野惇郎、中村唯我、近藤高志	東京大学	太陽電池応用に向けた真空共蒸着法を用いたホルムアミニウムヨウ化鉛多結晶薄膜の作製	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
128	瓦家正英、八幡直人、別所毅隆、瀬川浩司	東京大学御国色素	気相合成金属酸化物から作製したペロブスカイト太陽電池の特性	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
129	村上拓郎、船木敬、Ludmila Cojocar, 宮寺哲彦、Kazaoui Said、近松真之、瀬川浩司	東京大学産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池のチタニア伝導帯準位制御による性能向上	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
130	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyanagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Material characterization of lead free air stable Cs ₂ SnI ₆ for perovskite solar cells	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
131	尾込祐平、Teresa Ripolles、廣谷太佑、森谷昌平、沈青、豊田太郎、吉野賢二、早瀬修二	九州工業大学	ペロブスカイト太陽電池の高性能化と界面構築	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
132	堅山瑛人、米谷真人、和田雄二	東京工業大学	酸化物結晶面制御によるペロブスカイト太陽電池の界面制御技術	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
133	M. Sugimoto, W. -W. Wang, J. -S. Dang	熊本大学	First-principles study on metal halide perovskite-graphene hybrids	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
134	瀬川浩司	東京大学	進化するペロブスカイト太陽電池—現状と課題	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/20
135	若宮淳志、嶋崎愛、中池由美、RAFIEH, Alwani、JUNG, Mina、丸山直輝、阿波連知子、	京都大学	ペロブスカイト太陽電池：溶液法における中間体の構造・物性解明と高光電変換効率セルの作製法開発	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/20

	村田靖次郎				
136	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Low temperature printing process for metal oxide-based high performance perovskite solar cells	SISF 2016 (5th Sungkyun International Solar Forum 2016) (Seoul, Korea)	2016/5/25
137	Shuzi Hayase	九州工業大学	Interface architecture between TiO ₂ /perovskite, perovskite/hole transport layer, and perovskite grain boundary	SISF 2016 (5th Sungkyun International Solar Forum 2016) (Seoul, Korea)	2016/5/25
138	近松真之	産業技術総合研究所	有機薄膜およびペロブスカイト太陽電池の開発動向	e-テキスタイル製品開発研究会 2016 年度第 1 回例会 (福井県工業技術センター)	2016/5/26
139	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid solar cells for next generation photovoltaics	SISF 2016 (5th Sungkyun International Solar Forum 2016) (Seoul, Korea)	2016/5/27
140	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Recent progresses in solution-processed perovskite solar cells and optoelectronic devices	32nd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (大宮)	2016/6/2
141	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池の成膜法	薄膜工学セミナー	2016/6/3
142	Y. Ogomi, D. Hirotsu, K. Fujiwara, K. Sakaguchi, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, A. Wakamiya, T. S. Ripolles, S. Hayase	九州工業大学	Near IR sensitive Sn based perovskite solar cells with high current density reaching 30 mA/cm ²	2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (Oregon, USA)	2016/6/5
143	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid photovoltaics based on nano-structured organic solar cells	Nature Conference on Materials for Energy 2016 (Wuhan, China)	2016/6/12
144	瀬川浩司	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の最新技術開発動向	TSC Foresight セミナー (東京)	2016/6/27
145	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Performance and durability of metal oxide and polymer-based organo lead halide perovskite solar cells	HOPV16 (International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics) (Swansea, UK)	2016/6/29
146	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Computational simulation of the I-V curves for different architecture perovskite solar cells	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/6/29
147	S. Kazaoui, Z. Wang, N. Onozawa- Komatsuzaki, T. Funaki, Y. Nishihara	産業技術総合研究所	Stability under continuous illumination and bias of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ -based solar cells consisting of various types of ETL and HTL layers	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/6/29

148	Shuzi Hayase	九州工業大学	Interface architecture between TiO ₂ /perovskite, perovskite/hole transport layer, and perovskite grain boundary for MAPbI ₃ , MASnPbI ₃ and CsPbI ₃ solar cells	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/6/28
149	瀬川浩司	東京大学	未来の社会を彩る再生可能エネルギー技術の挑戦	RE2016 (再生可能エネルギー国際会議) (横浜)	2016/6/29
150	M. Maitani, H. Segawa, Y. Wada	東京大学 東京工業大学	Interface effects of titania meso-scaffold on carrier transport in perovskite solar cells	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/6/30
151	Satoshi Uchida	東京大学	Perovskite solar cells - crystal structure and interface architecture	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/7/1
152	與那覇 歩、西山翼、尾込裕平、沈青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	逆構造ペロブスカイト太陽電池のNiO緻密層に関する研究	第53回化学関連支部合同九州大会 (北九州)	2016/7/2
153	戸野本久朗、與那覇歩、尾込裕平、沈青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	Sn/Pb ペロブスカイト太陽電池の改善	第53回化学関連支部合同九州大会 (北九州)	2016/7/2
154	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池開発	JACI エネルギー・資源技術部会 エネルギー分科会・現地分科会 京都大学化学研究所	2016/7/2
155	近松真之	産業技術総合研究所	ペロブスカイトおよび有機薄膜太陽電池の開発	産学官連携ワークショップ (琉球大学)	2016/7/5
156	近藤高志	東京大学	ハロゲン化金属ペロブスカイト型半導体と太陽電池応用	AM-FPD16 (23rd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices) (京都)	2016/7/6
157	Atsushi Wakamiya	京都大学	Recent progress on perovskite solar cells and our materials science	AM-FPD16 (京都)	2016/7/6
158	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tambo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Laser deposition for the controlled co-deposition of organolead halide perovskite	AM-FPD16 (京都)	2016/7/1
159	T. A. Nirmal Peilis, G. Mizuta, H. Kanda, T. Nishina, S. Ito, H. Segawa	兵庫県立大学	Fully printable mesoscopic perovskite solar cells; effect of NiO layer on the device performance	AM-FPD16 (京都)	2016/7/7
160	V. Murugan, Y. Ogomi, S. S. Pandey, T. Toyoda, Q. Shen,	九州工業大学	Selection of suitable chloride precursor for bigger crystal growth	IUMRS-ICEM2016 (International Union of Materials Research)	2016/7/4

	S. Hayase		and reduced defects in lead halide perovskites	Societies - International Conference on Electronic Materials) (Singapore)	
161	近松真之	産業技術総合研究所	有機薄膜およびペロブスカイト太陽電池の研究開発動向	おかもやま次世代産業関連技術研究会第1回技術セミナー (岡山ロイヤルホテル)	2016/7/7
162	瀬川浩司	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の実用化最新動向	光機能材料研究会第60回講演会「ペロブスカイト太陽電池の研究開発・実用化最新動向」(東京理科大)	2016/7/19
163	近藤高志	東京大学	ペロブスカイト型半導体の基礎物性	光機能材料研究会第60回講演会「ペロブスカイト太陽電池の研究開発・実用化最新動向」(東京理科大)	2016/7/19
164	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト型太陽電池の研究開発最前線	第73回応用科学セミナー 大阪府立大学 分子エレクトロニックデバイス研究所 ニュー・フロンティア材料研究会	2016/7/25
165	Satoshi Uchida	東京大学	Perovskite solar cells - crystal structure and interface architectures	IPS-21 (21st International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy) (St. Petersburg, Russia)	2016/7/25
166	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid photovoltaics using organic solar cells	IPS-21 (St. Petersburg, Russia)	2016/7/26
167	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜大学	Progress in solution-processed organo metal halide perovskite solar cells	IPS-21 (St. Petersburg, Russia)	2016/7/26
168	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Interfaces in perovskite solar cells, computational simulation of the I-V curves	IPS-21 (St. Petersburg, Russia)	2016/7/26
169	Shuzi Hayase	九州工業大学	Interface architecture between TiO ₂ /perovskite, perovskite/hole transport layer, and perovskite grain boundary for perovskite solar cells	IPS-21 (St. Petersburg, Russia)	2016/7/25
170	M. Maitani, H. Segawa	東京大学	Interface characteristics of perovskite solar cells depend on crystalline facet of scaffold	BWP-2 (2nd Best-Efficiency Engineering Research Workshop for Perovskite Photovoltaics and Beyond) (大阪)	2016/8/19
171	T. Miyadera, T. N. Murakami, T. Koganezawa, T. Sugita, and M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Crystallization dynamics of organolead-halide perovskite measured by real-time grazing incident wide angle X-	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (Nagoya)	2016/8/1

			ray scattering		
172	Yuji Wada	東京工業大学	Perovskite solar cells created in the research of dye-sensitized solar cells — similarities and differences	6th AEARU Energy and Environmental Workshop	2016/8/26
173	Atsushi Wakamiya	京都大学	Precursor chemistry for high efficiency perovskite solar cells	The 6th Energy and Environmental Workshop: Next generation solar cells as a solution to energy challenges (AEARU), Tokyo Institute of Technology	2016/8/26
174	M. Ozaki, A. Shimazaki, M. Jung, Y. Nakaïke, N. Maruyama, T. Aharen, A. Rafieh, T. Sasamori, N. Tokitoh, A. Wakamiya, Y. Murata	京都大学	Development of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3 \cdot \text{DMF}$ as a perovskite precursor for highly efficient perovskite solar cells	The 6th Energy and Environmental Workshop: Next generation solar cells as a solution to energy challenges (AEARU), Tokyo Institute of Technology	2016/8/26
175	A. Tateyama, M. Maitani, S. Tsubaki, Y. Wada	東京工業大学	Crystalline facet effect of titanium dioxide scaffold on perovskite solar cell	6th AEARU Energy and Environmental Workshop	2016/8/27
176	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Interfacial management of hybrid perovskite solar cells toward high performance and stability	Symposium on Quantum Materials Synthesis (New York, USA)	2016/8/30
177	M. Jung, A. Rafieh, M. Ozaki, A. Shimazaki, Y. Nakaïke, N. Maruyama, T. Aharen, T. Sasamori, N. Tokitoh, Y. Murata, A. Wakamiya	京都大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells (2): Elucidation of structures and properties of key intermediates in solution process	第 27 回基礎有機化学討論会, 広島国際会議場	2016/9/2
178	尾崎雅司、嶋崎愛、Mina Jung、中池由美、丸山直輝、阿波連知子、Alwani Rafieh、笹森貴裕、時任宣博、村田靖次郎、若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池の作製：有機溶媒の効果と高純度前駆体の開発	第 27 回基礎有機化学討論会, 広島国際会議場	2016/9/2
179	若宮淳志、尾崎雅司、ミナ ユング、嶋崎愛、中池由美、中村智也、ジェイヒュンリー、アネシュゴパル、西村秀隆、村田靖次郎	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池の作製：材料化学と塗布技術開発	日本セラミックス協会 第 29 回秋季シンポジウム、広島大学	2016/9/7
180	M. Sugimoto, W. Wang, J. Dang, R. Jono, H. Segawa	熊本大学	Influence of lattice defects on interfacial electronic properties of the MAPbI_3 -graphene hybrid system. An electronic-structure	2016 年光化学討論会	2016/9/7

			simulation study		
181	J. -S. Dang, W. -W. Wang, R. Jono, M. Sugimoto, H. Segawa	熊本 大学	Impact of Sn distribution on photovoltaic properties of Pb-Sn mixed perovskites. An electronic-structure simulation study	2016 年光化学討論会	2016/9/7
182	W. -W. Wang, J. -S. Dang, R. Jono, M. Sugimoto, H. Segawa	熊本 大学	Surface modification of perovskite-type organic metal halides by graphene oxide. An electronic-structure simulation study	2016 年光化学討論会	2016/9/8
183	米谷真人, 新田明央, 樫淵耕平, 瀬川浩司, 和田雄二, 大谷文章	東京 大学 東京 工業 大学	結晶面選択的酸化チタンナ ノ粒子のトラップ評価と光 電変換デバイスでの電子移 動特性に対する影響	2016 年光化学討論会 (東 京)	2016/9/8
184	紺野晃央, 松下智紀, 佐野惇郎, 中村唯我, 近藤高志	東京 大学	真空蒸着を用いた高安定性 ホルムアミジニウムヨウ化 鉛多結晶薄膜の作製	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/13
185	佐藤友香, 米谷真人, 椿 俊太郎, 鈴木榮一, 和田雄二	東京 工業 大学	金属-酸化物界面でのマイ クロ波吸収特性における界 面因子の影響	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/14
186	堅山瑛人, 米谷真人, 椿俊太郎, 和田雄二	東京 工業 大学	有機-無機ハイブリッドペ ロブスカイト結晶の特性に 対する金属酸化物基材の表 面構造の影響	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/14
187	宇田川洋祐, 清田祐貴, 中村唯我, 佐野惇郎, 松下智紀, 樫田英之, 竹岡裕子, 近藤高志, 江馬一弘	東京 大学	有機無機ペロブスカイト物 質 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ の励起子物 性	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/15
188	濱田健吾, Ripolles Teresa, 尾込裕平, 沈青, 吉野賢二, 豊田太郎, 早瀬修二	九州 工業 大学	TiO_2 -Perovskite 界面 $\text{SnI}_2/\text{PbI}_2$ パッシベーション の太陽電池特性への影響	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/13
189	尾込裕平, 沈青, 飯久保 智, 吉野賢二, 峯元高志, 早瀬修二	九州 工業 大学	錫-鉛混合ペロブスカイト 太陽電池の電荷分離界面制 御に関する検討	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/13
190	山本久美子, 飯久保 智, 尾込裕平, 早瀬修二	九州 工業 大学	有機無機ペロブスカイト化 合物の構造安定性と電荷分 布	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/13
191	飯久保 智, 山本久美子, 尾込裕平, 早瀬修二	九州 工業 大学	Cs-Sn-I 三元系の安定構造 探索	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/13
192	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyanagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. Taro, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州 工業 大学	Study pertaining to spray deposited Cs_2SnI_6 thin films for perovskite solar cells	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/13
193	V. Murugan, T. Ohta, S. Iikubo, G. Kapil, T. Ripolles, Y. Ogomi,	九州 工業 大学	Sulfur doped lower band gap bismuth based perovskites for future	第 77 回応用物理学会秋季学 術講演会 (新潟)	2016/9/13

	T. Ma, S. Pandey, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase		solar cells		
194	Hiroshi Segawa	東京 大学	Hybrid photovoltaics based on nano-structured organic solar cells	Euro MRS Fall Meeting (Warsaw, Poland)	2016/9/19
195	Masayuki Chikamatsu	産業 技術 総合 研究 所	Thin-film fabrication and stability of organic and perovskite solar cells	Euro MRS Fall Meeting (Warsaw, Poland)	2016/9/1
196	Shuzi Hayase	九州 工業 大学	The relationship between interfaces and photovoltaic performances for perovskite solar cells including Pb and mixed metal of Sn/Pb	ACNSC (10th Aseanian Conference on Nano-Hybrid Solar Cell) (North China Electric Power University, China)	2016/9/20
197	Hiroshi Segawa	東京 大学	Basics and Application of Organometal Halide Perovskite Solar Cells	PSCO2016 (2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics) (Genova, Italy)	2016/9/27
198	T. Miyasaka, A. Kulkarni, S. Trilok, A. Kogo, M. Ikegami, Y. Numata	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Brookite-based lead halide and lead-free perovskite solar cells by low temperature processes	PSCO2016 (2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics) (Genova, Italy)	2016/9/26
199	T. N. Murakami, T. Funaki, T. Miyadera, L. Cojocar, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業 技術 総合 研究 所	Conduction Band Edge Tuning of Compact TiO ₂ Layer with TiCl ₄ Treatment in the Perovskite Solar Cells	2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (Genova, Italy)	2016/9/1
200	田上晏莉、杉本学	熊本 大学	電子状態インフォマティクス によるペロブスカイト太陽電池用ホール輸送材料の 探索	第39回ケモインフォマティクス 討論会	2016/9/29
201	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Recent progresses in solution-processed hybrid perovskite devices in photovoltaics and optoelectronics	PRiME 2016 (230th ECS Meeting) (Hawaii, USA)	2016/10/2
202	Atsushi Wakamiya	京都 大学	X-ray crystallographical studies on the intermediates in the solution fabrication process for highly efficient perovskite solar cells	PRiME2016, Convention Center, Honolulu Hawaii	2016/10/5
203	Tetsuhiko Miyadera	産業 技術 総合 研究 所	Real Time Analysis of the Crystallization Dynamics of Organic lead Halide Perovskite	ECS Symposium on Photovoltaics for the 21th Century 12 (Honolulu, Hawaii)	2016/10/1

204	米谷真人, 岸本史直, 佐藤友香, A. Buyanin, 筑紫洋平, 間中孝彰, 岩本光正, M. Salmeron, 椿俊太郎, 和田雄二	東京 大学 東京 工業 大学	マイクロ波とナノ界面との 相互作用による加熱原理	第10回日本電磁波エネルギー 応用学会シンポジウム	2016/10/14
205	W. -W. Wang, J. -S. Dang, M. Sugimoto	熊本 大学	Band gap modulation by anion substitution in ASnI ₃ (A = CH ₃ NH ₃ , Cs) perovskite crystals. A DFT study.	日本コンピュータ化学会 2016 秋季年会	2016/10/23
206	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Organo-metal-halide perovskite solar cells - past, present, and future	PVSEC-26 (Singapore)	2016/10/25
207	M. Maitani, A. Nitta, K. Kashibuchi, M. H. Kumar, P. P. Boix, N. Mathews, H. Segawa, Y. Wada, B. Ohtani	東京 大学 東京 工業 大学	Carrier transport of perovskite solar cells controlled by exposed facet of oxide scaffold	PVSEC-26 (Singapore)	2016/10/26
208	Satoshi Uchida	東京 大学	Perovskite solar cell - crystal structure and interface architecture	PVSEC-26 (Singapore)	2016/10/27
209	Masato Maitani	東京 大学	Organic-inorganic hybrid interface chemistry for solar cells and opto- electric devices	CBC Seminar at Department of Chemistry and Biological Chemistry, Nanyang Technological University (Singapore)	2016/10/28
210	Masato Maitani	東京 大学	Engineering of semiconductor energetics of scaffolds in perovskite solar cells from surface chemical point of view	Okinawa Institute of Science and Technology	2016/10/28
211	Takuro N. Murakami	産業 技術 総合 研究所	Interface engineering for improving of the electron transfer in the dye-sensitized solar cells and the perovskite solar cells	11th TOIN International Symposium on Biomedical Engineering (Yokohama)	2016/10/29
212	M. Maitani, Y. Wada, H. Segawa	東京 大学 東京 工業 大学	Facet effects of oxide scaffold in perovskite solar cells	ENGE 2016 (4th International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment) (Jeju, Korea)	2016/11/7
213	瀬川浩司	東京 大学	有機無機ハイブリッド太陽 電池の新展開	光化学応用講座	2016/11/9
214	宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	ペロブスカイト太陽電池- 構造と発電機構-	光化学応用講座	2016/11/9
215	城野亮太	東京 大学	有機無機ハイブリッド太陽 電池材料の計算科学	光化学応用講座	2016/11/9

216	尾崎雅司, 嶋崎愛, Mina Jung, 中池由美, 丸山直輝, 阿波連知子, Alwani Rafieh, 笹森貴裕, 時任宣博, 若宮淳志, 村田靖次郎	京都 大学	高純度前駆体材料を用いた 高効率ペロブスカイト太陽 電池の作製	第一回フロンティア太陽電池 セミナー	2016/11/17
217	T. Aharen, T. Sasamori, N. Tokitoh, Y. Murata, A. Wakamiya	京都 大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells using properties of key intermediates in solution process	第一回フロンティア太陽電池 セミナー	2016/11/17
218	米谷真人, 新田明央, 樫淵耕平, 瀬川浩司, 和田雄二, 大谷文章	東京 大学 東京 工業 大学	結晶面選択酸化チタンの電 子物性と塗布型太陽電池特 性との相関	第 35 回固体・表面光化学討 論会	2016/11/21
219	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Photovoltaic hybrid materials for solar energy conversion	International Symposium on Next Generation Solar Cells and Solar Energy Conversion (Hsinchu, Taiwan)	2016/11/21
220	Takuro N. Murakami	産業 技術 総合 研究 所	Surface engineering on TiO ₂ for the dye- sensitized and perovskite solar cells	International Symposium on Next-Generation Solar Cells and Solar Energy Conversion (NCTU, Hsinchu, Taiwan)	2016/11/1
221	Takeru Bessho	東京 大学	Research for high efficiency organic- inorganic halide perovskite solar cells	Workshop for Emerging Photovoltaic Technology	2016/11/25
222	Takuro N. Murakami	産業 技術 総合 研究 所	Surface engineering on TiO ₂ for the dye- sensitized and perovskite solar cells	Workshop for Emerging Photovoltaic Technology (NCKU, Tainan)	2016/11/25
223	Hiroshi Segawa	東京 大学	Hybrid photovoltaics based on nano-structured organic solar cells	MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston, USA) ES3.2.01	2016/11/28
224	T. Miyasaka, T. Singh, A. Kogo, Y. Numata, M. Ikegami	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Development of lead halide and lead-free halide perovskite solar cells by low temperature processes	MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston, USA)	2016/11/28
225	S. Uchida, L. Cojocar, P.V.V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京 大学	Equivalent circuit model of perovskite solar cell with surface boundary induced capacitance	MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston, USA) ES3.4.07	2016/11/29
226	L. Cojocar, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京 大学	Origin of the capitance at the interface TiO ₂ /CH ₃ NH ₃ PbI ₃ in planar structure perovskite solar cells	MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston, USA) ES3.6.08	2016/11/29
227	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo,	産業 技術	Laser deposition for the highly controlled co-	2016 Materials Research Society Fall Meeting	2016/11/1

	K. Matsubara, M. Chikamatsu	総合 研究 所	deposition of organolead halide perovskite	(Boston, USA)	
228	尾崎雅司, 嶋崎愛, Mina Jung, 中池由美, 丸山直輝, 阿波連知子, Alwani Rafieh, 笹森貴裕, 時任宣博, 若宮淳志, 村田靖次郎	京都 大学	高純度前駆体材料を用いた 高効率ペロブスカイト太陽 電池の作製法	京都大学化学研究所第116回 研究発表会	2016/12/2
229	若宮淳志	京都 大学	高効率ペロブスカイト太陽 電池のための鍵材料開発	2016 有機エレクトロニクス シンポジウム	2016/12/5
230	宮寺哲彦	産業 技術 総合 研究 所	有機鉛ペロブスカイトの製 膜制御と評価	有機太陽電池研究コンソーシ アム 第22回定例研究会(京 都大)	2016/12/6
231	若宮淳志	京都 大学	高効率ペロブスカイト太陽 電池のための材料化学	セラミックス協会関西支部 2016年度支部セミナー	2016/12/9
232	Hiroshi Segawa	東京 大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	IPC2016 (11th SPSJ International Polymer Conference) (福岡)	2016/12/14
233	Y. Ogomi, T. Ripolles, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Pandey, T. Ma, D. Hirotsu, S. Moritani, K. Hamada, S. Hayase	九州 工業 大学	Perovskite solar cells- architecture of hetero interfaces	ICNME2016 (12th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (神戸)	2016/12/14
234	尾込祐平, Teresa Ripolles, 沈青、豊田太郎、 吉野賢治、峯元高志、 パンジー シャム、 馬廷麗、廣谷大輔、 森谷昌平、濱田健吾、 早瀬修二	九州 工業 大学	ペロブスカイト太陽電池 その界面構築 (Perovskite solar cells. Architecture of hetero interfaces for MAPbX ₃ , CsPbX ₃ , and MASnPbX ₃)	第26回日本MRS年次大会 (横浜)	2016/12/19
235	V. Murugan, T. Ohta, S. Iikubo, G. Kapil, T. Ripolles, Y. Ogomi, T. Ma, S. S. Pandey, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase	九州 工業 大学	Novel bismuth based perovskites by sulfur doping for future solar cells	第26回日本MRS年次大会 (横浜)	2016/12/19
236	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyanagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. Toyoda, T. Minemoto, T. N Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州 工業 大学	Study of interfacial charge transfer with Cs ₂ SnI ₆ thin films for perovskite solar cells	第26回日本MRS年次大会 (横浜)	2016/12/19
237	若宮淳志	京都 大学	ペロブスカイト太陽電池: 真の有機無機ハイブリッド を目指して	第219回フォトポリマー講演 会、I-site なんば	2017/1/27
238	瀬川浩司	東京 大学	有機無機ハイブリッド太陽 電池の新展開	東京理科大学 総合研究院 太陽光発電技術研究部門第7 回シンポジウム「太陽電池・	2017/1/30

				発電技術の最新動向」(東京・神楽坂)	
239	近松真之	産業技術総合研究所	有機系太陽電池の研究開発動向	東京理科大学総合研究院太陽光発電技術研究部門第7回シンポジウム(東京理科大学)	2017/1/30
240	H. Segawa, L. Cojocar, S. Uchida	東京大学	Gamma voltaic property of perovskite solar cell toward the novel nuclear power generation	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
241	T. Kubo, H. Segawa, L. Cojocar, S. Almosni, D. Li, S. Uchida	東京大学	Perovskite solar cells hysteresis simulation using Heiman-Warfield trapping model implemented in Silvaco Atlas	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
242	H.-W. Chen, T. Bessho, Z. Tang, H. Segawa	東京大学	Tin oxide based organo-lead-halide perovskite solar cells prepared by low temperature solution process	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
243	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Organolead halide perovskite solar cells with reduced hysteresis fabricated by laser deposition method.	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/1
244	N. Onozawa-Komatsuzaki, T. Funaki, T. N. Murakami, S. Kazoui, M. Chikamatsu, Kazuhiro Sayama	産業技術総合研究所	Novel cobalt complexes as a dopant for hole-transporting material in perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
245	T. N. Murakami, T. Funaki, T. Miyadera, L. Cojocar, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業技術総合研究所	Electrical properties of thin TiO ₂ prepared with TiCl ₄ treatment for perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
246	Y. Ogomi, T. Ripolles, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Pandey, T. Ma, D. Hirotani, S. Moriya, K. Hamada, H. Zhaosheng, S. Hayase	九州工業大学	Hetero-interfaces for perovskite solar cells consisting of Sn	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
247	G. Kapil, T. Ohta, T. Koyanagi, Y. Ogomi, K. Yoshino, Q. Shen, T. Toyoda, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Lead free Cs ₂ SnI ₆ thin films using solution processing technique for perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3

248	M. Vigneshwaran, T. Ohta, S. Iikubo, G. Kapil, T. Ripolles, Y. Ogomi, S. S. Pandey, T. Ma, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase	九州 工業 大学	Facile synthesis and characterization of sulfur doped low bandgap bismuth based perovskites by soluble precursor route	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
249	M. Maitani, A. Tateyama, H. Segawa, Y. Wada	東京 大学 東京 工業 大学	Interface engineering by facet controlled TiO ₂ for CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
250	S. Tsubaki, M. Maitani, A. Tateyama, D. Iso, G. Han, P. P. Boix, N. Mathews, J. Kim, H. Segawa, Y. Wada	東京 工業 大学	Scaffold and annealing engineering for high crystallinity of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ for perovskite solar cell	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
251	S. Fukumoto, H. Kanda, A. K. Baranwar, S. Ito	兵庫 県立 大学	Detail analysis on temperature effects of NiO electron conducting layer for perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
252	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Materials science for fabrication of high performance perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
253	M. Ozaki, A. Shimazaki, M. Jung, Y. Nakaïke, N. Maruyama, T. Aharen, A. Rafieh, T. Sasamori, N. Tokitoh, Y. Murata, A. Wakamiya	京都 大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells using a complex of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ ·DMF as a key precursor for perovskite	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
254	M. Jung, A. Rafieh, M. Ozaki, A. Shimazaki, Y. Nakaïke, N. Maruyama, T. Aharen, T. Sasamori, N. Tokitoh, Y. Murata, A. Wakamiya	京都 大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells: Properties of key intermediates in solution process	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
255	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells: Elucidation of perovskite layer formation mechanism in solution process	The 3rd ANGEL Symposium, Yamagata University	2017/2/3
256	Hiroshi Segawa	東京 大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	JSPS 175th Committee, Division of Organic Photovoltaics, 4th Workshop on Present Status and Future Perspective of Perovskite Solar Cells (東京・駒場)	2017/2/6

257	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	High efficiency development perovskite solar cells by tuning metal oxide electron transport layers	JSPS 175th Committee, Division of Organic Photovoltaics, 4th Workshop on Present Status and Future Perspective of Perovskite Solar Cells (東京・駒場)	2017/2/6
258	Shuzi Hayase	九州工業大学	Enhancement of Sn/Pb perovskite solar cell from view-point of interface and crystal	JSPS 175th Committee, Division of Organic Photovoltaics, 4th Workshop on Present Status and Future Perspective of Perovskite Solar Cells (東京・駒場)	2017/2/6
259	村上拓郎	産業技術総合研究所	色素増感太陽電池およびペロブスカイト太陽電池における界面制御技術	電気化学会、電解科学技術委員会総会 (電気化学会)	2017/2/8
260	瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の現状と展望	兵庫県立大学 次世代分散エネルギーセンターシンポジウム (姫路)	2017/2/20
261	H. Segawa, T. Kubo, J. Nakazaki, S. Uchida, L. Cojocar, S. Kaneko, P. V. V. Jayaweera	東京大学	Simulation of I-V curves for inverted structure perovskite solar cells using equivalent circuit model with inductance	ABXPV17 (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Valencia, Spain)	2017/3/2
262	L. Cojocar, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Physical modeling of hysteretic behavior in I-V curves of perovskite solar cells	ABXPV17 (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Valencia, Spain)	2017/3/2
263	木村浩平、松下智紀、近藤高志	東京大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体のヘテロエピタキシャル薄膜形成	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜) 14p-303-5	2017/3/14
264	佐野惇郎、松下智紀、近藤高志	東京大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイト型半導体混晶の光誘起スピノーダル分解の温度依存性	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜) 16a-303-3	2017/3/16
265	T. Kim, S. Uchida, T. Matsushita, L. Cojocar, T. Kondo, H. Segawa	東京大学	Transmission electron microscopy observation of phase coexistence in organometal halide perovskite solar cell	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜) 16a-303-2	2017/3/16
266	西原佳彦、近松真之、カザウイサイ、宮寺哲彦、吉田郵司	産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池における NiO _x への表面処理の影響	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/1
267	宮寺哲彦、村上拓郎、近松真之	産業技術総合研究所	過渡電流測定による有機鉛ペロブスカイト太陽電池におけるヒステリシスの解析	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/1
268	飯久保智、山崎純、山本久美子、尾込裕平、早瀬修二	九州工業大学	Cs-X-I 三元化合物の探索	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14

269	山裾大樹、與那覇歩、尾込裕平、沈青、豊田太郎、吉野賢二、早瀬修二	九州工業大学	SnF ₂ (DMSO) ₂ を用いた逆構造 Perovskite 太陽電池の研究	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
270	山口恵里奈、與那覇歩、尾込裕平、沈青、吉野賢二、峯元高志、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	Sn 系ペロブスカイト太陽電池の Br 添加に関する研究	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
271	濱田健吾、Ripolles Teresa、尾込裕平、沈青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	Sn 系 Perovskite 太陽電池における TiO ₂ 界面パッシベーションの影響	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
272	干場悠真、與那覇歩、尾込裕平、沈青、吉野賢治、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	ホール輸送層に NiO _x を用いた Sn/Pb ペロブスカイト太陽電池の作製	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
273	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyonagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. Toyoda, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Dual role of Cs ₂ SnI ₆ : A hole transporter and an absorber for perovskite based solar cells	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
274	米谷真人、堅山瑛人、新田明央、瀬川浩司、大谷文章、和田雄二	東京大学 東京工業大学	有機・無機ハイブリッド半導体ペロブスカイトの組成による金属酸化物 Scaffold の電子トラップへの影響	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/16
275	若宮淳志	京都大学	新規前駆体材料を用いた塗布法におけるペロブスカイト層形成メカニズム解明	日本化学会春季年会 ATP 講演, 化学が拓くエネルギーイノベーション, 慶應義塾大学	2017/3/17
276	瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の新展開	日本化学会第 97 春季年会 (横浜) 3D1-12	2017/3/18
277	宮坂力	東京大学 桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池における界面制御と耐久性向上技術	日本化学会第 97 春季年会 (横浜) 3D1-28	2017/3/18
278	木下卓巳、内田聡、久保貴哉、瀬川浩司	東京大学	スピン禁制遷移を利用する広帯域ハイブリッド太陽電池の開発	日本化学会第 97 春季年会 (横浜) 3A6-39	2017/3/18
279	磯大吉、米谷真人、椿俊太郎、瀬川浩司、和田雄二	東京工業大学	ペロブスカイト太陽電池形成におけるマイクロ波を用いた薄膜結晶化プロセス	日本化学会第 97 春季年会 (横浜)	2017/3/18
280	田鎖光力、米谷真人、椿俊太郎、瀬川浩司、和田雄二	東京工業大学	微粒子酸化チタンを用いた結晶配向性制御コンパクト層のペロブスカイト太陽電池への適用	日本化学会第 97 春季年会 (横浜)	2017/3/18
281	尾崎雅司、嶋崎愛、Mina Jung、中池由美、丸山直輝、阿波連知子、Alwani Rafiesh、笹森貴裕、時任宣博、若宮淳志、村田靖次郎	京都大学	高純度化鍵前駆体材料を用いた高効率ペロブスカイト太陽電池の作製	日本化学会第 97 春季年会 (横浜)	2017/3/18

282	瀬川浩司	東京大学	次世代光電変換デバイスの可能性－有機系太陽電池を中心に－	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 講演会（尼崎）	2017/3/23
283	米谷真人, 磯大吉, Kim Junbeom, 椿俊太郎, 瀬川浩司, 和田雄二	東京大学 東京工業大学	マイクロ波界面加熱を用いた有機・無機ハイブリッドペロブスカイト薄膜の結晶成長	電気化学会第84回大会（首都大学東京・南大沢）	2017/3/25
284	濱田健吾、レポレス サンチス テレサ、尾込裕平、沈青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	SnPb-Perovskite 太陽電池における TiO ₂ 界面パッシベーションの影響	電気化学会第84回大会（首都大学東京・南大沢）	2017/3/25
285	小柳嗣雄、太田 剛、Gaurav Kapil、尾込裕平、吉野賢二、沈青、豊田太郎、村上拓郎、瀬川浩司、早瀬修二	九州工業大学	超音波法を用いた Cs ₂ SnI ₆ 量子ドットの合成・物性評価	電気化学会第84回大会（首都大学東京・南大沢）	2017/3/25
286	Satoshi Uchida	東京大学	Comparison of power conversion efficiency of solar cell showing hysteresis by I-V measurement and MPPT method under various light intensities	StableNextSol COST Action no. MP1307 (Lisbon, Portugal)	2017/4/6
287	若宮淳志	京都大学	高性能エレクトロニクスを実現する材料科学	新化学技術研究奨励賞第4回 成果報告講演会（東京・一橋講堂）	2017/4/10
288	瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライド太陽電池－その特殊性から見えてくるもの	応用物理学会結晶工学分科会第146回研究会「ペロブスカイトは結晶か？－有機金属ハライド太陽電池の特殊性・一般性と可能性－」（東京・駒場）	2017/4/14
289	近藤高志	東京大学	ペロブスカイト型半導体の基礎物性と結晶工学	応用物理学会結晶工学分科会第146回研究会「ペロブスカイトは結晶か？－有機金属ハライド太陽電池の特殊性・一般性と可能性－」（東京・駒場）	2017/4/14
290	T. Miyasaka, M. Ikegami, A. Kulkarni, T. Singh, A. Kogo	東京大学 桐蔭横浜大学	Lead halide and lead-free perovskite solar cells by metal oxide-based low temperature processes	MRS spring meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2017/4/17
291	S. Uchida, L. Cojocaru, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Computational I-V curve of perovskite solar cell with surface boundary induced capacitance	MRS spring meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2017/4/18
292	Shuzi Hayase	九州工業大学	Enhancement of efficiency for Sn-perovskite solar cell from viewpoint of hetero-interface structure	MRS spring meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2017/4/20

293	Y. Ogomi, K. Hamada, D. Hirotoni, A. Yonaha, E. Yamaguchi, S. Qing, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, R. Teresa, S. Hayase	九州 工業 大学	Enhancement of efficiency for mixed metal Sn/Pb perovskite solar cells - What lowers efficiency	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
294	Hiroshi Segawa	東京 大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
295	Z. Tang, T. Bessho, F. Awai, T. Kinoshita, H. Wang, M. M. Maitani, R. Jono, T. Kubo, S. Uchida, H. Segawa	東京 大学	Hysteresis-less highly efficient perovskite solar cells via modifying perovskite absorber	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
296	M. Maitani, A. Tateyama, A. Nitta, W.-W. Wang, M. Sugimoto, B. Ohtani, Y. Wada, H. Segawa	東京 大学	Adsorption and trap- state control at perovskite/TiO ₂ interface by exposed facet of scaffold for CH ₃ NH ₃ PbI ₃ (Cl _x) perovskite solar cells	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
297	T. Kim, S. Uchida, L. Cojocar, u, T. Matsushita, T. Kondo, H. Segawa	東京 大学	Crystal phase coexistence in organometal halide perovskite solar cell observed by transmission electron microscopy	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
298	M. Sugimoto, A. Tanoue, L. Xethakis, H. Segawa	熊本 大学 東京 大学	Electronic-structure informatics on organic hole transport materials in perovskite solar cells: lessons from experiment and predictions from computation	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
299	Seigo Ito	兵庫 県立 大学	N ₂ blow drying method for perovskite solar cells with NiO and low- temperature carbon	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/23
300	Satoshi Uchida	東京 大学	The evaluation of capacitance for perovskite solar cell with hysteresis in I-V curve	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/24
301	Manabu Sugimoto	熊本 大学	A first-principles study on photo-induced hole injection into organic molecule on metal halide perovskite surface	231st Electrochemical Society (ECS) Meeting (New Orleans, USA)	2017/5/30
302	瀬川浩司	東京 大学	有機金属ハライドペロブス カイト太陽電池の基礎	光機能材料研究会 第63回講 演会「ペロブスカイト太陽電 池の材料開発とセル作成技 術・実用化最新動向」	2017/6/12

303	杉本学	熊本大学	電子状態インフォマティクスによるペロブスカイト太陽電池材料の解析と探索	光機能材料研究会 第63回講演会「ペロブスカイト太陽電池の材料開発とセル作成技術・実用化最新動向」	2017/6/12
304	宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	効率20%を超えるペロブスカイト太陽電池の製膜条件	光機能材料研究会 第63回講演会「ペロブスカイト太陽電池の材料開発とセル作成技術・実用化最新動向」	2017/6/12
305	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池～材料化学からのアプローチ～	高分子学会 17-2ポリマーフロンティア21 (東京工業大・蔵前会館)	2017/6/13
306	Satoshi Uchida	東京大学	Crystal phase analysis in organometal halide perovskite solar cell	SISF2017 (6th Sungkyun International Solar Forum 2017, Seoul, Korea)	2017/6/13
307	Atsushi Wakamiya	京都大学	Purified precursor materials for efficient perovskite solar cells	SISF2017 (6th Sungkyun International Solar Forum 2017, Seoul, Korea)	2017/6/14
308	Hiroshi Segawa	東京大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	SISF2017 (6th Sungkyun International Solar Forum 2017, Seoul, Korea)	2017/6/16
309	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide and low temperature based perovskite solar cells and high efficiency development	SISF2017 (6th Sungkyun International Solar Forum 2017, Seoul, Korea)	2017/6/16
310	K. Wang, Y. Nakamura, T. Kondo, K. Kobayashi, S. Yamaguchi	東京大学	The partial conductivity measurements on methylammonium lead tribromide perovskite materials	21st International Conference on Solid State Ionics (Padua, Italy)	2017/6/19
311	K. Wang, Y. Nakamura, T. Kondo, S. Yamaguchi	東京大学	The photoelectrochemical properties of methylammonium lead tribromide perovskite materials governed by ion migration and its application to photo-electrochemical devices	21st International Conference on Solid State Ionics (Padua, Italy)	2017/6/19
312	Hiroshi Segawa	東京大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	ICMAT2017 (9th International Conference of Materials for Advanced Technologies), Suntec Singapore	2017/6/19
313	Gaurav Kapil, T. Ohta, T. Koyanagi, Y. Ogomi, S. S. Pandey, K. Yoshino, Q. Shen, T. Toyoda, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学 東京大学	Study for realizing the role of Cs ₂ SnI ₆ in perovskite based solar cells	ICMAT 2017 (Singapore)	2017/6/20
314	T. N. Murakami, T. Funaki, T. Miyadera, L. Cojocar, S. Kazaoui,	産業技術総合研究所	Interface engineering between electron transport layer and perovskite layer for perovskite solar cells	6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (福井)	2017/6/20

	M. Chikamatsu, H. Segawa	東京 大学			
315	Ashish Kulkarni, Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Bismuth based light absorbing material for lead free perovskite solar cells	ICMAT 2017 (Singapore)	2017/6/21
316	Satoshi Uchida	東京 大学	Perovskite solar cells with crystal structure and interface architecture	ICMAT2017 (Singapore)	2017/6/21
317	Seigo Ito	兵庫 県立 大学	Thermal stability of printable perovskite solar cells using porous carbon electrodes	ICMAT 2017 (Singapore)	2017/6/21
318	T. S. Ripolles, F. Shuichiro, K. Hamada, T. Sato, T. Toyoda, Q. Shen, S. Hayase	九州 工業 大学	Device engineering on high efficient all- inorganic cesium perovskite solar cells	ICMAT 2017 (Singapore)	2017/6/21
319	米谷真人, 堅山瑛人, 新田明央, Wei-Wei Wang, 杉本学, 大谷文章, 和田雄二, 瀬川浩司	東京 大学	ペロブスカイト太陽電池の 高効率化に向けた酸化チタ ン結晶面を利用した界面接 合制御と電子トラップ制御	第 41 回有機電子移動化学討 論会 (北海道大学・札幌)	2017/6/22
320	宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	有機無機ペロブスカイト半 導体と太陽電池開発の最新 動向	第36回無機高分子シンポジウ ム (東京理科大・神楽坂)	2017/6/23
321	T. Miyadera, T. Murakami, M. Chikamatsu	産業 技術 総合 研究 所	Hysteresis analysis of organolead halide perovskite solar cells by transient current measurement	9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (金沢)	2017/6/28
322	Hiroshi Segawa	東京 大学	Hybrid photovoltaics using organic solar cells	TOEO-10 (10th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics) (Waseda Univ., Tokyo)	2017/7/4
323	Atsushi Wakamiya	京大 学	Functional organoboron materials using intramolecular B-N coordination bonds	IMEBORON-XVI (16th International Meeting on Boron Chemistry) (Hong Kong)	2017/7/9
324	宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	効率 20%を超えるペロブス カイト太陽電池の製膜技術	学振 175 委員会シンポジウム (名古屋)	2017/7/21
325	Satoshi Uchida	東京 大学	Perovskite solar cells - crystal structure and interface	IGEC-XII (12th International Green Energy Conference) (Xi'an, China)	2017/8/2
326	K. Kimura, T. Matsushita, T. Kondo	東京 大学	Formation of epitaxial thin films of lead halide perovskite semiconductor	Photonics@SG 2017 (Singapore)	2017/8/3

327	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide based perovskite solar cells and high efficiency development	IUMRS-ICAM 2017 (15th International Conference on Advanced Materials)(京都)	2017/8/28
328	Trilok Singh	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Effects of doped electron transport layers on the performance of large active area perovskite cell with high efficiency	IUMRS-ICAM 2017 (京都)	2017/8/28
329	Atsushi Wakamiya	京都大学	Purified materials for fabrication of efficient perovskite solar cells with high reproducibility	IUMRS-ICAM 2017 (京都)	2017/8/28
330	Shuzi Hayase	九州工業大学	Enhancement of efficiency for perovskite solar cells consisting of Sn from viewpoint of interfacial and crystal architecture	IUMRS-ICAM 2017 (京都)	2017/8/29
331	Ashish Kulkarni, Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Bismuth based light absorbers for lead-free perovskite solar cells	IUMRS-ICAM 2017 (京都)	2017/8/29
332	Satoshi Uchida	東京大学	Perovskite solar cells - crystal structure and interface architectures	IUMRS-ICAM 2017 (京都)	2017/8/29
333	若宮淳志	京都大学	高純度化材料を用いたペロブスカイト太陽電池の作製法	学振 175 委員会 有機系太陽電池分科会 第 5 回研究会 (京都)	2017/8/30
334	早瀬修二, 沈青, 尾込裕平, 豊田太郎, 吉野賢二, 峯元高志	九州工業大学	ヘテロ界面構造と Sn 系混合金属ペロブスカイト太陽電池	第78回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡) 5p-C19-4	2017/9/5
335	戸邊智之, 岩橋秀樹, 遠藤聡人, 實平義隆, 沼田陽平, 池上和志, 宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	インクジェット製膜法によるペロブスカイト光発電層における液滴サイズの検討	第78回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡) 5p-PA3-25	2017/9/5
336	秋山航汰, 實平義隆, 沼田陽平, 宮坂力, 池上和志	東京大学 桐蔭 横浜 大学	酸化チタン超ナノ微粒子を用いたペロブスカイト太陽電池メソポーラス層の低温製膜	第78回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡) 5p-PA3-24	2017/9/5
337	木下卓巳, 久保貴哉, 内田聡, 瀬川浩司	東京大学	広帯域 Ru 錯体色素の光励起状態制御と光電変換への応用	2017年光化学討論会 (仙台) 3B10	2017/9/6
338	古郷敦史, 實平義隆, 沼田陽平, 池上和志, 宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	ブルッカイト型 TiO ₂ 電子収集層による高効率低温製膜ペロブスカイト太陽電池	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡) 7a-A501-1	2017/9/7

339	柴山直之, 福本翔太, 神田広之, 春山雄一, 瀬川浩司, 宮坂力, 伊藤省吾	兵庫 県立 大学	ペロブスカイト太陽電池に 用いる NiOx 層設計	第78回応用物理学会秋季学術 講演会 (福岡) 7a-A501-3	2017/9/7
340	沼田陽平, 實平義隆, 古郷敦史, 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	ニオブドープアモルファス 酸化チタンをブロッキング 層に用いた低温作製高効率 ペロブスカイト太陽電池	第78回応用物理学会秋季学術 講演会 (福岡) 7a-A501-4	2017/9/7
341	實平義隆, 沼田陽平, 池上和志, 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	水蒸気加熱法による酸化チ タン多孔膜のナノ構造制御 とペロブスカイト太陽電池 への応用	第78回応用物理学会秋季学術 講演会 (福岡) 7a-A501-8	2017/9/7
342	米谷真人, Vijay S. Murugesan, 磯大吉, Junbeom Kim, 椿俊太郎, 宮坂力, 和田雄二, 瀬川浩司	東京 工業 大学 東京 大学	マイクロ波界面加熱による 有機無機ハイブリッド半導 体の結晶化技術を用いた高 効率ペロブスカイト太陽電 池	第 78 回応用物理学会秋季学 術講演会 (福岡) 7a-A501-9	2017/9/7
343	山田研人, 西久保綾佑, 大賀光, 今村穰, 尾込裕平, 早瀬修二, 佐伯昭紀	九州 工業 大学	Sn ペロブスカイト薄膜の GHz 誘電率の光制御	第 78 回応用物理学会秋季学 術講演会 (福岡) 7p-A504-4	2017/9/7
344	中村唯我, 松下智紀, 近藤高志	東京 大学	ガスソースを用いた真空蒸 着による CH ₃ NH ₃ PbI ₃ 多結晶 薄膜の作製	第 78 回応用物理学会秋季学 術講演会 (福岡) 8a-A501-7	2017/9/8
345	宮坂力, 池上和志, 古郷敦史, 沼田陽平	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	ペロブスカイト太陽電池に おける低温製膜金属酸化物 層による高電圧・高効率化	2017 年電気化学秋季大会 (長崎) 2L17	2017/9/11
346	村上拓郎, 船木 敬, 近松真之, 瀬川浩司	産業 技術 総合 研究 所	ペロブスカイト太陽電池の 電子輸送層とペロブスカイ ト層界面の電気化学手法に よる評価	2017 年電気化学秋季大会 (長崎) 2L18	2017/9/11
347	柴山直之, 福本翔太, 神田広之, Ajay Baranwal, 春山雄一, 瀬川浩司, 宮坂力, 伊藤省吾	兵庫 県立 大学	スプレー熱分解法を用いた NiOx 層の作製とそれを用い たペロブスカイト太陽電池	2017 年電気化学秋季大会 (長崎) 2L20	2017/9/11
348	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Materials chemistry toward highly efficient perovskite solar cells	2017 Summer Workshop for Photovoltaics, Institute of Atomic and Molecular Science, Academia Sinica, Taipei, Taiwan	2017/9/14
349	城野亮太, 瀬川浩司	東京 大学	CH ₃ NH ₃ PbI ₃ / TiO ₂ 界面にお ける分子構造・電子状態の 解明	第 11 回分子科学討論会 (仙 台)	2017/9/16
350	Naoyuki Shibayama, Shota Fukumoto, Hiroyuki Kanda, Yuichi Haruyama, Seigo Ito	兵庫 県立 大学	Analysis of spray- pyrolysis deposited NiOx layers with different temperatures in inverted perovskite solar cells	PSC017 (3rd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics) (Oxford, UK)	2017/9/18
351	T. Miyadera, Y. Auchi, T. Koganezawa,	産業 技術 総合	CH ₃ NH ₃ PbI ₃ epitaxial film with atomically smooth	PSC017 (Oxford, UK)	2017/9/19

	H. Yaguchi, Y. Yoshida, M. Chikamatsu	研究所	surface fabricated by IR laser deposition method		
352	S. Kazaoui, T. N. Murakami, N. Onozawa- Komatsuzaki, T. Funaki	産業技術総合研究所	Environmental stability of mixed perovskite solar cells under 1 sun	PSC017 (Oxford, UK)	2017/9/19
353	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Perovskite solar cells with efficiency over 21% based on cost-efficient low temperature preparation of metal oxide blocking layers	PSC017 (Oxford, UK)	2017/9/20
354	S. Uchida, L. Cojocararu, V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Comparison of power conversion efficiency of solar cell showing hysteresis by I-V measurement and MPPT method under various light intensities	PSC017 (Oxford, UK)	2017/9/20
355	Y. Ogomi, K. Hamada, D. Yamasuso, D. Hirotsu, A. Yonaha, E. Yamaguchi, S. Hayase, S. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto	九州工業大学	Enhancement of efficiency for mixed metal Sn/Pb perovskite solar cells with 16% efficiency from the viewpoint of crystal and hetero-interface architecture	EU PVSEC 2017 (Brussels, Belgium) 3DV.2.64	2017/9/28
356	Manabu Sugimoto	熊本大学	Structures and electronic characteristics of lattice defects at interfaces in the perovskite solar cell. A first principles study	232nd Electrochemical Society (ECS) Meeting (National Harbor)	2017/10/4
357	T. Miyadera	産業技術総合研究所	Crystallization control and analysis of organolead halide perovskite	NHSC11 (11th Aseanian Conference on Nano-Hybrid Solar Cells) (姫路)	2017/10/9
358	S. Uchida, L. Cojocararu, V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Perovskite solar cells: crystal structure and interface architecture	NHSC11 (姫路)	2017/10/10
359	T. N. Murakami, K. Tamaki, T. Miyadera, T. Funaki, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業技術総合研究所	Interface modification between electron transport layer and perovskite layer for efficient energy transfer in perovskite solar cells	NHSC11 (姫路)	2017/10/10

360	Atsushi Wakamiya	京都大学	Development of precursor materials for perovskite solar cells	NHSC11 (姫路)	2017/10/10
361	Masato Maitani, Akito Tateyama, Akio Nitta, Bunsho Ohtani, Yuji Wada, Hiroshi Segawa	東京工業大学	Interfacial electron traps at perovskite / TiO ₂ interface and its management for high efficiency of perovskite solar cells	NHSC11 (姫路)	2017/10/11
362	T. W. Kim, S. Uchida, T. Matsushita, L. Cojocar, R. Jono, D. Matsubara, M. Shirai, K. Ito, H. Matsumoto, T. Kondo, H. Segawa	東京大学	Observation of phase coexistence at room temperature in organometal halide perovskite solar cell with transmission electron microscopy	NHSC11 (姫路)	2017/10/11
363	T. N. Murakami, T. Miyadera, T. Funaki, L. Cojocar, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業技術総合研究所	Impact of chemical bath deposition with TiCl ₄ on electron transport layer for perovskite solar cells	90th JSCM Anniversary Conference Symposium (東京/神田)	2017/10/17
364	Weiwei Wang, Jingshuang Dang, Manabu Sugimoto, Hiroshi Segawa	熊本大学	Surface modification of defective metal halides perovskite by graphene. An electronic-structure simulation study	日本コンピュータ化学会 2017 秋季年会 (熊本)	2017/10/21
365	Jingshuang Dang, Weiwei Wang, Manabu Sugimoto, Hiroshi Segawa	熊本大学	Theoretical studies on perovskite-hole transporting material interface: Molecular design and surface engineering for photovoltaic efficiency improvement	日本コンピュータ化学会 2017 秋季年会 (熊本)	2017/10/21
366	T. Miyadera	産業技術総合研究所	Crystallization control of organolead halide perovskite	JSAP-KPS Joint Symposium (Gyeongju, Korea)	2017/10/26
367	Hiroshi Segawa	東京大学	Hysteresis-free perovskite solar cells made of potassium-doped organometal halide perovskite	PVSEC-27 (27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference) (大津) 5Mo04.1	2017/11/13
368	Youhei Numata, Yoshitaka Sanehira, Atsushi Kogo, Ryo Ishikawa, Hajime Shirai, Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Low-temperature prepared niobium-doped amorphous titanium oxide compact layer in highly efficient and durable perovskite solar cells	PVSEC-27 (大津) 5Mo04.2	2017/11/13
369	Satoshi Uchida, Ludmila Cojocar, V. V. Jayaweera, Shoji Kaneko, Jotaro Nakazaki, Takaya Kubo,	東京大学	Perovskite solar cells: morphological crystal structure and interface architecture	PVSEC-27 (大津) 5Tu07.4	2017/11/14

	Hiroshi Segawa				
370	S. Kazaoui, T. N. Murakami, N. Onozawa- Komatsuzaki, T. Funaki	産業 技術 総合 研究 所	Stability of mixed perovskite solar cells: effect of oxygen, humidity and temperature at 1 sun	PVSEC-27 (大津) 5TuPo.166	2017/11/14
371	N. Onozawa- Komatsuzaki, T. N. Murakami, T. Funaki, S. Kazoui, M. Chikamatsu, Wei-Wei Wang, Manabu Sugimoto	産業 技術 総合 研究 所	Impact of azaaromatic compounds treatment of the interface between perovskite and hole transport material in perovskite solar cells	PVSEC-27 (大津) 5TuPo.169	2017/11/14
372	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Materials science in solution process for highly efficient perovskite solar cells	PVSEC-27, 2nd Asian Nations Joint Workshop on Photovoltaics (大津)	2017/11/14
373	Masato Maitani, Vijay S. Murugesan, Daikichi Iso, Junbeom Kim, Shuntaro Tsubaki, Tsutomu Miyasaka, Hiroshi Segawa, Yuji Wada	東京 工業 大学	Microwave irradiation for organic-inorganic hybrid lead halide crystallization applied to perovskite solar cells	PVSEC-27 (大津) 5We07.3	2017/11/15
374	Taewoong Kim, Satoshi Uchida, Ludmila Cojocaru, Tomonori Matsushita, Takashi Kondo, Hiroshi Segawa	東京 大学	Direct observation of phase coexistence and microstructural configuration of the organometal halide perovskite solar cell	PVSEC-27 (大津) 5We07.5	2017/11/15
375	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide and low temperature process based perovskite solar cells and high efficiency development	PVSEC-27 (大津) 5We07.6	2017/11/15
376	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Chemical approaches toward highly efficient perovskite solar cells	RSC Materials Horizons Symposium: Electronic and Photonic Materials (京都)	2017/11/15
377	Manabu Sugimoto	熊本 大学	Electronic-structure informatics for discovery/design of functional molecules	5th Autumn School of Chemoinformatics in Nara, 2017	2017/11/15
378	Ajay Kumar Jena, Masashi Ikegami, Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Severe morphological deformation of Spiro- OMETAD in perovskite solar cells at high temperature: causes and consequences	PVSEC-27 (大津) 5ThPo.162	2017/11/16
379	T. Funaki, N. Onozawa-Komatsuzaki, T. N. Murakami, M. Chikamatsu	産業 技術 総合 研究 所	Triphenylamine Derivatives for Interface between Perovskite and Hole Transport Material in Perovskite Solar Cells	PVSEC-27 (大津) 5ThPo.166	2017/11/16
380	Hsin-Wei Chen, Takeru Bessho,	東京 大学	Tin oxide electron- transport layer prepared	PVSEC-27 (大津) 5ThPo.167	2017/11/16

	Zeguo Tang, Hiroshi Segawa		by spray pyrolysis for hysteresis-less organo-metal-halide perovskite solar cells		
381	Ashish Kulkarni, Masashi Ikegami, Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Eco-friendly bismuth halide, Ag-Bi and Cu-Bi based light absorbing materials for lead free perovskite solar cells	PVSEC-27 (大津) 5ThPo.170	2017/11/16
382	Trilok Sign, Masashi Ikegami, Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	All low temperature (< 150°C) processed high efficiency and stable flexible perovskite solar cells	PVSEC-27 (大津) 5ThPo.172	2017/11/16
383	若宮淳志	京都大学	有機半導体の分子配向制御と高効率ペロブスカイト太陽電池の開発	第2回 pMAIRS ワークショップ (京都大学化学研究所)	2017/11/22
384	S. Uchida, L. Cojocar, V.V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Determination of unique power conversion efficiency of perovskite solar cell showing hysteresis in the I-V curve under various light intensities	2017 MRS Fall Meeting (Boston, USA) ES01.01.09	2017/11/27
385	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Tolerance of polymer HTM-based perovskite solar cells against high temperatures and high energy irradiations	2017 MRS Fall Meeting (Boston, USA) ES01.09.01	2017/11/29
386	Yuhei Ogomi, Qing Shen, Taro Toyoda, Kenji Yoshino, Takashi Minemoto, Shuzi Hayase	九州工業大学	SnPb mixed metal perovskite solar cell with low Voc loss and 16% efficiency	2017 MRS Fall Meeting (Boston, USA) ES01.11.06	2017/11/30
387	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池の高効率化：高純度前駆体材料の化学	第2回フロンティア太陽電池セミナー (金沢)	2017/12/1
388	山口周, Kai Wang, 小林清, 中村唯我, 近藤高志	東京大学	単結晶 MAPbBr ₃ の部分電気伝導度測定とその欠陥化学	第43回固体イオニクス討論会 (山形)	2017/12/6
389	T. N. Murakami, A. Kogo, M. Kim, T. Miyadera, L. Cojocar, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業技術総合研究所	EIS study of the shifts in conduction band edge of TiO ₂ compact layer for the perovskite solar cells	AEIS2017 (Asian Symposium on Electrochemical Impedance Spectroscopy) (東京)	2017/12/8
390	宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	有機無機ペロブスカイト光電変換デバイスの開発最前線と今後の展望	学振 162 委員会研究会「新規発光材料・新構造デバイスの最前線と今後の展開」(静岡・伊豆の国)	2017/12/15
391	村上拓郎	産業技術総合	色素増感太陽電池とペロブスカイト太陽電池の高効率化に向けた界面修飾	電気通信学会 OME 研究会 (東京・機械振興会館)	2017/12/28

		研究所			
392	Satoshi Uchida, Hiroshi Segawa	東京 大学	Practical use and industry oriented perovskite & dye- sensitized solar cell technology	Solar Asia 2018 (Kandy, Sri Lanka)	2018/1/5
393	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Interfacial management in metal oxide and low temperature based perovskite solar cells	ISEST 2018 (International Symposium on Energy Science and Technology) (沖縄/OIST)	2018/1/23
394	Gaurav Kapil, Kengo Hamada, Yuhei Ogomi, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Qing Shen, Taro Toyoda, Takuro N Murakami, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase	九州 工業 大学	Study to realize the effect of multiple monovalent cation for lead/tin mixed perovskite solar cells	AP-HOPV 18 (2nd Asia- Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics) (北九州)	2018/1/29
395	S. Uchida, T.W. Kim, L Cojocaru, T. Kondo, H. Segawa	東京 大学	Perovskite solar cells: crystal structure and interface architecture with high resolution TEM observations	AP-HOPV 18 (北九州)	2018/1/30
396	Manabu Sugimoto, Jing-Shuang Dang, Wei-Wei Wang, Ryota Jono, Hiroshi Segawa	熊本 大学	Chemistries of materials in perovskite solar cells revealed by electronic-structure informatics	AP-HOPV 18 (北九州)	2018/1/30
397	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Towards development of heat tolerant and durable perovskite solar cells with stable high efficiency	AP-HOPV 18 (北九州)	2018/1/30
398	G. M. Kim, T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	High performance multi- cation/halide perovskite solar cells by controlling evaporation kinetics of intermediate states	AP-HOPV 18 (北九州)	2018/1/30
399	Y. Numata, Y. Sanehira, R. Ishikawa, H. Shirai, T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Methylammonium-free formamidinium-cesium- rubidium based triple cation perovskite solar cell	AP-HOPV 18 (北九州)	2018/1/30
400	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Materials chemistry for efficient perovskite solar cells	Giessen University Seminar (Giessen, Germany)	2018/1/31
401	近松真之	産業 技術 総合 研究所	有機系薄膜デバイスの開発	金沢大学 RSET 第一部門講演 会 (金沢)	2018/2/1

402	Atsushi Wakamiya	京都大学	Materials required for efficient perovskite solar cells	Core-to-core Symposium, Münster University (Münster, Germany)	2018/2/1
403	早瀬修二	九州工業大学	Enhancement of efficiency for perovskite solar cells with spike band structure	学振 175 委員会・有機系太陽電池分科会 第 6 回研究会 (東京)	2018/2/6
404	杉本学	熊本大学	Revealing roles of atoms/molecules/materials in perovskite solar cells: Electronic-structure informatics studies aiming to improve their energy-conversion efficiency	学振 175 委員会・有機系太陽電池分科会 第 6 回研究会 (東京)	2018/2/6
405	S. Uchida, L. Cojocaru, V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Determination of unique power conversion efficiency of perovskite solar cell showing hysteresis in the I-V curve under low light intensities	SEPV18 (Stability of Emerging Photovoltaics from Fundamental to Applications - A StableNextSol COST Action MP1307 Meeting) (Barcelona, Spain)	2018/2/20
406	S. Uchida, T. W. Kim, L. Cojocaru, T. Kondo, H. Segawa	東京大学	A new discovery of double phase coexistence inside the perovskite solar cells	ABXPV18 (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Rennes, France)	2018/2/28
407	Y. Nakamura, T. Matsushita, S. Yamaguchi, T. Kondo	東京大学	Defect chemistry analysis on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ toward conductivity control of lead-halide perovskites	ABXPV18 (Rennes, France)	2018/2/28
408	M. Schulz, Y. Udagawa, Y. Nakamura, K. Kimura, C. Yura, K. Yamamoto, T. Matsushita, T. Kondo, H. Kunugita, K. Ema	東京大学	Exciton structure of perovskite single crystals ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ and $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$)	ABXPV18 (Rennes, France)	2018/2/28
409	Gyu Min Kim, 宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	High performance multi cation/halide perovskite solar cells by regulating evaporation kinetics of precursor intermediates	電気化学会第 85 回大会 (東京理科大学/葛飾)	2018/3/11
410	宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	低温製膜法で作製するペロブスカイト太陽電池の高電圧・高効率化	電気化学会第 85 回大会 (東京理科大学/葛飾)	2018/3/11
411	Hiroshi Segawa	東京大学	Hysteresis-free perovskite solar cells made of potassium-doped organometal halide perovskite	GPVC2018 (Global Photovoltaic Conference 2018) (Gwangju, Korea)	2018/3/15

412	Tae Woong Kim, Ludmila Cojocaru, Satoshi Uchida, Tomonori Matsushita, Takashi Kondo, Hiroshi Segawa	東京 大学	Perovskite solar cells: crystal structure and interface architecture with high resolution TEM observations	GPVC2018 (Gwangju, Korea)	2018/3/15
413	平野智也, 別所毅隆, 城野亮太, 栗井文康, 唐澤国, 多田圭志, 古江美和子, 西山知慧, 米谷真人, 瀬川浩司	東京 大学	異なる A サイトカチオンを 有する有機金属ハライドペ ロブスカイト結晶の光学特 性	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 17p-G202-21	2018/3/17
414	高島駿, 中村唯我, 松下智紀, 近藤高志	東京 大学	真空蒸着法による CH ₃ NH ₃ PbI ₃ /CH ₃ NH ₃ PbCl ₃ ヘテ ロ積層構造の作製	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 18p-G205-1	2018/3/18
415	木村浩平, 松下智紀, 近藤高志	東京 大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイ ト型半導体のヘテロエピタ キシャル薄膜形成 (II)	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 18p-G205-2	2018/3/18
416	實平義隆, 沼田陽平, 池上和志, 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	高効率ペロブスカイト太陽 電池に向けた水蒸気加熱法 による ITO 基板上への高結 晶性酸化チタン膜の低温製 膜	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 18a-G202-4	2018/3/18
417	沼田陽平, 實平義隆, 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	anti-solvent がペロブスカ イト太陽電池の変換効率と デバイス耐久性に与える影 響	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 18a-G202-5	2018/3/18
418	古郷敦史, 村上拓郎, 近松真之	産業 技術 総合 研究 所	ヨウ化メチルアミン処理に よるペロブスカイト太陽電 池の高効率化	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 18a-G202-6	2018/3/18
419	田鎖光力, 米谷真人, 椿 俊太郎, 瀬川浩司, 和田雄二	東京 工業 大学	アナターゼ(001)結晶面を 露出する酸化チタン緻密薄 膜形成と有機無機ハイブリ ッドペロブスカイト太陽電 池特性	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 18p-P4-15	2018/3/18
420	古橋知樹, 米谷真人, 椿 俊太郎, 瀬川浩司, 和田雄二	東京 工業 大学	有機-無機ハイブリッドペ ロブスカイト多結晶薄膜形 成におけるマイクロ波照射 による低温迅速結晶化	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 18p-P4-24	2018/3/18
421	宮寺哲彦, 伊藤英輔, 吉田弘幸, 近松真之	産業 技術 総合 研究 所	正逆光電子分光による有機 鉛ペロブスカイト/ホール 輸送層界面の電子状態解析	第 65 回応用物理学会春季学 術講演会 (東京/早稲田) 20a-G202-7	2018/3/20
422	Saemi Takahashi, Satoshi Uchida, Hiroshi Segawa	東京 大学	Performance and characteristic analysis of perovskite solar cells	日本化学会第 98 春季年会 (日本大学/船橋) 2I1-13	2018/3/21
423	宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	ペロブスカイト光電変換技 術の現状と社会実装のビジ ョン	日本化学会第 98 春季年会 (日本大学/船橋) 3A4-03	2018/3/22
424	瀬川浩司	東京 大学	有機金属ハライドペロブス カイト太陽電池の高性能化	日本化学会第 98 春季年会 (日本大学/船橋) 3A4-25	2018/3/22

425	船木敬, 小野澤伸子, 村上拓郎, 古郷敦史, 近松真之	産業 技術 総合 研究所	ペロブスカイト太陽電池の 界面制御に用いるトリフェ ニルアミン誘導体の合成と その機能評価	日本化学会第 98 春季年会 (日本大学/船橋) 3PB-039	2018/3/22
426	Nobuko Onozawa- Komatsuzaki, Takuro Murakami, Takashi Funaki, Said Kazaoui, Masayuki Chikamatsu, Hitoshi Tampo, Wei-wei Wang, Manabu Sugimoto	産業 技術 総合 研究所	Effect of aromatic nitrogen heterocycles treatment on the interface between perovskite and the hole transport material in perovskite solar cells	日本化学会第 98 春季年会 (日本大学/船橋) 3PB-040	2018/3/22
427	Takuro N. Murakami	産業 技術 総合 研究所	Keys for high efficiency and commercialization of perovskite solar cells	Asian International Symposium – Photochemistry, 98th CSJ Annual Meeting (日本大学/ 船橋)	2018/3/23
428	S. Uchida	東京 大学	Perovskite solar cells: crystal structure and interface architecture with high resolution TEM observation	2018 MRS Spring Meeting (Phoenix, USA)	2018/4/2
429	G. M. Kim and T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	High efficiency perovskite solar cells based on kinetic control of Cs-mixed intermediate states during the crystallization	2018 MRS Spring meeting (Phoenix, USA)	2018/4/2
430	T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Progress of perovskite photovoltaics exploring for ultra-thin lightweight power source	2018 MRS Spring meeting (Phoenix, USA)	2018/4/2
431	若宮淳志	京都 大学	ペロブスカイト太陽電池の 動向	光産業技術振興協会 2018年 度第1回技術動向委員会	2018/5/24
432	S. Uchida, T.-W. Kim, L. Cojocar, H. Segawa	東京 大学	Superlattice inside the perovskite solar cells	HOPV18 (Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (Benidorm, Spain)	2018/5/28
433	T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide-based perovskite solar cells and their superior tolerance in the space environment	HOPV18 (10th International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics) (Perugia, Spain)	2018/5/29
434	若宮淳志	京都 大学	高効率ペロブスカイト太陽 電池：作製法のコツ	AMFPD-18 チュートリアル講 演	2018/6/3
435	Seigo Ito	兵庫 県立 大学	Stability issue of perovskite solar cells	AM-FPD18 (25th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices) (京 都)	2018/6/4
436	S. Kanaya, D. Erdmann, G. M. Kim, M. Ikegami, Y. Numata,	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Evaluation of perovskite solar cells under irradiation with respect to carrier lifetime and structure for space	WCPEC-7 (World Conference on Photovoltaic Energy Conversion)	2018/6/10

	T. Miyasaka, Y. Hazama, H. Akiyama, K. Suzuki, K. Osonoe, T. Yamamoto, Y. Miyazawa, H. Toyota, and K. Hirose		application		
437	Y. Wada, M. Maitani, V. S. Murugesan, D. Iso, J. Kim, T. Furuhashi, S. Tsubaki, T. Miyasaka, and H. Segawa	東京 工業 大学	Crystallization for organic-inorganic hybrid lead halide perovskite solar cells by interfacial microwave heating towards high efficiency and high through-put process	GRE2018 (Grand Renewable Energy 2018) (横浜)	2018/6/17
438	T. Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Stable high efficiency of perovskite solar cells fabricated under ambient air conditions	GRE2018 (横浜)	2018/6/17
439	S. Uchida	東京 大学	Electron microscope observation of perovskite solar cells	2018 KSM Annual Spring Conference (Jeju, Korea)	2018/6/20
440	Atsushi Kogo, Takuro N. Murakami, Masayuki Chikamatsu	産業 技術 総合 研究 所	CH ₃ NH ₃ I treatment of organic-inorganic perovskite crystals for high efficiency solar cells	GRE2018 (横浜)	2018/6/20
441	S. Kazaoui	産業 技術 総合 研究 所	Environmental stability of perovskite solar cells: effect of oxygen and humidity under 1 sun	GRE2018 (横浜)	2018/06/20
442	Ryota Jono, Hiroshi Segawa	東京 大学	Theoretical study of the cation effects on the band-gap of cubic lead triiodide perovskite materials	GRE2018 (横浜)	2018/6/20
443	Hyung Do Kim, Hideo Ohkita	京都 大学	Voltage loss in organic- inorganic perovskite solar cells	GRE2018 (横浜)	2018/6/20
444	T. Minemoto, Y. Kawano, T. Nishimura	立命 館大 学	Analysis of potential distribution to reduce carrier recombination in CH ₃ NH ₃ PbI ₃ based solar cells by device simulation	GRE2018 (横浜)	2018/6
445	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Molecular design & materials science for organic electronics	Kyung Hee University Seminar	2018/6/26
446	Shuzi Hayase	九州 工業 大学	Toward less Pb and Pb- free perovskite solar cells, -Photoelectric conversion in near IR region-	SISF 2018 (7th Sungkyun International Solar Forum) (Korea)	2018/6/26

447	Seigo Ito	兵庫県立大学	Studies of tandem solar cells and stability issue of perovskite solar cells	SISF 2018 (Korea)	2018/6/27
448	Atsushi Wakamiya	京都大学	Materials science for lead and lead-free perovskite solar cells	SISF 2018 (Korea)	2018/6/27
449	内田聡	東京大学	太陽の恵みを電気に換えて色素増感太陽電池&ペロブスカイト太陽電池	賢材研究会 (東京/駒場)	2018/6/27
450	T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Superior tolerance of perovskite thin film solar cells in the space radiation environment	SISF 2018 (Korea)	2018/6/28
451	T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide-based high voltage perovskite solar cells and their superior tolerance in the space environment	22nd International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy (IPS22)	2018/6/30
452	Seigo Ito	兵庫県立大学	Studies of Tandem Solar Cells and Stability Issue of Perovskite Solar Cells	NANO KOREA 2018 (16th International Nanotech Symposium & Nano-Convergence Exhibition) (Seoul, Korea)	2018/7/12
453	峯元高志, 西村昂人, 河野悠	立命館大学	カリウム添加ペロブスカイト太陽電池のシミュレーションによる動作解析	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(ホテルさっぽろ芸文館, 北海道)	2018/7
454	伊藤省吾	兵庫県立大学	塗布プロセスで作製するデバイスの研究開発	第13回 日本セラミックス協会 関西支部 学術講演会(姫路)	2018/7/27
455	S. Uchida, T.-W. Kim, L. Cojocaru, T. Kondo, H. Segawa	東京大学	A new discovery of superlattice inside the perovskite solar cells	IPS-22 (22th International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy) (Hefei, China)	2018/7/29
456	Seigo Ito	兵庫県立大学	Thermal degradation analysis of sealed perovskite solar cell with porous carbon electrode at 100 °C for 7000 h	IPS-22 (Hefei, China)	2018/7/30
457	Shuzi Hayase	九州工業大学	Halogenated perovskite solar cells with Sn	IPS-22 (Hefei, China)	2018/7/31
458	若宮淳志	京都大学	次世代のフィルム型太陽電池～ユニークな特性と広がる用途～	GEF産学共創パートナーシップ	2018/8/9
459	T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide-based high efficiency and durable perovskite solar cells: current progress and perspectives	MCARE 2018 (Conference on the Material Challenges in Alternative Renewable Energy) (Vancouver, Canada)	2018/8/21
460	Atsushi Wakamiya	京都大学	Organic and Inorganic Materials for Efficient	4DMS ECS	2018/8/27

			Pb and Pb-free Perovskite Solar Cells		
461	別所毅隆	東京大学	ペロブスカイト太陽電池：低コスト材料開発と低ヒステリシス光電変換特性	第15回 日本写真学会 光機能性材料セミナー（東京）	2018/8/31
462	若宮淳志	京都大学	高性能ペロブスカイト太陽電池のための半導体材料開発	第一回物質エネルギー化学懇談会	2018/9/2
463	Seigo Ito	兵庫県立大学	Studies of tandem solar cells and stability issue of perovskite solar cells	International Conference on Functional Nanomaterials and Nanodevices (Vienna, Austria)	2018/9/4
464	Atsushi Wakamiya	京都大学	Materials science for printable perovskite solar cells	The 9th International Symposium of Advanced Energy Science	2018/9/4
465	T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜大学	Perovskite solar cell, its challenges and progresses	SSDM2018 (International Conference on Solid State Devices and Materials) (東京)	2018/9/9-13
466	S. Uchida, T.-W. Kim, L. Cojocar, T. Kondo, H. Segawa	東京大学	Self-organized superlattice and phase coexistence inside the perovskite solar cell thin film	SSDM2018 (東京)	2018/9/12
467	宮寺哲彦, 阿内悠人, 小金澤智之, 矢口裕之, 吉田郵司, 近松真之	産業技術総合研究所	有機鉛ペロブスカイトの結晶成長制御と評価	第67回高分子討論会	2018/9/13
468	Kim Hyung Do, 梁川奈侑, 嶋崎愛, 遠藤克, 若宮淳志, 大北英生	京都大学	高分子太陽電池とペロブスカイト太陽電池における電圧損失	第67回高分子討論会	2018/9/13
469	宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜大学	ペロブスカイト太陽電池における化学/物理の学際研究の現状と将来	日本化学会化学系学協会東北大会	2018/9/16
470	宮寺哲彦	産業技術総合研究所	有機鉛ペロブスカイトの結晶成長	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18
471	阿部剛志, 池上和志, 宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜大学	低温製膜ペロブスカイト太陽電池における高結晶性酸化チタンを用いる透明導電性基板の表面処理法	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18-21
472	大曾根真輝, 池上和志, 宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜大学	ペロブスカイト太陽電池における透明電極基板への酸化チタン微粒子層の低温製膜とその抵抗評価	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18-21

473	戸邊智之、船山遼斗、 岩橋秀樹、遠藤聡人、 實平義隆、沼田陽平、 池上和志、宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	インクジェット法によるトリプルカチオンペロブスカイト層の成膜とその光電変換特性	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18-21
474	塚本絢穂、池上和志、 宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	高結晶性酸化チタンナノ微粒子をコンパクト層として用いる低温製膜ペロブスカイト太陽電池	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18-21
475	實平義隆、沼田陽平、 池上和志、宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	ペロブスカイト太陽電池の高効率化に向けたニオブ、スズ共ドーブ酸化チタン膜の水蒸気加熱製膜	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18-21
476	小藪江幹太、 池上和志、宮坂力、 小林大輔、山本知之、 廣瀬和之	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	FA _{0.85} CS _{0.15} PbI ₃ /MO ₂ (M = Ti, Sn) の熱安定性評価	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18-21
477	沼田陽平、宮坂力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	新規添加剤を用いた2段階法による高電圧型-FAPbBr ₃ ペロブスカイト太陽電池	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18-21
478	宮坂力（応用物理学会 業績賞受賞講演）	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	有機無機ペロブスカイト太陽電池の創製と高効率化 Creation and efficiency enhancement of organic inorganic perovskite solar cells	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/18-21
479	Kim Hyung Do, 若宮淳志、大北英生	京都 大学	鉛およびスズ系ペロブスカイト太陽電池における開放電圧の損失機構	第79回応用物理学会秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/20
480	西原佳彦、宮寺哲彦、 小金澤智之、 近松真之、吉田郵司	産業 技術 総合 研究所	ガスブロー法によって製膜されたヨウ化鉛ペロブスカイト薄膜のX線その場観察	第79回 応用物理学会 秋季学術講演会（名古屋）	2018/9/21
481	S. Uchida	東京 大学	A new discovery of superlattices inside the perovskite solar cells	MSCMP 2018 (9th International Conference Materials Science and Condensed Matter Physics) (Chisinau, Moldova)	2018/9/25
482	N. Ito , T. S. Riporess, K. Hamada, M. A. Kamarudin, Y. Ogomi, S. Iikubo, K. Kinoshita, G. Kapil, K. Bessho, H. Segawa, S. Qing, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase	九州 工業 大学	Perovskite solar cells with mixed metal SnPb and SnGe light harvesting layer	EU-PVSEC (Brussel)	2018/9/24-28

483	T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Photovoltaics of halide perovskites and perspectives of extensive applications from the ground to the universe	2018 MRS Fall Meeting	2018/9/27
484	S. Uchida, T-W. Kim, L. Cojocararu, T. Kondo and H. Segawa	東京大学	The new discovery of superlattice inside the perovskite solar cells	PSCO 2018 (4th International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronic) (Lausanne, Switzerland)	2018/10/1
485	Takuro N. Murakami	産業技術総合研究所	Interface modification for efficient charge transfer in perovskite solar cells	Photovoltaics for the 21st Century 14 in AiMES 2018 Meeting (Cancun, Mexico)	2018/10/2
486	S. Uchida	東京大学	Organo-metal halide perovskite solar cells with superlattice	SIWAN 8 (8th Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience) (Szeged, Hungary)	2018/10/8
487	若宮淳志	京都大学	2018年度第一回化学研究所イブニングセミナー	化学で挑む高性能塗布型太陽電池の開発	2018/10/10
488	村上拓郎	産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池の現状と将来	第2回FREA-日大連携シンポジウム「有機系太陽電池」 日本大学工学部郡山キャンパス	2018/10/18
489	Seigo Ito	兵庫県立大学	Studies of tandem solar cells and stability issue of perovskite solar cells	nanoGe Fall Meeting (Torremolinos, Spain)	2018/10/22
490	S. Uchida, L. Cojocararu, T.W. Kim, V.V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo and H. Segawa	東京大学	The evaluation of capacitive property of perovskite solar cells	ISOS-11 (International Summit on Organic and Hybrid Photovoltaics Stability) (Suzhou, China)	2018/10/25
491	Atsushi Wakamiya	京都大学	Development of materials for perovskite solar cells	The 18th Japan-Korea Joint Symposium on Chemistry	2018/11/2
492	Y. Kawano, A. Nakagawa, T. Nishikawa, T. Nishimura, J. Chantana, T. Minemoto	立命館大学	Device parameter extraction using single diode model for high efficiency perovskite solar cells	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV (Seoul, Korea)	2018/11
493	T. Minemoto, J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura	立命館大学	Mimicking perovskite solar cells by device simulation considering band gap grading	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV (Seoul, Korea)	2018/11
494	Shuzi Hayase	九州工業大学	Narrow band gap perovskite solar cell	7th Korea-Japan Joint Seminar on PV (Seoul, Korea)	2018/11/8
495	若宮淳志	京都大学	印刷でつくる次世代フィルム太陽電池の開発	青森県立名久井農業高校講演会	2018/11/9

496	Seigo Ito	兵庫県立大学	Stability issue of perovskite solar cells	APC2018 (10th Asian Photochemistry Conference) (Taipei, Taiwan)	2018/11/12
497	Seigo Ito	兵庫県立大学	Thermal degradation analysis of sealed perovskite solar cells with porous carbon electrodes at 100 °C for 7000 h	ENGE2018 (5th International Conference on Electronic Materials and nanotechnology for Green Environment) (Jeju, Korea)	2018/11/15
498	Atsushi Wakamiya	京都大学	New-generation solar cells based on organic and inorganic-hybrid materials	JSPS Seminar, "Chemistry for New Solar Energy Materials"	2018/11/15
499	早瀬修二	九州工業大学	有機系およびペロブスカイト太陽電池の現状と将来展望	有機エレクトロニクス材料研究会 九州大学	2018/11/20
500	Takeru Bessho	東京大学	Potassium-doped organometal halide perovskite and its photovoltaic device performance with hysteresis-free	The 2018 International Conference on Green Electrochemical Technologies (2018 ICGET-Tw) Taiwan	2018/11/23
501	Takuro N. Murakami	産業技術総合研究所	Interface modification and impedance spectroscopy for perovskite solar cells	The 2018 International Conference on Green Electrochemical Technologies, Tainan, Taiwan	2018/11/24
502	S. Uchida, T-W. Kim, L. Cojocar, T. Kondo and H. Segawa	東京大学	In-situ TEM observation of perovskite solar cells	2018 MRS Fall Meeting (Boston, USA)	2018/11/29
503	Fu Yang, Daisuke Hirotsu, Gaurav Kapil, Yaohong Zhang, Qing Shen, Shuzi Hayase	九州工業大学	Effect of GeI ₂ addition to inorganic CsPbI ₂ Br perovskite for enhancing efficiency and stabilization of α -phase at room temperature	2018 MRS Fall Meeting (Boston, USA)	2018/11/30
504	Gaurav Kapil, Kengo Hamada, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Qing Shen, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Takashi Minemoto, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase	九州工業大学	First report of more than 20% efficient tin/lead perovskite solar cells with a reduced potential loss	2018 MRS Fall Meeting (Boston, USA)	2018/11/30
505	S. Uchida, L. Cojocar, H. Segawa	東京大学	The evaluation of capacitive perovskite solar cells	JSPS #175 committee workshop (東京)	2018/12/5
506	大北英生	京都大学	ペロブスカイト太陽電池における開放電圧の損失機構	日本学術振興会第175委員会「有機系太陽電池分科会」	2018/12/5
507	Shuzi Hayase	九州工業大学	Perovskite solar cells with narrow band gap-halogenated perovskite solar cells with Sn	India-Japan workshop on biomolecular electronics & organic nanotechnology for environment preservation-2018 (IJWBME) India	2018/12/6

508	Shuzi Hayase	九州工業大学	SnPb and Pb-Free SnGe perovskite solar cells - Narrow band gap perovskite solar cell-	IIJWBME	2018/12/6
509	Atsushi Wakamiya	京都大学	Materials chemistry for efficient perovskite solar cells	The Joint Symposium between Taiwan and Japan 2018	2018/12/8
510	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池のための半導体材料開発	第48回太陽光発電プロジェクト講演会	2018/12/12
511	Kim Hyung Do, 若宮淳志, 大北英生	京都大学	高分子太陽電池とペロブスカイト太陽電池における光エネルギー損失	第3回フロンティア太陽電池セミナー	2018/12/13
512	若宮淳志	京都大学	半導体材料開発とペロブスカイト太陽電池への展開	第45回有機典型元素化学討論会	2018/12/14
513	Seigo Ito	兵庫県立大学	Stability issue of perovskite solar cells	APC 2018 (10th Asia Photochemistry Conference)	2018/12/16
514	Takeru Bessho	東京大学	Hysteresis-free perovskite solar cells made of potassium-doped organometal halide perovskite	NHSC-12 (12th Aseanian Conference on Nano-hybrid Solar Cells) (Shenzhen, China)	2018/12/19
515	Seigo Ito	兵庫県立大学	Stability issue of perovskite solar cells	NHSC-12 (Shenzhen, China)	2018/12/20
516	S. Uchida, T.-W. Kim, L. Cojocar, T. Kondo, H. Segawa	東京大学	Crystal structure and interface architecture of perovskite solar cells with high resolution TEM observation	NHSC-12 (Shenzhen, China)	2018/12/20
517	若宮淳志	京都大学	半導体材料の配向・配列制御とペロブスカイト太陽電池の高性能化	18-2有機エレクトロニクス研究会	2018/12/21
518	伊藤省吾	兵庫県立大学	色素増感型太陽電池とペロブスカイト太陽電池の研究開発	第81回マテリアルズ・テラリング研究会(京都大学)	2018/12/22
519	Atsushi Wakamiya	京都大学	Application of carbon materials for perovskite solar cells	International ERATO Itami Molecular Nanocarbon Symposium 2019	2019/1/15
520	Atsushi Wakamiya	京都大学	Purified materials for highly efficient perovskite solar cells	IRCCS The 2nd International Symposium	2019/1/25
521	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Compositional engineering of cost efficient durable perovskite solar cells	IPEROP 19 (Asia-Pacific International Conference on Perovskite and Organic Photovoltaics and Optoelectronics) (京都)	2019/1/27-29
522	Gyumin Kim, Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Determination of optoelectronic properties of perovskites by evaporation kinetics of DMSO depending on the perovskite compositions	IPEROP 19 (京都)	2019/1/27-29

523	E. Smecca, G. Mannino, I. Deretzis, S. Sanzaro, A. La Magna, Y. Numata, T. Miyasaka, A. Alberti	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Structural and optical behaviour of MAPbI ₃ layers in nitrogen and humid air	IPEROP 19 (京都)	2019/1/27- 29
524	T. Miyadera, Y. Auchi, K. Yamamoto, N. Ohashi, T. Koganezawa, Y. Yoshida, M. Chikamatsu	産業 技術 総合 研究 所	Crystallization control and real-time analysis of organolead-halide perovskite by IR-laser deposition	IPEROP 19 (京都)	2019/01/29
525	T. Funaki, N. Onozawa-Komatsuzaki, A. Kogo, M. Chikamatsu	産業 技術 総合 研究 所	Evaluation of triphenylamine derivatives for interfacial modification in perovskite solar cells -effect of substituents on triphenylamine moiety-	IPEROP 19 (京都)	2019/1/29
526	T. N. Murakami, M. Kim, C-C. Lin, A. Kogo, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業 技術 総合 研究 所	Characterization of perovskite solar cells with impedance spectroscopy	IPEROP 19 (京都)	2019/1/29
527	Hyung Do Kim, Atsushi Wakamiya, Hideo Ohkita	京都 大学	Open-circuit voltage loss in organic- inorganic halide perovskite solar cells	IPEROP 19 (京都)	2019/1/29
528	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Development of perovskite solar cells based on materials chemistry: Foundation of PSC startup supported by Kyoto University	International Workshop on Evaluation Method for Perovskite Solar Cells (京 都)	2019/1/30
529	S. Uchida, L. Cojocar, U, T.W. Kim, V.V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo and H. Segawa	東京 大学	Evaluation method for capacitive perovskite solar cells	International Workshop on Evaluation Method for Perovskite Solar Cells (京 都)	2019/1/30
530	内田 聡	東京 大学	有機ハロゲン化鉛ペロブス カイトを用いた超格子太陽 電池に向けて	東京理科大学総合研究院太陽 光発電技術研究部門第9回シ ンポジウム (東京理科大学)	2019/1/30
531	S. Uchida	東京 大学	Practical use and industry oriented emerging organic solar cell technology	AMCEHA2019 (International Conference on Advanced Materials for Clean Energy and Health Applications) (Jaffna, Sri Lanka)	2019/2/6
532	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Semiconductors for electronics based on molecular aggregation control	JSPS Core to Core & GIR Symposium	2019/2/7

533	M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Control of semiconductor interfaces of perovskite and organic solar cells	6th Korea-Japan Joint Symposium on Advanced Solar Cells 2019 (日光)	2019/02/14
534	Atsushi Wakamiya	京都大学	Electronic materials for highly efficient perovskite solar cells	The 2nd Symposium for World Leading Research Centers -Materials Science and Spintronics-	2019/2/16
535	T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Enhancing photovoltaic performance and stability of all-inorganic and lead-free absorbers	NIPH019 (International Conference on Perovskite Solar Cells, Photonics, and Optoelectronics) (Jerusalem, Israel)	2019/2/26
536	若宮淳志	京都大学	塗布型半導体材料を用いた太陽電池の開発研究	リサーチユニット研究会 機能性固体材料の最前線	2019/3/6
537	宮寺哲彦	産業技術総合研究所	有機鉛ハライドペロブスカイトの結晶成長	千葉大学テニユアトラック教員主催セミナー：ハロゲン化金属ペロブスカイト研究の最前線	2019/3/6
538	古郷敦史、村上拓郎、近松真之	産業技術総合研究所	ヨウ化メチルアンモニウム処理によるペロブスカイト結晶の組成制御と高効率太陽電池の開発	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019/3/9
539	Kim Hyung Do, 大北英生	京都大学	鉛系ペロブスカイト太陽電池における曲線因子の支配要因	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019/3/9
540	G. Kim and T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Toward high performance and stable perovskite solar cells by the process from regulation of solvent evaporation to the Ge-doping in B site	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019/3/9-12
541	小藪江幹太, 池上和志, 宮坂力, 小林大輔, 山本知之, 廣瀬和之	東京大学 桐蔭 横浜 大学	X線回折法を用いた $\text{FA}_{0.85}\text{Cs}_{0.15}\text{PbI}_3$ 分解過程の評価	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019/3/9-12
542	沼田陽平, 實平義隆, 石川良, 白井肇, 宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	ルビジウムドープ高耐熱型ペロブスカイト太陽電池	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019/3/9-12
543	實平義隆, 柴山直之, 沼田陽平, 池上和志, 宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	バンドギャップのチューニングによるNbドープ酸化チタン/ペロブスカイト太陽電池の高効率化	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019/3/9-12
544	宮坂力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	「第19回業績賞 (研究業績) 受賞記念講演」 有機無機ペロブスカイト太陽電池の創製と高効率化	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019/3/9-12

545	Seigo Ito	兵庫県立大学	How to use synchrotron soft X-ray for analysis of perovskite solar cell	GPVC 2019 (Global Photovoltaic Conference 2019)	2019/3/14
546	船木 敬、小野澤伸子、村上拓郎、古郷敦史、近松真之	産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池に用いるトリフェニルアミン誘導体の合成 - トリフェニルアミン部分への置換基導入効果の検討 -	日本化学会第99春年会 (甲南大学)	2019/3/16
547	宮坂力	東京大学 桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池の効率と耐久性向上	日本化学会第99春季年会 (甲南大学)	2019/3/16
548	Jiewei Liu, Masashi Ozaki, Shinya Yakumaru, Taketo Handa, Ryosuke Nishikubo, Yoshihiko Kanemitsu, Akinori Saeki, Yasujiro Murata, Richard Murdey, Atsushi Wakamiya	京都大学	Improving the efficiency and reproducibility of lead-free perovskite solar cells with high purity precursors and modified solution process	日本化学会第99春季年会 (甲南大学)	2019/3/16
549	チョン ミンアン, マーディー リチャード, 若宮淳志	京都大学	酸素架橋トリフェニルアミン骨格を用いた透明正孔輸送性材料の開発	日本化学会第99春季年会 (甲南大学)	2019/3/16
550	若宮淳志	京都大学	材料化学で挑むペロブスカイト太陽電池の実用化	日本化学会春季年会, ATP講演, サステナブル社会構築のためのエネルギー化学	2019/3/16
551	Atsushi Wakamiya	京都大学	Materials science for highly efficient perovskite solar cells	70th CEMS colloquium	2019/3/27
552	古郷敦史、村上拓郎、近松真之	産業技術総合研究所	ハロゲン化メチルアンモニウム後処理によるペロブスカイト結晶の組成変化と発電特性への影響	電気化学会第86回大会 (京都)	2019/3/29
553	村上拓郎, Kim Myoung, Lin Ching-Chang, 古郷敦史, 近松真之, 瀬川浩司	産業技術総合研究所	インピーダンススペクトルによるペロブスカイト太陽電池の評価	電気化学会第86回大会 (京都)	2019/03/29
554	Shuzi Hayase	電気通信大学	Recent progress on narrow band gap perovskite solar cells	IEEE ICASI 2019 (IEEE International Conference on Applied System Innovation) (北九州)	2019/4/12
555	Hyung Do Kim, Hideo Ohkita	京都大学	Voltage loss in polymer solar cells and perovskite solar cells	2019 MRS Spring Meeting & Exhibit	2019/4/24
556	Tetsuhiko Miyadera, Yuto Auchi, Kohei Yamamoto, Noboru Ohashi, Tomoyuki Koganezawa, Yuji Yoshida, Masayuki Chikamatsu	産業技術総合研究所	Real-time crystallization analysis of organolead-halide perovskite	HOPV2019 (Hybrid Organic Photovoltaics 2019) Roma, Italy	2019/5/13

557	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池の 開発：研究最前線	近畿化学協会エレクトロニクス分科会 第1回研究会「古くて新しい材料：有機・無機ペロブスカイト研究の新潮流」	2019/5/13
558	Shuzi Hayase	電気通信大学	Expected innovative materials for printable solar cells	Lecture, China, Hangzhou, China Jiliang University	2019/5/14
559	Hiroshi Segawa	東京大学	Material engineering toward high performance perovskite solar cells	ICoPP 2019 (International Conference on Photocatalysis and Photoenergy) (Seoul, Korea)	2019/5/24
560	Shuzi Hayase	電気通信大学	Wide and narrow gap perovskite solar cells	ICoPP 2019 (Incheon, Korea)	2019/5/24
561	Takuro N. Murakami	産業技術総合研究所	Application of impedance spectroscopy for perovskite solar cells	235th ECS Meeting 2019 (Dallas, Texas, USA)	2019/5/26
562	Hideo Ohkita, Hyung Do Kim	京都大学	Metal halide-based perovskites for highly efficient photovoltaics	2019 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR2019)	2019/6/4
563	若宮淳志	京都大学	塗布型ペロブスカイト太陽電池：材料の結晶成長・配向制御に基づく高性能化	2019年日本結晶成長学会 特別講演会	2019/6/7
564	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池：化学で挑む実用化	広島大学大学院工学研究科講演会	2019/6/11
565	T. Kondo, K. Kimura, T. Matsushita	東京大学	Epitaxy of lead halide perovskites	EMN Epitaxy 2019 (Amsterdam, Netherlands)	2019/6/19
566	Atsushi Wakamiya	京都大学	Chemical approaches toward efficient lead and lead-free perovskite solar cells	SISF2019 (8th Sungkyun International Solar Forum 2019) (Seoul, Korea)	2019/6/19
567	Hiroshi Segawa	東京大学	Material engineering toward high performance perovskite solar cells	SISF 2019 (Seoul, Korea)	2019/6/21
568	Shuzi Hayase	電気通信大学	Wide and narrow bandgap perovskite solar cells	SISF 2019 (Seoul, Korea)	2019/6/21
569	Seigo Ito	兵庫県立大学	How to use synchrotron soft X-ray for analysis of perovskite solar cell	SISF 2019 (Seoul, Korea)	2019/6/22
570	Yongyoon Cho, Hyung Do Kim, Hideo Ohkita, Shujuan Huang, Anita Ho-Baillie	京都大学	Thermal stability improvement in perovskite solar cells without 4-tert-butylpyridine	ICPST-36 (36th International Conference of Photopolymer Science and Technology)	2019/6/26
571	Atsushi Wakamiya	京都大学	Materials for efficient perovskite solar cells	ICPST-36	2019/6/26
572	Richard Murdey, Masashi Ozaki, Yasuhisa Ishikura, Minh Anh Truong, Jiewei Liu, Tomoya Nakamura,	京都大学	Aging effects in mixed composition metal halide perovskites characterized by electrical impedance	MBE10 (10th International Conference on Molecular Electronics & BioElectronics)	2019/6/26

	Atsushi Wakamiya				
573	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池：実用化に向けた取り組み	JACI エネルギー・資源技術部会 エネルギー分科会 勉強会	2019/6/27
574	Tae Woong Kim, Ludmila Cojocaru, Satoshi Uchida, Takashi Kondo, Hiroshi Segawa	東京大学	Organometal halide perovskite based superlattice solar cells	ICMAT2019 (10th International Conference on Materials for Advanced Technologies) (Singapore)	2019/6/23-28
575	Seigo Ito	兵庫県立大学	How to use synchrotron soft X-ray for analysis of perovskite solar cell	ICMAT2019 (Singapore)	2019/6/29
576	別所毅隆、多田圭志、 瀬川浩司	東京大学	カリウムドーブ有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の高性能化	日本学術振興会 第175委員会 第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（宮崎）	2019/7/4-5
577	Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Qing Shen, Taro Toyoda, Takashi Minemoto, Takuro N. Murakami, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase	電気通信大学	Strain engineering in tin-lead perovskite solar cells to improve the power conversion efficiency Reduced strain by cesium addition leading to the improvement in the efficiency of tin-lead mixed perovskite solar cells	16th Next-generation solar power generation system symposium (宮崎)	2019/7/5-6
578	Takeru Bessho	東京大学	The recognizing and resolving of issues for high efficiency perovskite solar cells	Summer School on Organic Electronics at Bordeaux University (Bordeaux, France)	2019/7/11
579	Atsushi Wakamiya	京都大学	Molecular orientation control of organic semiconductors for organic electronics	ISNA-18 (18th International Symposium on Novel Aromatic Compounds)	2019/7/23
580	瀬川浩司	東京大学	再生可能エネルギーの主役に躍り出た太陽光発電とその新技術	電気通信大学i-PERCシンポジウム2019 ～革新的次世代太陽電池の大学での研究と企業実用化の動向～（電気通信大）	2019/8/2
581	若宮淳志	京都大学	研究成果の実用化にむけた取り組みについて～研究者から学ぶ～	ものづくり企業のための産学連携セミナーin 宇治～京都大学の産学連携事例から学ぶ～	2019/8/27
582	Atsushi Kogo, Masayuki Chikamatsu	産業技術総合研究所	Performance enhancement of perovskite solar cells based on composition tuning by post-treatment	ECME 2019 (15th European Conference on Molecular Electronics) (Sweden)	2019/8/28
583	若宮淳志	京都大学	化学で挑む高性能塗布型太陽電池の開発：ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けた取り組み	第16回光機能性材料セミナー「光機能性材料の新機軸—その研究手法から新しい応用展開まで」	2019/8/29
584	Atsushi Wakamiya	京都大学	Introduction of the laboratory of molecular aggregation analysis	モンゴル学生リサーチ	2019/9/1

585	K. Kimura, T. Matsushita, Z. Liu, T. Kondo	東京 大学	Critical thickness of epitaxial $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{IBr})_3$ thin films formed on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ single crystal substrates	SSDM2019 (International Conference on Solid State Devices and Materials) (名 古屋)	2019/9/2-5
586	Yoshihiko Nishihara, Nobuko Onozawa- Komatsuzaki, Hiroaki Tachibana, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida	産業 技術 総合 研究 所	Influence of p-type doping to dithiophene- benzene copolymer as hole transporting layers in perovskite solar cells	SSDM2019 (名古屋)	2019/9/3
587	中村智也	京都 大学	薄膜エレクトロニクスのため のn型有機半導体の分子 配向制御	第16回SPring-8産業利用報告 会	2019/9/5
588	S. Hayase, A. Kamarudin, G. Kapil, Ng, Huey, N. Nishimura, T. Ripolles, K. Hamada, Y. Ogomi, F. Yang, S. Iikubo, K. Kinoshita, K. Bessho, H. Segawa, S. Qing, K. Yoshino, T. Minemoto	電気 通信 大学	Pb free and Pb less perovskite solar cells with narrow, band gap- aiming at high efficiency and all perovskite tandem solar cells	EU-PVSEC	2019/9/11
589	若宮淳志	京都 大学	塗ってつくるペラペラ太陽 電池—ペロブスカイト太陽 電池の開発最前線—	科学カフェ京都 第165回定例 会	2019/9/14
590	Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Qing Shen, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Takashi Minemoto, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase	電気 通信 大学	Research to obtain high efficiency in tin-lead perovskite solar cells	80th JSAP Autumn Meeting (札幌)	2019/9/18- 21
591	西原佳彦、 小野澤伸子、橘浩昭、 近松真之、吉田郵司	産業 技術 総合 研究 所	ペロブスカイト太陽電池に おけるジチオフェン-ベン ゼン共重合体正孔輸送層へ のP型ドーピング効果	第80回応用物理学会秋季学術 講演会 (札幌)	2019/9/19
592	Yongyoon Cho, Hyung Do Kim, Jianghui Zheng, Jueming Bing, Meng Zhang, Yong Li, Martin A. Green, Shujuan Huang, Hideo Ohkita, Anita W. Y. Ho-Baillie	京都 大学	Efficiency improvement in perovskite solar cells by aging and passivation	第80回応用物理学会秋季学術 講演会 (札幌)	2019/9/19
593	R. Murdey, M. A. Truong, K. Otsuka, R. Hashimoto, T. Nakamura, A. Wakamiya	京都 大学	Mixed-composition metal halide perovskite solar cells for ambient light energy harvesting: Low light current-voltage behavior	第80回応用物理学会秋季学術 講演会 (札幌)	2019/9/19

594	吉田郵司、宮寺哲彦、西原佳彦、近松真之、小金澤智之	産業技術総合研究所	ガスブロー法によって製膜されたヨウ化鉛ペロブスカイト薄膜のX線その場観察(II)：前駆体結晶の配向化	第80回応用物理学会秋季学術講演会（札幌）	2019/9/20
595	Hyung Do Kim, 若宮淳志, 大北英生	京都大学	高分子太陽電池と鉛系ペロブスカイト太陽電池における開放電圧の損失機構	第80回応用物理学会秋季学術講演会（札幌）	2019/9/21
596	大北英生, Hyung Do Kim	京都大学	ハロゲン化金属ペロブスカイト太陽電池における電圧損失	第68回高分子討論会（福井）	2019/9/26
597	吉田郵司、宮寺哲彦、西原佳彦、近松真之	産業技術総合研究所	ガスブロー法によるヨウ化鉛ペロブスカイト前駆体結晶の配向特性	第68回高分子討論会（福井）	2019/9/26
598	宮寺哲彦、阿内悠人、山本晃平、大橋昇、小金澤智之、矢口裕之、吉田郵司、近松真之	産業技術総合研究所	真空プロセスによる鉛ハライドペロブスカイトの配向制御	第68回高分子討論会（福井）	2019/9/26
599	瀬川浩司	東京大学	再生可能エネルギーの主役に躍り出た太陽光発電とその新技術	光機能材料研究会第75回講演会「光触媒・太陽光発電技術の到達点と今後の展望」（東京理科大）	2019/10/4
600	小野澤伸子	産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池の要素技術の開発	学振第175委員会 Win PVJ分科会	2019/10/11
601	Yongyoon Cho, Hyung Do Kim, Jianghui Zheng, Jueming Bing, Yong Li, Meng Zhang, Martin A. Green, Atsushi Wakamiya, Shujuan Huang, Hideo Ohkita, Anita W.Y. Ho-Baillie	京都大学	Ambient storage induced efficiency improvements in perovskite solar cells	第2回 先端ナノミクス若手研究者交流会	2019/10/15
602	福本栞菜、木下卓巳、瀬川浩司	東京大学	Ybドーブ金属鉛ハライドペロブスカイトにおける多励起子生成	日本化学会第9回CSJ化学フェスタ（東京）P4-013	2019/10/16
603	藤生浩綺、Samy Almosny、別所毅隆、瀬川浩司	東京大学	MAフリー有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の高効率化	日本化学会第9回CSJ化学フェスタ（東京）P4-111	2019/10/16
604	高橋冴実、木下卓巳、瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の高性能化へ向けた結晶の制御	日本化学会第9回CSJ化学フェスタ（東京）P5-098	2019/10/16
605	前川貴俊、Gaurav Kapil、早瀬修二、別所毅隆、瀬川浩司	東京大学	近赤外吸収Sn-Pb複合有機金属ハライドペロブスカイト材料開発と太陽電池への応用	日本化学会第9回CSJ化学フェスタ（東京）P6-116	2019/10/16
606	Seigo Ito	兵庫県立大学	How to use synchrotron soft X-ray for analysis of perovskite solar cell	SPASEC-24 (24th International Conference on Semiconductor Photocatalysis & Solar	2019/10/19

				Energy Conversion)	
607	Hyung Do Kim, Takuya Ide, Hideo Ohkita	京都 大学	Difference in Voltage Loss between Polymer Solar Cells and Perovskite Solar Cells	The Polymer Society Korea 2019 Fall Meeting	2019/10/24
608	Hyung Do Kim	京都 大学	Difference in Photon Energy Loss between Tin- based and Lead-based Perovskite Solar Cells	2019 KICHe Fall Meeting and International Symposium	2019/10/25
609	若宮淳志	京都 大学	ペロブスカイト太陽電池の 基礎から実用化に向けて～ 有機化学からの挑戦～	北海道大学Ambitious 物質科 学セミナー	2019/10/31
610	Takeru Bessho	東京 大学	The effect of potassium to organometal halide perovskite property: crystal, layer and photovoltaics	PVSEC-29 (29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering) (Xi'an, China)	2019/11/7
611	瀬川浩司	東京 大学	革新的低製造コスト太陽電 池の先端技術開発	太陽光発電協会 第36回太陽 光発電シンポジウム「太陽光 発電の主力電源化に向けた道 筋」(東京)	2019/11/7
612	Shuzi Hayase	電気 通信 大学	Sn-perovskite solar cells with narrow gap - toward tandem and Pb free perovskite solar cells	PVSEC-29 (Xian, China)	2019/11/8
613	Seigo Ito	兵庫 県立 大学	Thermal stability issue of perovskite solar cells	PVSEC-29 (Xian, China)	2019/11/8
614	Hyung Do Kim, Hideo Ohkita	京都 大学	Difference in Photon Energy Loss between Polymer Solar Cells and Perovskite Solar Cells	3rd KU-VUW Joint Workshop	2019/11/12
615	若宮淳志	京都 大学	ペロブスカイト太陽電池～ 最新研究成果と実用化への 取り組み～	ASTEM開所30周年記念 ACT京 都シンポジウム	2019/11/12
616	Y. Nakamura, N. Shibayama, A. Hori, T. Matsushita, H. Segawa, T. Kondo	東京 大学	Lattice parameters of lead halide perovskite alloy $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{I}_{1-x}\text{Br}_x)_3$	The 8th NextPV International Workshop (東 京)	2019/11/17
617	Shuzi Hayase	電気 通信 大学	Perovskite solar cells with narrow band gap or wide band gap -toward tandem and Pb free perovskite solar cells-	The 8th NextPV International Workshop (東 京)	2019/11/19
618	Atsushi Wakamiya	京都 大学	Materials chemistry for printable solar cells	The 4th Yoshida Prize Symposium	2019/11/19
619	瀬川浩司	東京 大学	高性能ペロブスカイト太陽 電池に向けた材料工学/ Material engineering toward high performance perovskite solar cells	日本学術振興会第175委員会 ペロブスカイト太陽電池分科 会 第8回研究会 (京都)	2019/11/21
620	Hyung Do Kim, Yongyoon Cho, Hideo Ohkita	京都 大学	Approaches for suppressing voltage loss in lead-based perovskite	日本学術振興会第175委員会 ペロブスカイト太陽電池分科 会 第8回研究会 (京都)	2019/11/21

			solar cells		
621	Atsushi Wakamiya	京都大学	Fabrication and performance of perovskite solar cells using purified precursor materials	日本学術振興会第175委員会ペロブスカイト太陽電池分科会第8回研究会（京都）	2019/11/21
622	Seigo Ito	兵庫県立大学	Stability issue of perovskite solar cells	ACPES-10	2019/11/25
623	大塚健斗, Jiewei Liu, 半田岳人, 中村智也, Richard Murdey, 金光義彦, 若宮淳志	京都大学	高純度化材料を用いたスズ系ペロブスカイト半導体膜の作製と物性評価	第4回フロンティア太陽電池セミナー	2019/11/25
624	中西英太, 若宮淳志, 佐伯昭紀	京都大学	GA-FA-PEA 混合Sn ペロブスカイトの光電気特性と電気化学物性	第4回フロンティア太陽電池セミナー	2019/11/25
625	Yoshihiko Nishihara, Nobuko Onozawa-Komatsuzaki, Hiroaki Tachibana, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida	産業技術総合研究所	Effect of p-type doping to dithiophene-benzene copolymer as hole transporting layers in perovskite solar cells	2019 MRS Fall Meeting (Boston, USA)	2019/12/2
626	Gaurav Kapil, Takeru Bessho, Takumi Kinoshita, Qing Shen, Taro Toyoda, Takuro N. Murakami, Takashi Minemoto, Hiroshi Segawa, Shuzi Hayase	電気通信大学	Research pertaining to fabricate 20.4% efficient tin/lead perovskite solar cells	2019 MRS Fall Meeting (Boston, USA)	2019/12/1-6
627	橋本壘人, チョン ミンアン, 中村智也, マーディー リチャード, 若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト層との界面構造制御を志向した正孔輸送性材料の開発	第46回有機典型元素科学討論会	2019/12/6
628	大塚健斗, Jiewei Liu, 半田岳人, 中村智也, Richard Murdey, 金光義彦, 若宮淳志	京都大学	高純度化材料を用いたスズ系ペロブスカイト半導体のバンド構造制御	第46回有機典型元素科学討論会	2019/12/6
629	橋本壘人, チョン ミンアン, 中村 智也, マーディー リチャード, 若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト層との界面構造制御を志向した正孔輸送性材料の開発	第46回有機典型元素科学討論会	2019/12/6
630	Shuzi Hayase	電気通信大学	Narrow band gap perovskite solar cells containing Sn	2019 MRS Fall Meeting (Boston, USA)	2019/12/7
631	早瀬修二	電気通信大学	有機太陽電池の進展と将来展望	第236回JOEM研究会 有機エレクトロニクスのランドスケープ	2019/12/10
632	Tomoya Nakamura, Shinya Yakumaru, Jiewei Liu, Takeo Handa, Yoshihiko Kanemitsu, Richard Murdey,	京都大学	Tin-based perovskite solar cells using precursor materials purified by reducing agents	MRM2019 (Materials Research Meeting 2019) (横浜)	2019/12/10

	Atsushi Wakamiya				
633	Masayuki Chikamatsu	産業技術総合研究所	Precise control of semiconductor interfaces in perovskite solar cells	MRM2019 (横浜)	2019/12/12
634	Seigo Ito	兵庫県立大学	How to use synchrotron soft X-ray for analysis of perovskite solar cell	MRM2019 (横浜)	2019/12/12
635	Hyung Do Kim, Hideo Ohkita	京都大学	Photovoltaic parameters in lead-based perovskite solar cells	MRM2019 (横浜)	2019/12/12
636	Hideo Ohkita, Hyung Do Kim, Yongyoon Cho	京都大学	Open-circuit voltage in tin-based perovskite solar cells	MRM2019 (横浜)	2019/12/12
637	Tomoya Nakamura, Shinya Yakumaru, Jiewei Liu, Yoshihiko Kanemitsu, Richard Murdey, Atsushi Wakamiya	京都大学	Tin-based perovskite solar cells using precursor materials purified by reducing agents	MRM2019 (横浜)	2019/12/12
638	Minh Anh Truong, Richard Murdey, Atsushi Wakamiya	京都大学	Transparent organic hole-transporting materials containing partially oxygen-bridged triphenylamine skeletons: Synthesis and application for perovskite solar cells	MRM2019 (横浜)	2019/12/13
639	Tetsuhiko Miyadera, Yuto Auchi, Kohei Yamamoto, Noboru Ohashi, Tomoyuki Koganezawa, Hiroyuki Yaguchi, Yuji Yoshida, Masayuki Chikamatsu	産業技術総合研究所	Crystal growth dynamics of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ in vacuum deposition process	MRM2019 (横浜)	2019/12/13
640	Takeru Bessho	東京大学	Study of potassium doping to the organometal halide perovskite properties and less hysteresis photovoltaics with monolithic structure	MRM2019 (横浜)	2019/12/10-14
641	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池：実用化への取り組み	CMC出版+Andtech共催セミナー	2019/12/24
642	Takeru Bessho	東京大学	Material amelioration of organometal halide perovskite by potassium-doping and its efficient photovoltaics	IPEROP20 (Asia-Pacific International Conference on Perovskite, Organic Photovoltaics and Optoelectronics) (つくば)	2020/1/21
643	Atsushi Kogo, Tetsuhiko Miyadera, Masayuki Chikamatsu	産業技術総合研究所	Composition tuning of organic-inorganic perovskite crystals by post-treatment for high efficiency solar cells	IPEROP20 (つくば)	2020/1/21

644	Nobuko Onozawa-Komatsuzaki, Yoshihiko Nishihara, Masayuki Chikamatsu, Yuji Yoshida	産業 技術 総合 研究 所	Effect of FABr passivation on the interface of perovskite/hole-transporting layer on perovskite solar cells with donor-acceptor conjugated polymer	IPEROP20 (つくば)	2020/1/21
645	Ching Chang Lin, Takuro N. Murakami, Masayuki Chikamatsu, Takeru Bessho, Hiroshi Segawa	東京 大学	A facile ionic compound modification of SnO ₂ ETL to enhance the performance perovskite solar cell	IPEROP20 (つくば)	2020/1/21
646	Tetsuhiko Miyadera, Yuto Auchi, Kohei Yamamoto, Noboru Ohashi, Tomoyuki Koganezawa, Hiroyuki Yaguchi, Yuji Yoshida, Masayuki Chikamatsu	産業 技術 総合 研究 所	Crystal growth control and real-time analysis of organolead-halide perovskite	IPEROP20 (つくば)	2020/1/21
647	Satoshi Uchida, Ludmila Cojocaru, Hiromi Tobita, Viraji Jayaweera, Shoji Kaneko, Hiroshi Segawa	東京 大学	Evaluation of interface junction capacitance of perovskite solar cells by direct current measurement	IPEROP20 (つくば)	2020/1/20- 22
648	Ryota Jono, Hiroshi Segawa	東京 大学	Structure-bandgap relation on the lead halides based perovskite materials	IPEROP20 (つくば)	2020/1/20- 22
649	Hideo Ohkita	京都 大学	Charge recombination losses in perovskite solar cells	IPEROP20 (つくば)	2020/1/22
650	Richard Murdey, Minh Anh Truong, Kento Otsuka, Ruito Hashimoto, Tomoya Nakamura, Atsushi Wakamiya	京都 大学	Light intensity dependence Study of mixed-composition perovskite solar cells	IPEROP20 (つくば)	2020/1/22
651	西原佳彦、 小野澤伸子、橘浩昭、 近松真之、吉田郵司	産業 技術 総合 研究 所	ペロブスカイト太陽電池におけるジチオフェン-ベンゼン共重合体正孔輸送層へのP型ドーピングの影響	有機エレクトロニクス研究会 (OME)、金沢	2020/1/24
652	瀬川浩司	東京 大学	産官学連携で進める再エネ新技術開発—世界と勝負するために	RIETI 公開BBLセミナー「産官学連携で進める再エネ新技術開発—世界と勝負するために」(東京)	2020/1/29
653	近藤高志	東京 大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイトのヘテロエピタキシー	表面真空学会研究例会 (東京)	2020/1/29
654	宮寺哲彦	産業 技術 総合 研究 所	有機鉛ハライドペロブスカイトの結晶成長と放射光解析	日本表面真空学会 2020年1月研究例会「ペロブスカイト太陽電池と真空・表面」	2020/1/29

655	若宮淳志	京都大学	高性能ペロブスカイト太陽電池のための材料科学	関西学院大学大学院理工学研究科 パイスター分子制御による未来型物質変換研究拠点	2020/1/29
656	Atsushi Wakamiya	京都大学	Purified materials for Sn- and Pb-halide perovskite solar cells	The 1st Workshop of Energy Frontier Institute, SKKU@Korea	2020/2/5
657	早瀬修二	電気通信大学	全タンデムペロブスカイト太陽電池の開発研究に向けて	ヨウ素学会 CIRICセミナー	2020/2/19
658	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けた材料化学アプローチ	CIRICセミナーNo. 4	2020/2/19

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学 桐蔭横浜大学	日本初の期待の新人、ペロブスカイト太陽電池(監修：宮坂)	日経サイエンス 2015年10月号 83 ページ	2015/10
2	東京大学	“日本発” 革新技術で貢献 “ペロブスカイト” 本命に	日刊工業新聞 32 面	2015/11/4
3	東京大学	光発電特性に優れる日本初の太陽電池、世界に	日刊工業新聞 第2部 7 面	2015/11/12
4	東京大学	東大、ペロブスカイト・広帯域色素増感太陽電池で変換効率 21.5%の世界最高達成	日刊工業新聞/日刊工業新聞 Web http://www.nikkan.co.jp/articles/view/00364402	2015/11/13
5	東京大学	【革新！温暖化対策#02】塗るとクルマで発電ができる日本発の太陽電池「ペロブスカイト」世界各地で効率更新。東大が世界新	ニュースイッチ https://newswitch.jp/p/2654	2015/11/16
6	東京大学	有機系太陽電池で世界最高効率 東大、事業化目指す	日本経済新聞 電子版 http://www.nikkei.com/article/DGXLZ094035640V11C15A1TJM00/	2015/11/16
7	京都大学	ペロブスカイト太陽電池 東京化成、関連材料を拡充	化学工業日報 1 面	2015/11/18
8	東京大学	太陽電池の新星登場で、街中で発電が可能に：ビルや電車が“発電所”になる日	Forbes Japan 2016年2月号 76 ページ	2016/2/1
9	東京大学	ペロブスカイト太陽電池 変換効率向上 実用化へ弾み	日経産業新聞 8 面 先端技術欄	2016/2/12
10	東京大学 桐蔭横浜大学	薄膜樹脂使い軽量化 折り曲げ自在 コスト3割低減	日刊工業新聞	2016/4/28
11	京都大学	Emerging Tech 解説 ペロブスカイト太陽電池「格安で超高性能」を実現へ(京都大学)	日経エレクトロニクス 2017年4月号 pp. 81-89	2017/3/1
12	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の最新動向、東大や英弘精機が解説	日経テクノロジー on line	2017/5/31
13	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の最新動向	新エネルギー新聞	2017/6/12
14	東京大学	ペロブスカイト太陽電池で太陽光発電の大幅な低コスト化へ	新エネルギー新報 p. 4-5	2017/9/5
15	東京大学	ペロブスカイト太陽電池が一步前進、カリウムがレアメタルを代替へ	日経テクノロジー on line	2017/9/25

			http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/news/16/092509286/	
16	東京大学 桐蔭横浜 大学	ノーベル化学賞候補に日本人研究者 米の学術情報会社	朝日新聞デジタル https://www.asahi.com/articles/ASK9N5Q8DK9NULBJ00P.html	2017/9/20
17	東京大学 桐蔭横浜 大学	米社予想、宮坂氏「ノーベル化学賞有力」論文引用回数など	毎日新聞Web https://mainichi.jp/articles/20170921/k00/00m/040/137000c	2017/9/20
18	東京大学 桐蔭横浜 大学	ノーベル化学賞「候補に宮坂氏」米社予想、桐蔭横浜大	日本経済新聞 https://www.nikkei.com/article/DGKKZ021341880Q7A920C1CR8000/	2017/9/21
19	東京大学 桐蔭横浜 大学	ノーベル賞有力？ 宮坂さん	朝日新聞	2017/9/21
20	東京大学 桐蔭横浜 大学	ノーベル賞 宮坂さん有力	読売新聞	2017/9/21
21	東京大学 桐蔭横浜 大学	ノーベル化学賞予想、宮坂氏を選出	産経新聞	2017/9/21
22	東京大学 桐蔭横浜 大学	ノーベル賞予想に桐蔭大の宮坂力氏 米情報会社	神奈川新聞	2017/9/21
23	東京大学 桐蔭横浜 大学	ノーベル賞 日本人頂き!? 有力候補22人に宮坂氏選出 高効率の太陽電池で「化学賞」挑む	日刊スポーツ	2017/9/21
24	東京大学 桐蔭横浜 大学	ノーベル化学賞候補に日本人研究者 米の学術情報会社	朝日新聞デジタル https://www.asahi.com/articles/ASK9N5Q8DK9NULBJ00P.html	2017/9/20
25	東京大学 桐蔭横浜 大学	フィルム型ペロブスカイト太陽電池、エネ変換効率18%達成 - 桐蔭横浜大	日刊工業新聞 https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00448914	2017/11/1
26	東京大学 桐蔭横浜 大学	材料革命：シリコンを超える強者、ペロブスカイト太陽電池	東京新聞／中日新聞	2017/11/6
27	東京大学	東大、ペロブスカイト太陽電池で変換効率20.5% - 希少金属使わず実現	日刊工業新聞 https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00449493	2017/11/6
28	東京大学 桐蔭横浜 大学	太陽光発電 進む研究開発、「ペロブスカイト」に脚光	毎日新聞 (全国版朝刊) 17面 https://mainichi.jp/articles/20171123/ddm/016/040/014000c	2017/11/23
29	東京大学 桐蔭横浜 大学	フィルム状太陽電池を開発 桐蔭横浜大・宮坂力特任教授	読売新聞 夕刊5面	2017/11/30
30	東京大学	ペロブスカイト太陽電池、結晶相に異なる構造混在 東大が発見	日刊工業新聞 https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00463657	2018/2/28
31	東京大学 桐蔭横浜 大学	「衛星用電池 コスト1/10 JAXAなど 折り畳んで搭載」	日本経済新聞 夕刊、10面	2018/5/21
32	東京大学 桐蔭横浜 大学	「日本の革新力 土壌を鍛えろ(2) 枯れたテーマに水やり」	日本経済新聞	2018/6/5

33	京都大学	再現性よく高い光電変換効率を示すペロブスカイト太陽電池の作製手法を確率しました	京都大学 http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/180905_1.html	2018/9/6
34	京都大学	京大と阪大など、再現性良く高い光電変換効率を示すペロブスカイト太陽電池の作製手法を確立	日経新聞 Web https://www.nikkei.com/article/DGXLRS P489949_W8A900C1000000/	2018/9/6
35	京都大学	再現性良く高い光電変換効率を示すペロブスカイト太陽電池の作製手法を確立した	テック・アイ技術情報研究所 https://tiisys.com/blog/2018/09/07/post-12392/	2018/9/6
36	京都大学	京大、再現性良く高い光電変換効率を示すペロブスカイト太陽電池の作製手法を確立	fabcross http://engineer.fabcross.jp/archeive/180907_kyoto_u.html	2018/9/7
37	京都大学	京大、再現性と効率の高いペロブスカイト成膜法を開発	OPTRONICS online http://www.optronics-media.com/news/20180907/52699/	2018/9/7
38	京都大学	スズ系ペロブスカイト太陽電池に光明 京大・阪大が効率的な製法を開発	環境ビジネス https://www.kankyo-business.jp/news/021114.php	2018/9/10
39	京都大学	ペロブスカイト太陽電池、スズ系で変換効率7%以上に	Yahoo!ニュース https://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20180912-00000065-it_eetimes-sci	2018/9/12
40	京都大学	ペロブスカイト太陽電池、スズ系で変換効率7%以上に	EETimes http://eetimes.jp/ee/articles/1809/11/news037.html	2018/9/12
41	京都大学	ペロブスカイト太陽電池、スズ系で変換効率7%以上に	TechEyes Online https://www.techeyesonline.com/news/detail/eetimesjapan-201809120930-1/	2018/9/12
42	京都大学	ペロブスカイト太陽電池、スズ系で変換効率7%以上と「再現性」を両立	スマートジャパン http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1809/14/news047.html	2018/9/14
43	東京大学 桐蔭横浜 大学	「インクジェットで低温成膜 ペロブスカイト 樹脂基板に」	日刊工業新聞	2018/10/3
44	京都大学	ウェアラブル用薄い太陽電池 京大発企業が技術開発	日本経済新聞 33面 https://www.nikkei.com/article/DGXMZO39814470Z00C19A1LKA000/	2019/1/10
45	東京大学 桐蔭横浜 大学	科学の森「新領域への対応鈍い日本 次世代太陽電池『ドーナツ化』」	毎日新聞	2019/1/24
46	東京大学	研究最前線「軽くて曲がる太陽電池」	読売新聞 朝刊	2019/5/16
47	京都大学	フィルム太陽電池大型化の技術開発	京都新聞 25面社会3	2019/5/24
48	京都大学	新材料を使ったより簡易な太陽電池の製造方法を発見 京大など	産経新聞	2019/5/24
49	京都大学	ペロブスカイト薄膜、大面積塗工に成功 京大	日刊工業新聞	2019/5/29
50	京都大学	関西発企業の実例に学ぶ最新トレンドSDGs Mook 世界を変えよう	朝日新聞出版 ISBN978-4-02-271126-7	2019/7/5
51	東京大学	東大、ペロブスカイト太陽電池ミニモジュールで20.7%の変換効率を達成	日本経済新聞電子版 https://www.nikkei.com/article/DGXLRS P513687_U9A700C1000000/	2019/7/4

52	東京大学	ペロブスカイト太陽電池ミニモジュールで世界最高20.7%の変換効率を達成 — 再生可能エネルギーの導入拡大に大きく貢献 東大	Fabcross https://engineer.fabcross.jp/archieve/190705_tokyo.html	2019/7/5
53	東京大学	東大、ペロブスカイト太陽電池で変換効率20.7%	OPTRONICS online http://www.optronics-media.com/news/20190708/58558/	2019/7/8
54	東京大学	東大、ペロブスカイト太陽電池で世界最高効率を達成	日経メガソーラービジネス https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atl/19/news/00001/00055/	2019/7/8
55	東京大学	曲がる太陽電池 変換効率最高	日経産業新聞	2019/7/9
56	東京大学	ペロブスカイト太陽電池：東大、3直列ミニモジュールで変換効率20%超	EE Times Japan https://eetimes.jp/ee/articles/1907/10/news031.html	2019/7/11
57	東京大学	期待のペロブスカイト太陽電池、東大がミニモジュールで効率20.7%の快挙	ITmedia/スマートジャパン https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1907/12/news031.html	2019/7/12
58	京都大学	新型太陽電池に手応え	毎日新聞 ビジネスサロンwest	2019/7/26
59	東京大学	薄くて曲がる新太陽電池、車体やIoT装置にも	日経産業新聞	2019/8/27
60	東京大学	次世代太陽電池、「鉛の毒性」の壁超える研究活発 「ペロブスカイト太陽電池」で材料刷新	日本経済新聞電子版 https://www.nikkei.com/article/DGXMZO49213170Q9A830C1TJM000/	2019/9/1
61	京都大学	次世代太陽電池 鉛使わず 環境対策で研究活発 軽くて曲がる 用途多様	日経新聞	2019/9/1
62	京都大学	次世代太陽電池 「鉛の毒性」の壁超える研究活発	日経新聞	2019/9/2
63	京都大学	太陽電池で給電不要の自立型センサー開発／ニチコン・京大など	電気新聞	2019/10/18
64	京都大学	特集『年で大化け！サイエンス&ベンチャー105発』室内光でもOKの新型太陽電池	週刊ダイヤモンド 2019年 10/26号	2019/10/26
65	京都大学	京都大学ら3者 IoT環境センサーシステム ペロブスカイト利用	電子デバイス産業新聞	2019/10/31

【その他（受賞）】

番号	受賞者	所属	受賞内容	受賞年月
1	若宮淳志	京都大学	第11回野副記念奨励賞(基礎有機化学会)	2015/9
2	Taishi Ano, Fuminao Kishimoto, Takayuki Terauchi, Dai Mochizuki, Masato Maitani, Eiichi Suzuki, Yuji Wada	東京工業大学	Photocatalysis-1 (Chiba) Poster Award	2015/9
3	椿俊太郎	東京工業大学	第1回 JEMEA 進歩賞(日本電磁波エネルギー応用学会)	2015/11
4	Masato Maitani, Akito Tateyama, Yuji Wada	東京工業大学	PVSEC-25 (Busan, Korea) Best Presentation Award	2015/11
5	山本将大, 羽石直人, 吉村武朗, ヤッパージミ, 椿俊太郎, 米谷真人, 鈴木榮一, 和田雄二	東京工業大学	第9回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム ベストポスター賞	2015/11

6	木下卓巳	東京大学	Journal of Materials Chemistry C Presentation Prize (Young Researcher Oral Presentation Award at 26th IUPAC Symposium on Photochemistry)	2016/4
7	若宮淳志, 嶋崎愛, 中池由美, Alwani Rafieh, Mina Jung, 丸山直樹, 阿波連知子, 村田靖次郎	京都大学	日本学術振興会 産学協力研究委員会第 175 委員会 イノベティブ PV 賞「ペロブスカイト太陽電池：溶液法における中間体の構造・物性解明と高光電変換効率セルの作製法開発」	2016/5
8	木下卓巳	東京大学	第 28 回配位化合物の光化学討論会・優秀講演賞	2016/8
9	木下卓巳	東京大学	Journal of Materials Chemistry A Presentation Prize	2016/8
10	Fuminao Kishimoto, Masato M. Maitani, Eiichi Suzuki, Yuji Wada	東京工業大学	AEARU 6th Energy and Environmental Workshop Best Poster Award, 1st Prize	2016/8
11	尾崎雅司	京都大学	AEARU (Association of East Asian Research Universities) 6th Energy and Environmental Workshop Best Poster Award, 2nd Prize, "Development of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -DMF as a Perovskite Precursor for Highly Efficient Perovskite Solar Cells"	2016/8
12	Taishi Ano, Fuminao Kishimoto, Shuntaro Tsubaki, Masato M. Maitani, Eiichi Suzuki, Yuji Wada	東京工業大学	2016 iSyCE (2016 International Symposium for Young Chemical Engineers) Presentation Award	2016/9
13	尾崎雅司	京都大学	第 1 回フロンティア太陽電池セミナー・最優秀ポスター賞 "高純度前駆体材料を用いた高効率ペロブスカイト太陽電池の作製"	2016/11
14	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	AMFPD-16 (The 23rd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices) Paper Award "Laser deposition for the controlled co-deposition of organolead halide perovskite"	2016/12
15	宮坂力	桐蔭横浜大学	日本化学会賞	2017/3
16	別所毅隆	東京大学	日本学術振興会 産学協力研究委員会第 175 委員会 イノベティブ PV 賞「Hysteresis-free perovskite solar cells by incorporation of potassium cation in organometal halide layer」	2017/7
17	岸本史直	東京工業大学	第 31 回独創性を拓く先端技術大賞 ニッポン放送大賞	2017/7
18	岸本史直	東京工業大学	第 38 回触媒学会若手会「夏の研修会」優秀口頭発表賞	2017/8
19	岸本史直	東京工業大学	The 5th annual UK-Japan Engineering Education League Award First Prize	2017/9
20	宮坂力	桐蔭横浜大学	クラリベイトアナリティクス引用栄誉賞	2017/9
21	古郷敦史	産業技術総合研究所	第 42 回応用物理学会講演奨励賞「ブルッカイト型 TiO_2 電子収集層による高効率低温製膜ペロブスカイト太陽電池」古郷敦史、實平義隆、沼田陽平、池上和志、宮坂力：第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9

22	宮坂力	桐蔭横浜大学	PVSEC27 HAMAKAWA 賞	2017/11
23	唐 澤国	東京大学	AP-HOPV18 (2nd Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics) ポスター賞「Key factors to eliminate the I-V hysteresis of lead halide perovskite solar cells」	2018/2
24	宮坂力	桐蔭横浜大学	日本化学会、BCSJ 論文賞	2018/4
25	木下卓巳	東京大学	2018 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰「若手科学者賞」(受賞業績: スピン反転遷移を利用した広帯域太陽光エネルギー変換の研究)	2018/4
26	若宮淳志	京都大学	第 70 回化学技術賞 (近畿化学協会)	2018/5
27	別所毅隆	東京大学	GRE2018 (Grand Renewable Energy 2018 International Conference) Best Oral Award「Hysteresis-free perovskite solar cells made of potassium-doped organometal halide perovskite」	2018/6
28	大北英生	京都大学	2018 年度光化学協会賞	2018/9
29	宮坂力	桐蔭横浜大学	公益財団法人加藤科学振興会 加藤記念賞 有機無機ペロブスカイト半導体を用いる光変換デバイスの創製	2018/11
30	Hyung Do Kim	京都大学	第 3 回 フロンティア太陽電池セミナー最優秀ポスター賞	2018/12
31	宮坂力	桐蔭横浜大学	第 19 回応用物理学会 業績賞 (研究業績)	2018/12
32	瀬川浩司	東京大学	2019 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰「科学技術賞」(受賞業績: 有機無機ハイブリッド太陽電池の先駆的研究)	2019/4
33	別所毅隆	東京大学	PVSEC-29 (29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering) Best Paper Award「Photovoltaic properties of less-hysteresis by potassium doped perovskite solar cells」	2019/11
34	大塚健斗	京都大学	第 4 回 フロンティア太陽電池セミナー優秀賞	2019/11

(二) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

【A 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発】

(豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
<p>先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発 (豊田工業大学)</p>	<p>①変換効率 25%の試作ラインを構築する。</p> <p>②25%のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶の課題を明らかにする。</p> <p>③各プロセス技術を 25%太陽電池量産に適用する際の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにして参画企業の開発を支援する。</p> <p>④新規ヘテロ接合セルに関して、量産展開可能なプロセスを検討し、セル製造プロセスを実現する。</p> <p>⑤25%太陽電池セルをモジュール化評価する。</p>	<p>①p 型単結晶 PERC セル効率 20.0%、n 型単結晶 Bifacial PERT セル効率 21.0%を達成。開発した PERT セルプロセスは p 型 n 型両方に適用可能であることを確認し、高効率拡散系セルプロセスを確立。SHJ セル効率 23.2%、pseudo Eff. 24.3%を達成して高効率ヘテロ系セルプロセスを確立するとともに 25%達成の目途を得た。</p> <p>②セル試作ラインを活用して各連携機関の各種シリコン材料・結晶を評価。トクヤマとの共同研究によってモジュール製造コスト 1.9 円/W、発電コスト 0.38 円/kWh のコスト低減を実現。</p> <p>③セル試作ラインを活用して連携先企業のプロセス技術開発を支援。ナミックスの電極ペースト開発により、モジュール製造コストを 1.5 円/W、発電コストを 0.7 円/kWh 低減。コマツ NTC のスライス技術開発によって、モジュール製造コストを 6.8 円/W、発電コストを 0.5 円/kWh 低減。</p> <p>④シャープの HBC セル開発を支援するとともに、新規ヘテロセル技術を開発。電子選択コンタクトとして TiO_x、正孔選択コンタクトとして MoO_xを使った CSC セルを試作してそのポテンシャルを実証するとともに、新規評価技術も開発した。</p> <p>⑤複数の企業や大学、研究機関等と連携してモジュールを試作・評価できる体制を構築。PID や LeTID といった新しいモジュール劣化現象の原因とメカニズムの解明に貢献した。</p>	<p>○</p>	<p>発電コスト試算によれば、本プロジェクトの各技術開発成果を活用することによって、2020 年の発電コストは 11.0 円/kWh、2025 年の発電コストは 6.9 円/kWh になると見積られる。</p>

<p>材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発 (明治大学)</p>	<p>物理化学評価を通じた支援を継続するとともに、変換効率 25%の試作ラインの構築に貢献する。特に、25%高効率太陽電池量産化のための新規材料・プロセスの評価・解析技術を確立する。それにより得られた知見、技術開発指針をもとにプロジェクト連携・協力企業の技術開発を支援し、最終目標の達成に貢献する。さらに、変換効率 25%を実現するために必要な基盤技術をもとに、そのための新規材料ならびにセルフプロセス技術を提案し、各研究機関ならびに各企業との協力の上、参画企業の目標達成に貢献する。</p>	<p>・株式会社トクヤマと共同で、$10^{-20} \Omega \cdot \text{cm}$ で 18 msec、$1-2 \Omega \cdot \text{cm}$ では全長の 95%以上の領域で 2 msec を超える高ライフタイム結晶の成長に成功した。</p> <p>・SIRM 装置を導入し、熱処理によるライフ劣化機構を検討し、劣化の少ない成長条件を得た。ライフタイム劣化に関連する要因として、結晶中の C 濃度との関連を見出した。</p> <p>・発光活性化 PL により従来困難であった 10^{14}cm^{-3} 以下の低濃度測定法を開発した。 10^{12}cm^{-3} の定量の可能性を見出した。</p> <p>・発光活性化 PL の 77K での測定を検討し、4.2K の結果と良好な相関を得た。測定の高速度化、低コスト化を実現した。</p> <p>・ダイヤモンドワイヤーでスライスした基板の目視できない欠陥の PL イメージングによる可視化し、セル特性への影響を明らかにした。</p> <p>・高周波インピーダンス解析装置を導入し、リークが多いパッシベーション膜評価への適用を検討した。</p> <p>・欠陥を含むシリコン基板に対する鉄、ニッケルの影響を p 型, n 型で確認した。</p> <p>・小径の酸素析出物によって鉄、ニッケルのゲッターリングが阻害される可能性を見出した。析出処理を施した基板において酸素濃度に強く依存するゲッターリング効率の変化を見出した。→酸素析出が金属汚染の悪影響を増長。さらに結晶成長時の冷却過程を改良した基板では同程度の C 濃度であっても酸素析出物によるゲッターリング阻害が抑制された。FTIR によって酸素析出物の形状がインゴット成長条件によって異なり、板状析出物ピークが大きい場合にゲッターリング阻害が大きくなる可能性を見出した。</p> <p>・上記、結晶成長時の冷却過程を改良したプロセスにおいては、酸素析出物の多くはその形状が多面体構造であり、それが酸素析出物密度の低減に繋がることを見出した。</p>	<p>○</p>	
---	--	---	----------	--

		<ul style="list-style-type: none"> ・上記、結晶成長時の冷却過程を改良した基板では、同程度の C 濃度であっても熱処理後の酸素析出の抑制に加え、転位形成も抑制されてライフタイム劣化が抑制されていることを見出した。支配的な再結合中心が、酸素析出物/Si マトリックスの界面および転位であることを明らかにし、析出物のトータルでの表面積抑制がライフタイム劣化抑制に必要な指針を獲得した。 ・発光活性化 PL により従来困難であった 10^{14} cm^{-3} 以下の低濃度測定法を開発した。 10^{12} cm^{-3} の定量の可能性を見出した。 ・発光活性化 PL の 77K での測定を検討し、4.2K の結果と良好な相関を得た。測定の高速度化、低コスト化を実現した。さらに 77K での測定では G-line に基板抵抗率依存性がほぼ消失するという優位性を見出した。 ・発光活性化 PL の室温での測定を検討し、C-line と類似した挙動を示す C08-band 強度が炭素濃度と正相関することから炭素濃度定量に利用できる可能性を見出した。 ・室温における発光活性化 PL 法において観測される C08-band を利用した炭素定量を行う際に懸念される試料温度の上昇による欠陥構造変化は無視できることを示し、同発光強度比と炭素濃度の関係を、130 枚に及ぶ CZ、MCZ、FZ 結晶について調査した結果、酸素濃度と抵抗率が一定の範囲の試料間では正相関が認められることを示した。この手法により CZ Si インゴットを評価した結果、偏析現象にしたがった $10^{14} \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ の低濃度領域の濃度変化を捉えることが出来た。 ・Si 中の炭素の定量化のための室温 PL 法における誤差要因として、試料表面再結合と励起光強度の影響を考察した。炭素濃度の指標であるバンド端発光と炭素起因発光の強度比は、それぞれ発光の励起光強度依存性が自乗特性および線形特性を示すことによって、表面再結合の影響を強く受ける。従って、高精度化には、表面状態と励起 	
--	--	---	--

		<p>光強度の一定範囲への絞り込みが必要である。この結果は、室温 PL 炭素定量法に留まらず、一般に PL を利用した不純物・欠陥分析法の精度を向上させるための重要な指針である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フォトルミネッセンス (PL) 法による微量炭素不純物の定量技術の高精度化を進めた。発光再結合過程を正確に把握するため、PL 強度の励起光強度依存性の試料温度変化、および、試料特性変化を詳細に調べた。従来、バンド端発光強度は励起光強度に対しべき指数 1~2 のべき乗則で変化することが知られていたが、今回べき指数が 2 以上となる特異な現象を発見し、それが照射欠陥を含む発光再結合機構で説明できることを明らかにした。これは炭素定量手法の高精度化に大きく貢献するだけでなく、ライフタイムを司る再結合機構の正確な理解、ひいてはライフタイム制御への重要な指針に繋がる。 ・深い界面の化学結合状態を評価するため、斜め研磨+XPS 測定法を提案し、測定を開始した。 ・ITO/a-Si 界面の SiO_x 層を XPS および HAXPES (SPRING-8) において確認した。HAXPES では Si 1s スペクトルで熱処理による SiO_x ピークの変化を確認した。 ・反応性プラズマ蒸着 (RPD) プロセスが誘起する ITO/a-Si 界面ダメージの微細構造・化学結合状態を、HAXPES、TEM、HAADF にて決定し、本プロセスの潜在的問題を明らかにした。ITO/a-Si 界面に存在している界面反応層である SiO_2 は、界面から試料表面に向かうにつれ SiO_x に変化していることを見出した。ITO/a-Si 界面においては、熱処理前後で ITO 膜と a-Si 層の膜厚変化はとくに生じないが、ITO 側から a-Si 側へ In が、a-Si 側から ITO 側へ Si が相互拡散することを見出した。 ・RPD プロセスより下地膜界面酸化を抑制する改良型 (“低ダメージ”) スパッタプロセスに関して、その酸化過程のより詳細な描像を微細構造・化学結合状態の観点から評価した。HAXPES、TEM 解析結果 	
--	--	--	--

	<p>から、下地が結晶 Si の場合、放電形態によらず ITO/c-Si 界面に SiO_x 層 (約 1 nm) が形成されることを明らかにし、より低ダメージ、低光学損失なプロセス開発技術にフィードバックした。また、RPD プロセス誘起の再結合活性な欠陥が、Si/パッシベーション界面だけでなく Si 表面近傍の 10 nm 以内の極浅い領域にも形成されることを見出し、RPD プロセス改善指針を獲得した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実験室系硬 X 線光電子分光 (Lab-HAXPES) を用いて、ヘテロ接合型太陽電池の埋もれた界面評価技術を構築した。液体 Ga を光源とした 9.25 keV の X 線を用いて、標準金属試料の Fermi 端の測定、ならびに、パッシベーション (SiO_2) / 結晶 Si 界面近傍の内殻準位スペクトルの測定を行った。大型放射光施設 SPring-8 BL46XU の装置と比較して、10 倍程度の時間があれば同等の分解能のスペクトルが得られるほか、より高い X 線エネルギーの利点を生かして空間的により深い領域まで測定できることを見出し、太陽電池プロセスダメージやバンド構造の評価技術を整えた。 ・透明導電層 (ITO) の低ダメージ成膜技術開発のためのスパッタプロセス評価を行った。DC および RF スパッタの放電形態・条件の違いにより下地結晶 Si 基板の少数キャリアライフタイム差が生じること、および、その主な要因が Si 結晶表面近傍に形成されるダメージ層であることを見出した。同程度のシート抵抗を有する ITO 成膜においては、改良型 RF スパッタが有効であるというプロセス改善指針を獲得した。 ・PECVD、および、RPD プロセスダメージの Si 基板依存性を少数キャリアライフタイム、PL により評価した。RPD プロセスにおいては PL スペクトルに C-line のエネルギーと一致するピークが生じることを見出し、Si 基板のライフタイム劣化要因として C 原子による複合欠陥形成の影響の可能性を示した。酸素、あるいは、炭素濃度の異なる Si 基板において、 		
--	--	--	--

	<p>PECVD-SiN_x、および、RPD-ITO 成膜プロセスを経たのちの数キャリアライフタイム劣化には炭素濃度との正相関があることを示した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・従来の透明導電膜 (Sn 10wt% ITO) に代わる新規透明導電膜の開発、および、セル試作・評価を行った。新規透明導電膜の薄膜断面構造を解析し、粒径サイズと移動度低下との相関を見出した。また、成膜時のガス雰囲気および熱履歴の効果を透明導電膜/アモルファス Si 界面の化学結合状態の観点から明らかにした。これら結果を踏まえて成膜プロセスを改善し、高移動度・低キャリア濃度化を実現した。本膜を用いてヘテロ接合セルを試作し、長波長域での量子効率の改善により、変換効率の向上に貢献した。 ・機械学習法を用いてスライス痕と共存するエッチピットを自動検出する手法を開発した。 ・スライス時の基板破断メカニズムを共焦点光学顕微鏡、ラマン分光測定、マイクロ PL 等による評価を総合して検討し、スライス後表面条件と基板破断との関係を明らかにした。これら解析結果をもとに、スライス後の表面ラフネス、結晶性を制御したスライス技術を開発し、破断のない 100um 厚以下の十分フレキシブルな基板スライス技術を構築した。従来の 180um 厚セルと同等の性能を有する 100um 厚の n 型両面受光型セル作製に貢献した。 ・Raman 分光測定、4 点曲げ試験の結果を総合し、スライス後の Si 表面の結晶性が高く、かつ、基板両端間 (ワイヤの出入口間) での均一性も高いほど、スライス表面形状のラフネスが小さく、高い曲げ性を実現できることを見出した。さらに、改善したスライス法で得られた基板用いれば薄板厚になるほど曲げ性も高いことを実証し、薄板両面受光型セル実証に貢献した。 ・薄板基板スライス加工時に導入されるダメージの面内分布を明らかにし、スライスプロセス制御の指針獲得に貢献した。スライス条件の異なる基板において、マイク 		
--	---	--	--

		<p>ロ波光伝導法 (μ-PCR)、および、Raman 分光法により、ワイヤ走行方向、および、スライス加工方向に沿ったライフタイム分布、および、結晶性分布を評価した。従来スライス技術では、とくにワイヤの出口側が多結晶化し、ライフタイムの主な低下原因になる。曲げに強い薄板基板スライスのためには、ワイヤ出口側も結晶性が高く維持されることが要件であることを見出した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 正孔選択コンタクトとして ITO/MoO_x/i-a-Si:H 構造を有するデバイスの作製プロセスを、ライフタイムおよび界面仕事関数の観点から最適化するプロセス条件を見出し、豊田工大、名古屋大と共同で実施している CSC セル作製プロセスにフィードバックした。片側 CSC (表: ITO/MoO_x/i、裏: HIT (i/n)) セルを試作し、成膜後熱処理なしで、高 V_{oc} (700 mV 越)、高 FF (pFF=85%) まで向上させ、156 角プロセス同等電流仮定で 21%超を達成した。 ・ CSC セルと同時作製した FET 型解析 TEG テスト素子を用いて、反転層ラテラル電流測定によりアモルファス結晶界面特性を解析する手法を構築した。反転層中の少数キャリアの実効移動度を抽出し、プロセスにより V_{oc} がほとんど変化しなくても移動度が変化する場合があることを見出し、本手法がライフタイムや V_{oc} 評価では捉えられなかったより高感度な界面特性評価手法になり得ることを示した。また、H₂O₂-HF プロセスを用いたテクスチャラウンディング手法を検討し、V_{oc}、FF 増加が期待できるより安定的なプロセス改善指針を得た。 ・ 共通評価技術として確立した FET 型テスト素子解析を進め、アモルファス/結晶 Si 界面のトラップ密度を定量し、シミュレーション結果との比較検討から実験コンセプトの妥当性を検証した。反転層中の少数キャリアのうち、ラテラル方向の電流に寄与するキャリア濃度を解析することで、観測されるコンダクタンス劣化要因となる 	
--	--	--	--

		<p>欠陥がトラップとして働くことを示した。また、本 FET 型テスト素子のシミュレーションモデルを構築し、界面トラップ密度に関して実験との定量的な整合性を確認した。これにより、セル性能を制限するデバイスパラメタの特定に貢献した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 共通評価基盤技術として確立した FET 型テスト解析素子を用いたアモルファス/結晶 (a/c) 界面のラテラル方向電流解析技術をキャリア選択コンタクト (CSC) デバイスに展開した。反転層電流の実効移動度解析から、CSC 材料 (MoO_x) /i 型アモルファス Si/結晶 Si 積層構造では、従来 HIT 型と比較して成膜プロセスによるトラップ生成密度が 1 桁程度小さいことを見出した。一方、成膜後熱処理依存性が従来 HIT 型と異なる傾向を示すことから、これまでの容量—電圧解析結果の知見と合わせて、MoO_x 膜の仕事関数や膜中欠陥の低減に由来した劣化機構を提案した。 ・ 二次元材料を用いた新概念キャリア選択コンタクトセル開発を進めた。ヘテロセルの熱プロセスを想定した低温でのスパッタ成膜を行い、アモルファス Si 膜上でも二次元状の MoS_2 薄膜が堆積できることを示した。MoS_2/アモルファス Si 積層構造により、とくに正孔選択性が高く得られる ($iV_{oc} > 700 \text{ mV}$) を見出した。Si 表面のポテンシャルを容量—電圧測定により解析し、正孔選択性が MoS_2 の大きな仕事関数 ($\sim 5 \text{ eV}$) に由来することを明らかにした。二次元材料のさらなる高移動度化とバンドパラメーターの調整可能性を応用した新概念セルを特許出願した。 ・ XPS により新規ファイアスルー電極/SiN_x 界面において Ag の酸化成分が焼成温度と強く相関することを見出した。 ・ ダイヤモンドワイヤーでスライスした基板の目視できない欠陥の PL イメージングによる可視化し、セル特性への影響を明らかにした。 ・ 高周波インピーダンス解析装置 	
--	--	--	--

		を導入し、リークの多いパッシベーション膜評価への適用の可能性を見出した。また低リーク構造において、C-V測定と複素インピーダンスがよく一致することを確認した。 ・欠陥を含むシリコン基板に対する鉄、ニッケルの影響をp型、n型で確認した。		
高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究（九州大学）	原料ならびに結晶メーカーの製造コストの低減、およびそれら基板を用いたセルメーカーの高効率化・低コスト化のための高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究の推進 p型基板では5msec、n型基板では10msecのバルクライフタイムの実現	p型基板では5msec、n型基板では10msecのバルクライフタイムを実現（8インチCZ結晶）	◎	
新規ヘテロ接合材料に関する研究（名古屋大学）	ヘテロ接合材料の吸収係数 $1 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ (@600nm)、導電率： $1 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ を達成する。コンソーシアム内の連携大学や関係機関と協力することでヘテロ接合型太陽電池の開放電圧 0.74 V、変換効率 25%以上に寄与することを目指した。	・PECVD装置を新規に導入し、成膜した真性の a-Si:H で 0.725 V の i-V _{oc} を達成 ・アモルファスシリコンを用いたヘテロ接合型太陽電池において、開放電圧 0.740 V 以上、変換効率 23.2% に貢献 ・原子層堆積法で作製した TiO _x において 3.1 eV の高い光学ギャップを確認し、 $1 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ (@600nm) の低い吸収係数を確認 ・TiO ₂ :Nb 膜において、約 $3.3 \times 10^2 \text{ S/cm}$ の電気導電率を達成 ・QSSPC法とPLイメージングを組み合わせた i-VOC イメージングの測定環境を構築 ・提案手法で作製した疑似単結晶シリコンウエハ作製法において従来のキャスト法で作製したシリコンウエハより比較的高い i-Voc が得られた	○	
アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究（東京工業大学）	アモルファス膜と結晶シリコンとの界面構造や界面における再結合速度などを評価・解析して、得られた知見、技術開発指針をもとに、ヘテロ系デバイスにおける表面再結合電流 $J_{0\text{front}}$ を 10 fA/cm ² 、裏面再結合電流 $J_{0\text{rear}}$ を 10 fA/cm ² に低減する方法を提案する。	① ライフタイムの温度依存測定による界面のバンドオフセット評価手法を確立。FTS法による i-a-Si:H 層 (5 nm) により、 $J_0=4.6 \text{ fA/cm}^2$ を達成。堆積速度は約 15 nm/min である。この i-a-Si:H を用いたシリコンヘテロ接合太陽電池 (p、n 層はプラズマ CVD 製膜) を作製し、変換効率 17.4% (V _{oc} =0.679 V, J _{sc} =35.0 mA/cm ² , FF=0.732)	○	

		<p>を得た。電子選択コンタクトとしてSiドープnc-GaNの形成を試み、結晶性が高く電気的特性の良好な膜の形成に成功した。</p> <p>② スパッタによるi-a-Si:H(5.8 nm)/p-Cu₂O:N(20 nm)により、J_0=約4 fA/cm²を達成。Implied Vocは0.699 Vであるが、太陽電池を作製した場合のVocは0.54 V程度と低い。この原因が、p-Cu₂O:N製膜時のプレスパッタ時に形成される変質層であることを明らかにし、製膜初期時の変質層形成の抑制に向けホットワイヤー法を用いたWO₃バッファ層の検討を進めた。WO₃のみを正孔輸送層に用いた太陽電池において、p-Cu₂O:Nを用いた場合よりも高い開放電圧0.57 Vが確認された。また、通常のRFスパッタによるBドープp-a-Si:H膜の形成を検討し、良好な電気的特性を有するp-a-Si:Hの作製に成功した。このp-a-Si:Hをエミッタに用いた太陽電池(オールスパッタエミッタ)を作製し、開放電圧0.633 Vを得た。また、電極金属を変更することにより、開放電圧0.659 Vが得られており、SiH₄フリープロセスの可能性を示すことができた。</p>		
<p>低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究(兵庫県立大学)</p>	<p>表面再結合電流 $J_{0\text{front}}$、裏面再結合電流 $J_{0\text{rear}}$、およびバルク再結合電流 $J_{0\text{bulk}}$ の総和 J_0 ($=J_{0\text{front}} + J_{0\text{rear}} + J_{0\text{bulk}}$) を現状の750 fA/cm²から400 fA/cm²まで低減するプロセスを、これまでのプロセスとは異なる“低コスト”な手法により確立し、拡散系太陽電池の低コスト化を目標とする各研究機関ならびに各企業との協力の上で、各企業の目標達成に貢献する。</p>	<p>・再結合電流の抑制 本研究では裏面パッシベーション膜により $J_{0\text{rear}}$ を260 fA/cm² 削減可能なプロセスを開発に成功し、かつエミッタプロファイルの数値シミュレーションより、$J_{0\text{front}}$ を50 fA/cm² 削減しうるプロセスを明らかにした加えて6大学コンソーシアムにおいてシリコン単結晶の高品質化が行われ、$J_{0\text{bulk}}$ の大幅な削減(100 fA/cm² 以上)に成功しており、全ての技術を組み合わせることにより、最終目標を超える J_0 の削減が可能となった。</p> <p>・新規薄膜作製 最終目標に加えて、本研究で使用した薄膜作製手法により、透明導</p>	○	

		<p>電膜材料、キャリア選択性コンタクト材料、電荷制御可能な混晶系材料などの開発に成功し、さらに次の世代の太陽電池に寄与しうる基礎データの取得に成功した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セルへの適用 <p>本研究で用いた手法の実セルサイズへの適用については、LIA 援用反応性スパッタ法に関しては反射防止層の2層化や裏面パッシベーション/cap層の作製に使用し、適用が可能であることが確認出来た。</p>		
--	--	--	--	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【B 薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発】

(産業技術総合研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 * 1	備考
① ウエハスライス技術に関する研究開発	極薄ウエハ(厚み 50 μm)の品質指針及び高効率セルプロセス技術開発課題を明らかにする。	板厚 50 μm 級の極薄ウエハを用いた SHJ セルを開発し、世界トップレベルの発電効率 22% 超を達成。さらにウエハ厚さ依存性を詳細に評価することで、板厚 50 μm の高効率極薄セルを実現するための、極薄ウエハの品質指針及びプロセス技術開発課題を明らかにした。	○	板厚 50 μm 級の結晶 Si 太陽電池で発電効率 22% 超を得たのは世界でも類が無い成果である。また基板厚さと効率の相関を詳細に調べて得た知見は、連携先企業の事業化戦略に大きく貢献した。
② 高効率・低コストセルプロセス技術 高効率・高信頼性モジュール技術	高効率(セル効率 22%)のためのセル化技術開発指針を得る。 長寿命(35年)のための高信頼性モジュール化技術開発指針を得る。	<p>連携先と共同で、高効率化に向けたセルプロセスの改善項目を明確にすることができた。</p> <p>連携先作製のモジュールについて各種の単体/複合ストレス試験を行い、劣化メカニズムの解析を行うことで、UV+湿熱ストレスに基づいたモジュールの寿命予測手法の開発に貢献した。</p> <p>上記により、連携先が開発したモジュールが、国内市場 35 年相当以上のストレスに対して十分な耐性を有していることを実証することができた。</p>	○	UV+湿熱ストレスに基づいた寿命予測手法の開発については、連携先と共同で特許を出願済み。本研究で得られた一連の知見は、連携先企業の事業展開に大きく貢献することができた。

<p>③高効率・低コストセルプロセス技術</p>	<p>高効率セルの低コストのための簡易プロセス要素技術指針を得る。</p>	<p>スクリーン印刷などの低コストプロセスを用いて、両面受光-裏面電極 (BC) 型セルの効率向上を図り、変換効率 22.3%を達成した。任意の波長で内部量子効率のマッピングが可能な内部量子効率マッピング法を新規に開発し、BCセルの電氣的遮蔽損失領域の同定に成功した。 Si ウエハを用いて作製されたイオン注入用ステンシルマスク (業界初) を用いてリンを注入し、注入領域の幅が従来の約 1/3 (100μm) のスリットパターンの形成に成功した。</p>	<p>△ 本セルと同様のスクリーン印刷電極を用いた BC セルでは、isc-konstanz の効率 23.2%が最高値 (2018.9)。本 BC セルの研究内容については、国際会議 (EU PVSEC 2018) においてポスター賞を受賞。 開発したステンシルマスクをイオン注入装置メーカーの市販の装置で実際のプロセスを想定した試験を行い、マスクの耐久性や注入層の注入幅の精度において、本開発品が従来品に比べ優れていることを実証済み。</p>
<p>④薄型セルを用いた高信頼性高効率モジュール技術</p>	<p>薄型セルを用いた高信頼性高効率モジュール (モジュール効率 22%) の技術開発指針を得る。</p>	<p>△ 開発した両面受光型 BC セルと細線ワイヤ技術を用いて 4 セルモジュールを作製し、変換効率 19.4%を得た。高信頼性化技術については、PCT による湿熱劣化の信頼性試験により、インターコネクタに沿った劣化モードを見出し、その劣化メカニズムを初めて提案した。</p>	<p>△ 両面受光型 BC セルの細線ワイヤを用いたモジュール化は例が少ない。高温多湿気候で 6 年間屋根に設置 (海外) された商用モジュールで、我々が報告した劣化モードが生じており、今回開発した PCT による湿熱劣化の信頼性試験方法が有効であることが示されている。</p>

* 1 達成度

◎ : 数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○ : 数値目標クリア、△ : 数値目標未達

【C Cat-CVD など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発】

(北陸先端科学技術大学院大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
パッシベーション性能	テクスチャ基板上(<100 μm)での SiN _x /a-Si 膜の表面再結合速度<3 cm/s	表面再結合速度 <1.1 cm/s (結晶 Si 中での再結合も勘案して見積もると<0.2 cm/s) を実現した。さらに、従来のアルカリ溶液にガラス微粒子を混入するという簡便な方法で、凹凸構造を微細化できることを発見し、薄型 Si 基板に適したテクスチャ形成法を確立した。	◎	
SiN _x 膜の化学耐性	5% HF 中エッチング速度<5 nm/min	5% HF 中エッチング速度<5 nm/min を達成した。また、異なる堆積条件で SiN _x を積層することにより、パッシベーション性能との両立が可能であることも見出した。	◎	
i-a-Si 中のキャリアの利用	SiN _x /a-Si の a-Si で生成されるキャリアの利用効率>99% の条件の明確化	a-Si 層厚<15 nm であれば、a-Si 層中のキャリアがほぼ 100%、c-Si に移動することを確認した。	◎	
触媒体寿命	使用寿命>60日を実現する触媒体の開発	表面を炭化した Ta 触媒体線を使用することで、a-Si 堆積中の触媒体の抵抗値変化が飽和、すなわち変性が抑止されることを見出し、60 日以上の連続使用の見込みを得た。	○	
裏面電極型 Si ヘテロ接合太陽電池の裏面構造	局所的に a-Si の伝導型と導電率を制御する技術の確立	非質量分離型プラズマイオン注入により p 型 a-Si を n 型に反転する技術を確立した。また、イオン注入により一旦低下するパッシベーション性能を、事後のアニールで回復できることを見出し、その機構が、P とともに注入された H による欠陥終端であることも明らかにした。この方法で形成した n 型 a-Si を用いた太陽電池の動作も確認した。	◎	
両面型 Si ヘテロ接合太陽電池の高性能化	開放電圧>750 mV を得るための基盤技術確立	P Cat ドーピングを組み込んだ Si ヘテロ接合太陽電池において、ドーピングを行っていない比較セルに対する開放電圧および曲線因子の向上を確認し、P Cat ドーピングの有効性を実証した。	○	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【D CIS太陽電池高性能化技術の研究開発】

(産業技術総合研究所、東京工業大学、学校法人立命館、東京理科大学、筑波大学、
鹿児島大学、龍谷大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
光吸収層の 高品質化に よる CIS 太 陽電池の高 効率化 (産総研)	高品質な CdS/CIS界面、 CIS 結晶高品 質化、新規透 明導電膜材料 と CIS/Mo 界 面制御技術を 開発、CIS 小面 積セルで変換 効率 23%を達 成する。	三段階蒸着製膜 CIS 光吸収層におけ る銀 (Ag) やアルカリ金属添加、およ びバンドギャップグレーディング制 御、熱光照射処理により変換効率向上 を実現。プロジェクト開始当初には 20%に満たなかった小面積セル効率 を、最終目標値 23%に迫る 22%以上 (中 間目標値は達成) の世界最高水準域に 押し上げることに成功した。	○	最終目標として 設定された小面 積セル数値目標 23%は SAS 法 CIS 太陽電池で出光 興産(ソーラーフ ロンティア)が達 成した。 蒸着法 CIS 太陽 電池での達成 97% (22.2%/23%) だが、効率 25%達 成に向けた指針 を示した。
界面制御に よるカルコ ゲナイド系 薄膜太陽電 池の高効率 化 (東工大)	界面制御によ り、従来に対 して 30mV 高 い V_{oc} 、 $J_{sc} \times V_{oc}$ 値において 26.2mW/cm ² を 達成する。	CIGS 太陽電池の pn ヘテロ接合界面に 価電子帯オフセット ΔE_v を設けるこ とにより界面再結合電流の抑制が可能 であることを指摘した。 ΔE_v を形成 する層として Cu 欠損層を用いること により、開発開始時の開放端電圧 V_{oc} を +30mV 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 26.3$ mW/cm ² を実現、最終目標を達成した。 さらに、3 段階法における Cu 欠損層 の成長モデルを構築した。	◎	ヘテロ接合界面 における ΔE_v の 効果は、SAS 法 CIS 太陽電池を 開発する出光興 産の硫化プロセ スの意味に物理 的解釈を与え、そ の高効率化の指 針を示した。
バンド制御 による再結 合パッシブ ーション技 術の開発 (立命館 大)	従来に対して 30mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値に おいては 28mW/cm ² を達 成する。	CIS の表面改質技術を開発し、かつ、 (Zn, Mg)O 系材料を用いたバンドアラ イメントの最適化を行うことで、最終 目標を達成した。また、従来のウェッ トプロセスを用いないオールドライ プロセスで、世界で初めて効率 22%を 超える CIS 太陽電池を実現すること に成功した。	◎	従来のウェット プロセスを用い ず、ドライプロセ スだけを用いる というオールド ライプロセスで 22%を超える世界 最高水準の効率 を実現できる技 術を開発した

<p>エピタキシャル成長を利用した CIS 太陽電池の高効率化指針の解明 (東京理科大)</p>	<p>(中間目標) エピタキシャル CIGS 単結晶薄膜で、少数キャリア寿命 τ_2 の値で 80ns 以上 (300K) を達成する。</p>	<p>エピタキシャル CIGS 製膜に際し、その下地となる Mo 薄膜について、低温バッファ層を導入した新規スパッタ法を開発し、Mo 薄膜のエピタキシャル成長に成功した。次に、新たに開発した高温 3 段階法で Mo/サファイア基板上にエピタキシャル CIGS 薄膜を作製し、中間目標値であるキャリアライフタイム τ_2 の値で 100ns 以上 (300K) を達成した。 さらに、この上に形成した CdS/CIGS 界面では、格子整合が良好なエピタキシャル関係となることを明らかにし、光生成キャリアの界面再結合が極めて少ないデバイスへの展開が期待できる。</p>	<p>◎</p>	<p>エピタキシャル CIGS 太陽電池の作製・評価に先立ち、比較対象用の多結晶 CIGS 太陽電池についてアルカリ金属処理と熱・光照射の複合処理により変換効率の改善が可能であることを初めて見出した。</p>
<p>結晶欠陥の検出と同等、欠陥密度低減化技術開発支援 (筑波大)</p>	<p>格子欠陥、異相欠陥の定量的評価と性質を理解する。他機関が開発する技術を総合して従来効率に対して +1 % を達成し、変換効率 23% の達成に貢献する。</p>	<p>アルカリ処理 CIGS 試料の深い欠陥準位の相関を示し、バルク改質 (アンチサイト欠陥の密度低減) の効果があることを確認した。また、バルク再結合成分が減少し、開放起電圧が改善することを、再結合解析より定量的に明らかにした。 放射再結合定数の再計算とシミュレーションを組み合わせ、25% の達成に必要な開放起電圧 (欠陥準位) について明らかにした。非輻射再結合損失に加え、J_{sc} 損失の低減が不可欠であることを示した。</p>	<p>◎</p>	<p>欠陥準位検出で得た成果を、デバイス特性の損失解析と結びつけ、変換効率 25% の達成に向けた課題を提示した。</p>
<p>積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発 (鹿児島大)</p>	<p>電子構造の深さ方向プロファイルの精密な決定方を開発し、電子構造とデバイス特性との関係をフィードバックすることで、変換効率 23% の達成に貢献する。</p>	<p>電子構造の深さ方向プロファイルを評価するための技術として窓層/バッファ、バッファ/CIS 層界面形成、CIS/Mo 界面露出、「その場」アルカリ処理技術を開発した。それらと電子分光法による評価の結果、バッファ/CIS 界面のバンド接続がほぼ理想的であること、この界面の拡散電位がアルカリ処理により増大し、処理による開放電圧の増大に対応すること、三段階法、SAS 法共に高性能電池の CIS 層内、Mo 側にバンドギャップ二重傾斜、Back Surface Field が存在することを明らかにした。一方、窓層/バッファ、CIS/Mo 界面の電子接続には効率向上に向けて改善の余地が残されていることを示した。</p>	<p>○</p>	<p>窓層から裏面電極に至る全領域を縦貫するバンドプロファイルを初めて決定し、変換効率 25% の達成に向けた改善すべき部位を提示した。</p>

理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究 (龍谷大)	CIGSSe系化合物半導体の電子構造を明らかにし、得られた知見に基づいて太陽電池の界面や粒界を中心とした材料設計を行う事で、変換効率23%の達成に貢献する。	Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ [CIGSSe]系化合物半導体の禁制帯幅やバンド構造(価電子帯上端[VBM]と伝導帯下端[CBM]の準位)のGa/(In+Ga)比とS/(S+Se)比をパラメーターとした3次元マップを作成し、CuInSe ₂ のGaやSの固溶効果を明らかにするとともに、高効率太陽電池の光吸収層の深さ方向の組成分布や粒界構造モデルを提案した。深さ分解XAFS法を用いて、高効率太陽電池に用いられているCs処理は、表面だけではなく薄膜内部に与える効果で変換効率の向上に寄与していることを示した。	○	カルコパイライト構造を有するCIGSSe元系化合物半導体の電子構造を明らかにしたことで、さらなる材料の改良についての指針が得られ、変換効率25%の達成に向けた課題を提示した。
--	--	--	---	---

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【E 高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発】(産業技術総合研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 * 1	備考
高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発 ① シリコン系材料 (ナノ結晶 Si(nc-Si:H))	● J _{sc} を2%向上 (標準的なヘテロ接合結晶系太陽電池比) ● V _{oc} ・FF維持、効率向上(η>22%)	プラズマCVDを用いて薄膜(<25nm)で導電性の高いp型nc-Si:Hを開発 標準的なヘテロ接合結晶系太陽電池比で J _{sc} 最大+2.1%を達成するとともに、V _{oc} ・FFも微増 p型nc-Si:Hの適用で効率改善効果(0.3-0.6%)を確認し、変換効率23.5%を達成(従来のp型アモルファスシリコンでは最高23.0%)	○	従来のヘテロ接合結晶系太陽電池の効率を改善する技術を開発した。開発した(p)nc-Si:Hは現在のヘテロ接合結晶系太陽電池太陽電池と同じ製膜手法で作製できることから事業化の障壁は比較的低いものと考えられる。
高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発 ② 非シリコン系材料 (酸化チタン (TiO _x))	● J _{sc} を3%向上 (標準ヘテロ接合結晶系太陽電池比) ● ライフタイム評価による implied V _{oc} > 700 mV	従来のアモルファスシリコン p-i層をTiO _x に置換することで J _{sc} を+4.1%改善 SiをTiO _x でパッシベーションした試料で implied V _{oc} =714 mVを達成 実セルで V _{oc} =700 mVを達成	◎	シリコン系材料に替わる透明な新規パッシベーションコンタクトで大幅な J _{sc} 改善を実証することができた。更なる高性能化・耐久性実証を行うことで、高効率・低コストセルの実用化に繋がるのが期待される。

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

A 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発
 (豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学)

1. 成果詳細

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」(豊田工業大学)

① 新規高効率標準試作ラインの構築

学内に太陽電池試作ラインを構築して高効率結晶シリコン太陽電池の研究開発を行うとともに、これを産業開発プラットフォームとして活用し、プロジェクト参画機関の研究開発を支援した。

まず初めに p 型 PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) セルの開発を推進した。本プロジェクトの開始当時、結晶シリコン太陽電池においては Conventional セル、あるいは Al-BSF (Aluminum Back Surface Field) セルと呼ばれる構造の太陽電池セルが一般的に用いられていた。それに対して我々は、セル裏面をパッシベーション膜で覆うことによって損失を低減し高い変換効率を得ることができる PERC セルを開発し、表 III-2-(ニ)-A-1 に示すように平均セル効率 19.9%、最高セル効率 20.0%を得た。

表 III-2-(ニ)-A-1 p 型 PERC 最適化検討セル試作結果 (156mm 角)

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	Eff. (%)
最高値	38.5	656	0.792	20.0
平均値 (n=4)	38.5	656	0.790	19.9

さらに我々は PERC の次の世代を担う高効率セルの開発にも取り組んだ。そのような次世代セルの有力候補の一つとして、n 型基板を使った PERT (Passivated Emitter and Rear Totally diffused) セルがある。表 III-2-(ニ)-A-2 に豊田工業大学で試作した n 型両面受光 (Bifacial) PERT セルの特性を示す。この試作では、表 (p⁺) 面を AlO_x 膜でパッシベーションした上で、電極直下と電極間の p⁺ 拡散層に濃度差をつけることによって損失を抑制する選択エミッタ (Selective Emitter, SE) 構造を導入して変換効率を向上させ、表 (p⁺) 面変換効率 21.0% を達成した。なお、SE 構造を作りこむ際には非質量分離型イオン注入法を適用して製造コストの上昇も抑えた。

表 III-2-(ニ)-A-2 AlO_x パッシベーション SE 構造 n 型 Bifacial PERT セル特性 (156mm 角)

光入射面	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	Eff. (%)	Bifaciality
表 (p ⁺) 面	40.2	652	0.803	21.0	0.924
裏 (n ⁺) 面	37.9	642	0.797	19.4	

上記のような Bifacial PERT セルには効率面で有利であることから n 型基板を用いた。しかし、材料コストの面からは p 型基板が有利である。そこで我々は、開発した PERT セルプロセスを p 型基板に適用する検討も行った。その結果、表 III-2-(ニ)-A-3 に示すように、我々のプロセスによれば n 型と p 型で相対的に 3.5% 程度の出力差しかないことがわかった。これにより、我々の開発した PERT セルプロセスは n 型・p 型両方に適用可能であることを確認することができた。

表 III-2-(ニ)-A-3 n 型および p 型 Bifacial PERT セル試作結果 (156mm 角)

	光入射面	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	Eff. (%)	Bifaciality
N 型 PERT	p ⁺	39.5	654	0.787	20.3	0.949
P 型 PERT	n ⁺	38.7	644	0.784	19.6	0.852

上記のような拡散系セルの試作プロセス確立に加えて、ヘテロ接合 (Silicon Hetero-Junction, SHJ) セル試作プロセスの構築も推進した。表 III-2-(ニ)-A-4 に示したように、我々のプロセスを用いて試作した SHJ セルの効率は 23.2% に達するとともに、到達可能な効率を意味する Pseudo Efficiency では 24% を超えており、量産品と同じ 156mm 角サイズで高効率を得られることが確認できた。これは豊田工大の SHJ セル標準試作プロセスが高い完成度を持っていることを示している。一方、ベンチマークとするセルとの特性比較では J_{sc} 、 V_{oc} 、FF それぞれで 1%~3% 程度の相対差が存在し、いまだ改善の余地があることもわかる。これに対して我々は原因分析と改善策の立案お

よびそれらの効果検証を行った。その結果、①2層反射防止膜により J_{sc} 2.5%向上、②基板品質改善により 1%特性向上、③光照射・アニールにより 4%程度特性向上、④電極面積率低減により J_{sc} 2.6%増、などの改善効果を確認して、セル効率 25%達成の目途を得ることができた。量産品と同じ 156mm 角サイズでこのような高効率の拡散系およびヘテロ系セルを試作できる環境を持つ大学は日本においては豊田工大のみである。

表 III-2-(ニ)-A-4 豊田工大試作 SHJ セル特性とベンチマークとの比較 (156mm 角)

	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	Eff. (%)	Pseudo FF	Pseudo Eff. (%)
豊田工大 SHJ	39.0	736	0.808	23.2	0.847	24.3
Benchmark	39.5	750	0.832	24.7	-	-
差異	1.3%	1.8%	3.0%	6.4%		

② 高品質結晶シリコン材料・結晶評価

上記の豊田工大試作ラインを活用して、様々なシリコン材料・結晶評価を行った。図 III-2-(ニ)-A-1 には、豊田工大試作ラインを使ったシリコン材料・結晶評価の例を示している。(a)では、SHJ 標準試作プロセスを使って京セラのシードキャスト基板を評価し、その技術開発を支援した。(b)では、九州大学で試作したウエハをセル化評価し、その結晶成長技術が優位性を持つことを示した。また(c)では、トクヤマの試作インゴットを評価し、不純物や結晶成長条件がインゴット品質に与える影響を検討した結果、ライフタイム 2msec 以上を達成し、インゴットの歩留りを向上させることが出来た。これによりモジュール製造コスト 1.9 円/W、発電コスト 0.38 円/kWh のコスト低減を実現した。

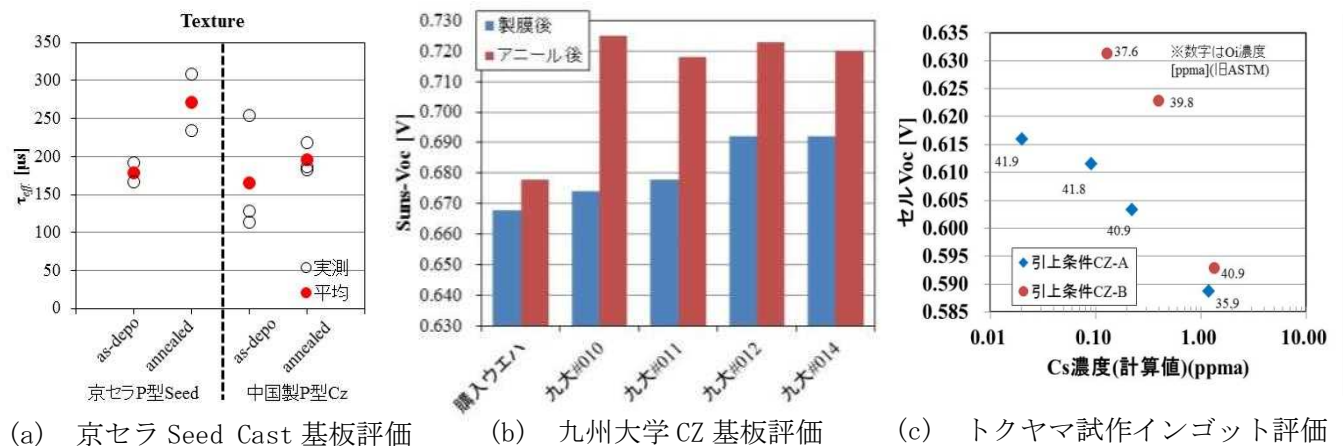


図 III-2-(ニ)-A-1 豊田工大試作ラインを使ったシリコン材料・結晶評価の例

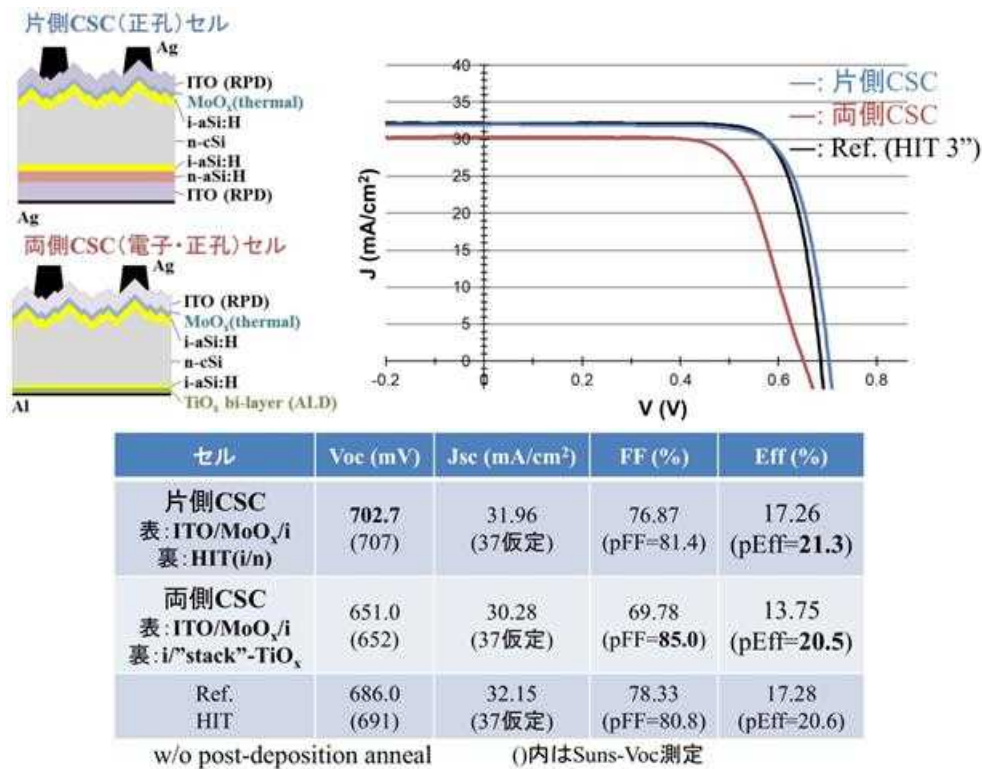
③ セルプロセス評価

豊田工大のパイロットライン設備および各種セル標準試作プロセスを用いて、連携先企業の開発したプロセス技術および装置の評価を行い、それらの研究開発を支援した。ナミックスの拡散系セル用 Ag および Cu 電極ペーストおよび SHJ セル用電極ペースト開発に対してパイロットラインを使ったセル試作により協力。モジュール製造コストを 1.5 円/W、発電コストを 0.7 円/kWh 低減させることができた。さらに、コマツ NTC の極薄極狭カーブロス固定砥粒スライスウエハを使って PERC、PERT および SHJ セルを試作しその有効性を評価した。N 型 Bifacial PERT セルを薄型化すると裏面効率が向上するなど、有益な知見を得るとともに 91 μm 厚の SHJ セルでも効率 19.4%が得られることを確認し、最薄 66 μm 厚のセル試作にも成功した。これらの評価によってスライスピッチ 200 μm のスライス加工技術の確立に貢献し、モジュール製造コストを 6.8 円/W、発電コストを 0.5 円/kWh、低減させることができた。

④ ヘテロ技術評価

SHJ などヘテロ系セルの技術開発においては、デバイスシミュレーション環境を活用して理論的検討を行うとともにセルおよびデバイス試作と評価解析を組み合わせセル高効率化の設計指針を探り、シャープ HBC (Hetero-junction Back Contact) セル技術開発に貢献した。さらに、次世代のヘテロ系

セルとして期待される CSC (Carrier Selective Contact) 技術開発も推進した。CSC セル作製・評価技術に関して、小面積基板を使った共通評価技術を構築。電子選択コンタクトとして TiO_x 、正孔選択コンタクトとして MoO_x を使った CSC セル試作検討を実施。高い V_{oc} (700mV) と高 FF (pFF=85%) が得られることを確認した (図III-2-(ニ)-A-2)。FET 型テスト素子を用いたアモルファス/結晶 Si 界面のラテラル電流解析により、界面トラップ密度を定量的に評価する手法を開発した。さらにこれを CSC セルコンタクト型にも展開して界面パラメータを抽出。従来型ヘテロ接合セルと異なる劣化メカニズムを定量評価する方法を開発した。



図III-2-(ニ)-A-2 (上段左) 片側 CSC (正孔) セル構造および両側 CSC (電子・正孔) セル構造。(上段右) セルの光照射 J-V 特性。(下段) セル特性結果。

⑤ モジュール評価

我々は複数の企業や大学、研究機関等と連携してモジュールを試作・評価できる体制を構築し、それを活用してモジュール信頼性劣化メカニズムの解明や信頼性向上技術の開発に取り組んだ。日清紡メカトロニクスおよび奈良先端科学技術大学院大学と連携して、豊田工大パイロットラインを用いて試作した N 型単結晶 PERT セルを使って 54 直フルモジュールを試作、信頼性評価を実施した。また、産総研・北陸先端大・奈良先端大・ナミックスと連携して PID (Potential Induced Degradation) メカニズム解明のための検討を行い、PID に対する電極ペーストの影響や SiN_x 反射防止膜の影響、あるいは N 型 Bifacial PERT セルにおける PID メカニズムを明らかにするなどの成果を得た。さらに名古屋大学や太陽電池メーカーと連携して多結晶 PERC セルの LeTID (Light and elevated Temperature Induced Degradation) についての検討を行い、その原因とメカニズムの解明に貢献した。

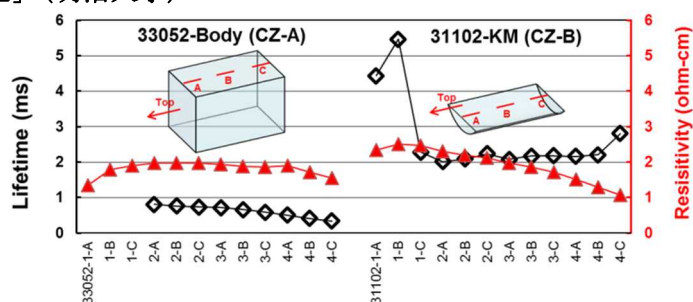
上記の研究開発の成果を定量的に評価するためにモジュール製造原価及び発電コストの試算を行った。その結果を表III-2-(ニ)-A-5に示す。例えば、本プロジェクトの高品質低コスト結晶成長技術、極薄極狭カーフスライス技術、セル効率向上技術、材料コスト低減技術、モジュール信頼性向上技術などによって、2020年にインゴット製造経費 2,000 円/kg、ウエハ厚 100 μ m、スライスピッチ 170 μ m、スライス加工費 22 円/枚、セル効率 23.2% になったとすると、モジュール製造コストは 36,429 円/kW になる。これに BOS コストの予測値 87,620 円/kW をくわえてシステム価格を算出すると 124,050 円/kW となり、2020年の発電コストは 11.0 円/kWh となると見積られる。同様に、2025年の発電コストは 6.9 円/kWh となると見積ることができる。以上の試算によって、本プロジェクトの開発成果の優位性を示すとともに、目標とする発電コスト達成の見込みも示すことができた。

表Ⅲ-2-(ニ)-A-5 本開発成果に基づくモジュール製造原価及び発電コスト試算

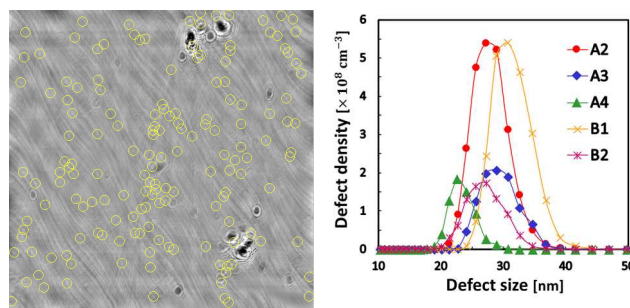
	2015年	2020年	2025年
原料ポリシリコン価格 (¥/kg)	¥1,400	¥1,400	¥700
インゴット製造経費 (¥/kg)	¥2,600	¥2,000	¥1,500
スライス加工費 (¥/枚)	¥47.0	¥22.0	¥18.0
ウエハ厚 (μm)	180	100	80
スライスピッチ (μm)	340	170	130
セル効率	20.0%	23.2%	25.0%
モジュール効率	17.7%	20.6%	23.6%
モジュール製造コスト (¥/kW)	¥61,366	¥36,429	¥26,693
BOSコスト (¥/kW)	¥201,826	¥87,620	¥55,260
システム単価 (¥/kW)	¥263,192	¥124,050	¥81,952
土地造成費 (¥/kW)	¥4,000	¥4,000	¥4,000
土地リース費用 (¥/m ²)	¥150	¥150	¥150
系統連系費用(昇圧費用) (¥/kW)	¥13,500	¥13,500	¥13,500
O&M費比率(対システム単価)	2.1%	2.1%	2.1%
撤去費用(対システム単価)	5%	5%	5%
設備利用率	13.0%	15.0%	15.0%
運転年数(年)	20	20	25
劣化率	1.0%	1.0%	0.5%
発電コスト(減価償却ありメンテ込) (¥/kWh)	24.2	11.0	6.9

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」(明治大学)

セルプロセスごとに最適なウエハ仕様を提示するため、株式会社トクヤマと共同で原料・結晶中の不純物濃度や結晶成長条件を変えたウエハを作製した。改良した成長プロセスによって高ライフタイムかつ高プロセス耐性のインゴットを実現した。図Ⅲ-2-(ニ)-A-3 に従来手法と改良手法によって成長したインゴットのライフタイム測定結果を示す。インゴット全領域で従来手法と比べ1 ms以上高く、劣化領域が見られなかった。さらに1000°C近傍の高温処理を含む製造プロセスによってn型両面受光セルを作製したところ、改良手法によるウエハでは熱処理によるライフタイム劣化が小さいことが見出された。ライフタイムと熱処理耐性に対する改善について、酸素析出物の観点から調査を行なった。走査型赤外顕微鏡SIRM-2100および透過電子顕微鏡(TEM)像解析によって熱プロセスによる酸素析出動態を調べた(図Ⅲ-2-(ニ)-A-4、図Ⅲ-2-(ニ)-A-5)。析出物密度は炭素濃度と相関し、従来手法で作製したウエハ(A0-A5)と改良手法によって作成したウエハ(B0-B2)を比較すると改良手法で一桁程度析出物密度が小さくなった。図Ⅲ-2-(ニ)-A-5(b)に示すように、従来手法と改良手法では析出物の形状に大きく違いがあり、従来手法では板状の析出物周辺に高密度の転位が発生していることを見出した。



図Ⅲ-2-(ニ)-A-3 従来手法(CZ-A)と改良手法(CZ-B)によって成長したインゴットのライフタイム(黒)と抵抗率(赤)の分布



図Ⅲ-2-(ニ)-A-4 1100°C、3時間の熱処理後の(a) SIRMによる赤外後方散乱像と散乱体の検出結果(黄色の円)および(b) 欠陥のサイズ分布

結晶 Si 太陽電池の高効率化に向け、低コスト原料中に残留するドナー・アクセプタ不純物、および接合層、コンタクト層の高濃度不純物の精密評価を目的とし、低温フォトルミネッセンス (PL) 分析において不純物クラスタに起因する発光 (ICBE: impurity cluster bound exciton) を新たに見出し、さらに不純物定量への応用を示した。

Si 基板の高品質化を図る上で不可欠な極低炭素濃度定量を目的とし、電子線照射発光活性化 PL 法により 10^{14} – 10^{15} cm^{-3} 台の炭素が高感度で検出できることを示した。また、炭素濃度をコントロールした試料の定量を行ない、電子線誘起炭素複合体に起因する C-line 発光が 10^{14} cm^{-3} オーダーまで信号強度に対応することを確認した。また電子線照射量を十分に大きくすることで信号強度が増強され、得られた S/N 比から検出下限を見積もり、おおよそ 5×10^{12} cm^{-3} という結果を得た (図 III-2-(二)-A-6)。本成果は、論文誌 Japanese Journal of Applied Physics にて注目論文として spotlight に選ばれた。

液体ヘリウム温度測定に加え、安価である液体窒素温度 (77 K) PL 法による炭素濃度の定量評価の検討を行った。発光線はブロードになるが、バンド端発光 (I_{TO}) と、C-および G-line を一括で測定することになり、C-および G-line のバンド端発光強度は 4.2 K と液体窒素温度 (77 K) で強い正相関がある。また、ドーパント不純物発光も現れないことから、とくに G-line において基板抵抗率依存性がほぼ消失する優位性も見出した。これらにより、高感度化・高感度化、ならびに解析の容易化などの利点がある (図 III-2-(二)-A-7)。本評価手法は特許出願に至った。

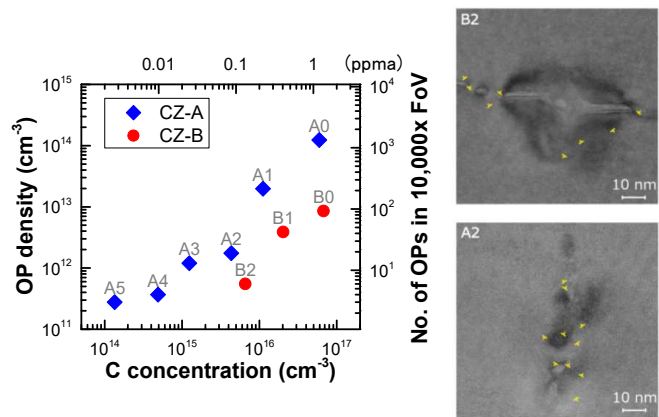


図 III-2-(二)-A-5 太陽電池製造プロセス後のウエハにおける (a) TEM 像解析による酸素析出物密度、および (b) 酸素析出物の TEM 像。転位を黄色の記号で示した。

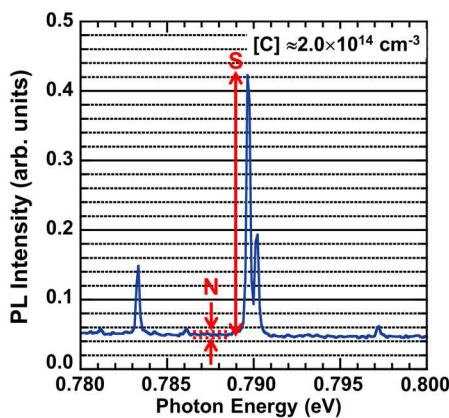


図 III-2-(二)-A-6 電子線照射量を 2 MeV で 1×10^{16} cm^{-2} としたときの C-line と背景ノイズの強度比較

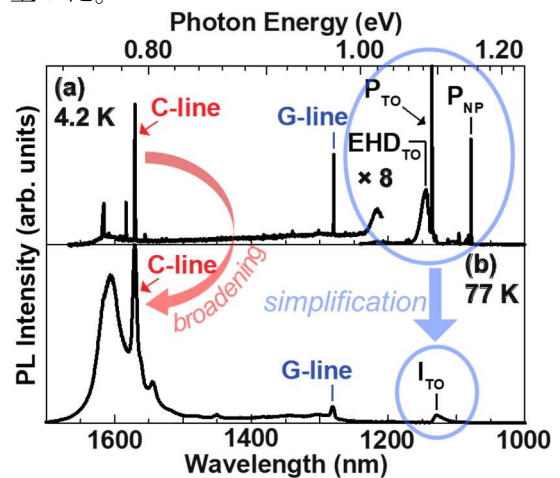


図 III-2-(二)-A-7 PL 発光スペクトルの測定温度による PL スペクトルの違い。(a) 液体ヘリウム温度、(b) 液体窒素温度。

さらに、寒剤が不要で大気中で測定が行える室温発光活性化 PL 測定法を開発した (図 III-2-(二)-A-8)。室温測定では、低温における炭素起因発光線 (C-line) 近傍に深い準位の発光帯 (C08-band) が現れ、この PL 信号強度は炭素濃度と正相関することを見出した。実用化に向けて長時間測定における試料温度上昇の問題が懸念されたが、これによる欠陥構造変化は無視できる程度であることがわかった (図 III-2-(二)-A-9)。本測定法を用いて C08-band の相対信号強度と炭素濃度の関係を、130 枚におよぶ CZ、MCZ、FZ 結晶に対して調べた。結果として、酸素濃度と抵抗率が一定の範囲の試料においては正相関が認められることを示した (図 III-2-(二)-A-10)。

RT-PL Spectroscopy

- Laser Excitation
- Wavelength: **532 nm**
 - Spot Size : about 2.3 mm
 - Surface Intensity: **190 mW**

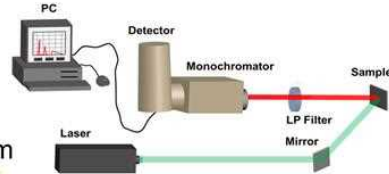


図 III-2-(ニ)-A-8 室温発光活性化 PL (RT-PL) 法の概要。

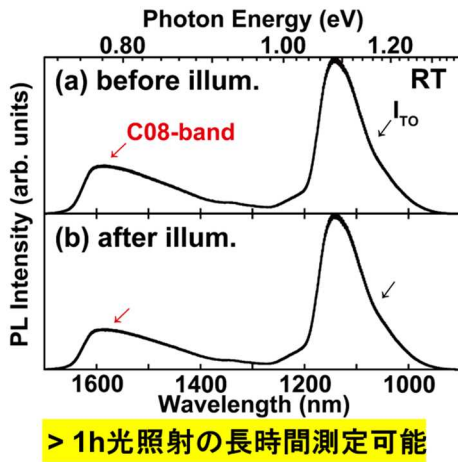


図 III-2-(ニ)-A-9 MCZ Si 結晶の室温 PL スペクトル (炭素濃度: $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) : (a) 2 MeV 電子線照射直後、および、(b) 引き続き 1 hr レーザー照射後。

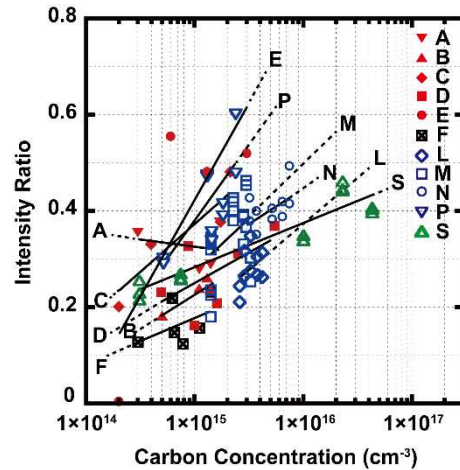


図 III-2-(ニ)-A-10 炭素濃度と C08-band 相対信号強度の関係。

キャスト成長による太陽電池用多結晶シリコンは高効率化の傾向と平行してシェアを維持している。ハイパフォーマンス (HP) 多結晶シリコン、擬似単結晶シリコンは種結晶を導入することでキャスト成長法を用いて従来型多結晶シリコンより優れたライフタイムなどの性質が得られる。特に HP 多結晶は従来型多結晶シリコンとの置き換えが進んでいる。我々は種結晶以外の条件を揃えた従来型多結晶、HP 多結晶、擬似単結晶シリコン (図 III-2-(ニ)-A-11、図 III-2-(ニ)-A-12) について顕微赤外分光マッピングを用いて酸素・炭素分布を調べた。HP 多結晶シリコンでは従来手法と同様の分布を示す一方、擬似単結晶シリコンでは種結晶に由来すると考えられる比較的高濃度の酸素分布が見出された。また低品位原料の影響を金属不純物と欠陥の相互作用の観点から評価し、サブグレイン欠陥への金属修飾を PL イメージング法により解析した。その結果、金属不純物が欠陥と相互作用して効率劣化をもたらす現象について、基板導電型 (n または p) が異なると汚染金属種毎に影響度が異なることを見出した。本成果は、2016 年春季応用物理学会で講演奨励賞を獲得した。

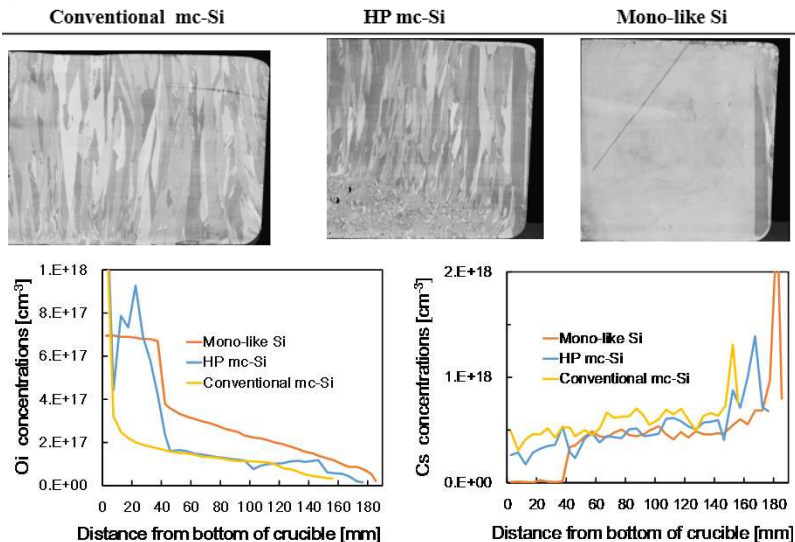
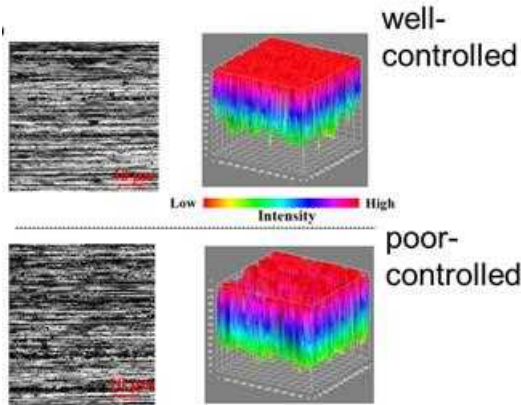


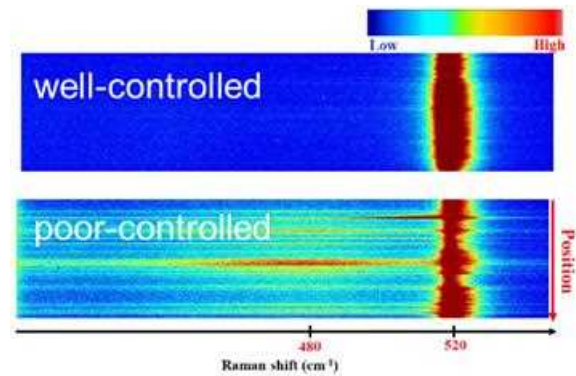
図 III-2-(ニ)-A-11 従来型多結晶、HP 多結晶、擬似単結晶シリコンの試料断面。インゴットから結晶成長方向に平行にスライスした。

図 III-2-(ニ)-A-12 擬似単結晶、HP 多結晶、従来型多結晶シリコン試料の成長方向の格子間酸素 (O_i)、置換位置炭素 (C_s) 濃度分布

シリコン基板スライスの低コスト高性能化を目指して、従来手法の遊離砥粒を用いたセルを参照として、コマツ NTC 株式会社と共同で固定砥粒ワイヤによるスライスプロセスのセル特性への影響を調査した。基板コストや歩留まりの観点から、厚さ 100 μm 以下の薄型かつ高強度な基板を実現するため、より高精度なスライス技術の確立が求められている。コマツ NTC 株式会社、長岡技術科学大学、豊田工業大学と共同で、固定砥粒方式マルチワイヤダイヤモンドソーによるシリコン基板スライスの低コスト化・高性能化技術の評価・開発を行い、本大学は基板の破損の原因やスライスプロセスで生じるダメージの詳細を明らかにした。破断し易い基板とし難い基板では、表面ラフネスの影響が大きく、基板表面の結晶性が異なることが判明した（図Ⅲ-2-(ニ)-A-13、図Ⅲ-2-(ニ)-A-14）。

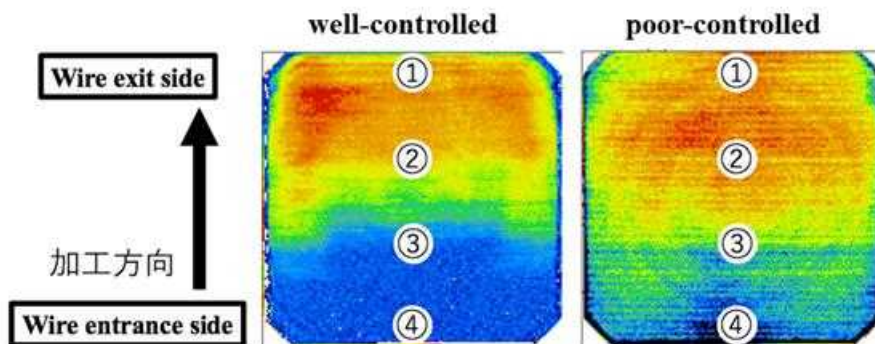


図Ⅲ-2-(ニ)-A-13 (a) 改良型スライス技術 (well-controlled)、および、(b)従来スライス技術 (poor-controlled) により得られたシリコン基板表面の共焦点高顕微鏡イメージ、および、ラフネス分布。



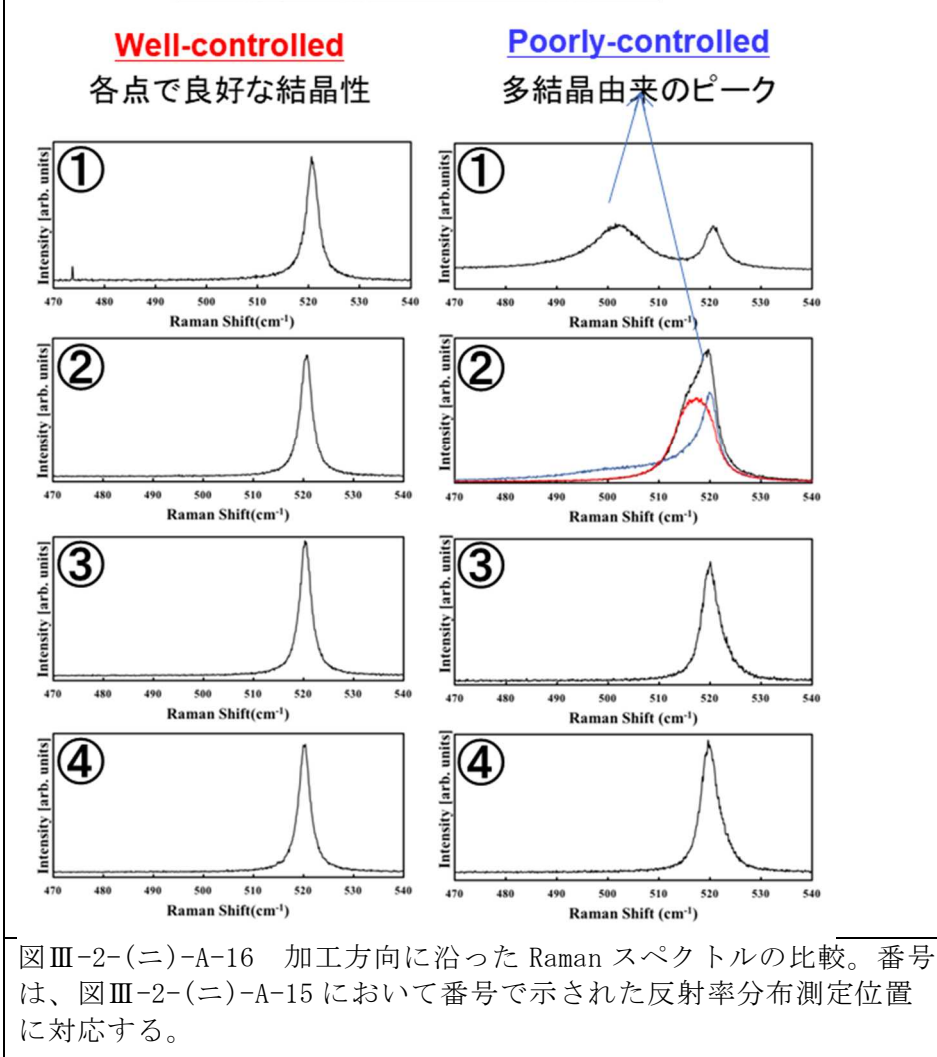
図Ⅲ-2-(ニ)-A-14 (上) 改良型スライス技術、および、(下) 従来スライス技術により得られたシリコン基板表面の Raman イメージの比較。

加えて、基板のライフタイムには面内の分布があることが判明した。図Ⅲ-2-(ニ)-A-15 にマイクロ波光伝導 (μ -PCR) 法で評価したスライス基板表面の反射率分布を示す。図における基板下部がスライス開始位置、上部がスライス終了位置であり、水平方向がワイヤ往復走行方向となる。スライス条件によらずワイヤの入り口側よりも出口側の反射率が低いことが判明し、これはスライスダメージの影響を反映している。図Ⅲ-2-(ニ)-A-15 中に示す箇所において、結晶性を評価するため Raman 分光評価を行った（図Ⅲ-2-(ニ)-A-16）。



図Ⅲ-2-(ニ)-A-15 各スライス条件で作製されたシリコン基板表面の反射波ピーク値マッピング。

加工方向に沿ったRaman分光評価

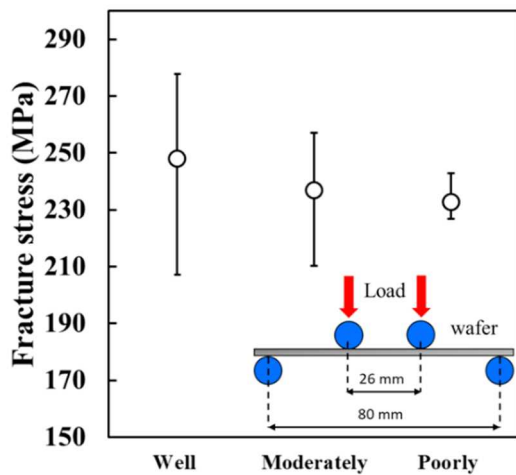


改良スライス技術では、基板表面の結晶性はどの位置においても高い。このことは、図Ⅲ-2-(ニ)-A-15 で得られた反射率が大きい領域においても結晶性は高いのであって、スライスダメージが抑制されていると考えられる。一方、従来スライス技術では、スライスプロセスの前半に相当する③、④の位置において結晶性の低下にともなう半値幅の増加、および、圧縮応力由来の高端数側ブロードニングが生じている。スライスプロセスの後半である①、②の位置では、上記に加えて、多結晶層由来の大幅な低波数側へのラマンシフト、および、結晶性低下による低波数側へのブロードニングが生じている。この分布の違いは、図Ⅲ-2-(ニ)-A-15 で得られた反射率分布との相関が高い。

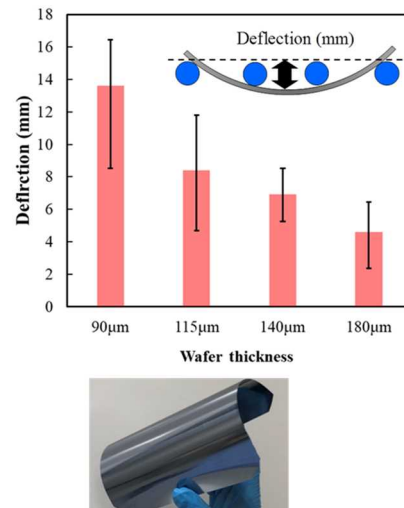
スライス制御された Si ウェハの曲げ破断試験では、結晶性が高いほど高く (図Ⅲ-2-(ニ)-A-17)、薄い基板ほど高い曲率性を示した (図Ⅲ-2-(ニ)-A-18)。本技術を用いて、従来の 180 μm 厚セルと同等の性能を有する 100 μm 厚の n 型両面受光型セル作製に貢献した (表Ⅲ-2-(ニ)-A-6)。

表Ⅲ-2-(ニ)-A-6 改良スライス技術で作製された薄板基板を用いた n 型両面受光型セルの性能比較。

Cell thickness	J_{sc} (mA/cm ²)		V_{oc} (V)		η (%)	
	Front	Rear	Front	Rear	Front	Rear
180 [μm]	39.6	37.7	0.642	0.641	19.8	19.6
100 [μm]	38.4	37.5	0.639	0.635	18.8	19.2

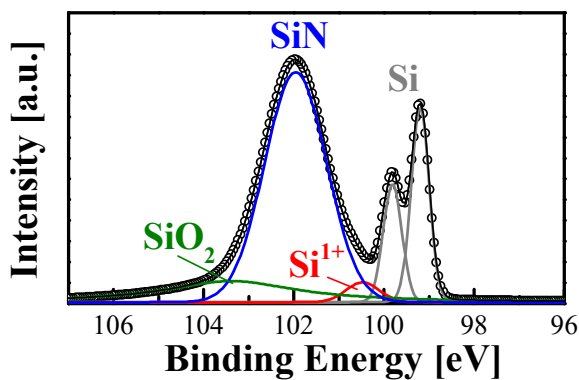


図III-2-(二)-A-17 スライス条件と基板の曲げ破断応力の関係。



図III-2-(二)-A-18 (上) 4点曲げ試験によるシリコン基板ひずみ量 (deflection) のシリコン板厚依存性。
(下) 90 μm 厚のシリコン基板。

表面パッシベーションは HIT や TOPCon に代表されるパッシベーターティッドコンタクトの研究の進展、PERC セル、PERT セルの市場参入によりさらに重要な技術課題となっている。SiN パッシベーション成膜プロセスを詳細に評価し、窒化シリコン膜 (SiN_x 膜) のパッシベーション性がプラズマ処理によって改善し、X 線光電子分光 (XPS) によって化学結合の再結合が起こっていることを見出した。また SPring-8、BL46XU の硬 X 線光電子分光 (HAXPES) 装置を用い、100.5 eV の位置に Si¹⁺(Si₂O) に起因するピークが存在し、プラズマ処理により減少することを見出した (図III-2-(二)-A-19)。また、パッシベーターティッドコンタクトなど高リーク性の界面を評価するために、超高周波インピーダンス解析装置を用いて、アモルファス膜界面や改良ペースト電極の評価を進めた。インピーダンスの Cole-Cole プロットと等価回路フィッティングの結果を図III-2-(二)-A-20 に示す。今後本手法を用いることで、界面特性を界面準位 (D_{it}) および固定電化密度 (Q_f) 等の定量的な指標で示していく。



図III-2-(二)-A-19 SPring-8、硬 X 線光電子分光 (HAXPES) 法によって測定した、SiN_x 膜界面における化学結合状態による Si2p ピークの分裂

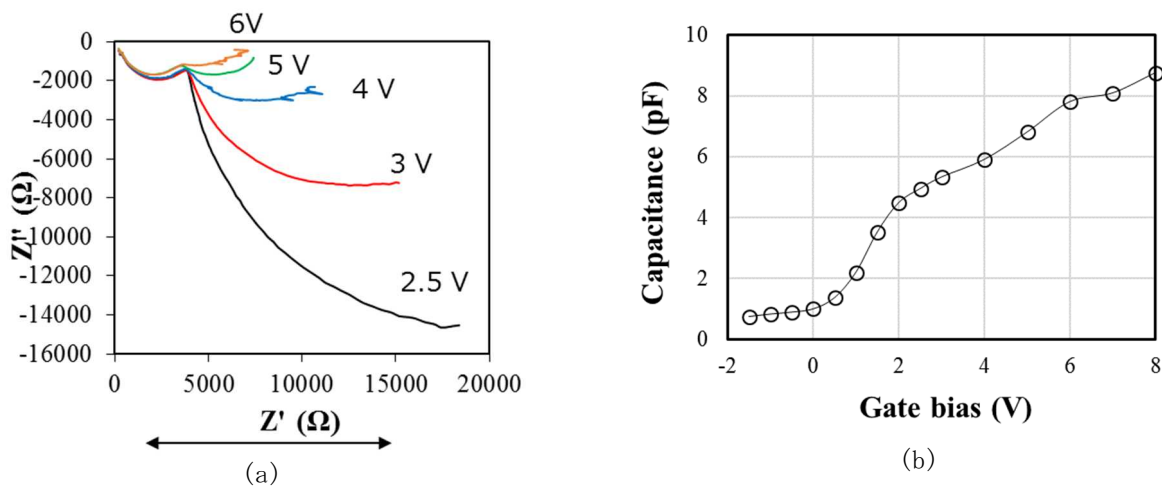


図 III-2-(二)-A-20 超高周波インピーダンス測定によるアモルファスシリコン界面に対する測定結果の(a) Cole-Coleプロット、および(b)等価回路フィッティングにより導出した容量

ヘテロ接合セルにおける受光面側に堆積させる透明導電膜 (transparent conductive oxide; TCO)、代表例はスズ添加インジウム酸化物 (indium-tin-oxide; ITO) は、プロセス中にデバイス性能を劣化させる種々のいわゆる「ダメージ」が導入されることが問題となる。高効率化のためには、このプロセスダメージの抑制が重要となるため、様々な手法を用いた物理化学評価に基づく、TCO のプラズマ成膜ダメージのメカニズムの解明に取り組んだ。

低ダメージプロセスと期待されている反応性プラズマ蒸着 (reactive-plasma deposition; RPD) 法によるプロセスダメージ評価では、その微細構造・化学結合状態を硬 X 線光電子分光法 (HAXPES)、透過電子顕微鏡法 (TEM)、高角散乱環状暗視野法 (HAADF) にて決定した。p 型 a-Si 薄膜上に RPD 法で ITO を成膜し、断面構造を TEM 観察した結果、および、硬 X 線光電子分光 (HAXPES) 法を用いて Si 1s スペクトルを測定した結果をそれぞれ図 III-2-(二)-A-21 に示す。断面 TEM 像からは不明瞭だが、光電子スペクトルにおいて Si-O 結合に起因する 1843 eV のピーク強度が小さい取出し角 (take-off angle; TOA) において強く、また、大きな TOA において強度が著しく弱くなることから、ITO/a-Si 界面にシリコン酸化膜が形成されていることが判明した。酸化膜は成膜中に形成されたものと考えられ、本構造デバイスを大気中にて 200°C、30 min で熱処理すると、この酸化膜由来のピークはほぼ消失する。一方で、In 3d スペクトルの解析から、ITO 層の In が 3 価から 4 価へと変化した。この熱処理の効果は、HAADF 像でも確認できた。熱処理により ITO 側から a-Si 側へ In が、また、a-Si 側から ITO 側へ Si が相互拡散することを見出した (図 III-2-(二)-A-22)。プラズマプロセスでは、後述するように再結合中心となる欠陥が基板表面近傍に導入されるが、今回、界面反応層の形成をとまなうこと、界面では種々の元素の相互拡散なども生じることがわかった。低ダメージを目指しながら界面反応層の形成も抑制するようなプロセスが求められることに加え、デバイス特性が個々の単膜特性から予想されるものからずれる原因の理解が重要であることを示した。

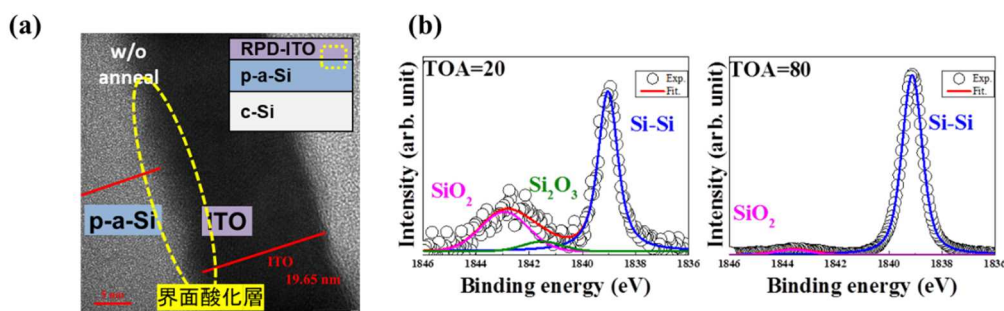
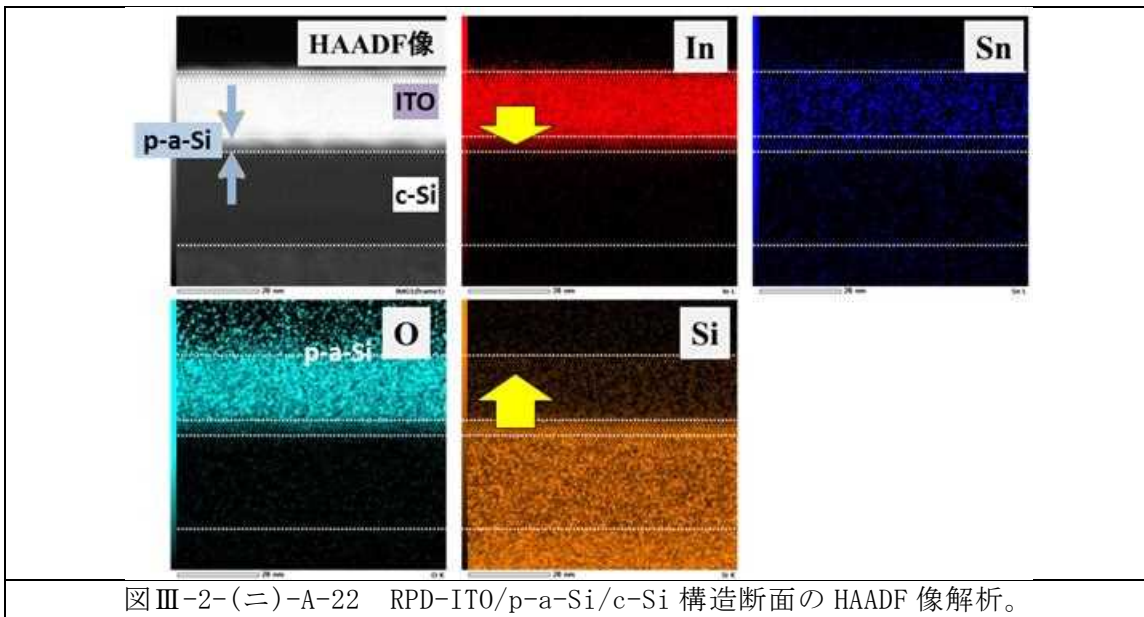


図 III-2-(二)-A-21 (a) RPD-ITO/p-a-Si 界面の断面 TEM 像、および、(b) Si 1s コアレベルスペクトルの光電子取り出し角 (TOA) 依存性。



また、RPD ダメージを Si 基板のライフタイムの観点から評価を行った。RPD 法で成膜した ITO 膜を剥離させ、キンヒドロン/メタノール混溶液にてパッシベーションを行った後、ライフタイムを測定した。その後、過酸化水素溶液とフッ酸溶液の浸漬を繰り返すことで Si 基板のエッチングを行い、深さ方向における RPD ダメージ分布を取得した (図 III-2-(二)-A-23)。サイクルごとに実効ライフタイムを測定したところ、RPD プロセスを経ない場合は、ライフタイムのサイクル数依存は確認されず、RPD プロセスを得た場合は、サイクル数の増加に伴いライフタイムも増加し、5 回前後で飽和する。このことは、表面から約 10 nm 以下程度の範囲に再結合中心となる欠陥が分布していたことを示す。これら欠陥は、熱処理 (N₂ 雰囲気、200°C) で回復していることもわかった。ライフタイムの減少の実体を調査するために、PL 法を用いて評価した。PL 測定より、結晶材料中の不純物である炭素に起因した複合欠陥と相関があることが判明した (図 III-2-(二)-A-24)。加えて、複合欠陥は表面近傍に多く形成され、かつ、再結合中心として働くことを見出した。

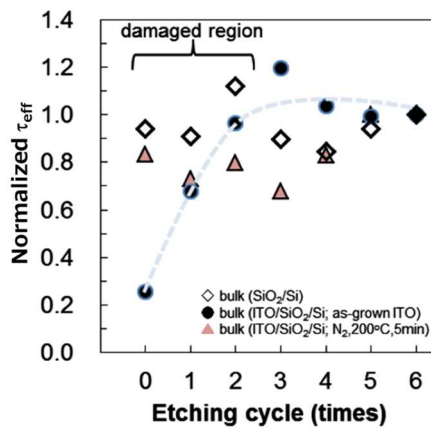
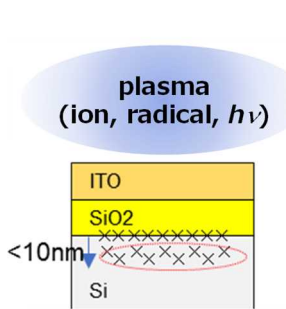


図 III-2-(二)-A-23 RPD プロセスにより Si 基板表面に導入される再結合中心の深さ方向分布。

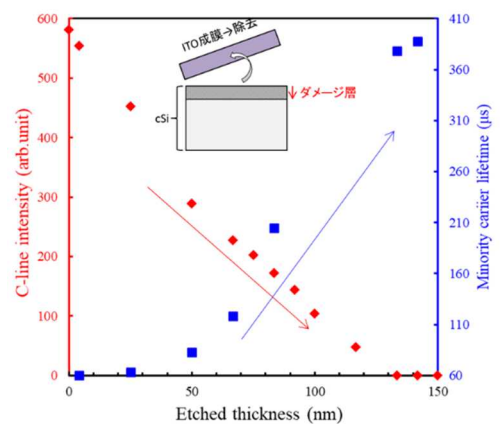
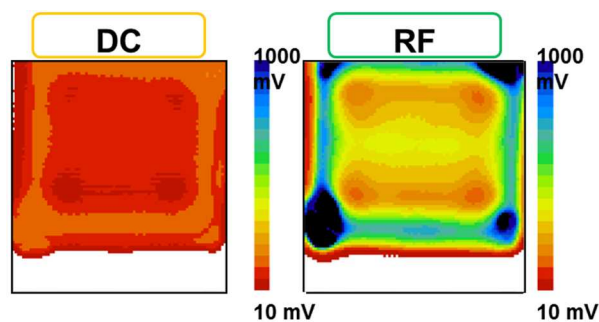


図 III-2-(二)-A-24 C-line 強度、および、ライフタイムのエッチング深さ依存性

従来の TCO の成膜手法であるスパッタリング法のダメージを、Si 基板のライフタイムの観点から評価した。DC、および、改良 RF スパッタにより成膜された ITO を除去したのち、Si 表面を化学パッシベーションした試料を作製し、 μ -PCR 法によりマイクロ波反射率の分布を測定した (図 III-2-(二)-A-25)。改良 RF での反射率が高く、プロセスによるライフタイム劣化が小さいことが示された。さらに、本試料をエッチングし、その前後における Si バルクの実効ライフタイム (バルクライフタイムに相当) を

測定した。エッチング後はいずれもライフタイムは向上しており、ライフタイムを低下させるダメージ層が主に表面近傍に形成されていたことを示している。また、成膜プロセスを経ていない参照基板試料 (ref. Si bulk) との差分から、ダメージ導入量が改良 RF で低減されていることもわかった (図 III-2-(二)-A-26)。以上の結果から、同程度のシート抵抗を有する ITO 成膜においては、改良型 RF スパッタが有効であるというプロセス改善指針を獲得した。



	DC SCOT®	RF SCOT®	DC SCOT® rear Si	RF SCOT® rear Si
Average(mV)	92.298	437.55	513.62	489.17
Median(mV)	<u>88.112</u>	<u>342.02</u>	<u>501.55</u>	<u>484.17</u>

図 III-2-(二)-A-25 マイクロ波反射率分布の比較。

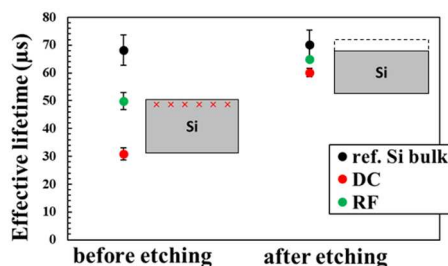


図 III-2-(二)-A-26 エッチング前後の Si 基板の実効ライフタイム。

従来の透明導電膜 (Sn 10 wt% ITO) に代わる高移動度透明導電膜の材料・プロセス評価・開発、および、セル試作・評価を株式会社アルバック、および、豊田工業大学と共同して行った。TCO 材料として ANP 社製高移動度 TCO である SCOT® を使い、明治大学では太陽電池に適したプロセス開発のため、単膜や界面特性の劣化要因を調べた。HAXPES を用いた TCO 界面の化学結合状態を、ガス雰囲気および熱履歴の効果と合わせて評価し、TCO 成膜時の界面酸化膜の形成を抑制するための基板 pre-heat 技術の開発に貢献した (図 III-2-(二)-A-27)。この改善成膜プロセスにより、高移動度・低キャリア濃度化を実現した。本膜を用いてヘテロ接合セルを試作し、長波長域での量子効率の改善により (図 III-2-(二)-A-28)、変換効率の向上に貢献した。

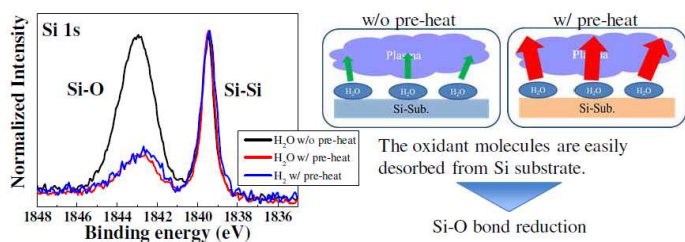


図 III-2-(二)-A-27 HAXPES による TCO 界面の化学結合評価、および、成膜時の界面酸化膜形成を抑制する pre-heat プロセス。

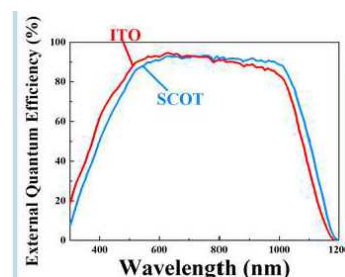


図 III-2-(二)-A-28 新規 TCO 材料・プロセス技術を用いて作製されたヘテロ接合セルの外部量子効率。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」(九州大学)

シリコン結晶の品質向上に関する研究開発は、磁場印加法など LSI の研究開発分野で 50 年以上の長い歴史が有る。しかし、この技術を直接太陽電池の高効率化に対して応用すると高いコストが発生し、実用的ではない。この既存の結晶成長技術を太陽電池用に応用する場合、太陽電池の製造プロセスに対応したシリコン単結晶成長技術を独自に研究開発する必要がある。特に、コスト低減と太陽電池の高効率化に焦点を当てた高純度のシリコン単結晶の製造に関する研究開発を通して、総合的な発電コストの低減に貢献する。

本研究開発の最終目標は、高品質・低コスト結晶成長技術として、転位密度が低くライフタイムの長い高品質な疑似単結晶ならびに軽元素濃度精密制御による単結晶成長技術に関する研究を行い、最終目標として、p 型基板では 5msec、n 型基板では 10msec のバルクライフタイムを持つ結晶を育成することである。これらにより得られた知見、技術開発指針をもとに、原料ならびに結晶メーカーの製造コストの低減、およびそれら基板を用いたセルメーカーの高効率化・低コスト化に貢献する。なお、これまでの研究開発によって、p 型基板では 5msec、n 型基板では 10msec のバルクライフタイムを実現し、最終目標をクリアしている。以下に本研究開発の詳細について述べる。

① 高品質低コスト疑似単結晶成長技術の構築

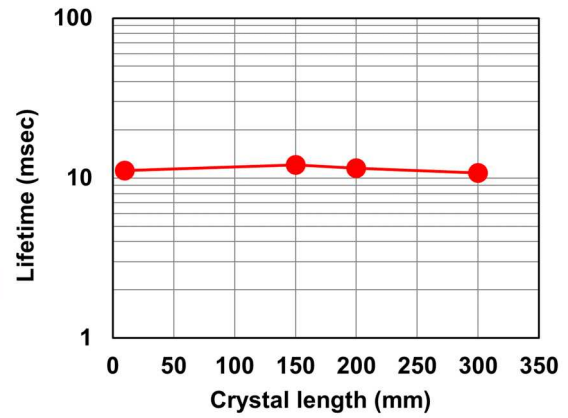
本研究開発では、疑似単結晶 Seed cast シリコン結晶化率の向上法を提案し、これを実施した。特に、X 線回折法を 3 次元観測カメラに応用して、単一シードを用いた時の疑似単結晶 Seed cast シリコン結晶中の転位密度測定や、結晶中の軽元素汚染を極力低減できる新規結晶育成方法の提案を行った。X 線カメラを使用して、結晶成長したシリコン単結晶と多結晶の評価を行った。X 線セクショントポグラフィマルチスライス法を用いて、シリコンウェハ表面近傍の研磨傷や析出物の 3 次元観察に成功した。これにより、ウェハ切削時に生じる研磨傷等の定量的な評価が可能となった。特に、種々の結晶育成条件で育成した単結晶と多結晶中の析出物や研磨傷の 3 次元分布とライフタイムとの関係を定量的に比較検討した結果、表層の欠陥密度が結晶特性に影響を与えていることが分かった。これにより、従来よりも転位密度、残留応力、双晶等が少ない疑似単結晶シリコンを Seed cast 法により実現することが可能となった。

② 超高品質単結晶成長技術の構築

本研究開発では、低不純物、高ライフタイムを実現可能な CZ シリコン結晶成長法を提案し、実施した。特に、極低濃度の酸素と炭素の CZ シリコン単結晶育成を行った。これにより、新規な CZ 結晶成長法を提案し、従来では到達できなかったライフタイムの実現に向けた炉の設計を行った。さらに、この結晶育成装置を用いて、実際に結晶育成を行い、極低濃度の酸素と炭素、および高ライフタイムの 8 インチ CZ シリコン単結晶を育成した。

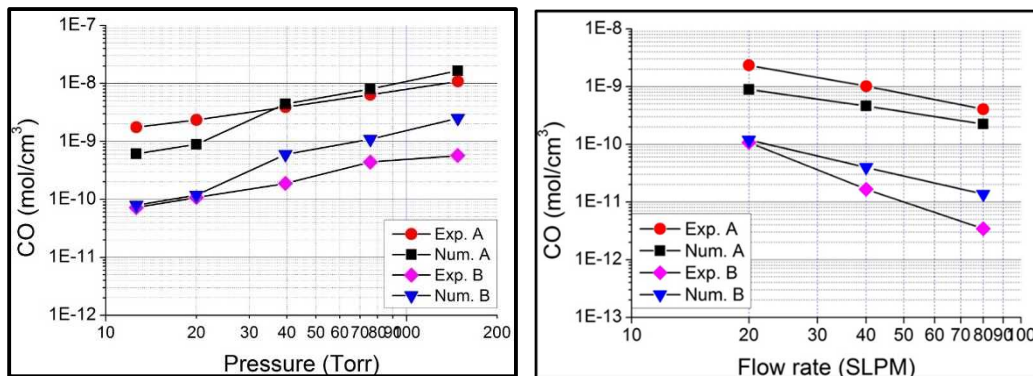
太陽電池の効率向上のためには、結晶シリコンの高キャリアライフタイム化が求められている。太陽電池用結晶内のキャリアライフタイムは、酸素析出物および育成欠陥の影響を受けることが報告されている。また、炭素濃度が 10^{14} atoms/cm³ 以下では、ライフタイムは酸素濃度に依らず炭素濃度のみに依存すると報告されている。今回育成した 8 インチ CZ 結晶シリコンにおいて、バルクライフタイムの結晶長さ依存性を検討した。従来の結晶では、バルクライフタイムは結晶の上部から下部に移動するにつれて減少することが一般的であった。今回の実験では、直径 8 インチの n 型リンドープ CZ シリコン単結晶を成長し、ライフタイムの結晶長さ依存性を測定した。抵抗率は 4 探針法にて、酸素濃度と炭素濃度は FT-IR 法にて、バルクライフタイムは渦電流方式 (Sinton BLS-I) を用いて測定した。

実験結果は以下のとおりである。図Ⅲ-2-(ニ)-A-29 は、今回育成した 8 インチ CZ 結晶シリコンの写真と、キャリアライフタイムの結晶長さ方向依存性を示している。この結果から、今開発した新規結晶育成法を用いれば、従来のように結晶の長さが増加することによるバルクライフタイムの劣化は観測されず、太陽電池作成のコスト低減に資する結果を得ることができた。すなわち、結晶長が増加しても、結晶全体にわたって 10 msec 以上のライフタイムを維持することが可能となり、この結果、本プロジェクトの最終目標を達成した。



図Ⅲ-2-(二)-A-29 8インチ CZ 結晶シリコン写真とキャリアライフタイムの結晶長さ方向依存性

シリコン結晶中の軽元素の一つである炭素濃度制御は、高効率の太陽電池の実現に重要である。図Ⅲ-2-(二)-A-30は、結晶中の炭素濃度と結晶育成炉内のアルゴンガスの流量との関係を、九州大学が独自に開発したグローバルシミュレータを用いて解析した結果および実験結果である。この実験結果は、図に示すようにガスグロマトグラフィを用いて、結晶育成炉内の融液直上と排気口で測定したCO濃度である。これにより、結晶中の炭素濃度は、炉内にアルゴン流量が大きいほど低減できることが明らかになった。これは、炭素製の坩堝とシリコン融液から蒸発したSiOが反応してCOを生成し、これが拡散によりシリコン融液に戻ってくるためである。従って、シリコン結晶中の炭素濃度を低減するためにはアルゴンガスの流量を増加させる必要があるが、アルゴンガスの値段が高いために実用的にはこの流量を低減させる必要がある。この実験結果と計算結果から、結晶中の炭素濃度を定量的に予測することが可能となり、太陽電池のライフタイム向上によりコスト削減に貢献することが可能となった。



図Ⅲ-2-(二)-A-30 結晶中の炭素濃度と結晶育成炉内のアルゴンガスの流量との関係

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」(名古屋大学)

① 高品質かつ低吸収なパッシベーション膜の開発

クラスタータイププラズマCVD装置を用いて水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)をベースとしたパッシベーション膜の研究開発を進めた。

名古屋大学へのプラズマCVD装置の導入後には、ヒーター温度の校正などプロセス環境整備を行った。20 nmのi-a-Si:Hの堆積、ポストアニールを行った初期検討では、最適化をしていない段階で、ライフタイムとして約1.3 ms、Implied- V_{oc} (i- V_{oc})は約0.71 Vという値が得られた。今後、本装置で製膜したa-Si:Hがコンソーシアムでのヘテロ接合太陽電池の研究開発に十分に活用できることを確認した。

次に、i-a-Si:Hのパッシベーション性能の向上へ向けて20 nm厚のa-Si:Hの製膜前に希釈した過酸化水素水(H₂O₂)で事前に酸化させることを検討した。製膜前の酸化処理なしでは約0.70 VのImplied- V_{oc} に対し、2%のH₂O₂に30秒浸して製膜前酸化を施すことで0.715 VのImplied- V_{oc} を示した。さらに、製膜温度を最適化することで20 nm厚のa-Si:Hでテクスチャ加工済みの156mm角サイズの両面0.725 VのImplied- V_{oc} を達成した。

さらなる a-Si:H のパッシベーション性能の向上へ向けて i-a-Si:H 層の積層化に取り組んだ。i-a-Si:H によるパッシベーション効果は、水素による i-a-Si:H/c-Si 界面のダングリングボンドの終端に起因すると考えられている。i-a-Si:H/c-Si 界面に水素を効果的に導入しパッシベーション性能を向上させることを目的として、原料ガスのシラン (SiH₄) を H₂ で希釈して供給することを試みた。その際、水素希釈比 ([H₂]/[SiH₄]) を 0 から 20 まで変化させ、7 nm 厚の単層の i-a-Si:H を製膜した。さらに、水素希釈を行わずに i-a-Si:H を 3.5 nm 製膜した後に、さまざまな希釈比 (2.5~20) で i-a-Si:H を 3.5 nm 製膜した積層 i-a-Si:H の作製も行った。図 III-2-(二)-A-31 は、両鏡面 Si 基板上に 7 nm 厚の i-a-Si:H を堆積した際の Implied-V_{oc} と水素希釈比 ([H₂]/[SiH₄]) の関係を示す。単層 i-a-Si:H では、水素希釈比の増大に伴い Implied-V_{oc} が単調に低下した。一方、積層 i-a-Si:H では、単層と比較して Implied-V_{oc} が向上した。水素希釈比が [H₂]/[SiH₄] = 10 において、7 nm の極薄 i-a-Si:H で最大 0.720 V を示した。

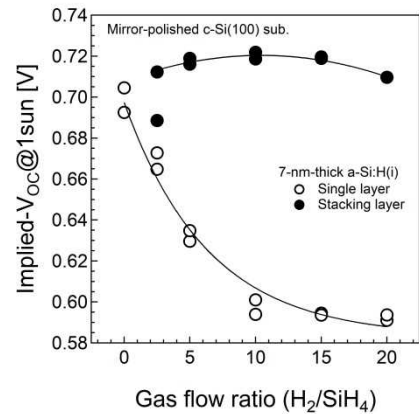


図 III-2-(二)-A-31 7 nm 厚の i-a-Si:H を両鏡面基板上に製膜した際の i-V_{oc} と水素希釈比 ([H₂]/[SiH₄]) の関係

低い吸収率かつ高い導電率を有する a-SiO_x:H の開発を試みた。豊田工業大学を中心としたコンソーシアムでは、n 型の a-Si:H を受光面としたヘテロ接合型太陽電池を採用しているため、n-a-SiO_x:H の開発に注力した。図 III-2-(二)-A-32 は暗導電率 (σ_d) の水素希釈量依存性である。水素希釈比 [H₂]/[SiH₄] = 50 において、σ_d が約 9 × 10⁻² S cm⁻¹ であった。この値は、従来で使用していた n-a-Si:H の σ_d = 2 × 10⁻³ S cm⁻¹ と比較して 45 倍に向上することができた。光学バンドギャップ (E_{G,opt}) の水素希釈量依存性を図 III-2-(二)-A-33 に示す。水素希釈比 [H₂]/[SiH₄] = 50 で形成した n-a-SiO_x:H の E_{G,opt} は 1.92 eV であり、従来使用していた n-a-Si:H の E_{G,opt} は 1.75 eV であった。このことから、光学的にも吸収が小さいドープ層を開発することができた。

これらパッシベーション層とドープ層を豊田工業大学の太陽電池試作ラインに組み込むことにより、170 μm 厚の太陽電池において短絡電流密度 39.0 mA/cm²、開放電圧 0.736 V、曲性因子 80.8%、変換効率 23.21% に貢献することができた。さらに、光照射を行うことで開放電圧 0.740 V 以上を達成し、高性能パッシベーション膜と低吸収なドープ層の積層膜を開発することができた。

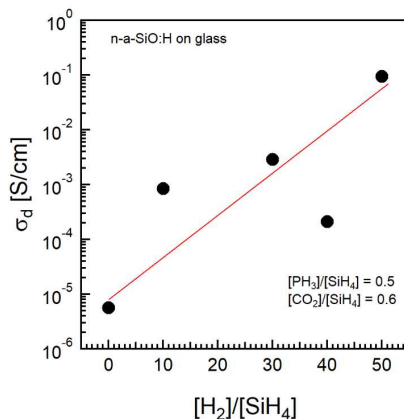


図 III-2-(二)-A-32 n-a-SiO_x:H の暗導電率の水素希釈量依存性

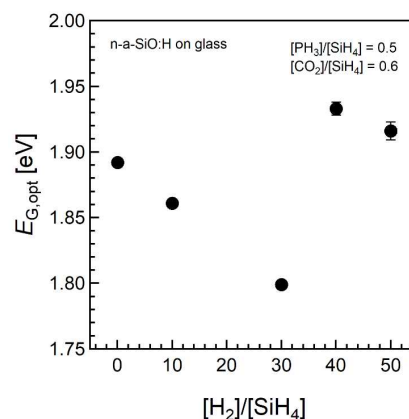


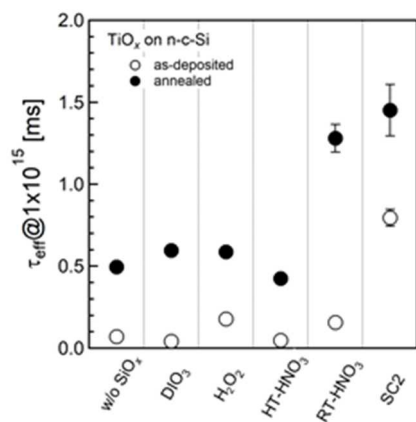
図 III-2-(二)-A-33 n-a-SiO_x:H の光学バンドギャップの水素希釈量依存性

② バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合材料の探索

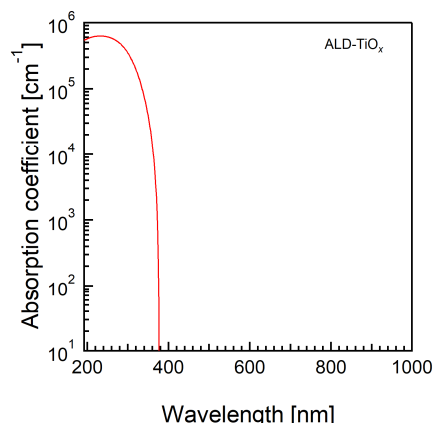
新規電子選択層として、原子層堆積法を用いた TiO_x (ALD-TiO_x) の開発を実施した。図 III-2-(二)-A-34 は、様々な化学薬品で形成した SiO_y 中間層を用いた TiO_x/c-Si ヘテロ構造の注入量が 1 × 10¹⁵ cm⁻³ における実効キャリアライフタイム τ_{eff} である。室温の硝酸を用いて約 1 nm の極薄の酸化膜を TiO_x/c-Si 界面に導入し、フォーミングガスアニール (FGA) を行うことで 1.3 ms の τ_{eff} を達成するこ

とができた。

ALD-TiO_xの特性向上を狙うために、高性能な ALD-TiO_x/SiO_y/c-Si 構造を透過電子顕微鏡 (TEM) と電子エネルギー損失分光 (EEL) 法を組み合わせ原子レベルでの局所的な構造を調査した。その結果、FGA によるパッシベーション性能の向上は、SiO_y 中に 0 および Ti 原子が拡散し、シリコン酸化膜の形成と Si と Ti を含んだ酸化膜が形成されることによるものと分かった。そこで、この原子の拡散を促進する



図III-2-(二)-A-34 様々な化学薬品で形成した SiO_y 中間層を用いた TiO_x/c-Si ヘテロ構造の実効キャリアライフタイム



図III-2-(二)-A-35 FGA 後の TiO_x/SiO_x/c-Si 構造の吸収係数スペクトル

ことでさらなる高性能化が狙えると考え、より疎な SiO_y 中間層の導入を検討した。

文献調査を行い、密度の低い SiO_y 中間層は SC2 溶液 (HCl:H₂O₂:H₂O=1:1:4) により形成されることが分かった。SC2 溶液を用いて SiO_y 中間層を形成して ALD-TiO_x/SiO_y/c-Si 構造を作製し、電気的特性を評価した。SC2-SiO_y 中間層を用いることで τ_{eff} が 1.7 ms まで向上した。SC2 溶液を用いた際の再結合電流 J_{rec}、接触抵抗 ρ_c を表 III-2-(二)-A-7 にまとめた。比較のために他機関の値も掲載した。SC2 を用いることで、低い J_{rec} および ρ_c が得られた。これは、疎な SiO_y 中間層を用いることで Ti、O 原子の拡散が促進されたためと考えられる。

また、ALD-TiO_xの吸収係数を調査した。図III-2-(二)-A-35は、FGA 後の TiO_x/SiO_y/c-Si 構造の TiO_x の吸収係数スペクトルである。400 nm 以上の長波長光に対しては、開発した TiO_x/SiO_y/c-Si 構造は、光学的にも a-Si:H と比較して高い透過率が見込まれるため、新規ヘテロ接合材料として有望な材料を開発できた。

表III-2-(二)-A-7 ボロン・エミッタ形成方法による n 型 Bifacial PERT セル特性の比較 ALD-TiO_x/c-Si ヘテロ接合の再結合電流、接触抵抗

機関	再結合電流 J _{rec} [fA]	接触抵抗 ρ _c [Ω·cm ²]
Institute of Solar Energy Research GmbH [†]	9	0.67
Univ. of California ^{††}	140.0	0.005
Nagoya University	10.3	0.007

[†] V. Titova et al., Energy Procedia 124 (2017) 441-447.

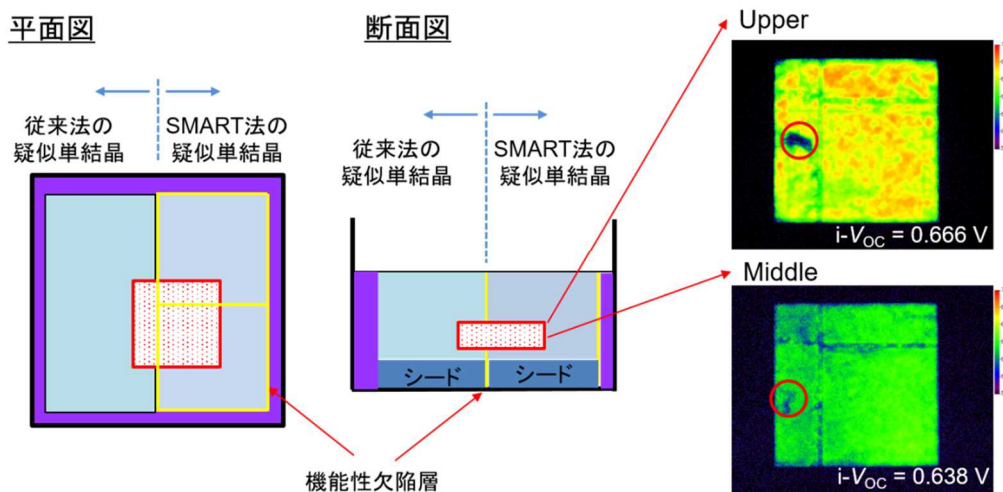
^{††} J. Bullock et al., Adv. Energy Mater. 1803367 (2019).

③ 高品質セルに適応したシリコン基板の物性解明

i-V_{oc} と PL イメージングを組み合わせ i-V_{oc} イメージングの測定環境を整え、本研究室にて開発した Seed Manipulation for ARTificially controlled defect Technique (SMART) 法を用いた擬似単結晶シリコンウエハの検討を行った。

SMART 法で作製したウエハに PECVD を用いて a-Si:H を製膜し、i-V_{oc} イメージングによる評価を行った。図III-2-(二)-A-36 は結晶成長時のるつぼの鳥瞰図、縦断面図および i-V_{oc} イメージング像である。

SMART 法による擬似単結晶シリコンの成長を狙った領域と通常が多結晶シリコンの成長を狙った領域をまたがって切り出した 125 mm 角ウエハの上部と中間部の $i-V_{oc}$ イメージング像が示されている。擬似単結晶の領域は、多結晶領域と比較して極端な暗部がない。さらに、擬似単結晶の領域は比較的高い $i-V_{oc}$ 領域で占められていることを確認でき、SMART 法で成長した Si インゴットを用いた高性能セルの実現が期待できることが確認した。さらなる最適化により、SMART 法で作製したインゴットを用いることで高性能かつ低コストなヘテロ接合型太陽電池の作製が期待できる。



図III-2-(二)-A-36 擬似単結晶シリコン成長時のるつぼの鳥瞰図、縦断面図および $i-V_{oc}$ イメージング像。擬似単結晶 Si ウエハは 15 nm 厚の a-Si:H 層でパッシベーションされている

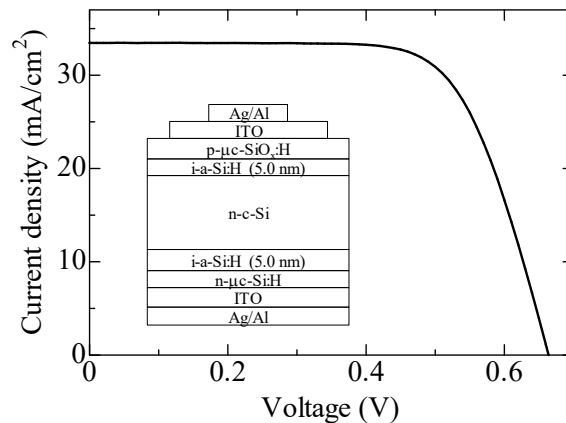
「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」(東京工業大学)

①アモルファス Si 系材料/結晶シリコン接合界面の精密評価

研究内容：

アモルファス Si 系材料/結晶シリコン界面の状態を精密に評価することは、パッシベーション効果の更なる向上や新しい材料系の導入のために非常に重要である。界面評価技術には様々な手法があるが、多くは電極形成などの前処理が必要、試料を破壊する必要があるなどの短所がある。我々は、前処理なしに界面状態を精密に評価できる簡便な手法として、少数キャリアライフタイムの温度依存性測定に着目し、解析技術の開発を進め、中間評価までに温度可変型 QSSPC 測定とそのデータ解析手法について報告した。中間評価後はそれらの手法を用いて SiH_4 フリー技術である対向ターゲットスパッタ法を用いて、良質な i-a-Si:H パッシベーション膜の開発に取り組んだ。

対向ターゲットスパッタ技術の改善 (DC、RF パワーの重畳および 2 段階製膜法) により、i-a-Si:H の膜厚 5 nm にて良好なパッシベーション効果を得ることに成功した。具体的には、FTS 製膜時に印加する RF および DC 電力の比を調整することにより、特性の向上が得られた。また、ライフタイムの測定結果より計算される裏面再結合電流密度 J_{0rear} は 4.6 fA/cm^2 であり、最終目標値をクリアした。また、FTS 法による i-a-Si:H パッシベーション膜を用いたヘテロ接合結晶シリコン太陽電池の試作を行った。この太陽電池においては、p 型層および n 型層は従来のプラズマ CVD 法を用いて形成した。その結果、1 段階製膜法を用いた場合には、図III-2-(二)-A-37 に示すように変換効率 15.4% ($V_{oc}=0.664 \text{ V}$, $J_{sc}=33.4 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0.695$ 、シリコンの表面テクスチャなし) が得られた。2 段階製膜法による i-a-Si:H を用いた場合にはさらに高い変換効率 17.4% (反射防止膜形成) が得られている。これらの太陽電池には光閉じ込めのためのテクスチャ構造を形成していないため、変換効率の更なる向上が可能である。通常のプラズマ CVD 法により i-a-Si:H 系



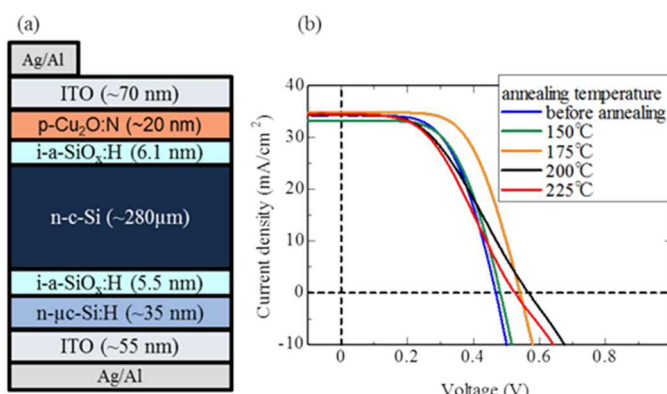
図III-2-(二)-A-37 FTS 法による i-a-Si:H を用いたシリコンヘテロ接合太陽電池の特性例

パッシベーション層を形成した太陽電池と比べるとまだ若干特性が低い、この結果は FTS 法による i-a-Si:H パッシベーション膜の可能性を示す結果と考えられる。

②超低ダメージ金属氧化物エミッタ製膜技術の開発

研究内容：

ヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池のエミッタ層には、ドーパしたアモルファスシリコンが用いられているが、製膜時に爆発性の SiH_4 および毒性の強いドーピングガス (B_2H_6 , PH_3) を用いることが問題である。また、結晶 Si とアモルファスシリコンのバンドアライメントを考えると、価電子帯に大きなオフセットが存在することが問題である。これらの問題に対する解決策の候補として金属氧化物エミッタが挙げられる。金属氧化物は特殊ガスを使用しない手法で作製が可能であり、p 型の半導体としての特性もしくは正孔選択コンタクトの機能を有する材料が存在する。先行研究ではモリブデン



図Ⅲ-2-(二)-A-38 作製した太陽電池の構造（テクスチャ無）と照射時の $J-V$ 特性

酸化物がその候補として検討されているが、良い特性は蒸着法のみで得られており、量産への適用は難しいと考えられる。我々は低ダメージスパッタ法を用いて金属氧化物エミッタの検討を行った。

金属氧化物エミッタの作製には量産性に優れ、基板表面にダメージを与えずに製膜できる手法を用いることが重要である。そのため超低ダメージで製膜可能なスパッタ装置の導入を行った。また、RF スパッタ装置による p 型の窒素ドーパ Cu_2O ($\text{p-Cu}_2\text{O:N}$) エミッタと i-a-Si:H パッシベーション膜の積層構造を用いて、パッシベーション効果の検討を行った。図Ⅲ-2-(二)-A-38 は $\text{p-Cu}_2\text{O:N}$ エミッタを用いたシリコンヘテロ接合太陽電池の特性の例である。太陽電池の構造は $\text{Al/Ag/ITO/p-Cu}_2\text{O:N/i-a-SiO}_x\text{:H/n-c-Si/i-a-SiO}_x\text{:H/n-}\mu\text{c-Si:H/ITO/Ag/Al}$ である。良い特性が得られた i-a-SiO_x:H 層膜厚 6 nm 程度で太陽電池を作製し、そのアニール温度依存性を評価した。図Ⅲ-2-(二)-A-38 に示すようにアニール温度 175°C で最もよい特性が得られており、 $V_{oc}=0.541$ V、 $J_{sc}=34.8$ mA/cm²、 $FF=0.603$ 、 $Eff.=11.4\%$ が得られた。膜厚の調整によりわずかに特性は向上したが、変換効率は 11% 台にとどまっている。我々のグループで $\text{p-Cu}_2\text{O:N}$ を $\text{p-}\mu\text{c-SiO}_x\text{:H}$ に置き換えた際には 17% 台の効率が得られるため、まだ界面に問題があると考えられる。界面バッファ層としてホットワイヤー法による WO_3 膜の検討を行い、 WO_3 を $\text{p-Cu}_2\text{O:N}$ の代わりに用いた場合にはわずかに開放電圧が向上し 0.57 V が得られたが、以前として開放電圧が低いという問題が明らかになった。

そこで、スパッタ法による p 型 a-Si:H をバッファ層に用いることを検討した。初めに低抵抗 p-a-Si:H 膜の形成技術の確立を行った。製膜には RF マグネトロンスパッタを用いた。ターゲットにはホウ素を 1% もしくは 5% 添加した Si ターゲットを用いた。スパッタガスには水素濃度 10% の Ar と水素の混合ガスを用いた。なお、製膜は室温で行った。ホウ素濃度 5% のターゲットを用いて製膜した結果、製膜後のアニール温度 200°C 程度において、最大で 10^{-4} S/cm という高い導電率が得られた。そこで、スパッタによる p-a-Si:H を用いた太陽電池を試作した。その結果、変換効率 11.8% ($V_{oc}=0.633$ V) が得られた。p-Cu₂O:N を用いた場合に比べて開放電圧が大きく向上した。また、電極の金属を変更することにより、 $V_{oc}=0.659$ V も得られている。これらの結果より、スパッタによる p-a-Si:H を用いることにより、SiH₄ フリープロセスにより良質なエミッタ構造を作製できる可能性が示されたと考えられる。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」(兵庫県立大学)

(A) ミスト CVD 法

(A-1) ミスト CVD 法の概要

ミスト CVD 法は大気中で金属酸化膜を製膜可能である。加えて、安全な原料を使用するため、真空プロセスや危険な原料を用いる従来の方法、例えば原子層堆積 (Atomic Layer Deposition, ALD) 法等と比べて、装置導入コストやランニングコストの大幅な削減が期待できる。目的とする金属酸化物の金属イオンを含むアルコール系溶液を原料とし、原料溶液は超音波振動子によりミスト化され、キャリアガスにより基板表面に供給される。基板はヒーターにより加熱されており、この熱により原料

溶液中の金属イオンの酸化反応が促進され、金属酸化物が基板表面に付着する。本研究開発においては、ミストは直線状に基板表面に供給され、基板を移動させることで面状の金属酸化物膜を形成した。

(A-2) AlO_x 製膜プロセスの開発

製膜速度の温度依存性について検討を行った結果、アレニウス型の反応であることが判った。そこでおよそ 30 nm の AlO_x 膜をシリコン基板両面に製膜し、パッシベーション性能の評価を行った結果、製膜温度が 350 °C 以上では製膜直後の状態 (as-deposited) で最大再結合速度が 10 cm/s を下回る高いパッシベーション性能が得られた(図 III-2-(二)-A-39)。ALD 法で製膜した AlO_x 膜の場合は活性化処理として、製膜後の熱処理 (post-deposition anneal, PDA) が必須であるが、ミスト CVD 法で製膜した AlO_x 膜では PDA 処理が不要であることはプロセスの簡易化という観点から大きなアドバンテージと言える。次に AlO_x 膜厚依存性について調べた結果、膜厚が 5 nm 程度の場合にはパッシベーション性能は低く、10 nm 程度からはほぼ一定の高いパッシベーション性能が得られることが判った。この時の再結合電流は 30 fA /cm² 以下であり、従来の裏面における再結合電流から 250 fA /cm² 低下させることに成功した。この結果を用いて PERC 型セルに適用した結果については (C-1) にて後述する。

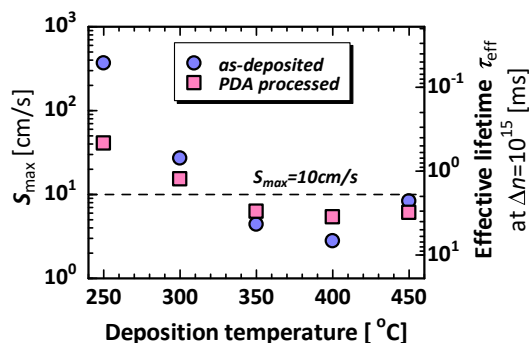


図 III-2-(二)-A-39 最大再結合速度の製膜温度依存性

(A-3) n 型用新規パッシベーション材料の探索

n 型用の新規パッシベーション材料としては“正”の固定電荷を有することが望まれる。これまでに実施した研究の成果から、界面ダイポールの存在が膜中の固定電荷の起源の一つであると予想した。ダイポール発現には SiO₂ 膜 / 金属酸化物膜界面における酸素の拡散が関与していると考え、SiO₂ 膜を基準とした酸素の面密度を計算した。図 III-2-(二)-A-40 に SiO₂ 膜を基準とした各種金属酸化物の相対酸素面密度を示す。前述の AlO_x 膜の場合は相対酸素面密度が高く、“負”の固定電荷が発現していた。同様の方針から、“正”の固定電荷密度を得るためには相対酸素面密度が 1 よりも小さい必要がある。そこで大気中でも比較的安定と予想されるイットリウム酸化物 (YO_x) の製膜を試みた。

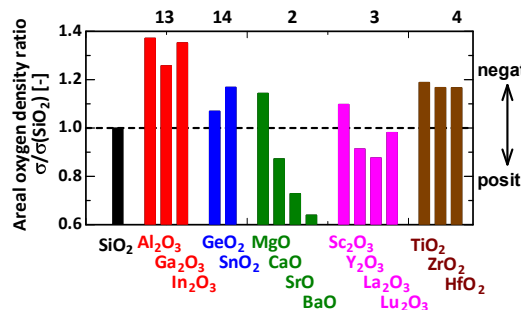
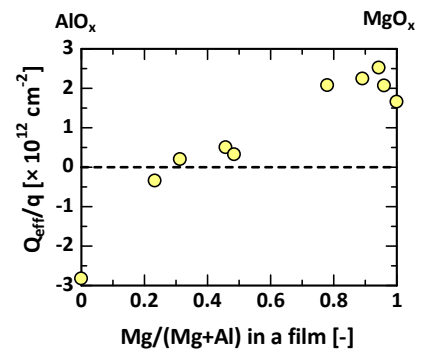


図 III-2-(二)-A-40 SiO₂ 膜を基準とした各種金属酸化物の相対酸素面密度

その結果、大まかな傾向として、製膜温度が高いほどパッシベーション性能が高い傾向が見られた。YO_x 膜の電気的特性を評価したところ、相対酸素面密度から予想したとおり、正の固定電荷を有しており、製膜温度によらず、ほぼ一定の値 ($2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) を示した。

(A-4) 混晶系金属酸化膜による固定電荷制御

電界効果パッシベーションはp型用には負の固定電荷、n型用には正の固定電荷を有することが望まれる。現在、n型用のパッシベーション膜としてSiN_x膜が用いられているが、p型用、n型用のパッシベーション膜作製に異なる手法を用いることはコストダウンの観点からは望ましくない。そこで、パッシベーション材料に混晶系を用いることで、同じ原料系を使用しながら原料組成を変更するだけで固定電荷の極性を制御可能ではないかと考え、そのモデルとしてAlO_x-MgO_x混晶系の検討を行った。AlO_x、MgO_x単体での製膜を検討した結果、共にアレニウス型の反応であることが判った。そこで、原料溶液組成を変化させて混晶系の製膜を実施した結果、原料溶液組成と膜中組成との関係が得られた。次に各試料の容量-電圧(C-V)特性を測定し、実効固定電荷密度 Q_{eff}/q [cm⁻²]を求めたところ、図III-2-(二)-A-41に示すように、膜中Mg比率の増加に伴い、実効固定電荷密度は負の値から正の値へと連続的に変化することが明らかになった。同じ原料系列でp型、n型のどちらにも対応可能なパッシベーション膜が得られることから、製膜装置の共通化などによる低コスト化が期待出来る。

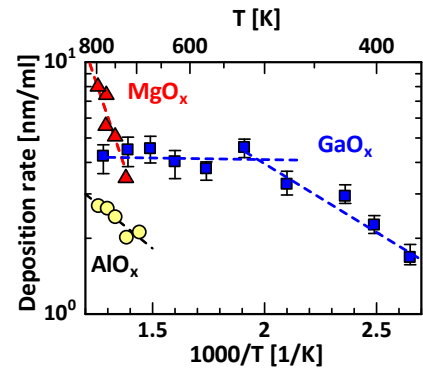


図III-2-(二)-A-41 実効固定電荷の組成依存

(A-5) 低温製膜可能なパッシベーション材料の探索

p型用のパッシベーション膜として現在はAlO_x膜が使用されている。AlO_x膜は高いパッシベーション性能を示すが、その性能を発現するためには400~450℃程度の熱処理が必須である。太陽電池製造工程中の熱処理は不純物の拡散や結晶特性の低下など負の側面が多く存在する。そこでより低温でのパッシベーション膜作製を目指して、GaO_x膜の開発を行った。

図III-2-(二)-A-42に製膜温度と原料溶液使用量を基準とした製膜速度の関係を示す。GaO_x膜は300℃以下では製膜温度の上昇と共に製膜速度が上昇し、300℃以上ではほぼ一定の製膜速度となっている。この結果から、300℃以下ではアレニウス型の反応、300℃以上では原料供給律速の反応となっていることが判った。また同図には類似の条件で製膜したAlO_x膜とMgO_x膜の結果も示している。これらと比較すると、GaO_x膜は低温での製膜に適していることが明らかになった。製膜温度と屈折率の関係については、製膜温度上昇に伴い屈折率も増大し、350℃以上で屈折率は1.8を超え、ほぼ一定の値となった。両面受光のPERC型太陽電池を想定した場合、反射防止層としても十分利用可能な値となっている。



図III-2-(二)-A-42 製膜速度の温度依存性

製膜温度を変化させた試料の電気的特性を評価した結果、界面トラップ密度は製膜直後の場合は250~300℃で最小の値を取り、PDAにより界面トラップ密度は増加する傾向が確認された。一方、実効固定電荷密度に関しては、製膜直後は低温での製膜ではほぼニュートラルの状態が、製膜温度上昇に従い、負の固定電荷が増加していることが判った。また、PDAにより負の実効固定電荷は増大しており、今回のPDA条件においては製膜温度250℃以上でPDAを施せばほぼ一定の電界効果パッシベーションの能力が発現することが判った。以上の結果を基にして製膜条件等の見直しをした結果、製膜温度250℃で実効ライフタイム約2 msecという良いパッシベーション性能を得ることに成功した。

(B) LIA 援用反応性スパッタ法

(B-1) LIA 援用反応性スパッタ法の概要

LIA 援用反応性スパッタ法ではターゲット材料に金属単体を用いることでスパッタガス種に応じて金属酸化物、金属窒化物などの製膜が可能である。そのため高いスループットが期待出来る。加えて危険な原料を使用しないため、従来法に比べてプロセスコストの削減が期待できる。一方、スパッタ法の欠点として知られているのが基板へのプラズマダメージである。本研究ではプラズマダメージを減少させるために、低インダクタンスアンテナ (Low-Inductance-Antenna, LIA) を反応性スパッタ法に援用した。例えばターゲットをシリコンとした場合、スパッタガスをアルゴンのみにするるとa-Si膜が、アルゴンガスに酸素ガスを混入させるとSiO_x膜が、アルゴンガスに窒素ガスを混入させるとSiN_x膜が基板表面に形成される。導入するスパッタガスにより様々な膜の形成が可能なのは本法の長

所の一つである。また、基板ホルダーは回転可能としており、これにより 3 インチのターゲットを用いて 6 インチの製膜を可能としている。

(B-2) p 型用 AlO_x パッシベーション膜の高性能化

比較的低コストな製膜法としてスパッタ法が挙げられるが、製膜と同時にプラズマによるダメージが入るため、LIA を導入することで製膜時のダメージ軽減を試みた。実験には LIA が使用可能な反応性スパッタ装置を用い、ターゲットは Al、雰囲気ガスには O₂ を混合した Ar ガスを用いた。酸化の度合いは Ar ガス中の O₂ ガス濃度で制御し、屈折率の異なる試料を LIA なし、LIA 600W、LIA 800W の 3 条件下で製膜し、評価を行ったところ、全体の傾向として屈折率が小さいほど S_{max} が小さい、すなわちパッシベーション能力が高くなることがわかった。LIA 条件で比較すると、LIA なしの条件に比べ、LIA 600W の条件の方が S_{max} が小さくなっている。しかし、LIA 800W の条件に関しては、LIA なしの条件よりも S_{max} が大きな場合もあり、屈折率により最適な LIA 条件があることが示唆された。

LIA の効果が確認されたため、次に Ar ガス中の O₂ ガス濃度を制御し、詳細な検討を行った。O₂ ガス濃度を上昇させるに伴い、屈折率、実効ライフタイムはそれぞれ減少、および増加するが、どちらも O₂ ガス濃度 8% 以上では一定の値に収束した。O₂ ガス濃度を変化させることで実効ライフタイムが変化する要因を明らかにするために、C-V 特性を測定し、界面トラップ密度 D_{it} [cm⁻²·eV⁻¹] と実効固定電荷密度 Q_{eff}/q [cm⁻²] を求めた。界面トラップ密度、実効固定電荷密度共に、O₂ ガス濃度の上昇に伴い減少した。パッシベーション能力は化学パッシベーションと電界効果パッシベーションの両方の影響を受けるが、理想的には界面トラップ密度は小さく、実効固定電荷密度は大きいことが望ましい。しかし実験結果は、化学パッシベーションの効果を上げると電界効果パッシベーションの効果が低下するという相反する傾向を示している。

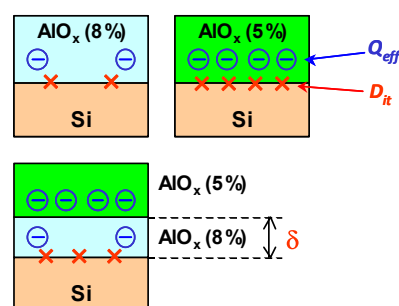


図 III-2-(二)-A-43 2 層構造の概念図

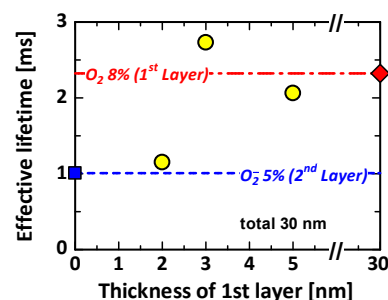


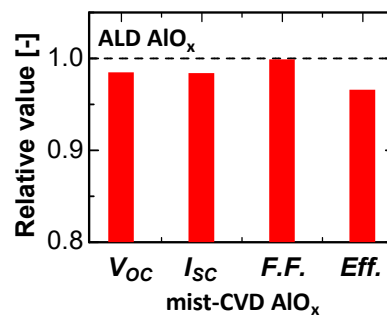
図 III-2-(二)-A-44 1 層目の膜厚と実効ライフタイムの関係

そこで界面トラップ密度を小さく保持したまま実効固定電荷密度を上げる方法として、図 III-2-(二)-A-43 に示すように、界面トラップ密度が低い層 (O₂ ガス 8%) を始めに製膜し、続いて実効電荷密度が高い層 (O₂ ガス 5%) を製膜する 2 層構造を考案した。2 層合計の膜厚は 30nm と一定とし、1 層目の膜厚を変化させたときの実効ライフタイムを図 III-2-(二)-A-44 に示す。1 層目の膜厚が薄い (2nm) 場合、実効ライフタイムは 2 層目の実効ライフタイムとほぼ同程度を示した。これは、1 層目が 2 層目の製膜時に導入されるダメージをブロックするのに十分な厚さがなかったと考えられる。1 層目の膜厚が厚い (5nm) 場合、実効ライフタイムは 1 層目のライフタイムとほぼ同程度を示した。この場合は、1 層目が 2 層目製膜時に導入されるダメージをブロックするのに十分な厚さがあつたが、界面から離れ過ぎていたために電荷追加の効果が現れなかったと考えられる。1 層目の厚さをこれらの間 (3nm) にした場合、実効ライフタイムは単層膜の値よりも高い値が得られた。これは、ダメージ導入をブロックしつつ電荷追加効果が現れた結果と考えられる。以上の結果から、膜厚を適切に制御することでパッシベーション膜の 2 層化はパッシベーション性能の更なる向上に有効であることが示された。

(C) 開発した製膜プロセスのセルへの適用

(C-1) AlO_x 膜の PERC セルへの適用

(A-2)にて前述したとおり、ミスト CVD 法により高いパッシベーション性能を示す AlO_x 製膜プロセスを開発した。これを PERC 型太陽電池に適用し、現在一般に用いられている ALD 法による AlO_x 膜との比較を行った。図Ⅲ-2-(二)-A-45 にミスト CVD 法による AlO_x 膜を適用した PERC 型太陽電池の特性を ALD- AlO_x 膜を適用した場合を基準とした相対値として示す。ALD- AlO_x 膜には若干性能は劣るものの、熱処理工程などの最適化を行うことで、ミスト CVD 法は ALD 法の代替法として十分期待出来ることが示された。



図Ⅲ-2-(二)-A-45 ミスト CVD 法による AlO_x 膜を導入した PERC セルと ALD 法による AlO_x 膜を導入した PERC セルとの相対比較

(C-2) SiO_x膜の HIT セルへの適用

HIT 型太陽電池は高い変換効率が期待されている。本研究開発の 6 大学コンソーシアムでも HIT 型太陽電池の試作を行い、変換効率は 20%を超えているが、世界最高の変換効率 25%までは達しておらず、改善の余地が残されている。コンソーシアムで試作した HIT 型太陽電池の特性を検討すると、短絡電流密度がまだ十分な値となっていないことが判った。そこで表面反射について測定を行ったところ短波長側および長波長側の反射抑制が十分でなかった。そこで透明導電膜と反射防止膜を兼ねている ITO 膜の上にさらに屈折率の小さな膜を想定してシミュレーションを実施した。その結果、図 III-2-(二)-A-46 に示すように、適切な膜厚の SiO_x 膜を表面に追加することで、表面反射がさらに抑制可能であることが判った。そこで ITO 膜厚と SiO_x 膜厚を変化させ、さらに ITO 膜による吸収を考慮してシミュレーションを行った(図 III-2-(二)-A-47)。単層膜の場合の実効最大外部量子効率は 96.7 % であるのに対し、二層化することで、実効最大外部量子効率は 97.9 % と 1 ポイント以上改善可能であることが判った。これらの結果を元に既に完成した単層反射防止構造の HIT 太陽電池上に、さらに SiO_x 膜を製膜した結果、2 層化により表面反射が抑制された。この時のセル特性を評価した結果、短絡電流密度が 2.5 % 上昇し、二層化が性能向上に有効であることが示された。また、ITO 膜、SiO_x 膜ともにスパッタ法で製膜可能であるため、プロセスを連続化することで 2 層化によるコスト増を最小限に抑える事が可能である。

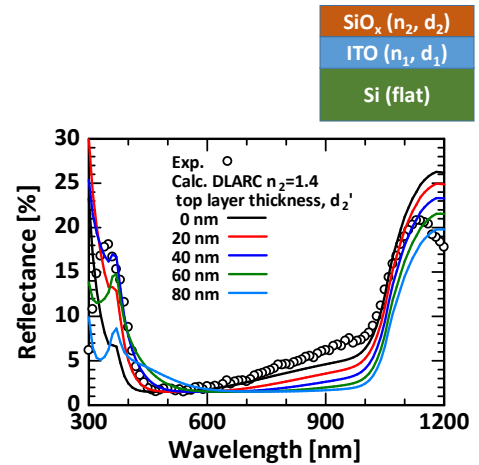


図 III-2-(二)-A-46 ITO 単層膜の反射率の実測結果および 2 層化した場合の反射率のシミュレーション結果

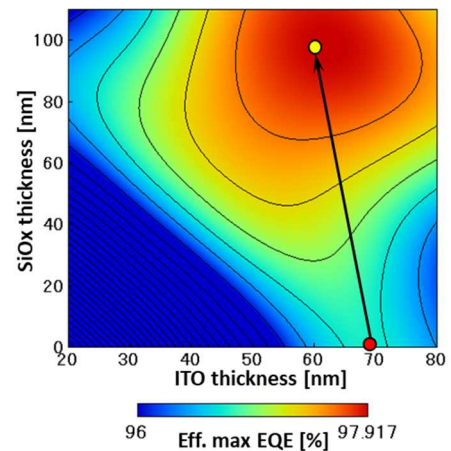


図 III-2-(二)-A-47 ITO 膜、SiO_x 膜それぞれの膜厚と実効最大外部量子効率の関係

2. 実用化・事業化見通し

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」(豊田工業大学)

豊田工業大学では太陽電池試作ラインを構築して高効率結晶シリコン太陽電池の研究開発を行うとともに、これを産業開発プラットフォームとして活用し、プロジェクト参画機関の研究開発を支援した。既述のように、トクヤマの結晶成長技術開発への貢献はモジュール製造コスト 1.9 円/W、発電コスト 0.38 円/kWh 低減に相当し、コマツ NTC のスライス加工技術開発への貢献ではモジュール製造コスト 6.8 円/W、発電コスト 0.5 円/kWh 低減に相当する。さらにナミックスの電極ペースト開発においてはモジュール製造コスト 1.5 円/W、発電コスト 0.7 円/kWh の低減成果をあげている。これらの他にも豊田工業大学では連携先のセルメーカー、装置メーカー、材料メーカーとデバイスシミュレーション等を活用した理論検討、パイロットライン設備を活用した試作検討、各種解析装置・手法を活用した評価・解析などを共同で行うことによってその研究開発の推進に貢献してきた。そのような高品質低コスト結晶成長技術、極薄極狭カーフロススライス技術、セル効率向上技術、材料コスト低減技術、モジュール信頼性向上技術等の研究開発成果により、2020 年の発電コストは 11.0 円/kWh、2025 年の発電コストは 6.9 円/kWh になると見積ることができる。今後は、これらの開発成果がそれぞれのメーカーの製品やサービスに適用され、それらを通じて実用化・事業化されていく見込みである。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」(明治大学)

開発した評価手法と評価の結果得られた改善プロセスについては、随時セルメーカー等と情報共有を行なっている。すでに、セルメーカーからは試料提供を頂き測定結果のフィードバックを協議中である。またセルメーカー、装置メーカー、材料メーカーなど数社から試料提供を受け、現行のプロセスにおけ

る不良解析および製品開発を共同で行なっている。詳細は NDA により公開できないものの、これらの開発成果がそれぞれのメーカーの製品やサービスに適用され、それらを通じて実用化・事業化されていく見込みである。材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発を担当し、Ⅰ)改良型結晶成長技術評価・開発、Ⅱ)室温発光活性化 PL 法による極低炭素濃度定量手法の開発、Ⅲ)スライスダメージ評価・薄型基板セル実証、Ⅳ)薄膜堆積プロセス評価・開発で成果を得た。これらで得られた知見は、太陽電池および製造装置と原材料、特にセルだけではなく、ワイヤーソー等の製造装置や電極ペースト等の部品材料の製品化に大きく貢献した。一方、多結晶シリコン太陽電池の高効率化のための結晶成長時の雰囲気制御では、結晶中の酸素および炭素の導入を抑制することが析出による結晶欠陥を制御し、高効率太陽電池を製造するために重要であることを明らかにした。これらは京セラなどの事業に貢献した。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」(九州大学)

九州大学が提案している不純物低減法を実際の生産炉に展開する可能性がある。以前、本法を用いて結晶を作成したところ、セル変換効率が 17%から 19%に向上しているため、生産レベルでの変換効率の向上が期待できる。また、疑難結晶育成法も企業に移管済であり、事業化が検討されている。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」(名古屋大学)

プラズマ援用化学気相堆積法を用いた水素化アモルファスシリコン製膜済み基板等を豊田工業大学から多数のメーカーに供給し事業化の支援を行った。新規ヘテロ接合用材料は、将来を見据えた探索的なテーマのため今のところ実用化・事業化の見通しは立っていないが、酸化チタンなどでは良好な結果が得られているため、今後のさらなる改善により実用化可能と見込んでいる。新規インゴット成長法の実用化サイズの検討実験に関して良好な結果が得られてきており、セルメーカーに特許実施権許諾を行った。これを通じて当該メーカーの事業へ貢献していく。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」(東京工業大学)

本テーマについては、今のところ実用化・事業化の見通しは立っていないが、 SiH_4 フリープロセスによるヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池作製プロセスの実現の可能性を示すことはできたと考えている。デバイスレベルでの実証を今後も積み重ねることにより、実用化の可能性を探っていく必要がある。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」(兵庫県立大学)

現在の結晶シリコン太陽電池の大部分は Al-BSF 構造であるが、ITRPV ではより高いエネルギー変換効率が期待できる PERC 構造へと移行していくと予想している。Al-BSF 構造と PERC 構造の間で最も顕著な違いが裏面へのアルミナ(AlO_x)薄膜の導入である。現段階では AlO_x 薄膜は ALD 法により形成されているが、装置導入コストおよびランニングコストが高いという問題がある。本研究開発では、ALD 法に比べて大幅なコストダウンが可能な薄膜形成技術であるミスド CVD 法および LIA 援用反応性スパッタ法により AlO_x 薄膜形成を試み、ALD 法で形成された AlO_x 薄膜と比較して、遜色のないレベルの AlO_x 薄膜形成にラボレベルで成功している。現在、国内セルメーカーと連携して、生産レベルでの検証を開始しており、良好な結果が得られれば数年以内での実用化・事業化につながると見通している。

3. 波及効果

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」(豊田工業大学)

上述のように、本プロジェクトの高品質低コスト結晶成長技術、極薄極狭カーフロススライス技術、セル効率向上技術、材料コスト低減技術、モジュール信頼性向上技術などによって、2020 年にインゴット製造経費 2,000 円/kg、ウエハ厚 $100\mu\text{m}$ 、スライスピッチ $170\mu\text{m}$ 、スライス加工費 22 円/枚、セル効率 23.2%になったとするとモジュール製造コストは 36,429 円/kW、発電コストは 11.0 円/kWh となると見積られる。同様に、2025 年の発電コストは 6.9 円/kWh になると見積ることができる。今後、これらのプロセス技術研究開発成果が連携先メーカーの製品・サービスを通じて実用化・事業化されていくことによって実際に発電コストが低減していくものと期待される。また、豊田工大では引き続きそれらの活動を支援することにより、モジュール製造コストおよび発電コストのより一層の低減に貢献していく。さらに Passivated Contact あるいは CSC と言われる次世代結晶シリコン太陽電池プロセスや、Si Based Tandem 太陽電池を世界に先駆けて開発し、関連する日本企業の研究開発を主導していくことによって、日本の結晶シリコン太陽電池技術および産業の国際競争力向上にも寄与する。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」(明治大学)

前項で述べたセルメーカーへの解析を通してデバイス特性およびプロセスの改善に貢献する。それによって世界における日本のプレゼンスを確保することができると考えられる。太陽電池の一層の普及を促進し、CO₂削減、雇用創出に貢献した。また、多くの参画企業では、事業化プロセスの検討が行われ、省エネルギー化の実現に貢献した。さらに、プロジェクト遂行を通じて、多くの学生に実践的な教育の機会が与えられ、この分野に多くの有為な人材を供給する波及効果が得られた。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」(九州大学)

九州大学が提案している不純物低減法を実際の生産炉に展開する可能性がある。以前、本法を用いて結晶を作成したところ、セル変換効率が 17%から 19%に向上しているため、生産レベルでの変換効率の向上が期待できる。また、単結晶育成法も企業に移管済みであり、事業化が検討されている。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」(名古屋大学)

導入したプラズマ援用化学気相堆積装置を用いて 23%を超えるヘテロ接合型太陽電池の作製に貢献した。これにより、ヘテロ接合型太陽電池のイノベーションハブとして貢献することが可能となった。また、開発した新規ヘテロ材料が比較的高いパッシベーション性能を示すことを確認できたため、それらを用いた太陽電池の性能向上を示すことで、アモルファスシリコンを用いた従来のヘテロ接合型太陽電池に置き換わる可能性が示された。さらに、本研究室で提案してきたプロセスを用いて作製した擬似単結晶シリコンウエハは、アモルファスシリコンによる表面パッシベーションで良好な特性を示したことから、擬似単結晶を用いた太陽電池による低コスト化につながることを期待できる。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」(東京工業大学)

ライフタイムの温度依存性評価により、アモルファスシリコン/結晶シリコン界面のバンドオフセットの情報を簡便に評価可能であることを確認した。この手法は新しい電子選択および正孔選択コンタクトの評価にも使用できる。また、対向ターゲットスパッタ法を用いたアモルファスシリコンパッシベーション膜の形成において、プラズマ CVD に迫る特性を得ることに成功した。さらに、スパッタ法による Cu₂O:N および p-a-Si:H を用いたヘテロ接合型太陽電池の動作を確認した。これらの結果は、SiH₄ フリープロセスによるヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池実現の可能性を示しており、ヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池への低コストプロセス適用によるコスト削減につながる可能性がある。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」(兵庫県立大学)

ミスド CVD 法は Al₂O₃ 薄膜のみならず、様々な金属酸化膜の形成に対応可能である。また、LIA 援用反応性スパッタ法においては、製膜時のガスを変更することで酸化膜のみならず窒化膜の形成も可能であり、両者を同時に導入することで、酸窒化膜も得ることが出来る。このような多様性を有した製膜方法であることから、既存薄膜形成プロセスをこれらの手法に置き換えることにより、さらなる製造コスト削減につながる可能性がある。

4. 今後の展開

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」(豊田工業大学)

本プロジェクトにおいて確立した PERC、PERT など拡散系セル試作プロセスと SHJ などのヘテロ系セル試作プロセス、および本学内に構築した結晶シリコンセル試作ラインを活用して、引き続き太陽電池産業に係る日本企業・研究機関・大学等の研究開発を支援していく。今後、本プロジェクトの研究開発成果は順次、各連携先メーカーによって製品やサービスへと実用化・事業化されていくと考えられるが、それらの活動を引き続きサポートして開発成果の社会実装に貢献していく。それと並行して、バンドエンジニアリング技術を用いた Passivated Contact あるいは CSC 等、次世代セルの研究開発を継続し、高効率と高生産性・低コストを両立できる次世代結晶シリコン太陽電池プロセスの確立を目指す。さらに、これら結晶シリコン太陽電池プロセス共通基盤技術をベースとして、Si Based Tandem 太陽電池の研究開発を進める。結晶シリコン太陽電池をボトムセルとしてその上に III-V 族化合物太陽電池やペロブスカイト太陽電池を積層した Si Based Tandem 太陽電池は、30%を超える超高効率と低コストを両立できる次世代太陽電池として、電動車などの移動体や ZEB、ZEH などの主要な電力源となることが期待されている。現在、国際的にもこの Si Based Tandem 太陽電池の

研究開発が活発化しているが、日本の太陽電池関連企業や研究機関・大学等がこの Si Based Tandem 太陽電池を研究開発していく上で、豊田工大の持つ結晶シリコンセル試作ラインと結晶シリコン太陽電池プロセス共通基盤技術は非常に重要な役割を果たすことができる。今後、これらの技術資産を Si Based Tandem 太陽電池開発に活用していく。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」(明治大学)

引き続き、高品質化材料を用いたデバイス実証、新規測定手法のデータの蓄積と方式の確立、科学的基盤に基づくプロセスの開発支援を行い、高性能太陽電池の我が国における製造業の競争力強化を支援していく。また、これまでは結晶 Si 太陽電池に関する研究を主とし行ってきたが、今後は更なる高効率化が求めて、結晶 Si 太陽電池技術をベースとして、III-V/Si タンデム構造やペロブスカイト/Si タンデム等のタンデム構造を視野に入れた開発に移行する。太陽電池全体のコストを考慮すると、ボトム材料に Si 基板は必要不可欠であり、これまでに培った結晶 Si 太陽電池に対する知見は今後の研究が見込まれるタンデム型太陽電池においても十分に活用可能であり、より一層の結晶 Si に留まらない太陽電池全体の高効率化に貢献していく。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」(九州大学)

今後も、本方法を実際の生産炉へ展開するための技術移管を企業と継続していく。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」(名古屋大学)

プラズマ援用化学気相堆積法で作製したアモルファスシリコンのさらなる高品質化およびプロセスの改善により、より高い変換効率が望める標準ヘテロ接合型シリコン太陽電池が作製できる拠点形成を目指す。新規ヘテロ接合材料の太陽電池性能を実証し、アモルファスシリコンを用いた従来のヘテロ接合型シリコン太陽電池に代わる新型太陽電池の実現に貢献していく。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」(東京工業大学)

スパッタ法を用いた完全 SiH_4 フリープロセスによる高効率ヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池作製の可能性を独自に追求する。本研究プロジェクトで開発した、対向ターゲット法による i-a-Si:H パッシベーション膜、スパッタ法による正孔選択性コンタクト材料 ($\text{Cu}_2\text{O}:\text{N}$, p-a-Si:H)、GaN 系電子選択性コンタクト材料の特性を更に向上させることで、実現可能と考えている。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」(兵庫県立大学)

現在の研究開発は PERC 構造の AlO_x 薄膜を中心として実施しているが、上述したように、様々な金属酸化膜形成が可能であり、かつ、LIA 援用反応性スパッタ法の場合は金属/酸素比率も制御可能という特徴がある。そのため、バンドエンジニアリングを駆使した新規太陽電池構造への展開、様々な環境に適応したオーダーメイド的な太陽電池の展開につながるものと考えている。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	2 (0)	2 (0)	5 (0)
論文	20	22	28	24	15	109
研究発表・講演 (うち国際会議)	108 (50)	116 (50)	144 (73)	109 (66)	108 (51)	585 (290)
新聞・雑誌等への掲載	7	0	2	5	0	14
その他	1	6	5	3	3	18

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	学校法人明治大学	特願 2017- 13609	国内	2017/1/27	出願中	炭素濃度測定方法及び炭素濃度測定装置	田島道夫, 小椋厚志
2	学校法人明治大学	特願 2018-3897	国内	2018/1/14	出願中	炭素濃度測定方法及び炭素濃度測定装置	田島道夫, 小椋厚志
3	公立大学法人兵庫県立大学	特願 2018-026649 特開 2019-145603	国内	2018/2/19	公開中	抵抗変化型半導体メモリ素子及びそれを用いた不揮発性スイッチング装置、並びに抵抗変化型半導体メモリ素子の製造方法	上岡聡史, 佐藤真一, 吉田晴彦, 堀田育志, 小林滉平, 新船幸二
4	学校法人明治大学 学校法人豊田学園	特願 2019-162471	国内	2019/9/5	出願中	光電変換素子	小椋厚志, 神岡武文, 大下祥雄
5	国立大学法人名古屋大学	特願 2020-061178	国内	2020/3/30	出願中	導電性保護および太陽電池	後藤和泰, 津幡亮平, 宇佐美徳隆

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Xin Liu, Bing Gao, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical investigation of carbon contamination during the melting process of Czochralski silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth 417 (2015) 58-64	有	2015/5
2	Y. Miyamura ^{1,2} , H. Harada ^{1,3} , K. Jiptner ¹ , S. Nakano ³ , B. Gao ³ , K. Kakimoto ³ , K. Nakamura ⁴ , Y. Ohshita ⁵ , A. Ogura ⁴ , S. Sugawara ⁶ , and	1, MANA Nanoelectronic Materials Unit, National Institute for Materials Science 2, Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of	Advantage in solar cell efficiency of high-quality seed cast mono Si ingot	Applied Physics Express 8, 062301 (2015)	有	2015/5

	T. Sekiguchi ^{1,2}	Tsukuba 3, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 4, Meiji University 5, Toyota Technological Institute 6, Kyocera Corporation				
3	T. Sekiguchi ^{1,2} , K. Jiptner ¹ , Ronit R. Prakash ^{1,2} , J. Chen ¹ , Y. Miyamura ¹ , H. Harada ¹ , S. Nakano ³ , B. Gao ³ , and K. Kakimoto ³	1, MANA Nanoelectronic Materials Unit, National Institute for Materials Science 2, Doctoral Program for Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba 3, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Control of extended defects in cast and seed cast Si ingots for photovoltaic application	Phys. Status Solidi C 12, No. 8, 1094- 1098 (2015)	有	2015/5
4	Tomihisa Tachibana, Takuto Kojima, Daisuke Takai, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Recombination lifetime estimation at crystalline defects layer induced by SiN _x deposition using plasma CVD	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-42)	無	2015/6
5	T. Kamioka, D. Takai, T. Tachibana, T. Kojima, Y. Ohshita,	Toyota Technological Institute	Plasma damage effect on ultraviolet-induced degradation of PECVD SiN _x :H passivation	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-42)	無	2015/6
6	T. Kamioka, Y. Hayashi, K. Nakamura and Y. Ohshita,	Toyota Technological Institute	Simulation of interdigitated back- contact silicon heterojunction solar cells with quantum transport model	Jpn. J. Appl. Phys. vol. 54, 08KD07	有	2015/7
7	Ken Mishina, Atsufumi Ogishi, Kiyoshi Ueno, Sachiko Jonai, Norihiro Ikeno, Tetsuya Saruwatari, Kohjiro Hara, Atsushi Ogura, Toshiharu Yamazaki, Takuya Doi, Makoto Shinohara, Atsushi Masuda	Shimadzu Corporation, Choshu Industry Co., Ltd., AIST, Meiji University	Plasma-enhanced chemical-vapor deposition of silicon nitride film for high resistance to potential- induced degradation	Jpn. J. Appl Phys. 54, 08KD12	有	2015/7

8	Yoshihiro Yamashita Norihiro Ikeno Tomihisa Tachibana Yoshio Ohshita Atsushi Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	X-ray evaluation of electronic and chemical properties and film structures in SiN passivation layer on crystalline Si solar cells	Jpn. J. Appl Phys. 54, 08KD14	有	2015/7
9	C. T. Trinh, Y. Nakagawa, K. O. Hara, R. Takabe, T. Suemasu, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University, Tsukuba University	Photoresponse properties of BaSi ₂ film grown on Si (100) by vacuum evaporation	Materials Research Express 3, 076204	有	2015/7
10	Norihiro Ikeno, Yoshihiro Yamashita, Hiroshi Oji, Shohei Miki, Koji Arafune, Haruhiko Yoshida, Shin-ichi Satoh, Ichiro Hirosawa, Toyohiro Chikyow, Atsushi Ogura	Meiji University, Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, University of Hyogo, National Institute for Materials Science, JST-CREST	Relationship between passivation properties and band alignment in O ₃ -based atomic-layer-deposited AlO _x on crystalline Si for photovoltaic applications	Jpn. J. Appl Phys. 54, 08KD17	有	2015/7
11	Hyunju Lee, Keigo Ueda, Yuya Enomoto, Koji Arafune, Haruhiko Yoshida, Shin-ichi Satoh, Toyohiro Chikyow, Atsushi Ogura	Meiji University, JST-CREST, University of Hyogo, National Institute for Materials Science	Surface passivation of crystalline silicon by sputtered AlO _x /AlN _x stacks toward low-cost high-efficiency silicon solar cells	Jpn. J. Appl Phys. 54, 08KD19	有	2015/7
12	Shohei Miki, Koji Iguchi, Sho Kitano, Koki Hayakashi, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Atsushi Ogura, Shin-ichi Satoh, Koji Arafune	University of Hyogo, JST-CREST, Meiji University	Passivation properties of aluminum oxide films deposited by mist chemical vapor deposition for solar cell applications	Jpn. J. Appl Phys. 54, 08KD25	有	2015/7
13	T. Hiramatsu, I. Takahashi, S. Matsushima, and N. Usami	Nagoya University	Growth direction control of dendrite crystals in parallel direction to realize high-quality multicrystalline silicon ingot	Jpn. J. Appl. Phys. 55, 091302	有	2015/8
14	B. Gao ¹ , S. Nakano ¹ , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 2 National Institute for Materials Science	Single-Seed Casting Large-Size Monocrystalline Silicon for High-Efficiency and Low-Cost Solar Cells	Engineering, 2015, Vol. 1 Issue (3) : 378 -383	有	2015/9

15	I. Takahashi, S. Joonwichien, T. Iwata, and N. Usami	Nagoya University	Seed manipulation for artificially controlled defect technique in new growth method for quasi- monocrystalline Si ingot based on casting	Appl. Phys. Exp. 8, 105501	有	2015/9
16	Takashi Sekiguchi ¹ , Yoshiji Miyamura ^{1,2,3} , Hirofumi Harada ^{1,3} , Karolin Jiptner ¹ , Jun Chen ¹ , Ronit R. Prakash ^{1,2} , Satoshi Nakano ³ , Bing Gao ³ , and Koichi Kakimoto ³	1, WPI Center for Materials Nanoarchitectonics (MANA), National Institute for Materials Science, 2, Graduate School of Pure & Applied Sciences, Univ. Tsukuba, 3, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	50cm size Seed Cast Si ingot growth and its characterization	Solid State Phenomena Vol. 242 (2016) pp 30-34	有	2015/10
17	Mitsuhiro Matsumoto ¹ , Hirofumi Harada ² , Koichi Kakimoto ² , and Jiwang Yan ¹	1, Department of Mechanical Engineering, Keio University 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Study on Mechanical Properties of Single- Crystal Silicon Carbide by Nanoindentation	Advanced Materials Research 1136, 549-554	有	2016/1
18	Erick Omondi Ateto, Makoto Konagai, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Triple Layer Antireflection Design Concept for the Front Side of c-Si Heterojunction Solar Cell Based on the Antireflective Effect of nc-3C-SiC:H Emitter Layer	International Journal of Photoenergy (Vol. 2016, 5282851)	有	2016/2
19	Norihiro Ikeno, Taka-aki Katsumata, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Shin-ichi Satoh, Toyohiro Chikyow, Atsushi Ogura	Meiji Univ., Univ. Hyogo. NIMS	Investigation of new stacking surface passivation structures with interfacial tuning layers on p-type crystalline silicon	Jpn. J. Applied Physics, 55, 04ES03 (2016).	有	2016/3
20	Masahiro Inaba, Soichiro Todoroki, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Temperature-dependent minority carrier lifetime of crystalline silicon wafers passivated by high quality amorphous silicon oxide	Japanese Journal of Applied Physics (Vol. 55, 04ES04)	有	2016/3
21	K. Kakimoto, B. Gao, Xin Liu, Satoshi Nakano	Kyushu University	Growth of semiconductor silicon crystals	Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 62	有	2016/5

				(2016) 273-285		
22	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Efficiency improvement by charged-insulator layers for IBC-SHJ cells	Energy Procedia (Vol.9 2 pp. 96-102)	有	2016/8
23	Mari Aoki, Takayuki Aoyama, Isao Sumita, Yasushi Yoshino, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	A Study on the Evaluation Method of Glass Frit Paste for Crystalline Silicon Solar Cells	Proceedings of the 43th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC43)	無	2016/8
24	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Excellent Surface Passivation of Crystalline Silicon by Ternary $Al_xMg_{1-x}O_y$ Thin Films	Proceedings of the 43th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC43)	無	2016/8
25	Kuniyuki Sato, Atsushi Ogura, and Haruhiko Ono	Meiji University, Kanagawa Industrial Technology Center	Electrically active light-element complexes in silicon crystals grown by cast method	Jpn. J. Appl Phys. 55, 095502	有	2016/8
26	H. Ichikawa, I. Takahashi, N. Usami, K. Shirasawa, and H. Takato	Nagoya University, Fukushima Renewable Energy Institute, National Institute of Advanced Sciences and Technology	Light-induced recovery of effective carrier lifetime in boron-doped Czochralski silicon at room temperature	Energy Procedia 92 (2016) 801-807	有	2016/8
27	Tomihisa Tachibana ¹ , Daisuke Takai ^b , Takuto Kojima ² , Takefumi Kamioka ² , Atsushi Ogura ³ and Yoshio Ohshita ²	1 AIST FREA, 2 Toyota Technological Institute, 3 Meiji University	Minority Carrier Recombination Properties of Crystalline Defect on Silicon Surface Induced by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition	ECS J. Solid State Sci. Technol. 5 (9) Q253	有	2016/8
28	Hyunju Lee, Fumiya Nishimura, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Haruhiko Yoshida, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Doped Dielectric Nanolayers for Advanced Surface Passivation of Silicon Solar Cells	Proceedings of the 26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	無	2016/8
29	Xin Liu, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	Kyushu University	Effect of the packing structure of silicon chunks on the melting process and carbon reduction in Czochralski silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth 468 (2017)595- 600	有	2016/9
30	Xin Liu, Satoshi Nakano, and Koichi Kakimoto	Kyushu University	Development of carbon transport and modeling in Czochralski silicon crystal growth	Cryst. Res. Technol., 1-11 (2016)	有	2016/10

31	Yasushi Hotta, Satoshi Ueoka, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Atsushi Ogura, Shin-ichi Satoh	兵庫県立大学, 明治大学	Room temperature formation of Hf-silicate layer by pulsed laser deposition with Hf-Si-O ternary reaction control	AIP ADVANCES, 6, 105303 (2016)	有	2016/10
32	Shota Taniwaki, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Atsushi Ogura, Shin-ichi Satoh, Yasushi Hotta	兵庫県立大学, 明治大学	Correlation between chemical-bonding states and fixed-charge states of Sr-silicate film on Si(100) substrate	Journal of Vacuum Science & Technology A, 34, 061506 (2016)	有	2016/11
33	Karolin Jiptner ^{1,2} , Yoshiji Miyamura ^{2,3} , Hirofumi Harada ^{2,3} , Bing Gao ³ , Koichi Kakimoto ³ and Takashi Sekiguchi ²	1, WPI Center for Materials Nanoarchitectonics, International Center for Young Scientists 2, National Institute for Materials Science 3, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Dislocation behavior in seed-cast grown Si ingots based on crystallographic orientation	Progress in Photovoltaics: Research and Applications Volume 24, Issue 12 December 2016 Pages 1513- 1522	有	2016/12
34	S. Nakano ¹ , B. Gao ¹ , K. Jiptner ² , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , T. Sekiguchi ² , M. Fukuzawa ³ , K. Kakimoto ¹	a Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University b National Institute for Materials Science, c Kyoto Institute of Technology,	Numerical analysis of the relation between dislocation density and residual strain in silicon ingots used in solar cells	Journal of Crystal Growth 474 (2017) 130-134	有	2016/12
35	Xin Li, Bing Gao, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Reduction of carbon contamination during the melting process of Czochralski silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth 474 (2017) 3-7	有	2016/12
36	B. Gao ^{1,2} , S. Nakano ¹ , H. Harada ¹ , Y. Miyamura ¹ , K. Kakimoto ¹	1 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 2 SINTEF, Materials and Chemistry	Three-dimensional analysis of dislocation multiplication during thermal process of grown silicon with different orientations	Journal of Crystal Growth 474 (2017) 121-129	有	2016/12
37	Y. Hayama, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Controlling impurity distributions in crystalline Si for solar cells by using artificial designed defects	Journal of Crystal Growth 468, 625-629	有	2016/12
38	B. Gallien ^{1,2} , M. Albaric ² , T. Duffar ¹ , K. Kakimoto ³ , M. M' Hamdi ⁴	1, SIMAP-EPM 2, INES, CEA, LITEN, Solar Technologies Department 3, RIAM, Kyushu University	Study on the usage of a commercial software (Comsol-Multiphysics®) for dislocation multiplication model	Journal of Crystal Growth 457 (2017) 60-64	有	2017/1

		4, Dep. Mat. Sci. Eng., NTNU				
39	Koichi Kakimoto, Bing Gao, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, and Yoshiji Miyamura	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Silicon bulk growth for solar cells: Science and technology	Japanese Journal of Applied Physics 56 (2), 020101	有	2017/1
40	S Nakano, B Gao, K Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical analysis of dislocation density and residual stress in a GaN single crystal during the cooling process	Journal of Crystal Growth 468 (2017)839-844	有	2017/1
41	Koichi Kakimoto, Bing Gao, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, and Yoshiji Miyamura	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Silicon bulk growth for solar cells: Science and technology	Japanese Journal of Applied Physics 56 (2), 020101	有	2017/1
42	Michio Tajima, Hirotsu Kiuchi, Fumito Higuchi and Atsushi Ogura	Meiji University	Quantification of C in Si by photoluminescence at liquid N temperature after electron irradiation	Appl. Phys. Express 10, 046602	有	2017/3
43	Tomihisa Tachibana ¹ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Ogura ² , Yoshio Ohshita ³ , Takafumi Shimoda ⁴ , Isao Masada ⁴ , and Eiichi Nishijima ⁴	1 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Fukushima Renewable Energy Institute, AIST (FREA), 2 Meiji University, 3 Toyota Technological Institute, 4 Tokuyama Corporation	Effects of thermal budget in n-type bifacial solar cell fabrication processes on effective lifetime of crystalline silicon	AIP Advances 7, 045111	有	2017/4
44	K. Takahashi, Y. Nakagawa, K. O. Hara, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Investigation of p-type emitter layer materials for heterojunction barium disilicide thin film solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 05DB05	有	2017/4
45	Yoshio Ohshita, Takefumi Kamioka, Kyotaro Nakamura	Toyota Technological Institute, Meiji University	Technology Trend of High Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells	Association of Asia Pacific Physical Societies Vol. 27 No. 3	有	2017/6
46	Takefumi Kamioka, Satoshi Kameyama, Kazuo Muramatsu, Aki Tanaka, Naotaka Iwata, Kyotaro Nakamura, Atsushi Ogura, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University, NAMICS	Carrier Transportation at Novel Silver Paste Contact	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	無	2017/6

47	Hirotatsu Kiuchi ¹ , Michio Tajima ¹ , Fumito Higuchi ¹ , Atsushi Ogura ¹ , Nobuhito Iida ² , Shoji Tachibana ² , Isao Masada ² and Eiichi Nishijima ²	1 Meiji University, 2 Tokuyama Corporation	Determination of low carbon concentration in Czochralski-grown Si crystals for solar cells by luminescence activation using electron irradiation	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 070305	有	2017/6
48	Shota Taniwaki, Keiji Imanishi, Mitsuhiro Umamo, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Atsushi Ogura, Shin-ichi Satoh, Yasushi Hotta	兵庫県立大学, 明治大学	Investigation of the static electric field effect of strontium silicate layers on silicon substrates	J. Appl. Phys., 121, 225302 (2017)	有	2017/6
49	F. Higuchi, M. Tajima, A. Ogura	Meiji University	Photoluminescence due to early stage of oxygen precipitates in multicrystalline Si for solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, 070308 (2017).	有	2017/6
50	T. Iwata, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Effects of grain boundary structure controlled by artificially designed seeds on dislocation generation	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 75501	有	2017/6
51	K. Gotoh, M. Cui, N. C. Thanh, K. Koyama, I. Takahashi, Y. Kurokawa, H. Matsumura, and N. Usami	Nagoya University, Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST)	Fabrication of CuI/a-Si:H/c-Si Structure for Application to Hole-selective Contacts of Heterojunction Si Solar Cells	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	無	2017/6
52	S. Masuda, K. Gotoh, I. Takahashi, K. Nakamura, Y. Ohshita, and N. Usami	Nagoya University, Meiji University, Toyota Technological Institute	Solar Cells Application of p-type poly-Si Thin Film by Aluminum Induced Crystallization	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	無	2017/6
53	S. Masuda, K. Gotoh, I. Takahashi, K. Nakamura, Y. Ohshita, and N. Usami	Nagoya University, Meiji University, Toyota Technological Institute,	Solar Cells Application of p-type poly-Si Thin Film by Aluminum Induced Crystallization	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	無	2017/6
54	J. A. Wibowo, I. Takahashi, K. O. Hara, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Realization of Crystalline BaSi ₂ Thin Films by Vacuum Evaporation on (111)-oriented Si Layers Fabricated by Aluminum Induced Crystallization	JJAP Conf. Proc. 5, 11201	無	2017/7
55	T. Aoyama, M. Aoki, I. Sumita, Y. Yoshino,	Toyota Technological Institute, Meiji University	Characterization of glass frit in conductive paste for n-type crystalline silicon	IEEE J. Photovolt., vol. 7, 1313 (2017).	有	2017/7

	A. Ogura		solar cells			
56	Yuki Takiguchi, Yutaro Takei, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Fabrication and characterization of sputtered Cu ₂ O:N/c-Si heterojunction diode	Applied Physics Letters	有	2017/8
57	K. Gotoh, M. Cui, I. Takahashi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Development of Spin- coated Copper Iodide Film on Silicon for Use in Hole-selective Contacts	Energy Procedia	有	2017/9
58	Y. Hayama, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Controlling Impurity Distribution in Quasi- mono Crystalline Si Ingot by Seed Manipulation for Artificially Controlled Defect Technique	Energy Procedia	有	2017/9
59	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Yuki Isogai, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Analysis of interface work function and process-induced damage of reactive-plasma- deposited ITO/SiO ₂ /Si stack	AIP ADVANCES, 7, 9, 095212	有	2017/9
60	T. Aoyama, M. Aoki, I. Sumita, Y. Yoshino, Y. Ohshita, A. Ogura	Toyota Technological Instiute, Meiji University	The electrical losses induced by silver paste in n-type silicon solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, 102302 (2017).	有	2017/9
61	Jianbo Liang, Tomoki Ogawa, Tomoya Hara, Kenji Araki, Takefumi Kamioka, Naoteru Shigekawa	Osaka City University, Toyota Technological Institute	Electrical conduction of Si/indium tin oxide/Si junctions fabricated by surface activated bonding	Japanese Journal of Applied Physics, 57, 2S1, 02BE03	有	2018/1
62	Yuta Shiratori, Faris Akira Bin MohdZulkifly, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Effect of RF power on the properties of intrinsic hydrogenated amorphous silicon passivation layer deposited by facing target sputtering	Applied Physics Express	有	2018/1
63	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Effect of controlled crucible movement on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth, 483 (2018) 241-244	有	2018/2
64	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	3D numerical simulation of free surface shape during the crystal growth of floating zone (FZ) silicon	Journal of Crystal Growth, 483 (2018) 269- 274.	有	2018/2
65	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano,	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu	3D Global Heat Transfer Model on Floating Zone for Silicon Single	Cryst. Res. Technol. 2018, 1700246	有	2018/2

	Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, and Koichi Kakimoto	University	Crystal Growth			
66	K. Takahashi, Y. Nakagawa, K. O. Hara, I. Takahashi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi	Alternative simple method to realize p-type BaSi ₂ thin films for Si heterojunction solar cells application	MRS Advances	有	2018/2
67	Y. Miyamura, H. Harada, S. Nakano, S. Nishizawa, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Do thermal donors reduce the lifetimes of Czochralski-grown silicon crystals?	Journal of Crystal Growth 489 (2018) 1-4	有	2018/2
68	M. Tajima, Y. Ishikawa, H. Kiuchi, A. Ogura	Meiji University	Origin of room- temperature photoluminescence around C-line in electron- irradiated Si and its applicability for quantification of carbon	Appl. Phys. Express, vol. 11, 041301 (2018).	有	2018/2
69	Wataru Fukushima ¹ , Hirofumi Harada ² , Yoshiji Miyamura ² , Masato Imai ³ , Satoshi Nakano ² , Koichi Kakimoto ^{1,2} ,	1 Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University 2 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 3 Faculty of Engineering, University of Miyazaki	Effect of oxygen on dislocation multiplication in silicon crystals	Journal of Crystal Growth 486 (2018) 45- 49	有	2018/3
70	Y. Miyamura, H. Harada, S. Nakano, S. Nishizawa, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Relationship between carbon concentration and carrier lifetime in CZ- Si crystals	Journal of Crystal Growth 486 (2018) 56- 59	有	2018/3
71	K. Kinoshita, T. Kojima, R. Suzuki, T. Kawatsu, K. Nakamura, Y. Ohshita, A. Ogura	Meiji University, Komatsu NTC, Toyota Technological Institute	Evaluation of saw damage using diamond-coated wire in crystalline silicon solar cells by photoluminescence imaging	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, 055702 (2018).	有	2018/4
72	M. Tajima, H. Kiuchi, F. Higuchi, Y. Ishikawa, A. Ogura	Meiji University	Determination of low C concentration in Czochralski-grown Si for solar cells by liquid-N- temperature photoluminescence after electron irradiation	J. Elec. Mater., vol. 47, 5056 (2018).	有	2018/5
73	X. Cheng, K. Gotoh, Y. Nakagawa, and N. Usami	Nagoya University	Effect of substrate type on the electrical and structural properties of TiO ₂ thin films deposited by reactive DC	J. Cryst. Growth	有	2018/6

			sputtering			
74	K. Kinoshita, T. Kojima, H. Kobayashi, Y. Ohshita, and A. Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	Evaluation of oxygen precipitation behavior in n-type Czochralski-Si for photovoltaic by infrared tomography: Effects of carbon concentration and annealing process conditions	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, 08RB01 (2018).	有	2018/6
75	Tomoro Ide ¹ , Hirofumi Harada ² , Yoshiji Miyamura ² , Masato Imai ³ , Satoshi Nakano ² and Koichi Kakimoto ^{1,2}	1 Department of Aeronautics and Astronautics, Kyushu University 2 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 3 Faculty of Engineering, University of Miyazaki	Relationship between Dislocation Density and Oxygen Concentration in Silicon Crystals during Directional Solidification	Crystals 2018, 8(6), 244	有	2018/6
76	T. Kamioka, Y. Hayashi, Y. Isogai, K. Nakamura, Y. Ohshita	Meiji University, Toyota Technological Institute	Effects of annealing temperature on work function of MoO _x at MoO _x /SiO ₂ interface and process-induced damage in indium tin oxide/MoO _x /SiO _x /Si stack	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, 076501 (2018).	有	2018/6
77	Yoichiro Ishikawa ¹ , Michio Tajima ¹ , Hirotatsu Kiuchi ¹ , Atsushi Ogura ¹ , Yoshiji Miyamura ² , Hirofumi Harada ² , and Koichi Kakimoto ²	1 Meiji University 2 Kyushu University	Determination of C concentration in P-doped n-type Czochralski-grown Si crystals by liquid N temperature photoluminescence after electron irradiation	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB06 (2018)	有	2018/6
78	Yasushi Hotta, Iwao Kawayama, Shozo Miyake, Ikuya Saiki, Shintaro Nishi, Kota Yamahara, Koji Arafune, Haruhiko Yoshida, Shin-ichi Satoh, Naomi Sawamoto, Atsushi Ogura, Akira Ito, Hidetoshi Nakanishi, Masayoshi Tonouchi, Hitoshi Tabata	Univ. Hyogo	Control of dipole properties in high-k and SiO ₂ stacks on Si substrates with tricolor superstructure	Appl. Phys. Lett., 113, 012103 (2018).	有	2018/7

79	S. Masuda, K. Gotoh, I. Takahashi, K. Nakamura, Y. Ohshita, and N. Usami	Nagoya University, Toyota Technological Institute	Impact of boron incorporation on property of Si solar cells employing p-type poly-Si by aluminum induced crystallization	Jpn. J. Appl. Phys.	有	2018/7
80	Hyunju Lee, Inseol Song, Sang-Won Lee, Soo Hyun Bae, Ji Yeon Hyun, Yoonmook Kang, Hae-seok Lee, Donghwan Kim, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, KU-KIST Green School, Korea University, Korea University, Meiji University	Potential of chemical rounding for the performance enhancement of pyramid textured p- type emitters and bifacial n-PERT Si cells	Current Applied Physics 18 (2018) 1268- 1274	有	2018/7
81	田島道夫, 小椋 厚志	明治大学	液体窒素温度・室温フォト ルミネセンス法による Si 結晶中炭素濃度の定量	応用物理, vol. 87, 655 (2018).	有	2018/9
82	Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Xue-feng Han, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical analyses and experimental validations on transport and control of carbon in Czochralski silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth 499 (2018) 8- 12	有	2018/10
83	T. Mochizuki, K. Gotoh, A. Ohta, Y. Kurokawa, S. Miyazaki, T. Yamamoto, and N. Usami	Nagoya University	Local Structure of High Performance TiO_x Passivating Layer Revealed by Electron Energy Loss Spectroscopy	Proceedings for WCPEC-7	無	2018/11
84	M. Cui, K. Gotoh, Y. Kurokawa and N. Usami	Nagoya University	Development of the Passivation Layer For P- type CuI Thin Film Fabricated by the 2-step Method as the Novel Hole Selective Contact of Silicon Heterojunction Solar Cells	Proceedings for WCPEC-7	無	2018/11
85	X. Cheng, K. Gotoh, T. Mochizuki and N. Usami	Nagoya University	Controllable optical and electrical properties of Nb doped TiO_2 films by RF sputtering	Proceedings for WCPEC-7	無	2018/11
86	K. Gotoh, M. Cui, R. Akaishi, Y. Kurokawa and N. Usami	Nagoya University	Stacks of a-Si O_x :H/a- Si:H passivation layer for low parasitic absorption and high passivation in silicon heterojunction solar cells	Conference Proceedings of the 35th EU PVSEC	無	2018/11
87	Y. Miyamura, H. Harada, X. Liu, S. Nakano, S. Nishizawa,	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	In-situ measurement of CO gas concentration in a Czochralski furnace of silicon crystals	Journal of Crystal Growth 507 (2019) 154-156	有	2018/11

	K. Kakimoto					
88	T. Mochizuki, K. Gotoh, Y. Kurokawa, T. Yamamoto, and N. Usami	Nagoya University	Local Structure of High Performance TiO _x Electron-Selective Contact Revealed by Electron Energy Loss Spectroscopy	Adv. Mater. Interface	有	2018/12
89	B. Gao, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Carbon Impurity in Crystalline Silicon	Handbook of Photovoltaic Silicon, 1-26	有	2019/1
90	K. Kinoshita, T. Kojima, K. Onishi, Y. Ohshita, A. Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	Effect of oxygen precipitation through annealing process on lifetime degradation by Czochralski-Si crystal growth conditions	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 58, SBBF02 (2019).	有	2019/2
91	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	3D numerical study of the asymmetric phenomenon in 200 mm floating zone silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth Volume 532	有	2019/2
92	Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Xue-feng Han, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Transient global modeling for the pulling process of Czochralski silicon crystal growth. II. Investigation on segregation of oxygen and carbon	Journal of Crystal Growth Volume 532	有	2019/2
93	Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Xue-feng Han, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Transient global modeling for the pulling process of Czochralski silicon crystal growth. I. Principles, formulation, and implementation of the model	Journal of Crystal Growth Volume 532	有	2019/2
94	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Noritaka Usami, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute Nagoya University	Effects of Surface Doping of Si Absorbers on the Band Alignment and Electrical Performance of TiO ₂ -Based Electron-Selective Contacts	MRS Advances	有	2019/3
95	Yoichiro Ishikawa, Michio Tajima, and Atsushi Ogura	Meiji University	Effects of surface recombination and excitation power on quantitative analysis of carbon in Si using room-temperature photoluminescence after electron irradiation	Japanese Journal of Applied Physics 58, 076502 (2019).	有	2019/6
96	Tappei Nishihara ¹ , Takefumi	1. Meiji University, 2. Toyota	Evaluation of Sn-doped indium oxide film and interface properties on	ECS Journal of Solid State Science and	有	2019/6

	Kamioka ¹ , Hiroki Kanai ¹ , Yoshio Ohshita ² , Ichiro Hirosawa ³ , Atsushi Ogura ¹	Technological Institute, 3. JASRI,	a-Si formed by reactive plasma deposition	Technology, vol. 8, no. 6, pp. Q101-Q105, 2019.		
97	Kazuhiro Gotoh, Markus Wilde, Shinya Kato, Shohei Ogura, Yasuyoshi Kurokawa, Katsuyuki Fukutani, and Noritaka Usami	Nagoya University, University of Tokyo	Hydrogen concentration at a-Si:H/c-Si heterointerfaces - the impact of deposition temperature on passivation performance	AIP Advances	有	2019/7
98	Kazuhiro Gotoh, Takeya Mochizuki, Yasuyoshi Kurokawa, and Noritaka Usami	Nagoya University	Tuning the Electrical Properties of Titanium Oxide Bilayers Prepared by Atomic Layer Deposition at Different Temperatures	Physica Status Solidi A	有	2019/8
99	Sachiko Jonai ¹ , Aki Tanaka ² , Kazuo Muramatsu ² , Genki Saito ² , Kyotaro Nakamura ³ , Atsushi Ogura ⁴ , Yoshio Ohshita ³ , Atsushi Masuda ¹	1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Namics Corporation, 3. Toyota Technological Institute, 4. Meiji University	Effect of additives in electrode paste of p- type crystalline Si solar cells on potential-induced degradation	Solar Energy 188 (2019) 1292-1297	有	2019/9
100	Yutaka Hayashi ¹ , Takefumi Kamioka ^{1,2} , Kazuhiro Gotoh ³ , Ryo Ozaki ¹ , Kyotaro Nakamura ¹ , Motoo Morimura ¹ , Shimako Naitou ¹ , Noritaka Usami ³ , Atsushi Ogura ² , Yoshio Ohshita ¹	1. Toyota Technological Institute, 2. Meiji University, 3. Nagoya University	Surface inversion layer effective minority carrier mobility as one of the measures of surface quality of the p-a-Si:H/i-a-Si:H/c-Si heterojunction solar cell	Ext. Abst. 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2019), pp. 147-148, 2019.	無	2019/9
101	Sachiko Jonai ¹ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Masuda ¹	1. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2. Toyota Technological Institute	Universal explanation for degradation by charge accumulation in crystalline Si photovoltaic modules with applying high voltage	Applied Physics Express, 12 101003	有	2019/9
102	Takefumi Kamioka, Yuki Isogai, Yutaka Hayashi, Yoshio Ohshita, and Atsushi Ogura	Meiji University, Toyota Tech. Inst.	Effects of damages induced by indium tin- oxide reactive plasma deposition on minority carrier lifetime in silicon crystal	AIP Advances 9, 105219 (2019);	有	2019/10

103	Koji Arafune, Sho Kitano, Haruhiko Yoshida, Atsushi Ogura, and Yasushi Hotta	Hyogo University, Meiji University	Effect of post- deposition annealing on electrical properties and structures of aluminum oxide passivation film on a crystalline silicon substrate	Japanese Journal of Applied Physics 58, 125502 (2019)	有	2019/11
104	Tomoyasu Suzuki ¹ , Seira Yamaguchi ¹ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Masuda ³ , and Keisuke Ohdaira ¹	1. Japan Advanced Institute of Science and Technology, 2. Toyota Technological Institute, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Effect of a SiO ₂ film on the potential-induced degradation of n-type front-emitter crystalline Si photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics 59, SCCD02 (2020)	有	2019/11
105	Shinsuke Miyagawa, Kazuhiro Gotoh, Shohei Ogura, Markus Wilde, Yasuyoshi Kurokawa, Katsuyuki Fukutani, Noritaka Usami	Nagoya University, University of Tokyo	Effect of hydrogen plasma treatment on the passivation performance of TiO _x on crystalline silicon prepared by atomic layer deposition	J. Vac. Sci. Technol. A	有	2020/1
106	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Kazuhiro Gotoh, Ryo Ozaki, Kyotaro Nakamura, Motoo Morimura, Shimako Naitou, Noritaka Usami, Atsushi Ogura, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute Meiji University, Nagoya University	Surface inversion layer effective minority carrier mobility as one of the measures of surface quality of the p-aSi:H/i-aSi:H/cSi heterojunction solar cell	Japanese Journal of Applied Physics 59, SGGF06 (2020).	有	2020/2
107	Yuta Nakagawa, Kazuhiro Gotoh, Markus Wilde, Shohei Ogura, Yasuyoshi Kurokawa, Katsuyuki Fukutani, Noritaka Usami	Nagoya University, University of Tokyo	Effect of forming gas annealing on hydrogen content and surface morphology of titanium oxide coated crystalline silicon heterocontacts	J. Vac. Sci. Technol. A	有	2020/2
108	Yuta Shiratori, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Effect of Superimposed DC Power on the Properties of Intrinsic Hydrogenated Amorphous Silicon Passivation Layer Deposited by RF Facing Target Sputtering	IEEE Journal of Photovoltaics	有	2020/5

109	Faris Akira Bin Mohd Zulkifly, Yuta Shiratori, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Impact of bilayer structures on the surface passivation quality of high-rate sputtered hydrogenated amorphous silicon for silicon heterojunction solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications	有	2020/6
-----	--	--------	--	--	---	--------

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	B. Gao ¹ , K. Jiptner ² , S. Nakano ¹ , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	One-seed casting large-size monocrystalline silicon for high-efficiency and low-cost solar cells	8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2015/5/7
2	K Nakagawa ^{1,2} , Michio Tajima ^{1,2} , Hiroyuki Toyota ² , Atsushi Ogura ¹	1, Meiji University, 2, ISAS/JAXA	Systematic change of photoluminescence spectra in highly doped Si	8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells (CSSC-8)	2015/5/8
3	S. Nakano ¹ , B. Gao ¹ , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , K. Jiptner ² , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	Numerical investigation of the relationship between the crystal growth method and dislocation density in multicrystalline silicon for solar cells	8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2015/5/8
4	I. Takahashi, T. Iwata, S. Joonwichien, and N. Usami	Nagoya University	Seed Manipulation for ARTificially controlled defects Technique (SMART) as a new growth method for high-quality mono-like silicon crystals	8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2015/5/8
5	卜部駿介, 清水一希, Ateto Eric Omondi, 宮島晋介	東京工業大学	太陽電池裏面のレーザーポイントコンタクト部の特性解析	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2015/5/28
6	高橋勲, 岩田大将, 宇佐美德隆	名古屋大学	SMART (Seed Manipulation for ARTificially controlled defects Technique) 法による新規モノライクシリコンの結晶成長	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2015/5/29
7	稲葉真宏, 轟宗一郎, 中田和吉, 宮島晋介	東京工業大学	温度可変 QSSPC 法による結晶シリコンのパッシベーション膜評価	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2015/5/29

8	T. Kamioka, D. Takai, T. Tachibana, T. Kojima, Y. Ohshita,	Toyota Technological Institute	Plasma damage effect on ultraviolet- induced degradation of PECVD SiN _x :H passivation	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC- 42)	2015/6/14
9	Tomihisa Tachibana, Takuto Kojima, Daisuke Takai, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Recombination lifetime estimation at crystalline defects layer induced by SiN _x deposition using plasma CVD	42th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-42)	2015/6/16
10	Yoshihiro Yamashita ¹ Norihiro Ikeno ^{1,2} Nagisa Aizawa ¹ , Tomihisa Tachibana ³ , Yoshio Ohshita ⁴ Atsushi Ogura ¹	1, Meiji University 2, Research Fellow of JSPS 3, AIST-FREA 4, Toyota Technological Institute	Raman Spectroscopy Study of Crystalline Damage Induced by PECVD SiN	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/6/16
11	K. Nakamura ¹ K. Okamoto ² Y. Kawamoto ³ Y. Yoshino ³ Y. Ohshita ⁴	1, Meiji University 2, MITSUBOSHI DIAMOND INDUSTRIAL CO., LTD. 3, NORITAKE CO., LTD. 4, Toyota Technological Institute	SiO ₂ /SiN _x Stacking Layer for Rear Surface Passivation of PERC	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/6/16
12	大下祥雄、 神岡武文、 中村京太郎	豊田工業大学、 明治大学	結晶シリコン太陽電池 の最近の動向	第 12 回 Cat-CVD 研究 会	2015/7/4
13	中村京太郎	明治大学	結晶シリコンセルの技 術開発動向 ~ 次世代 高効率セルにおける劣 化現象 ~	学振 175 委員会モジ ュール・システム分 科会・次世代シリコ ン太陽電池分科会合 同研究会	2015/7/22
14	D. Takai, T. Kamioka, T. Kojima, T. Tachibana, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Plasma damage Effects on light- induced degradation of PECVD SiN _x :H Passivation quality	Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2015/7/26
15	R. Suzuki ¹ N. Ikeno ^{1,2} T. Tachibana ³ Y. Ohshita ⁴ A. Ogura ¹	1, Meiji University 2, Research Fellow of JSPS 3, AIST-FREA 4, Toyota Technological Institute	Evaluations of Carrier Recombination at Small Angle Grain Boundaries with Metal Contamination in n-type Multicrystalline Silicon by PL Imaging	25th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2015/7/27
16	B. Gao, S. Nakano, K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF DISLOCATION MULTIPLICATION IN SINGLE-CRYSTAL SILICON UNDER	ACCGE-20/OMVPE-17	2015/8/5

			ACCURATE CONTROL OF COOLING HISTORY OF TEMPERATURE		
17	B. Gao ¹ , S. Nakano ¹ , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	ONE-SEED CASTING LARGE-SIZE MONOCRYSTALLINE SILICON FOR HIGH-EFFICIENCY AND LOW-COST SOLAR CELLS	ACCGE-20/OMVPE-17	2015/8/6
18	Takuto Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Annealing effects on recombinative activity of nickel at direct silicon bonded interface	AIP Advances	2015/9/1
19	B. Gallien ¹ , M. Albaric ¹ , J.P. Garandet ² Thierry Duffar ¹ , K. Kakimoto ³ , M. M' Hamdi ⁴	1, Grenoble Institute of Technology 2, CEA 3, RIAM, Kyushu University 4, NTNU	Study on the usage of a commercial software (Comsol multiphysics) for dislocation multiplication model	5th European Conference on Crystal Growth	2015/9/10
20	Satoshi Nakano ¹ , Bing Gao ¹ , Karolin Jiptner ² , Hirofumi Harada ² , Yoshiji Miyamura ² , Takashi Sekiguchi ² , Masayuki Fukuzawa ³ and Koichi Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS 3, Kyoto Institute of Technology	Numerical analysis of dislocation density in multicrystalline silicon for solar cells using experimental verification	5th European Conference on Crystal Growth	2015/9/10
21	Xin Liu, Bing Gao, Satoshi Nakano and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Reduction of carbon contamination during the melting process of Czochralski silicon crystal growth	5th European Conference on Crystal Growth	2015/9/10
22	筋原康博、 Sergii Tutashkonko、 高橋勲、 宇佐美德隆	名古屋大学	Al 誘起成長における a-Si 層の厚膜化が poly-Si の成長メカニズムに及ぼす影響	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/13
23	神岡武文, 林豊, 中村京太郎, 大下祥雄	豊田工業大学、 明治大学	電極の仕事関数を制御した MIS 型セルのシミュレーション	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/13
24	Xin Liu, Bing Gao, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analysis of SiC and SiO ₂ deposition processes by gas-solid interaction in Czochralski silicon crystal growth	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/13
25	T. Tachibana ¹ Y. Ohshita ²	1, AIST-FREA 2, Toyota	The Effects of Annealing Processes	2015 European PV Solar Energy	2015/9/14

	N. Ikeno ^{3,4} A. Ogura ³	Technological Institute 3, Meiji University 4, Research Fellow of JSPS	on Effective Lifetime in n-Type Crystalline Silicon	Conference and Exhibition	
26	T. Aoyama ^{1,2} Y. Yoshino ¹ N. Sawamoto ² A. Ogura ²	1, NORITAKE CO., LIMITED. 2, Meiji University	Impact of Glass Frit in Ag/Al Paste on Electrical Properties of Bifacial N-Type Crystalline Silicon Solar Cells	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/14
27	山田郁彦、 須田耕平、 神岡武文、 中村京太郎、 小椋厚志、 大下祥雄、 神谷格	豊田工業大学、 明治大学	結晶 Si 太陽電池の断 面仕事関数測定に適し た観察面研磨手法の検 討	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15
28	宇野匠 ^{1,2} 、 小椋厚志 ¹ 、 小野春彦 ^{2,1}	1. 明治大、 2. 神奈川県産技セ	多結晶シリコン中の粒 界上に形成された酸 素・窒素析出物	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会（名 古屋国際会議場）	2015/9/15
29	鈴木涼太 ¹ 、 池野成裕 ^{1,2} 、 立花福久 ^{3,4} 、 大下祥雄 ³ 、 小椋厚志 ¹	1. 明治大学、 2. 学振特別研究員 3. 豊田工大、 4. 産総研福島	PL イメージングによる n 型多結晶 Si 中の小角 粒界におけるキャリア 再結合と金属不純物の 影響評価	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会（名 古屋国際会議場）	2015/9/15
30	山田郁彦 ¹ 、 須田耕平 ² 、 神岡武文 ¹ 、 中村京太郎 ² 、 小椋厚志 ² 、 大下祥雄 ¹ 、 神谷格 ¹	1. 豊田工大、 2. 明治大	結晶 Si 太陽電池の断 面仕事関数測定に適し た観察面研磨手法の検 討	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会（名 古屋国際会議場）	2015/9/15
31	Y. Yamashita ¹ 、 N. Ikeno ^{1,2} 、 T. Katsumata ¹ 、 K. Kurishima ¹ 、 R. Imai ¹ 、 Y. Suzuki ¹ 、 A. Ogura ¹ 、 H. Oji ³ 、 I. Hirosawa ³ 、 T. Tachibana ⁴ 、 Y. Ohshita ⁵	1 Meiji University University, 2 Research Fellow of JSPS 3 Japan Synchrotron Radiation Research Institute 4 AIST-FREA 5 Toyota Technological Institute	Detail Study on Electronic Bonding States on SiN Passivation Film and Interface for Si Solar Cell Applications	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/15
32	中野智 ¹ 、高冰 ¹ 、 Jiptner Karolin ² 、 原田博文 ² 、 宮村佳児 ² 、 関口隆史 ² 、 福澤理行 ³ 、 柿本浩一 ¹	1. 九大応力研 2. 物質・材料研究機 構 3. 京都工繊大	太陽電池用多結晶 Si 育成時における 3 次元 転位密度・残留応力解 析の評価	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15
33	高冰、中野智、 原田博文、 宮村佳児、 柿本浩一	九大応力研	シリコン単結晶成長に おける転位密度低減に 対する結晶成長方位の 役割	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15

34	高橋勲、 岩田大将、 市川寛章、 宇佐美德隆	名古屋大学	SMART (Seed Manipulation for ARTificially controlled defects Technique)法を用いたモノライクシリコンの結晶成長	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15
35	岩田大将、 高橋勲、 宇佐美德隆	名古屋大学	$\Sigma 3$ 粒界からの微小角度ズレと融液成長過程における欠陥発生	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15
36	黄雅テイ、 星裕介、 高橋勲、 宇佐美德隆	名古屋大学	ホスフィンを利用したSi基板中へのPドーピングによる電界効果パッシベーションの検討	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15
37	稲葉真宏、 宮島晋介	東京工業大学	a-Si _{1-x} O _x :Hパッシベーション膜を堆積させた結晶シリコンの実効ライフタイムの温度依存性	第76回 応用物理学会 秋季学術講演会 (15p-2S-3)	2015/9/15
38	卜部 駿介、 Ateto Eric Omondi、 宮島晋介	東京工業大学	太陽電池裏面レーザーポイントコンタクトの最適化	第76回 応用物理学会 秋季学術講演会 (15p-2S-11)	2015/9/15
39	Akira Faris, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Optimization of a-Si (i) Passivation Layer Fabricated by Facing Target Sputtering (FTS) Method	第77回 応用物理学会 秋季学術講演会 (15p-P13-10)	2015/9/15
40	Akira Faris, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Optimization of a-Si (i) Passivation Layer Fabricated by Facing Target Sputtering (FTS) Method	第77回 応用物理学会 秋季学術講演会 (15p-P13-10)	2015/9/15
41	N. Ikeno ^{1,2} , Y. Yamashita ¹ , A. Ogura ¹ , T. Chikyow ³	1 Meiji University, 2 Research Fellow of JSPS, 3 NIMS	Interface States Observation between Atomic Layer Deposited AlO _x Layer and Si by Photoelectron Spectroscopy	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/16
42	K. Nakamura ¹ , T. Takahashi ² , Y. Ohshita ³	1 Meiji University 2 NAMICS Corporation 3 Toyota Technological Institute	Novel Silver and Copper Pastes for N-type Bi-Facial PERT Cell	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/17
43	Bing Gao	RIAM, Kyushu University	The role of numerical simulation in growing high quality and large size crystals in silicon	第39回結晶成長討論会	2015/9/25
44	N. Ikeno ¹ T. Katsumata ^{2,3} H. Yoshida ^{2,3} K. Arafune ^{2,3}	1 Meiji University 2 University of Hyogo, 3	Investigation of New Stacking Surface Passivation Structures with	International Conference on Solid State Devices and Materials	2015/9/30

	S. Satoh ² T. Chikyow ⁴ A. Ogura ¹	3 JST-CREST 4 NIMS	Interfacial Tuning Layers on p-type Crystalline Silicon for Solar Cell Applications		
45	Masahiro Inaba, Soichiro Todoroki, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Temperature- dependent minority carrier lifetime of crystalline silicon wafers passivated by high quality amorphous silicon oxide	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials(C-7-3)	2015/9/30
46	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Crystalline Silicon Solar Cell R&D - higher conversion efficiency and lower cost	Association for Research on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules Workshop 2015	2015/10/15
47	K. Nakamura	Meiji University	Recent Developments of Silicon Heterojunction Solar Cells in Japan	15th Chinese Photovoltaic Conference, (招待講 演)	2015/10/15
48	高冰, 中野智, 原田博文, 宮村佳児, 柿本浩一	九大・応力研	シリコン単結晶成長に おける転位密度低減に 対する結晶成長方位の 役割	第45回結晶成長国内 会議	2015/10/20
49	中野智 ¹ , 高冰 ¹ , Karolin Jiptner ² , 原田博文 ² , 宮村佳児 ² , 関口隆史 ² , 福澤理行 ³ , 柿本浩一 ¹	1. 九大・応力研, 2. 物材機構, 3. 京都工繊大	太陽電池用多結晶シリ コン育成時における三 次元転位密度・残留応 力の数値解析および実 験的評価	第45回結晶成長国内 会議	2015/10/20
50	Xin Liu, Bing Gao, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Reduction of Carbon Contamination during the Melting Process of Czochralski Silicon Crystal Growth	第45回結晶成長国内 会議	2015/10/20
51	大下祥雄	豊田工業大学	豊田工大における セルモジュール工程の 紹介	2015年度第1回 PVTEC 戦略企画部会	2015/10/22
52	Yoshio Ohshita, Takefumi Kamioka, Lee Hyunju, Kyotaro Nakamura, Atsushi Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University	High efficiency and low cost crystalline silicon solar cells	The 14th International Union of Materials Research Societies- International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2015)	2015/10/26
53	中村京太郎	明治大学	極限シリコン結晶太陽 電池の研究開発	2015年度 NEDO 新エ ネルギー成果報告会 (ポスター, 予稿集)	2015/10/28

54	Isao Takahashi, Noritaka Usami	Nagoya University	Growth of Silicon Bulk Crystals for solar cells	The first International Workshop on Advanced Nanomaterials for Future Electron Devices 2015	2015/11/7
55	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Mari Aoki, Tomohiro Fujii, Koji Arafune, Haruhiko Yoshida, Naomi Sawamoto, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Impact of light illumination on surface passivation of crystalline silicon by SiN _x :H capped oxide layers	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC25)	2015/11/15
56	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Crystalline Silicon Solar Cells	The 25th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25 & GPVC-2015)	2015/11/15
57	Y. Sujihara, S. Tutashkonko, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Growth of thick polycrystalline silicon layer by aluminum-induced crystallization	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition Global Photovoltaic Conference 2015	2015/11/16
58	Yoshio Ohshita, Kyotaro Nakamura, Atsushi Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University	High efficiency and low cost crystalline silicon solar cell R&D by universities' network of intelligent technologies	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/16
59	S. Nakano ¹ , B. Gao ¹ , K. Jiptner ² , H. Harada ¹ , Y. Miyamura ¹ , T. Sekiguch ² , M. Fukuzawa ³ , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS 3, Kyoto Institute of Technology	Numerical Analysis of Relationship between Dislocation Density and Residual Strain in Silicon Ingots Used for Solar Cells	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/16
60	X. Liu, B. Gao, S. Nakano, K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Reduction of Carbon Contamination during the Melting Process of CZ-Si Crystal Growth	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/16
61	Takumi Uno ¹ Atsushi Ogura ¹ Haruhiko Ono ^{1,2}	1 Meiji University 2 Kanagawa Ind. Technol. Center,	Oxygen and Nitrogen Precipitates distributed on Grain Boundaries in Cast-grown	25th International Photovoltaic Science and Engineering	2015/11/17

			Multicrystalline Silicon	Conference (PVSEC-25)	
62	I. Takahashi, T. Iwata, and N. Usami	Nagoya University	Seed Manipulation for ARTificially controlled defects Technique (SMART) as a new growth method for high-quality quasi-mono crystalline silicon	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/17
63	B. Gao ¹ , S. Nakano ¹ , H. Harada ¹ , Y. Miyamura ¹ , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	One-Seed Casting Large-Size Monocrystalline Silicon for High-Efficiency and Low-Cost Solar Cells	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/17
64	Sho Kitano, Hiroki Imaeda, Shohei Miki, Atsushi Ogura, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Shin-ichi Satoh, Koji Arafune	兵庫県立大学	Effect of post-deposition thermal annealing on passivation quality of AlO _x film deposited by atomic layer deposition	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/17
65	Yuki Miki, Hiroki Imaeda, Kou Urushibata, Ippei Nakagoshi, Shohei Miki, Atsushi Ogura, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Shin-ichi Satoh, Koji Arafune	兵庫県立大学	Evaluation of emitter saturation current density in n-type emitter formed by phosphorus thermal diffusion	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/17
66	Hyunju Lee ¹ , Takefumi Kamioka ¹ , Mari Aoki ¹ , Tomohiro Fujii ² , Koji Arafune ^{2,3} , Haruhiko Yoshida ^{2,3} , Naomi Sawamoto ⁴ , Atsushi Ogura ⁴ , Yoshio Ohshita ¹	1 Toyota Technological Institute, 2 University of Hyogo, 3 JST-CREST, 4 Meiji University	Impact of light illumination on surface passivation of crystalline silicon by SiN _x :H capped oxide layers	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/18
67	B. Gao ¹ , S. Nakano ¹ , H. Harada ¹ , Y. Miyamura ¹ , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	Modelling of Crystal Growth: Macro and Atomic Scale Analysis	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/18
68	Shunsuke Urabe, Kazuki Shimizu, Ateto Eric Omondi,	東京工業大学	Optimization of laser-transferred contact process for PERC cells with high open-circuit voltage	25th International Photovoltaic Science and Engineering	2015/11/18

	Shinsuke Miyajima			Conference (CSi-0-21)	
69	K. Nakamura ¹ A. Tanizaki ² K. Okamoto ³ Y. Kawamoto ⁴ Y. Ohshita ⁵	1 Meiji University 2 Komatsu NTC Ltd. 3 Mitsuboshi Diamond Industrial Co. 4 Noritake Co. 5 Toyota Technological Institute	Mono Crystalline Si PERC using Less Than 100 μ m-thick Wafer by MWS Slicing	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/20
70	Fumihiko Yamada	Toyota Technological Institute	nm-scale Work Function Measurements of the Interface between Si and Surface Layers on the Crystalline Si Solar Cell using Kelvin Probe Microscopy	Energy Materials Nanotechnology Meeting on Vacuum Electronics	2015/11/21
71	高橋勲、 宇佐美德隆	名古屋大学	シリコンインゴット成長の新技術	日本学術振興会 第161委員会 第93回研究会プログラム 「太陽電池用材料と結晶成長技術の新展開」	2015/11/27
72	宮島晋介	東京工業大学	ナノ結晶シリコンカーバイドの低温 CVD とヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池への応用	第62回 CVD 研究会 (招待講演)	2015/12/8
73	T. Kamioka, Y. Hayashi, K. Nakamura and Y. Ohshita,	Toyota Technological Institute, Meiji University	R&D of next generation heterojunction crystalline Si solar cells	The Energy Materials and Nanotechnology (EMN) Photovoltaics Meeting	2016/1/18
74	宇佐美德隆	名古屋大学	結晶シリコン太陽電池の高効率化技術	第23回次世代自動車公開シンポジウム	2016/1/19
75	中村京太郎	明治大学	結晶シリコン太陽電池の技術開発動向と今後の展望	東京理科大学太陽光発電技術研究部門第6回シンポジウム 「太陽電池・発電技術の現状と課題」(招待講演)	2016/1/21
76	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	NEDO Si Solar Cells Program	2nd Workshop on the Future Direction of Photovoltaics	2016/1/29
77	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Mari Aoki, Tomohiro Fujii, Koji Arafune, Haruhiko Yoshida, Naomi Sawamoto, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Impact of Light Illumination on the Surface Passivation Properties of SiN _x :H Capped Oxides Deposited on P-type Silicon	スマートエネルギー技術研究センター」第7回シンポジウム JST-CREST「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域 2015年度第4回公開シンポジウム	2016/2/4

78	中村京太郎	明治大学	試作ラインの紹介と最近の技術動向	学振 175 委員会次世代シリコン太陽電池分科会研究会	2016/2/22
79	T. Kamioka, T. Iwahashi, H. Lee, Y. Sato, K. Nakamura, Y. Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Effects of light soaking and thermal treatment on PECVD-SiN _x passivation on n-type Si	9th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma 2016 / IC-PLANTS 2016)	2016/3/6
80	T. Kamioka, Y. Hayashi, K. Nakamura and Y. Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Efficiency Improvement by Charged-Insulator Layers for IBC-SHJ Cells	6th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics 2016	2016/3/6
81	H. Ichikawa, I. Takahashi, N. Usami, K. Shirasawa, and H. Takato	Nagoya University, AIST	Light-induced recovery of effective carrier lifetime in boron-doped Czochralski silicon at room temperature	6th International Conference on Silicon Photovoltaics	2016/3/7
82	Yoshio Ohshita, Takefumi Kamioka, Taisei Iwahashi, Lee Hyunju, Yuri Sato	Toyota Technological Institute	Light-Induced Degradation and Thermal-Induced Recovery of PECVD-SiN _x :H Passivation: Reaction Kinetics and Interfacial Properties	6th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics 2016 (Silicon PV 2016)	2016/3/9
83	宇佐美德隆	名古屋大学	結晶シリコン太陽電池の高効率化技術	第7回薄膜太陽電池セミナー	2016/3/15
84	神岡武文, 岩橋泰正, Hyunju Lee, 佐藤友理, 中村京太郎, 大下祥雄	豊田工業大学、明治大学	"n 型 Si 表面における PECVD-SiN _x :H パッシベーション性に対する光照射・熱処理の効果"	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
85	山田郁彦, 神岡武文, 大下祥雄, 神谷格	豊田工業大学	太陽電池構造断面試料作製時のダメージが仕事関数測定に与える影響	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
86	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Excellent Surface Passivation of Crystalline Silicon by Atomic Layer Deposition Al _x Mg _{1-x} O _y Thin Films	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
87	鈴木涼太 ¹ 、池野 成裕 ^{1,2} 、小島拓人 ¹ 、大下祥雄 ³ 、小椋厚志 ¹	1. 明治大理工、 2. 学振特別研究員、 3. 豊田工大	PL イメージングを用いた強制汚染およびゲッタリングによる多結晶 Si 中の鉄およびニッケルの影響評価	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東工大大岡山キャンパス)	2016/3/19
88	Xin Liu, Bing Gao, Satoshi Nakano,	RIAM, Kyushu Univ.	Effect of packing structure of Si chunks on melting	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19

	Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto		process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth		
89	高橋勲、 筋原康博、 Wibowo Jefferson、 宇佐美德隆	名古屋大学	Al 誘起成長法を用いた p 型薄膜多結晶 Si の太 陽電池セルへの応用	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
90	中川啓、 田島道夫、 小椋厚志	明治大	フォトルミネッセンス 法による高濃度 Si 結 晶の不純物効果の解析	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東 工大大岡山キャンパ ス)	2016/3/20
91	山下祥弘、 池野成裕、 小島拓人、 肥山卓矢、 小椋厚志	明治大理工	結晶 Si 太陽電池にお けるポストプラズマ処 理を用いた SiN パッシ ベーション特性	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東 工大大岡山キャンパ ス)	2016/3/20
92	樋口史仁、 宇野匠、 田島道夫、 小椋厚志	明治大理工	太陽電池用多結晶 Si における酸素析出初期 状態のフォトルミネッ センス	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東 工大大岡山キャンパ ス)	2016/3/20
93	福島航 ¹ 、 高冰 ² 、 原田博文 ² 、 宮村佳児 ² 、 中野智 ² 、 柿本浩一 ¹	1. 九大院工、 2. 九大応力研	シリコン単結晶の転位 増殖に及ぼす酸素の影 響	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/20
94	羽山優介、 高橋勲、 宇佐美德隆	名古屋大学	機能性欠陥層を用いた 太陽電池用結晶シリコ ンの不純物制御	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/20
95	岩田大将、 高橋勲、 宇佐美德隆	名古屋大学	欠陥マニピュレーション に向けた結晶 Si の 粒界構造と転位発生の 関係	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/20
96	卜部駿介、 宮島晋介	東京工業大学	PERC 型太陽電池用 LTC コンタクトの電気的特 性	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (20a-W611-3)	2016/3/20
97	大下祥雄、 小椋厚志、 中村京太郎	豊田工業大学、 明治大学	先端複合技術型シリコ ン太陽電池に必要とさ れる技術	2016 年第 63 回応用 物理学会春季学術講 演会 -次世代高効率・低コ スト結晶シリコン太 陽電池シンポジウム-	2016/3/21
98	小椋厚志 ¹ 、 小島拓人 ¹ 、 中村京太郎 ¹ 、 田島道夫 ¹ 、 大下祥雄 ² 、 西島英一 ³ 、 正田勲 ³ 、 飯田伸仁 ³ 、 橋昇二 ³	1. 明大理工、 2. 豊田工大、 3. 株式会社トクヤマ	結晶シリコン太陽電池 におけるウエハとプロ セスの相性	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東 工大大岡山キャンパ ス)	2016/3/21
99	小島拓人 ¹ 、 鈴木涼太 ¹ 、 小椋厚志 ¹ 、 立花福久 ² 、	1. 明大理工、 2. 産総研福島、 3. 豊田工大、 4. 株式会社トクヤマ	n 型 CZ シリコンのキャ リア寿命に対する熱処 理による酸素析出の影 響	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東 工大大岡山キャンパ ス)	2016/3/21

	大下祥雄 ³ 、 西島英一 ⁴ 、 正田勲 ⁴ 、 飯田伸仁 ⁴ 、 橋昇二 ⁴				
100	宇佐美徳隆、 高橋勲、 黒川康良、 中塚理	名古屋大学	高性能結晶シリコン太陽電池の実現に向けた新規ヘテロ接合用材料と高品質シリコン結晶に関する研究	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会（東工大大岡山キャンパス）	2016/3/21
101	高橋一真、 中川慶彦、 原康祐、 黒川康良、 宇佐美徳隆	名古屋大学、 山梨大学	BaSi ₂ 薄膜太陽電池における p 型エミッタ層材料の探索	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会（東工大大岡山キャンパス）	2016/3/21
102	柿本浩一、 宮村佳児、 原田博文、 中野智、高冰	九大応力研	CZ シリコン単結晶における軽元素とバルクライフタイムの関係	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/21
103	稲葉真宏、 宮島晋介	東京工業大学	a-Si _{1-x} O _x :H ヘテロ接合太陽電池構造に対する少数キャリアライフタイム温度依存測定	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (20p-S611-13)	2016/3/21
104	谷脇将太、 今西啓司、 馬野光博、 吉田晴彦、 新船幸二、 佐藤真一、 堀田育志	兵庫県立大学	PLD 法により Sr ₂ SiO ₄ ターゲットから作製した Sr ₂ SiO ₄ 薄膜の膜中固定電荷のアニール時間依存性	第 63 回 応用物理学 関係連合講演会	2016/3/21
105	上岡聡史、 三宅省三、 堀田育志、 新船幸二、 佐藤真一	兵庫県立大学	HfO ₂ /SiO _x /Si 構造における C-V 特性のアニール温度依存性	第 63 回 応用物理学 関係連合講演会	2016/3/21
106	Takuto Kojima ¹ Yoshio Ohshita ² Atsushi Ogura ¹ Masafumi Yamaguchi ²	1 Meiji University 2 Toyota Technological Institute	Effect of Symmetricity on Annealing Sensitivity to Σ3n Grain Boundaries	6th International Conference on Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2016)	2016/3/22
107	竹井雄太郎、 滝口雄貴、 宮島晋介	東京工業大学	Cu ₂ O:N/c-Si ヘテロ接合太陽電池のデバイスシミュレーション	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (22a-W321-4)	2016/3/22
108	滝口雄貴、 竹井雄太郎、 宮島晋介	東京工業大学	Cu ₂ O:N/c-Si ヘテロ接合の作製と評価	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (22a-W321-5)	2016/3/22
109	市川寛章、 高橋勲、 宇佐美徳隆、 白澤勝彦、 高遠秀尚	名古屋大学、 産業技術総合研究所	Si _N :H/AlO _x パッシベーションスタック層を用いた光照射による Si 基板のライフタイム向上	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
110	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata,	Toyota Technological Institute	ALD Al _x Mg _{1-x} O _y Surface Passivation for Next Generation Silicon Solar Cells	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19

	and Yoshio Ohshita				
111	神岡武文, 林豊, 中村京太郎, 大下祥雄	豊田工業大学、 明治大学	裏面コンタクト型アモルファス/結晶 Si ヘテロ接合セルにおける電荷保有絶縁膜による効率改善	第 13 回 「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2016/5/19
112	滝口雄貴, 竹井雄太郎, 宮島晋介	東京工業大学	Cu ₂ O:N/c-Si ヘテロ接合太陽電池の検討	第 13 回 「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2016/5/19
113	中村京太郎 ¹ , 大下祥雄 ² , 小椋厚志 ¹ ,	1 明治大学, 2 豊田工業大学	豊田工業大学試作ラインにおける結晶シリコン太陽電池セル開発	第 13 回 「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2016/5/20
114	I. Takahashi, Y. Sujihara, H. Yating, J. Wibowo, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Application of New Doping Techniques to Solar Cells for Low Temperature Fabrication	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/5
115	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Excellent Surface Passivation of Crystalline Silicon by Ternary Al _x Mg _{1-x} O _y Thin Films	The 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC43)	2016/6/9
116	Mari Aoki, Takayuki Aoyama, Isao Sumita, Yasushi Yoshino, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	A Study on the Evaluation Method of Glass Frit Paste for Crystalline Silicon Solar Cells	The 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC43)	2016/6/9
117	肥山卓矢 小島拓人 山下祥弘 小椋厚志	明治大学	Evaluation of SiN _x Passivation with Plasma Treatment for Crystalline Si Solar Cell	43rd IEEE PVSC, Portland, USA	2016/6/9
118	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Next generation of high-efficient heterojunction crystalline silicon solar cells	Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR) 2016	2016/6/20
119	C. T. Trinh, Y. Nakagawa, And N. Usami	Nagoya University	Photoresponse Properties of BaSi ₂ Film Grown on Si (100) by Vacuum	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2016), Munich, Germany	2016/6/20
120	Takefumi Kamioka	Toyota Technological Institute	Next generation of high-efficient heterojunction crystalline silicon solar cells	CC3DMR	2016/6/21
121	小島拓人 ¹ 鈴木涼太 ¹ 中村京太郎 ¹	1 明治大理工 2 豊田工大 3 株式会社トクヤマ	Influence of Growth Conditions on Thermal Process	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference	2016/6/23

	小椋厚志 ¹ 大下祥雄 ² 西島英一 ³ 正田勲 ³ 飯田伸仁 ³ 橋昇二 ³		Sensitivity for n-Type CZ Silicon	and Exhibition (EU PVSEC 2016), Munich, Germany	
122	K. Takahashi, Y. Nakagawa, K. O. Hara, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Investigation of p-type Emitter Layer Materials for Heterojunction Barium Silicide Thin Film Solar Cells	APAC Silicide 2016	2016/7/17
123	C. T. Trinh, Y. Nakagawa, K. O. Hara, R. Takabe, T. Suemasu, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi, University of Tsukuba	The Growth of Polycrystalline Orthorhombic BaSi ₂ on Ge Substrate by Vacuum Evaporation Method	APAC Silicide 2016	2016/7/17
124	Y. Nakagawa, C. T. Trinh, K. O. Hara, Y. Kurokawa, T. Suemasu and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi, University of Tsukuba	Proposal of a Method to Realize BaSi ₂ Thin Films with Uniform Orientation using Reactivity of Excessive Ba in the Film and Si Substrate in Vacuum Evaporation	APAC Silicide 2016	2016/7/17
125	T. Suhara, K. Murata, A. Navabi, K. O. Hara, Y. Nakagawa, C. T. Trinh, Y. Kurokawa, T. Suemasu, K. L. Wang, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi, University of Tsukuba	Post -Annealing Effects on BaSi ₂ Evaporated Films Grown on Si Substrates	APAC Silicide 2016	2016/7/17
126	J. A. Wibowo, I. Takahashi, K. O. Hara, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi	Realization of Crystalline BaSi ₂ Thin Films by Vacuum Evaporation on (111)-oriented Si Layers Fabricated by Aluminum Induced Crystallization	APAC Silicide 2016	2016/7/17
127	Hyunju Lee	Toyota Technological Institute	Recent Progress in the Dielectric Passivation for Silicon Solar Cells	(独) 日本学術振興会「結晶加工と評価技術」第145委員会	2016/7/19
128	柿本浩一、 宮村佳兒、 原田博文、 中野智、 高 冰	九州大学	CZ シリコン単結晶成長における軽元素の導入とバルクライフタイムとの関係：実験と数値解析	(独) 日本学術振興会「結晶加工と評価技術」第145委員会第149回研究会	2016/7/19
129	山田郁彦	豊田工業大学	走査型プローブ顕微鏡によるナノスケール構造観察と物性評価	三重大学極限ナノエレクトロニクスセンター	2016/7/28

130	Y. Hayama, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoaya University	Controlling Impurity Distributions in Crystalline Si for Solar Cells by Using Artificial Designed Defects	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/8
131	Takefumi Kamioka, Hyunju Lee, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	PECVD-SiN _x :H Growth- Induced Defects in Crystalline Si	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18)	2016/8/8
132	W. Fukushima ¹ , B. Gao ² , S. Nakano ² , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , and K. Kakimoto ^{1,2}	1, Dept. Aeronautics and Astronautics 2, RIAM, Kyushu University	Effect of oxygen atoms on dislocation multiplication in a silicon crystal	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/8
133	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Atomic Layer Deposition of Al _x Mg _{1-x} O _y Nanolayers and Their Excellent Surface Passivation for Crystalline Silicon Solar Cells	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18)	2016/8/9
134	X Liu, S. Nakano, B. Gao, K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Effect of packing structure of Si chunks on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/11
135	Y. Miyamura, H. Harada, S. Nakano, B. Gao, K. Kakimoto	Kyushu University	Japan Influence of Light Elements on Bulk Lifetime in CZ Si crystals	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/11
136	T. Iwata, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoaya University	Dependence of Grain Boundary Structure Controlled by Artificially Designed Seeds on Dislocation Generation	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/11
137	G. Anandha babu, I. Takahashi, T. Muramatsu, and N. Usami	Nagoaya University	Towards optimized nucleation control in multicrystalline silicon ingot for solar cells	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/11
138	T. Muramatsu, I. Takahashi, G. Anandha Babu, and N. Usami	Nagoaya University	On the growth mechanism of a multicrystalline silicon ingot with small grains by using single layer silicon	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/12

139	Hyunju Lee, Fumiya Nishimura, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Haruhiko Yoshida, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Charge-Controllable Doped Dielectric Nanolayers for the Surface Passivation of Si Solar Cells	The 26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2016/8/29
140	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Fumihiko Yamada, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Work function of transition metal oxides in carrier- selective contact stacks: Device simulation and Kelvin force microscopy studies	The 26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2016/8/29
141	樋口史仁 田島道夫 小椋厚志	明治大学	Photoluminescence due to Early Stage of Oxygen Precipitates in Multicrystalline Si for Solar Cells	Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, Breckenridge, USA	2016/8/29
142	Yoshio Ohshita, Kyotaro Nakamura, and Atsushi Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University	Thin Wafer Crystalline Silicon Solar Cells using Advanced Technologies	The 26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2016/8/30
143	小島拓人 肥山卓矢 小椋厚志	明治大学	Evaluation of Passivation Film with Large Leakage Current by Applying Extremely High- frequency AC Voltage	Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, Breckenridge, USA	2016/8/30
144	N. Usami	Nagoya University	Silicon-based materials for heterojunction solar cells	Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, Breckenridge, USA	2016/8/30
145	柿本浩一	九州大学	パワーデバイス用高純 度 Si 単結晶製造とそ の適用	日本機械学会 2016 年度年次大会	2016/9/12
146	Hyunju Lee, Naotaka Iwata, Atsushi Ogura, Haruhiko Yoshida, Toyohiro Chikyow, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Dielectric Oxide Nanoengineering and Its Impact on the Surface Passivation and Interface Properties of Crystalline Silicon	The 2016 EMN Meeting on Surface and Interface	2016/9/13
147	宇佐美德隆	名古屋大学	アルミニウム誘起層交 換成長法によるシリコ ン薄膜成長のカイネテ ィクスと応用	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14

148	西慎太郎、 上岡聡史、 谷脇将太、 吉田晴彦、 新船幸二、 佐藤真一、 堀田育志	兵庫県立大学	PLD 法により SiO ター ゲットから作製した SiO ₂ 薄膜の表面ラフネ ス効果	第 77 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/14
149	J. A. Wibowo, I. Takahashi, K. O. Hara and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Growth of Crystalline BaSi ₂ Thin Films by Vacuum Evaporation on Poly- Crystalline Silicon Fabricated by Aluminum Induced Crystallization	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
150	山田郁彦、 神岡武文、 大下祥雄、 神谷格	豊田工業大学	太陽電池評価に適した 光照射が可能な AFM/KFM 装置の開発	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
151	小島拓人 ¹ 木下晃輔 ¹ 鈴木涼太 ¹ 中村京太郎 ¹ 小椋厚志 ¹ 大下祥雄 ² 西島英一 ³ 正田勲 ³ 橘昇二 ³ 飯田伸仁 ³	1 明治大理工 2 豊田工大 3 株式会社トクヤマ	n 型 CZ シリコン太陽電 池のプロセス起因酸素 析出に対する成長条件 の影響	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会 (朱鷺メッセ)	2016/9/15
152	木内広達 ¹ 田島道夫 ¹ 樋口史仁 ¹ 小椋厚志 ¹ 飯田伸仁 ² 橘昇二 ² 正田勲 ² 西島英一 ²	1 明治大理工 2 株式会社トクヤマ	電子線照射発光活性化 PL 法による CZ-Si 結晶 中の酸素析出過程の解 析	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会 (朱鷺メッセ)	2016/9/15
153	正田勲 ¹ 橘昇二 ¹ 飯田伸仁 ¹ 西島英一 ¹ 小島拓人 ² 中村京太郎 ² 小椋厚志 ² 大下祥雄 ³	1 トクヤマ 2 明治大理工 3 豊田工大	単結晶シリコンの品質 に及ぼす炭素と酸素析 出の影響	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会 (朱鷺メッセ)	2016/9/15
154	鈴木涼太 ¹ 小島拓人 ¹ 木下晃輔 ¹ 河津知之 ² 中村京太郎 ¹ 大下祥雄 ³ 小椋厚志 ¹	1 明治大理工 2 コマツ NTC 株式会社 3 豊田工大	PL イメージングを用い た結晶シリコン太陽電 池のスライスダメージ 評価	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会 (朱鷺メッセ)	2016/9/15
155	鈴木涼太 ¹ 小島拓人 ¹ 木下晃輔 ¹ 大下祥雄 ² 小椋厚志 ¹	1 明治大理工 2 豊田工大	PL イメージングによる 太陽電池用シリコン結 晶の評価	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会 (朱鷺メッセ)	2016/9/15

156	樋口史仁 田島道夫 木内広達 小椋厚志	明治大理工	電子線照射発光活性化 PL 法による CZ-Si 結晶 中の酸素析出過程の解 析	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会 (朱鷺メッセ)	2016/9/15
157	中山椋平 ¹ 小椋厚志 ¹ 小野春彦 ^{1,2}	1 明治大 2 神奈川県産業技術セ ンター	熱処理の冷却過程の違 いによる太陽電池用単 結晶シリコン中の酸素 析出への影響	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会 (朱鷺メッセ)	2016/9/15
158	高橋勲、 Supawan Joonwichien、 岩田大将、 宇佐美德隆	名古屋大学	Seed manipulation for artificially controlled defect technique in new growth method for quasi- monocrystalline Si ingot based on casting	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
159	高橋一真、 中川慶彦、 原康祐、 黒川康良、 宇佐美德隆	名古屋大学、 山梨大学	Si ヘテロ接合太陽電池 におけるホール選択層 としての BaSi ₂ の検討	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
160	市川寛章、 高橋勲、 宇佐美德隆、 白澤勝彦、 高遠秀尚	名古屋大学、 福島再生エネルギー研 究所	SiN _x :H/AlO _x パッシベ ーションスタック構造を 持つ Si 基板への光照 射の影響	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
161	須原貴道、 青柳健太、 原康祐、末益崇、 宇佐美德隆	名古屋大学、 山梨大学、 筑波大学	真空蒸着法により作製 した BaSi ₂ /SUS304 の断 面評価	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
162	中野智、 高冰、 柿本 浩一	九大応力研	Si 単結晶成長における 転位密度・残留歪の結 晶成長方位依存性	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
163	Xin Liu, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Dynamic modeling of melting process and carbon contamination in packed Si chunks of Czochralski silicon crystal growth	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
164	渡邊光、 竹井雄太郎、 滝口雄貴、 宮島晋介	東京工業大学	対向ターゲットスパッ タリングによる Cu ₂ O 薄膜の作製と評価	第 77 回 応用物理学 会秋季学術講演会 (15a-A31-8)	2016/9/15
165	中田和吉、 ファリス アキラ、 宮島晋介	東京工業大学	対向ターゲットスパッ タ法による i-a-Si パ ッシベーション膜の解 析	第 77 回 応用物理学 会秋季学術講演会 (15p-P13-11)	2016/9/15
166	西村郁哉、 森英喜、 新船幸二、 佐藤真一、 吉田晴彦	兵庫県立大学	LIA スパッタ法により 成膜した AlO _x 膜の XPS 評価	第 77 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/15
167	神岡武文、林豊、 磯貝勇樹、 中村京太郎、	豊田工業大学、 明治大学	遷移金属酸化物/SiO ₂ /結晶 Si ヘテロ接合	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/16

	大下祥雄		コンタクト界面における仕事関数		
168	宮村佳児, 原田博文, 中野智, 柿本浩一	九大応力研	CZ シリコンにおける 低温熱履歴のバルクラ イフタイムへの影響	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/16
169	竹井雄太郎, 滝口雄貴, 中田和吉, 宮島晋介	東京工業大学	i-a-Si:H/c-Si ヘテロ 接合への Cu ₂ O:N スパッ タ製膜の影響	第 77 回 応用物理学 会秋季学術講演会 (16a-A24-7)	2016/9/16
170	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Light-Induced Degradation of SiN _x :H Capped Metal Oxide Stacked Passivation	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016/9/28
171	Shota Taniwaki, Mitsuhiro Umano, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Shin-ichi Satoh, and Yasushi Hotta	兵庫県立大学	Influence of post annealing treatment on fixed charge density state and chemical bonding state of Sr-silicate film	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials	2016/9/28
172	Kyotaro Nakamura	Meiji University	Recent Developments of Crystalline Si Solar Cells in Japan under NEDO	Photovoltaic Industry Workshop 2016 (招待講演)	2016/9/30
173	X. Liu, B. Gao, S. Nakano and K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Effect of packing structure of Si chunks on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	The 9th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells and the 3rd Silicon Materials Workshop (CSSC-9)	2016/10/10
174	S. Nakano, B. Gao, H. Harada, Y. Miyamura and K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Effect of growth orientation on dislocation density and residual strain in mono-like silicon crystal	The 9th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells and the 3rd Silicon Materials Workshop (CSSC-9)	2016/10/12
175	Yutaro Takei, Yuki Takiguchi, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Sputtered Cu ₂ O:N Emitter for Silicon Heterojunction Solar Cells	PVSEC-26 (2_3-0057)	2016/10/22
176	Takahisa Masuda, Masahiro Inaba, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Characterization of the Passivation Effect of Al ₂ O ₃ for Crystalline Silicon by Using Temperature Dependence of Effective Carrier Lifetime	PVSEC-26 (2_4-0046)	2016/10/22
177	Koji Arafune, Shunpei Tanaka,	兵庫県立大学	Mist chemical vapor deposited yttrium	26th International Photovoltaic	2016/10/22

	Sho Kitano, Takashi Harada, Kouji Maeda		oxide films for crystalline silicon surface passivation	Science and Engineering Conference	
178	Koji Arafune, Toshiya Marukane, Yuki Miki, Sho Kitano, Kouji Maeda, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida	兵庫県立大学	Study of aluminum oxide passivation films deposited by reactive sputtering with assistance of low inductance antenna	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/22
179	Koji Arafune, Sho Kitano, Yuki Miki, Kouji Maeda, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida	兵庫県立大学	X-ray reflectivity study of structural change in atomic layer deposited AlO _x films by post deposition thermal treatment	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/22
180	小島拓人 ¹ 鈴木涼太 ¹ 木下晃輔 ¹ 中村京太郎 ¹ 小椋厚志 ¹ 大下祥雄 ² 西島英一 ³ 正田勲 ³ 橘昇二 ³ 飯田伸仁 ³	1 明治大理工 2 豊田工大 3 株式会社トクヤマ	Effects of growth conditions and carbon on oxygen precipitation in CZ silicon	PVSEC-26, Singapore	2016/10/26
181	鈴木涼太 ¹ 小島拓人 ¹ 木下晃輔 ¹ 河津知之 ² 中村京太郎 ¹ 大下祥雄 ³ 小椋厚志 ¹	1 明治大理工 2 コマツ NTC 株式会社 3 豊田工大	Evaluation of Saw Damages with Diamond-Coated Wire in Crystalline Silicon Solar Cell by Photoluminescence Imaging	PVSEC-26, Singapore	2016/10/26
182	Hyunju Lee, Fumiya Nishimura, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Haruhiko Yoshida, Naotaka Iwata, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Excellent Surface Passivation of Crystalline Silicon by Al _x Mg _{1-x} O _y and Its Tunable Interface Properties	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 26)	2016/10/27
183	Fumihiko Yamada, Takefumi Kamioka, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita and Itaru Kamiya	Toyota Technological Institute, Meiji University	Development of an AFM/KFM System Capable of Local Work function Mapping of Solar Cells under Light Illumination	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 26)	2016/10/27
184	Kyotaro Nakamura ¹ , Tomoyuki Kawatsu ² , Kazuo Muramatsu ³ and	1 Meiji University, 2 Komatsu NTC Ltd., 3 NAMICS CORPORATION,	P-type Bi-facial PERT Solar Cell using Less Than 100 μm thick CZ Wafer and Cu Paste	PVSEC-26, Singapore	2016/10/27

	Yoshio Ohshita ⁴	4 Toyota Technological Institute			
185	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Fumihiko Yamada, Yuki Isogai, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Interfacial work functions of transition metal oxides in carrier-selective contact stacks	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/28
186	Takefumi Kamioka, Tetsu Takahashi, Kazuo Muramatsu, Aki Tanaka, Naotaka Iwata, Kyotaro Nakamura, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Novel silver paste to n- and p-layers for fabricating high efficiency crystalline Si solar cells	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/28
187	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Crystalline silicon solar R&D by universities' network of intelligent technologies	Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS) and the 175th Committee of the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)	2016/10/28
188	神岡武文	豊田工業大学	ヘテロ接合用デバイスシミュレーション技術	学振第 175 委員会	2016/11/7
189	宮島晋介	東京工業大学	ライフタイム測定を基礎した高品質 Si ヘテロ界面のバンドアライメント評価	学振 175 委員会・次世代シリコン太陽電池分科会(招待講演)	2016/11/7
190	増田翔太、高橋勲、後藤和泰、中村京太郎、大下祥雄、宇佐美徳隆	名古屋大学、明治大学、豊田工業大学	アルミニウム誘起成長法による高濃度 p 型 Si 多結晶薄膜の太陽電池応用に関する研究	第 26 回学生による材料フォーラム	2016/11/15
191	Hyunju Lee, Fumiya Nishimura, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Haruhiko Yoshida, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Nano-Engineered Surface Passivation for Advanced Silicon Solar Cells	第 8 回スマートエネルギー技術研究センターと第 2 回グリーン電子素子・材料研究センター合同シンポジウム	2016/11/18
192	木内広達 ¹ 田島道夫 ¹ 樋口史仁 ¹ 小椋厚志 ¹ 飯田伸仁 ² 橋昇二 ²	1. 明治大理工 2. 株式会社トクヤマ	Determination of Low Carbon Concentration in CZ-Si for Solar Cells by Luminescence	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of	2016/11/22

	正田勲 ² 西島英一 ²		Activation Using Electron Irradiation	Silicon Materials 2016, USA	
193	W. Fukushima ¹ , B. Gao ² , S. Nakano ² , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , K. Kakimoto ^{1,2}	1, Department of Aeronautics and Astronautics 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Three-dimensional Analysis of Dislocation Density in Oxygen Dissolved Silicon Crystals	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials	2016/11/22
194	K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, X. Liu, S. Nakano	Kyushu University	Crystal Growth and Defect Analysis of Silicon for Photovoltaics	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials	2016/11/24
195	S. Nakano, B. Gao, K. Kakimoto	Kyushu University	Relationship between the Dislocation Density and Residual Stress in a GaN Crystal during the Cooling Process	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials	2016/11/24
196	小島 拓人	明治大学	結晶シリコンにおける キャリアライフタイム のデバイスへの影響お よび測定と解析	第6回次世代シリコ ン太陽電池分科会 研 究会	2017/2/17
197	後藤和泰、 崔敏、高橋勲、 黒川康良、 宇佐美德隆	名古屋大学	スピンコート法で作製 したCuIのヘテロ接合 型太陽電池のホール選 択層への検討	第64回応用物理学学会 春季学術講演会	2017/3/14
198	羽山優介、 高橋勲、 宇佐美德隆	名古屋大学	SMART法を用いた太陽 電池用擬似単結晶Si の不純物制御	第64回応用物理学学会 春季学術講演会	2017/3/14
199	山田郁彦、 神岡武文、 水野皓登、 大下祥雄、 神谷格	豊田工業大学	平坦なp-n接合断面に おける局所仕事関数測 定	第64回応用物理学学会 春季学術講演会	2017/3/14
200	田島道夫、 木内広達、 樋口史仁、 小椋厚志	明治大理工	発光活性化後の液体窒 素温度フォトルミネッ センス測定によるSi 結晶中炭素不純物の定 量	第64回応用物理学学会 春季学術講演会（パ シフィコ横浜	2017/3/14
201	木内広達、 田島道夫、 樋口史仁、 石川陽一郎、 小椋厚志	明治大理工	電子線照射発光活性化 液体窒素温度PL法に よる太陽電池用CZ-Si 中の低炭素濃度の定量	第64回応用物理学学会 春季学術講演会（パ シフィコ横浜	2017/3/14
202	宮村佳児、 原田博文、 中野 智、 柿本 浩一	九大応力研	CZシリコンにおけるキ ャリア濃度とバルクラ イフタイムの関係	第64回応用物理学学会 春季学術講演会	2017/3/14
203	中野智 ² 、 福島航 ¹ 、 原田博文 ² 、 宮村佳児 ² 、 柿本浩一 ^{1,2}	1. 九大院工 2. 九大応力研	酸素拡散を考慮したシ リコン単結晶中の転位 密度解析	第64回応用物理学学会 春季学術講演会	2017/3/14

204	Liu Xin, Han Xue-Feng, Nakano Satoshi, Kakimoto Koichi	RIAM, Kyushu Univ.	Effect of crucible movement on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/14
205	Han Xuefeng, Nakano Satoshi, Liu Xin, Kakimoto Koichi	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analysis on the free surface of floating zone (FZ) for silicon crystal growth by Volume of Fluid (VOF) model	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/14
206	谷脇将太、 馬野光博、 新船幸二、 吉田晴彦、 佐藤真一、 堀田育志	兵庫県立大学	フーリエ変換赤外分光法による Si(100) 基板上の Sr ₂ SiO ₄ 薄膜の評価	第 64 回 応用物理学 関係連合講演会	2017/3/14
207	Hyunju LEE, Fumiya Nishimura, Haruhiko Yoshida, Takefumi Kamioka, Naotaka Iwata, Kyotaro Nakamura, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Charge-Controllable Mg-Doped AlO _x for the Passivation of High Efficiency Silicon Solar Cells	Global Photovoltaic Conference 2017 (GPVC2017)	2017/3/15
208	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	CRYSTALLINE SILICON SOLAR R&D BY UNIVERSITIES' NETWORK OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES	Korea Photovoltaic Society	2017/3/15
209	中島佑実 ^{1,2} 、 中山椋平 ^{1,2} 、 沓掛健太郎 ³ 、 小椋厚志 ¹ 、 小野春彦 ^{1,2}	1. 明治大、 2. 神奈川県産技セ、 3. 東北大	High Performance mc-Si 中の軽元素分布	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会 (パ シフィコ横浜)	2017/3/15
210	木下晃輔 ¹ 、 小島拓人 ¹ 、 鈴木涼太 ¹ 、 小林弘人 ¹ 、 大下祥雄 ² 、 正田勲 ³ 、 橘昇二 ³ 、 小椋厚志 ¹	1. 明治大理工、 2. 豊田工大、 3. 株式会社 トクヤマ	赤外線トモグラフィーによる太陽電池用 n 型 CZ-Si 中の酸素析出挙動の評価 - 炭素濃度と成長条件の影響	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会 (パ シフィコ横浜)	2017/3/15
211	小島拓人 ¹ 、 木下晃輔 ¹ 、 鈴木涼太 ¹ 、 中村京太郎 ¹ 、 小椋厚志 ¹ 、 大下祥雄 ² 、 正田勲 ³ 、 橘昇二 ³	1. 明大理工、 2. 豊田工大、 3. 株式会社 トクヤマ	TEM による太陽電池用 n 型 CZ-Si 中の酸素析出挙動の評価 - 炭素濃度と成長条件の影響	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会 (パ シフィコ横浜)	2017/3/15

212	堀川裕貴、 森英喜、 新船幸二、 佐藤真一、 吉田 晴彦	兵庫県立大学	SiN _x /Si 構造の電気特性におけるファイアスルー処理の影響 (II)	第 64 回 応用物理学 関係連合講演会	2017/3/15
213	松本要朗、 森英喜、 新船幸二、 佐藤真一、 吉田晴彦	兵庫県立大学	LIA スパッタ法により成膜した AlO _x 膜の XPS 評価 (II)	第 64 回 応用物理学 関係連合講演会	2017/3/15
214	増田翔太、 後藤和泰、 高橋勲、 中村京太郎、 大下祥雄、 宇佐美德隆	名古屋大学、 明治大学、 豊田工業大学	Al 誘起成長法を用いた p 型 Si 多結晶薄膜の太陽電池応用	第 64 回応用物理学学会 春季学術講演会	2017/3/16
215	神岡武文、林豊、 山田郁彦、 磯貝勇樹、 Hyunju Lee、 中村京太郎、 大下祥雄	豊田工業大学、 明治大学	遷移金属酸化物/SiO ₂ /結晶 Si ヘテロ接合コンタクト界面における仕事関数(2): RPD-ITO	第 64 回応用物理学学会 春季学術講演会	2017/3/16
216	高橋一真、 中川慶彦、 原康祐、 黒川康良、 宇佐美德隆	名古屋大学、 山梨大学	Si ヘテロ接合太陽電池 応用に向けた p 型 BaSi ₂ の作製技術開発	第 64 回 応用物理学 関係連合講演会	2017/3/16
217	中川慶彦、 黒川康良、 宇佐美德隆	名古屋大学	3C-SiC 膜上に成長した BaSi ₂ 膜の結晶構造 の評価	第 65 回 応用物理学 関係連合講演会	2017/3/16
218	須原貴道、 中川慶彦、 原康祐、 黒川康良、 末益崇、 宇佐美德隆	名古屋大学、 山梨大学、 筑波大学	真空蒸着法により作製 した a-Si/BaSi ₂ の接触 抵抗低減効果	第 66 回 応用物理学 関係連合講演会	2017/3/16
219	藤原道信、 高橋一真、 中川慶彦、 後藤和泰、 黒川康良、 宇佐美德隆	名古屋大学	テクスチャ Si 上に真 空蒸着法で形成した BaSi ₂ 薄膜の評価	第 66 回 応用物理学 関係連合講演会	2017/3/16
220	堀田育志、 佐伯郁弥、 西慎太郎、 伊藤明、 中西英俊、 吉田晴彦、 新船幸二、 佐藤真一、 斗内政吉、 川山巖	兵庫県立大学	High-k/SiO ₂ 界面双極 子に起因するシリコン 表面バンドベンディング のレーザーTHz 放射 顕微鏡による直接観察	第 64 回 応用物理学 関係連合講演会	2017/3/16
221	小島拓人 ¹ 、 肥山卓矢 ¹ 、 中村京太郎 ¹ 、 小椋厚志 ¹ 、 大下祥雄 ²	1. 明大理工、 2. 豊田工大	超高周波インピーダ ンス解析による高漏れ性 パッシベーション膜の 評価	第 64 回応用物理学学会 春季学術講演会 (パ シフィコ横浜	2017/3/17

222	肥山卓矢、 小島拓人、 小椋厚志	明治大学理工	硬 X 線光電子分光法によるプラズマ処理を用いた SiN _x パッシベーション膜の評価	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会 (パ シフィコ横浜	2017/3/17
223	白取優大、 ファリス アキラ、 中田和吉、 宮島晋介	東京工業大学	対向ターゲットスパッタ法による i-a-Si:H パッシベーション膜作製における RF 電力の影響	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会 (17p-211-4)	2017/3/17
224	市川寛章、 高橋勲、 宇佐美德隆、 白澤勝彦、 高遠秀尚	名古屋大学、 産業技術総合研究所	熱 ALD による AlO _x 層成膜時の酸化剤とパッシベーション性能の関係	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/17
225	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Fumihiko Yamada, Yuki Isogai, Kyotaro Nakamura, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Interfacial work function and its impact on open-circuit voltage in transition-metal-oxide/silicon-oxide contact stacks	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2017)	2017/4/4
226	Y. Hayama, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Controlling Impurity Distribution in Quasi-mono Crystalline Si Ingot by Seed Manipulation for Artificially Controlled Defect Technique	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics	2017/4/4
227	K. Gotoh, M. Cui, I. Takahashi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Development of Spin-coated Copper Iodide Film on Silicon for Use in Hole-selective Contacts	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics	2017/4/5
228	J. A. Wibowo, Y. Nakagaya, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Realization of p-type BaSi ₂ by simple thermal evaporation on Si grown by aluminum induced crystallization	The 10th International Conference on Silicon Epitaxy and heterostructures	2017/5/15
229	丸金稔弥、 原田貴志、 前田光治、 新船幸二	兵庫県立大学	反応性スパッタ法による結晶シリコン太陽電池用パッシベーション膜の開発	応用物理学会関西支部 2017 年度 第 1 回講演会	2017/5/26
230	Takuto Kojima ¹ , Ryota Suzuki ¹ , Kosuke Kinoshita ¹ , Kyotaro Nakamura ¹ , Atsushi Ogura ¹ , Yoshio Oshita ² , Isao Masada ³ , Shoji Tachibana ³	1 Meiji University, 2 Toyota Technological Institute 3 Tokuyama Corporation	Effect of Carbon Concentration and Growth Conditions on Oxygen Precipitation Behavior in n-type CZ-Si	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC- 44), June 25-30, 2017, Washington D. C., U. S.	2017/6/28
231	K. Gotoh, M. Cui,	Nagoya University, JAIST	Fabrication of CuI/a-Si:H/c-Si	44th IEEE Photovoltaics	2017/6/28

	N. C. Thanh, K. Koyama, I. Takahashi, Y. Kurokawa, H. Matsumura, and N. Usami		Structure for Application to Hole- selective Contacts of Heterojunction Si Solar Cells	Specialists Conference	
232	S. Masuda, K. Gotoh, I. Takahashi, K. Nakamura, Y. Ohshita, and N. Usami	Nagoya University, Meiji University, Toyota Technological Institute	Solar Cells Application of p- type poly-Si Thin Film by Aluminum Induced Crystallization	44th IEEE Photovoltaics Specialists Conference	2017/6/28
233	Kenji Araki ¹ , Kyotaro Nakamura ² , Yu-Cian Wang ¹ , Nobuaki Kojima ¹ , Atsushi Ogura ² , Yoshio Ohshita ¹ , Masafumi Yamaguchi ¹	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji University	Design Arithmetic of the Lateral III-V / Si Hybrid Module	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC- 44), June 25-30, 2017, Washington D. C, U. S.	2017/6/29
234	Yoshio Ohshita ¹ , Takuto Kojima ² , Ryota Suzuki ² , Kosuke Kinoshita ² , Tomoyuki Kawatsu ³ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Ogura ²	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji University, 3 Komatsu NTC Ltd.	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC- 44), June 25-30, 2017, Washington D. C, U. S.	2017/6/29
235	Yoshio Ohshita ¹ , Takefumi Kamioka ¹ , Satoshi Kameyama ¹ , Kazuo Muramatsu ² , Aki Tanaka ² , Naotaka Iwata ¹ , Kyotaro Nakamura ³ , Atsushi Ogura ³	1, Toyota Technological Institute 2, NAMICS Corporation, 3, Meiji University	Carrier Transportation at Novel Silver Paste Contact	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC- 44), June 25-30, 2017, Washington D. C, U. S.	2017/6/29
236	Wataru Fukushima ¹ , Satoshi Nakano ² , Hirofumi Harada ² , Yoshiji Miyamura ² , Koichi Kakimoto ^{1,2}	1, Department of Aeronautics and Astronautics 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical analysis of dislocation density in Si single crystal with oxygen diffusion	7th International Workshop on Crystal Growth Technology	2017/7/3
237	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Control of crucible movement on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	7th International Workshop on Crystal Growth Technology	2017/7/3

238	Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Xin Liu and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	3D Numerical analysis on the shape of free surface in floating zone (FZ) method for silicon single crystal growth	7th International Workshop on Crystal Growth Technology	2017/7/3
239	Tomoro Ide ¹ , Satoshi Nakano ² , Hiroyuki Harada ² , Yoshiji Miyamura ² and Koichi Kakimoto ^{1,2}	1, Department of Aeronautics and Astronautics 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Effect of Oxygen on Dislocation Multiplication during Growth of Crystalline Silicon for Solar contamination in Czochralski silicon crystal growth	7th International Workshop on Crystal Growth Technology	2017/7/5
240	山田郁彦	豊田工業大学	(招待) 光制御下にお ける AFM を用いた太 陽電池表面層界面の断 面仕事関数測定	2017 年度第 2 回半 導体エレクトロニク ス部門委員会 第 1 回研究会	2017/7/15
241	崔敏、後藤和泰、 高橋勲、 黒川康良、 中村京太郎、 大下祥雄、 宇佐美徳隆	名古屋大学、 明治大学、 豊田工業大学	ヘテロ接合型 Si 系太 陽電池の新規正孔選択 輸送層 p 型 CuI の作製 と評価	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2017/7/20
242	望月健矢、 後藤和泰、 高橋勲、 黒川康良、 宇佐美徳隆	名古屋大学	キャリア選択接合層応 用に向けた Nb ドープ TiO ₂ 薄膜の作製と物性 評価	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2017/7/20
243	増田翔太、 後藤和泰、 高橋勲、 中村京太郎、 大下祥雄、 宇佐美徳隆	名古屋大学、 明治大学、 豊田工業大学	Al 誘起結晶法を応用し た太陽電池のキャリア 収集率評価	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2017/7/20
244	羽山優介、 高橋勲、 沓掛健太郎、 宇佐美徳隆	名古屋大学、 東北大学	太陽電池用疑似単結晶 Si の結晶品質向上に向 けた機能性欠陥層の活 用	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2017/7/20
245	高橋一真、 中川慶彦、 原康祐、高橋勲、 黒川康良、 宇佐美徳隆	名古屋大学、 山梨大学	p 型 BaSi ₂ 薄膜を用い たヘテロ接合型 Si 太 陽電池の作製	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2017/7/20
246	丸金稔弥、 岡大貴、 原田貴志、 堀田育志、 吉田晴彦、 前田光治、 新船幸二	兵庫県立大学	LIA 援用反応性スパッ タ法による結晶シリコ ン太陽電池用 AlO _x パ ッシベーション膜の高 性能化	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2017/7/20
247	白取 優大 ファリス アキラ ビン モハマド ズルキフリ	東京工業大学	対向ターゲットスパッ タ法による i-a-Si:H パッシベーション膜の 作製	第 14 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2017/7/20

	中田 和吉 宮島 晋介				
248	磯貝勇樹、 神岡武文、 リ ヒュンジュ、 小島信晃、 大下祥雄	豊田工業大学、 明治大学	反応性プラズマ蒸着プロセスの影響によるライフタイム変化	第 14 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2017/7/20
249	神岡武文、林豊、 磯貝勇樹、 中村京太郎、 大下祥雄	豊田工業大学、 明治大学	RPD-ITO/SiO ₂ /Si 積層コンタクトにおけるRPDITOの仕事関数、および、プロセスダメージの解析	第 14 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2017/7/20
250	増田翔太、 後藤和泰、 高橋勲、 中村京太郎、 大下祥雄、 宇佐美德隆	名古屋大学、 豊田工業大学	Al 誘起成長法を応用した太陽電池のキャリア収集率評価	第 14 回次世代の太陽光発電システムシンポジウム	2017/7/20
251	城内紗千子 ¹ 、 田中亜樹 ² 、 村松和郎 ² 、 中村京太郎 ³ 、 小椋厚志 ³ 、 大下祥雄 ⁴ 、 増田淳 ¹	1 産業技術総合研究所、 2 ナミックス株式会社 3 明治大学、 4 豊田工業大学	p 型結晶シリコン太陽電池の電極用ペースト中の Na が PID に及ぼす影響	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/21
252	Takefumi Kamioka、 Yutaka Hayashi、 Yuki Isogai、 Kyotaro Nakamura、 Yoshio Ohshita	Meiji University, Toyota Technological Institute	Electrical Characterization of ITO/MoO _x /SiO _x /n-c-Si Cell: Interface Work Function and Carrier Transport Analysis	The 27th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2017/7/31
253	Yoshio Ohshita、 Takuto Kojima、 Ryota Suzuki、 Kosuke Kinoshita、 Tomoyuki Kawatsu、 Kyotaro Nakamura、 Atsushi Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University	High Quality-Thin Silicon Wafer for High Efficiency and Low Cost Si Solar Cells	The 27th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2017/8/1
254	Yoshiji Miyamura、 Hirofumi Harada、 Satoshi Nakano、 and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Influence of Carrier Concentration on Bulk Lifetime in CZ- Si Crystal Efficiency Silicon Solar Cells	ICDS-29 (The 29th International Conference on Defects in Semiconductors)	2017/8/3
255	K. Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	INFLUENCE OF CARRIER CONCENTRATION ON BULK LIFETIME IN CZ- SI CRYSTAL	21st American Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-21)	2017/8/3
256	Satoshi Nakano、 Hirofumi Harada、 Yoshiji Miyamura Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Influence of oxygen diffusion on dislocation density in Si single crystal	21st American Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-21)	2017/8/3

257	K. Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	ANALYSIS OF RE-MELTING PROCESS OF SILICON GROWN BY TRANSVERSE MAGNETIC FIELD APPLIED CZ METHOD	21st American Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-21)	2017/8/3
258	Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Xin Liu and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	3D global modeling of induction heating of silicon in the floating zone process	21st American Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-21)	2017/8/4
259	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Control of crucible movement on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth,	21st American Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ACCGE-21)	2017/8/4
260	小島拓人 ¹ , 肥山卓矢 ¹ , 西原達平 ¹ , 中村京太郎 ¹ , 小椋厚志 ¹ , 大下祥雄 ²	1. 明大理工, 2. 豊田工大	超高周波インピーダンス解析による高漏れ性パッシベーション膜の評価(2)	第78回応用物理学会 秋季学術講演会(福岡)	2017/9/5
261	肥山卓矢 ¹ , 小島拓人 ¹ , 木下晃輔 ¹ , 西原達平 ¹ , 大西康平 ¹ , 村松和郎 ² , 田中亜樹 ² , 大下祥雄 ³ , 小椋厚志 ¹	1. 明治大理工, 2. ナミックス株式会社, 3. 豊田工業大学	太陽電池用ファイアスルー制御電極ペーストを用いた電極/シリコン界面の化学結合評価	第78回応用物理学会 秋季学術講演会(福岡)	2017/9/5
262	木下晃輔 ¹ , 小島拓人 ¹ , 大下祥雄 ² , 小椋厚志 ¹	1. 明大理工, 2. 豊田工大	太陽電池用n型CZ-Si中の炭素濃度が熱処理後の酸素析出に与える影響-赤外線トモグラフィによる評価	第78回応用物理学会 秋季学術講演会(福岡)	2017/9/5
263	中山椋平 ¹ , 小島拓人 ¹ , 小椋厚志 ¹ , 沓掛健太郎 ²	1. 明治大学, 2. 東北大学	High Performance mc-Si中の酸素析出分布	第78回応用物理学会 秋季学術講演会(福岡)	2017/9/5
264	白取優大 ファリス アキラ ビン モハマド ズルキフリ	東京工業大学	(講演奨励賞受賞記念講演(招待)) 対向ターゲットスパッタ法によるi-a-Si:Hパッシベーション膜作製における基板温度の影響	第78回応用物理学会 秋季学術講演会 (5a-A204-11)	2017/9/5
265	Faris Akira Bin MohdZulkifly Yuta Shiratori Kazuyoshi Nakada Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Effect of ultra-thin SiO _x insertion on a-Si:H(i) passivation layer deposited by facing target sputtering	第78回応用物理学会 秋季学術講演会 (5p-PB3-2)	2017/9/5
266	山田郁彦, 神岡武文, 大下祥雄, 神谷格	豊田工業大学	光制御下における結晶p型Si/ITO界面の断面仕事関数測定	第78回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/5

267	小島拓人、 肥山卓矢、 西原達平、 中村京太郎、 小椋厚志、 大下祥雄	豊田工業大学、 明治大学	超高周波インピーダンス解析による高漏れ性パッシベーション膜の評価(2)	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/5
268	肥山卓矢、 小島拓人、 木下晃輔、 西原達平、 大西康平、 村松和郎、 田中亜樹、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大学、 ナミックス、 豊田工業大学	太陽電池用ファイアスルー制御電極ペーストを用いた電極/シリコン界面の化学結合評価	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/5
269	木下晃輔、 小島拓人、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大学、 豊田工業大学	太陽電池用 n 型 CZ-Si 中の炭素濃度が熱処理後の酸素析出に与える影響—赤外線トモグラフィ—による評価	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/5
270	石川陽一郎 ¹ 、 田島道夫 ¹ 、 木内広達 ¹ 、 小椋厚志 ¹ 、 宮村佳児 ² 、 原田博文 ² 、 柿本浩一 ²	1. 明治大理工、 2. 九州大工	電子線照射発光活性化液体窒素温度 PL 法による P 添加 n 型 CZ-Si 結晶の炭素定量	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (福岡)	2017/9/6
271	崔敏、後藤和泰、 高橋勲、 黒川康良、 宇佐美德隆	名古屋大学	ヘテロ接合型 Si 系太陽電池の新規正孔選択輸送層 p 型 CuI の熱安定性	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (福岡)	2017/9/6
272	中野智, 劉鑫, 韓学峰, 柿本浩一	九大応力研	Si 単結晶成長における転位密度の半径方向温度差依存性	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/6
273	Xuefeng Han, Satoshi Nakano, Xin Liu, Koichi Kakimoto	九大応力研	3D global heat transfer model on floating zone (FZ) for silicon crystal growth	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/6
274	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	九大応力研	Control of crucible movement on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/6
275	宮村佳児、 原田博文、 中野智、 柿本浩一	九大応力研	CZ 炉内の CO 濃度	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/6
276	井手智朗、 中野智、 原田博文、 宮村佳児、 柿本浩一	九大院工 九大応力研	太陽電池用多結晶 Si の成長過程と冷却過程における転位の増殖	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/6
277	石川陽一郎 ¹ 、 田島道夫 ¹ 、 木内広達 ¹ 、	1. 明治大理工、 2. 九州大工	電子線照射発光活性化液体窒素温度 PL 法に	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/6

	小椋厚志 ¹ , 宮村佳児 ² , 原田博文 ² , 柿本浩一 ²		よる P 添加 n 型 CZ-Si 結晶の炭素定量		
278	谷脇将太、 吉田晴彦、 新船幸二、 佐藤真一、 堀田育志	兵庫県立大学	Si 基板上のストロンチウムシリケート薄膜の固定電荷の起源	第 78 回 応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/6
279	金珍雨、 滝口雄貴 中田和吉 宮島晋介	東京工業大学	反応性スパッタ Cu ₂ O:N の c-Si ヘテロ接合太陽電池への応用	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会 (6p-A204-10)	2017/9/6
280	神岡武文、林豊、 磯貝勇樹、 中村京太郎、 大下祥雄	明治大学、 豊田工業大学	遷移金属酸化物/SiO ₂ / 結晶 Si ヘテロ接合コン タクト界面における 仕事関数(3) : 熱蒸着 MoO _x	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/6
281	K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, L. Xin, S. Nakano	RIAM, Kyushu Univ.	Crystal Growth of CZ-Si and Relationship between Carrier Lifetime and Defects	SSDM2017	2017/9/20
282	Shota Taniwaki, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Atsushi Ogura, Shin-ichi Satoh, Yasushi Hotta	Univ. Hyogo. Meiji Univ.	Investigation of the effective net charge of strontium silicate layers on silicon substrates at changing annealing condition	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials	2017/9/20
283	Yuta Shiratori Kazuyoshi Nakada Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Characterization of amorphous silicon passivation layer deposited by facing target sputtering using temperature- dependent minority carrier lifetime measurement	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017) (C-1-06)	2017/9/20
284	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Yuki Isogai, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Meiji University, Toyota Technological Institute	Electrical characterization of ITO/MoO _x /SiO _x /n-c-Si cell: Interface work function and carrier transport analysis,	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017)	2017/9/20
285	大下祥雄、 中村京太郎、 リ ヒュンジュ、 神岡武文	豊田工業大学、 明治大学	(招待) 次世代高効率 シリコン太陽電池用薄 膜技術の展望	化学工学会第 49 回秋 季大会	2017/9/21
286	R. Nakayama, Y. Nakajima, K. Kutsukake, A. Ogura, H. Ono	Meiji University	Distribution of Light Element Impurities in Si Crystals Grown by Seed-Casting Method	EU PVSEC 2017, Amsterdam	2017/9/25
287	K. Kinoshita, T. Kojima,	Meiji University	Effects of Carbon Concentration on	EU PVSEC 2017, Amsterdam	2017/9/25

	H. Kobayashi, Y. Ohshita, I. Masada, S. Tachibana, A. Ogura		Oxygen Precipitation through Annealing Process in n-Type CZ-Si Evaluated by IR Laser Scattering Tomography		
288	Y. Ohshita, T. Kojima, T. Kawatsu, K. Kinoshita, K. Nakamura, A. Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University, Komatsu NTC Ltd.	Low Kerf Loss (<100 µm) High Quality Silicon Wafer Fabricated by Advanced Diamond Wire Saw	EU PVSEC 2017, Amsterdam	2017/9/25
289	T. Kojima, R. Suzuki, K. Kinoshita, K. Onishi, T. Nishihara, A. Ogura	Meiji University	Effects of Oxygen Precipitates on Stability of Metal Against Gettering in n-Type CZ Silicon	EU PVSEC 2017, Amsterdam	2017/9/25
290	T. Aoyama, M. Aoki, I. Sumita, Y. Yoshino, Y. Ohshita, A. Ogura	NORITAKE CO., LIMITED, Toyota Technological Institute, Meiji University	Effects of Tellurium Oxide in Silver Paste on the Electrical Losses in Silicon Solar Cells	EU PVSEC 2017, Amsterdam	2017/9/25
291	H. Hiyama, T. Kojima, K. Nakamura, K. Muramatsu, A. Tanaka, A. Ogura	Meiji University	Study of Electrode-Silicon Interface with Low Fire-Through Paste for Crystalline Si Solar Cell	EU PVSEC 2017, Amsterdam	2017/9/25
292	Y. Ohshita, T. Kojima, T. Kawatsu, K. Kinoshita, K. Nakamura, A. Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University	Low Kerf Loss (<100 µm) High Quality Silicon Wafer Fabricated by Advanced Diamond Wire Saw	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017)	2017/9/25
293	T. Aoyama, M. Aoki, I. Sumita, Yoshio Ohshita, Y. Yoshino, A. Ogura	Noritake, Asada Mesh, Toyota Technological Institute, Meiji University	Effects of Tellurium Oxide in Silver Paste on the Electrical Losses in Silicon Solar Cells	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017)	2017/9/25
294	K. Kinoshita, T. Kojima, H. Kobayashi, A. Ogura, Yoshio Ohshita, I. Masada, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corporation	Effects of Carbon Concentration on Oxygen Precipitation through Annealing Process in n-Type CZ-Si Evaluated by IR Laser Scattering Tomography	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017)	2017/9/25
295	K. Gotoh, I. Takahashi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Effect of sputtered a-Si on effective carrier lifetime of c-Si with ultra-thin SiO ₂ structure	European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/25

296	Fumihiko Yamada, Takefumi Kamioka, Yoshio Ohshita, Itaru Kamiya	Toyota Technological Institute, Meiji University	Development of an AFM/KFM System Capable of Cross- Sectional Work function Measuring of Solar Cell Structures under Light Illumination	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017)	2017/9/27
297	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Naotaka Iwata, Yoshio Ohshita, F. Nishimura, H. Yoshida	Toyota Technological Institute, Meiji University	Charge-Controllable Mg-Doped AlO _x Passivation Layers for p- and n-Type Silicon	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2017)	2017/9/27
298	H. Kiuchi, M. Tajima, F. Higuchi, Y. Ishikawa and A. Ogura	Meiji University	Determination of low carbon concentration in Czochralski-grown Si for solar cells by liquid-nitrogen- temperature photoluminescence after electron irradiation	17th Conference on Defects- Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP XVII)	2017/10/11
299	M. Tajima, K. Nakagawa, H. Kiuchi, A. Ogura, T. Bartel and F. Kirscht	Meiji University	Systematic variation of photoluminescence with dopant impurities in highly doped and highly compensated Si	17th Conference on Defects- Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP XVII)	2017/10/11
300	新船幸二	兵庫県立大学	ミスド CVD 法による酸 化膜形成	日本学術振興会 第 175 委員会 シリコン 分科会	2017/10/19
301	宮島晋介	東京工業大学	(招待講演) 対向ター ゲットスパッタによる a-Si:H パッシベーション 膜とその界面特性	学振 175 委員会 「次世代シリコン太 陽電池分科会」第 7 回研究会	2017/10/19
302	Hyunju Lee, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	(招待) Suppress surface recombination by introducing metal cations into AlO _x	次世代シリコン太陽 電池分科会第 7 回研 究会	2017/10/19
303	Y. Ishikawa, M. Tajima, H. Kiuchi, A. Ogura, K. Miyamura, H. Harada, K. Kakimoto	Meiji University, Kyushu University	Determination of carbon concentration in phosphorus-doped n-type Czochralski- grown Si crystals by liquid-nitrogen- temperature photoluminescence after electron irradiation	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/14
304	H. Lee, Inseol Song, S.-W. Lee, S. Park, S. Bae, Y. Kang, H. Lee, D. Kim,	Toyota Technological Institute, KU-KIST Green School, Korea University,	Effects of chemical rounding on the performance of pyramid-textured p- type emitters passivated by AlO _x in	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/14

	A. Ogura, Y. Ohshita	Korea University, Meiji University	n-type Si solar cells		
305	K. Araki, Y. Ota, T. Sakai, K. Nakamura, K.-H. Lee, T. Kamioka, K. Nishioka, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Si-based tandem cell, 2-terminal or 4-terminal?	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017/11/14
306	N. Yamaguchi, D. Hironiwa, H. Suzuki, K. Muramatsu, K. Nakamura	ULVAC, Namics, Toyota Technological Institute	Development of N-PERT solar cell using non mass separation type ion implantation	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017/11/14
307	T. Hiyama, T. Kojima, K. Kinoshita, T. Nishihara, K. Onishi, K. Muramatsu, A. Tanaka, Y. Ohshita, A. Ogura	Meiji University, NAMICS, Toyota Technological Institute	Study on chemical bonding states at electrode/silicon interface fabricated with fire-through control paste	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017/11/14
308	T. Kawatsu, Y. Ohshita, K. Nakamura, A. Ogura	Komatsu NTC, Toyota Technological Institute, Meiji University	Thin wafer and low kerf-loss diamond multi-wire saw	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017/11/14
309	S. Masuda, K. Gotoh, I. Takahashi, K. Nakamura, Y. Ohshita, N. Usami	Meiji University, Nagoya University, Toyota Tech. Inst.	Impact of boron incorporation on property of Si solar cells employing p-type poly-Si by aluminum induced crystallization	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)	2017/11/14
310	Hidenobu Mori, Yuki Horikawa, Iruro Matsumoto, Koji Arafune, Shin-ich Satoh, Haruhiko Yoshida	Univ. Hyogo	Influence of pseudo firing process on electrical property of Si _x N _y /Si structure	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14
311	Yuki Miki, Toshiya Marukane, Takashi Harada, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Kouji Maeda, Koji Arafune	Univ. Hyogo	Passivation properties of Al ₂ O ₃ films deposited by low-inductance antenna assisted reactive sputtering	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14
312	Yuki Isogai, Takefumi Kamioka,	Toyota Technological Institute, Meiji University	INFLUENCE OF ITO-RPD PROCESS ON EFFECTIVE MINORITY CARRIER LIFETIME IN REACTIVE	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering	2017/11/14

	Hyunju Lee, Nobuaki Kojima, Yoshio Ohshita		PLASMA DEPOSITED ITO/SiO ₂ /SI STRUCTURE	Conference (PVSEC- 27)	
313	Kyotaro Nakamura, Kazuo Muramatsu, Noboru Yamaguchi, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, NAMICS CORPORATION, ULVAC, Inc.,	NOVEL SILVER PASTE FOR N-TYPE BI-FACIAL PERT CELL	The 27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/14
314	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Control of crucible movement on melting process and C in CZ- Si growth	The 27th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/15
315	K. Kinoshita, T. Kojima, Y. Ohshita, A. Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	Effects of carbon concentration on oxygen precipitation through annealing process in n-type CZ-silicon evaluated by IR light scattering tomography	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/16
316	Y. Hayashi, T. Kamioka, Y. Isogai, K. Nakamura, Y. Ohsita	Meiji University, Toyota Technological Institute	Carrier selective transport path in a molybdenum oxide/tunnel insulator/n-cSi cell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/16
317	R. Nakayama, T. Kojima, A. Ogura, K. Kutsukake	Meiji University	Distribution of oxygen precipitates in high performance mc-silicon	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/16
318	T. Kojima, T. Hiyama, T. Nishihara, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita	Meiji University, Toyota Technological Institute	Extremely high- frequency impedance analysis on passivation film with large leakage current for passivated contacts	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/16
319	S. Yamaguchi, K. Nakamura, A. Masuda, K. Ohdaira	Meiji University	Rapid saturation of potential-induced degradation in n- type c-Si photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/16
320	K. Takahashi, Y. Nakagawa, K. Gotoh, K. O. Hara, I. Takahashi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi	Fabrication of silicon heterojunction solar cells with barium disilicide thin films prepared by thermal evaporation	PVSEC-27	2017/11/16
321	Toshiya Marukane,	Univ. Hyogo	Double layered aluminum oxide films	27th International Photovoltaic	2017/11/16

	Daiki Oka, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Kouji Maeda, Koji Arafune		deposited by reactive sputtering for surface passivation of crystalline silicon	Science and Engineering Conference	
322	Yasushi Hotta, Shota Taniwaki, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Shin-ichi Satoh	Univ. Hyogo	Charged strontium silicate layer for field effect passivation of silicon solar cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
323	Ikuya Saiki, Shintaro Nishi, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Shin-ichi Satoh, Yasushi Hotta	Univ. Hyogo	Charge properties of stacking structure of dipole interfaced and its field effect passivation effect	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
324	Faris Akira Bin MohdZulkifly, Yuta Shiratori, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	EFFECTS OF HYDROGEN PEROXIDE TREATMENT ON a-Si:H(i) PASSIVATION LAYER DEPOSITED BY FACING TARGET SPUTTERING (FTS) METHOD	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27) (1ThPo.38)	2017/11/16
325	T. Kamioka, Y. Hayashi, Y. Isogai, K. Nakamura, Y. Ohshita	Meiji University, Toyota Technological Institute	Analysis of work function of MoO _x at MoO _x /SiO ₂ interface by capacitance- voltage measurement	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27)	2017/11/17
326	Yuta Shiratori, Faris Akira Bin MohdZulkifly, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	INFLUENCE OF DC POWER ON THE PROPERTIES OF i-a- Si:H PASSIVATION LAYER DEPOSITED BY FACING TARGET SPUTTERING	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27) (1Fr01.5)	2017/11/17
327	Jinwoo Kim, Yuki Takiguchi, Shinsuke Miyajima.	東京工業大学	CHARACTERIZATION OF p-type Cu ₂ O:N/n-type μc-Si:H TUNNEL RECOMBINATION JUNCTION FOR PEROVSKITE/c-Si TANDEM SOLAR CELLS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27) (1ThPo.47)	2017/11/17
328	宮村佳兒、 原田博文、 中野智、柿本浩一	九大応力研	CZ 炉内の CO 濃度	第 46 回結晶成国内会 議 (JCCG-46)	2017/11/28
329	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical simulation on 3D melt-crystal interface of floating zone (FZ) for silicon crystal growth	第 46 回結晶成国内会 議 (JCCG-46)	2017/11/28

330	井手智朗 ¹ , 中野智 ² , 原田博文 ² , 宮村佳児 ² , 柿本 浩一 ^{1,2}	1. 九大院工 2. 九大応力研	太陽電池用多結晶 Si の成長過程と冷却過程 における転位増殖に及 ぼす酸素の影響	第 46 回結晶成国内会 議 (JCCG-46)	2017/11/28
331	中野智、劉鑫、韓 学峰、 柿本浩一	九大応力研	シリコン単結晶におけ る半径方向温度差の転 位密度に与える影響	第 46 回結晶成国内会 議 (JCCG-46)	2017/11/28
332	K. Takahashi, Y. Nakagawa, K. O. Hara, I. Takahashi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi	Alternative simple method to realize p- type BaSi ₂ thin films for Si heterojunction solar cells application	2017 MRS Fall Meeting & Exhibit	2017/11/28
333	T. Mochizuki, K. Gotoh, I. Takahashi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Surface passivation quality of atomic layer deposited TiO ₂ thin layer for carrier selective contact on crystalline silicon	2017 MRS Fall Meeting & Exhibit	2017/11/28
334	Masafumi Yamaguchi, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Analysis for Efficiency Potential of Crystalline Si Solar Cells	2017 MRS Fall Meeting	2017/11/29
335	Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Crystal growth for power devices and PVs	ISCGSCT2017	2017/12/2
336	大下祥雄	豊田工業大学	(招待) 高効率・低コ スト結晶シリコン太陽 電池技術の現状と今後 の方向性	早稲田大学野田・花 田研究室・太陽電池 講演会	2017/12/5
337	S. Masuda, K. Gotoh, K. Nakamura, Y. Ohshita, and N. Usami	Nagoya University, Toyota Technological Institute	Improvement of tunnel oxide passivated contact solar cells using aluminum induced crystallization	Global Photovoltaic Conference 2018	2018/3/14
338	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	(Plenary) Present Status and Future of R&D for Crystalline Silicon Solar Cells	Global Photovoltaic Conference 2018 (GPVC2018)	2018/3/14
339	Hyunju Lee, Inseol Song, Sang-Won Lee, Sungeun Park, Soohyun Bae, Ji Yeon Hyun, Yoonmook Kang, Haeseok Lee, Donghwan Kim, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, KU-KIST Green School, Korea University, Korea University, Meiji University	Potential of Chemical Rounding for the Performance Enhancement of Pyramid-textured P- type Emitters	Global Photovoltaic Conference 2018 (GPVC2018)	2018/3/14
340	小椋厚志	明治大	“テラワット発電に向 けて：結晶シリコン太 陽電池技術の新たな展 開” — はじめに —	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会(東 京)	2018/3/17

341	柿本浩一, 宮村佳児, 原田博文, Xin Liu, Han Xuefeng, 中野智, 西澤伸一	九大応力研	高効率シリコン太陽電池用単結晶育成と評価の温故知新	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/17
342	井手智朗 ¹ , 中野智 ² , 原田博文 ² , 宮村佳児 ² , 柿本浩一 ²	1. 九大院工 2. 九大応力研	太陽電池用シリコン単結晶の凝固過程および冷却過程における転位密度の酸素依存性	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/17
343	宇佐美德隆, 望月健矢, 増田翔太, 崔敏, 後藤和泰, 黒川康良	名古屋大学	次世代高性能ヘテロ接合太陽電池に向けた新材料と界面制御	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/17
344	大下祥雄	豊田工業大学	(招待) 最近の結晶シリコン太陽電池の技術動向	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会—テラワット発電に向けて: 結晶シリコン太陽電池技術の新たな展開シンポジウム—	2018/3/17
345	木下晃輔, 小島拓人, 大下祥雄, 小椋厚志	明治大理工, 豊田工大	太陽電池用 n 型 CZ-Si の結晶成長条件が熱処理後の酸素に与える影響—赤外線トモグラフィ法による評価	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会(東京)	2018/3/18
346	石川陽一郎, 田島道夫, 木内広達, 三好一智, 小椋厚志	明治大	電子線照射 Si 結晶の室温フォトルミネッセンスで観測される C-line 近傍発光を利用した炭素評価	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会(東京)	2018/3/18
347	西原達平, 小島拓人, 肥山卓矢, 松村英樹, 神岡武文, 大下祥雄, 安野聡, 廣沢一郎, 小椋厚志	明治大学, 北陸先端大, 豊田工大, 高輝度光科学技術センター	硬 X 線光電子分光法を用いた ITO/a-Si 界面特性の評価	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会(東京)	2018/3/18
348	大西康平, 小島拓人, 木下晃輔, 大下祥雄, 小椋厚志	明治大学, 豊田工業大学	太陽電池用 CZ-Si における酸素析出が金属ゲッターリングに与える影響	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会(東京)	2018/3/18
349	小島拓人, 小椋厚志, 福井健次, 小茂田学, 跡部淳一	明治大理工, 京セラ、	多結晶シリコンの非鏡面表面における機械学習を用いたエッチピット検出	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会(東京)	2018/3/18
350	田島道夫, 木内広達, 石川陽一郎, 小椋厚志	明治大	電子線照射 Si 結晶の室温フォトルミネッセンスで観測される C-line 近傍発光の起源	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会(東京)	2018/3/18

351	山口昇, 廣庭大輔, 鈴木英夫, 村松和郎, 中村京太郎	アルバック、 ナミックス、 豊田工大	太陽電池用イオン注入 技術の進展	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会(東 京)	2018/3/18
352	Xuefeng Han, Satoshi Nakano, Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical simulation of crystal rotation effect on the solid- liquid interface in the floating-zone (FZ) silicon	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/18
353	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analyses on carbon transport and control during the melting process of Czochralski silicon crystal growth	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/18
354	神岡武文、 望月健矢、 後藤和泰、林豊、 磯貝勇樹、 中村京太郎、 宇佐美德隆、 大下祥雄	豊田工業大学、 名古屋大学	キャリア選択コンタ クトにおける電極材料の 界面仕事関数および成 膜ダメージ評価：ALD- TiOx	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/18
355	木下晃輔、 小島拓人、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大学、 豊田工業大学	太陽電池用 n 型 CZ-Si の結晶成長条件が熱処 理後の酸素析出に与え る影響ー赤外線トモグ ラフィーによる評価	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/18
356	大西康平、 小島拓人、 木下晃輔、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大学、 豊田工業大学	太陽電池用 CZ-Si にお ける酸素析出が金属ゲ ッターリングに与える影 響	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/18
357	西原達平、 小島拓人、 肥山卓也、 松村英樹、 神岡武文、 大下祥雄、 安野 聡、 廣沢一郎、 小椋厚志	明治大理工、 北陸先端大、 豊田工大、 JASRI	硬 X 線光電子分光法を 用いた ITO/a-Si 界面 特性の評価	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/18
358	磯貝勇樹、 神岡武文、 リ ヒュンジュ、 小島信晃、 大下祥雄	豊田工業大学、 明治大学	RPD ダメージ解析： ITO/SiO ₂ /Si 構造デバ イスにおけるライフタ イムおよび界面特性の 相関の検討	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/18
359	神岡武文、 望月健矢、 後藤和泰、林豊、 磯貝勇樹、 中村京太郎、 宇佐美德隆、 大下祥雄	明治大学、 豊田工業大学、 名古屋大学	キャリア選択コンタ クトにおける電極材料の 界面仕事関数および成 膜ダメージ解析：ALD- TiOx	第 65 回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/18

360	城内紗千子, 田中亜樹, 村松和郎, 中村京太郎, 小椋厚志, 大下祥雄	産総研、 ナミックス、 明治大、 豊田工大	p型結晶シリコン太陽電池の電極用ペーストがPIDに及ぼす影響	第65回応用物理学会 春季学術講演会(東京)	2018/3/19
361	藤原道信、 高橋一真、 中川慶彦、 後藤和泰、 黒川康良、 伊藤孝至、 宇佐美德隆	名古屋大学	p型BaSi ₂ /n型結晶Si太陽電池の開放電圧向上に向けた真空蒸着法における蒸発初期過程の制御	第65回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/19
362	望月健矢、 後藤和泰、 大田晃生、 小倉正平、 黒川康良、 宮崎誠一、 福谷克之、 宇佐美德隆	名古屋大学、 東京大学	TiO _x /結晶Si界面における化学パッシベーションの研究	第65回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/19
363	望月健矢、 後藤和泰、 黒川康良、 宇佐美德隆	名古屋大学	TiO _x パッシベーション層の熱耐性にSiO _x 中間層が及ぼす影響	第65回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/19
364	崔敏、後藤和泰、 黒川康良、 宇佐美德隆	名古屋大学	2段階作製法で製膜したp型CuI薄膜のパッシベーション層開発ーヘテロ接合型Si系太陽電池の新規正孔選択輸送層としてー	第65回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/19
365	白取優大 ファリス アキラ ビン モハマド ズルキフリ 中田和吉 宮島晋介	東京工業大学	DC重畳RF対向ターゲットスパッタ法によるi-a-Si:Hパッシベーション膜の特性	第65回応用物理学会 春季学術講演会 (19a-D101-6)	2018/3/19
366	ファリス アキラ ビン モハマド ズルキフリ 白取優大 中田和吉 宮島晋介	東京工業大学	2段階製膜を用いたFTS法によるi-a-Si:Hパッシベーション膜	第65回応用物理学会 春季学術講演会 (19a-D101-7)	2018/3/19
367	城内紗千子、 田中亜樹、 村松和郎、 中村京太郎、 小椋厚志、 大下祥雄	産総研、 ナミックス、 豊田工大、 明治大	p型結晶シリコン太陽電池の電極用ペーストがPIDに及ぼす影響	第65回応用物理学会 春季学術講演会	2018/3/19
368	Yoshio Ohshita, Hyunju Lee, Tomoyuki Kawatsu, Kyotaro Nakamura, Takefumi Kamioka, Atsushi Ogura	Toyota Technological Institute, Komatsu NTC Ltd., Meiji Univ.	100 μm Thin n-Type Bifacial PERT Cell Using 200 μm Pitch Diamond Multi-Wire Slice Wafer	8th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaic (SiliconPV2018)	2018/3/20

369	Koichi Kakimoto, Satoshi Nakano, Yoshiji Miyamura, Hirofumi Harada, Xin Liu, Xuefeng Han, and Shin-ichi Nishizawa	RIAM, Kyushu Univ.	Silicon crystal growth of solar cells	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/9
370	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical simulation on asymmetrical interface of floating zone (FZ) for silicon crystal growth	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/9
371	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analyses on carbon transport and control during the melting process of Czochralski silicon crystal growth	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/9
372	Tomoro Ide ¹ , Satoshi Nakano ² , Hirofumi Harada ² , Yoshiji Miyamura ² , Masato Imai ³ , and Koichi Kakimoto ^{1,2}	1, Department of Aeronautics and Astronautics 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 3. University of Miyazaki	Effect of oxygen on dislocation density in Si single crystal for solar cells during solidification and cooling process	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/9
373	M. Cui, K. Gotoh, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Investigation on the thermal stability of p-type CuI as hole selective contact for the silicon heterojunction solar cells	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/9
374	T. Mochizuki, K. Gotoh, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Impact of interlayers on thermal stability of TiO _x passivating layer deposited by atomic layer deposition	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/9
375	X. Cheng, K. Gotoh, R. Nezasa, T. Mochizuki, and N. Usami	Nagoya University	Surface Passivation Property of Ultra- thin Titanium Oxide/Aluminum Oxide stacks for Silicon Based Selective Contact	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/9
376	Toshiya Marukane, Jinya Inoue, Yasushi Hotta,	Univ. Hyogo	Passivation property of a-Si:H film deposited by low inductance antenna	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/9

	Haruhiko Yoshida, Kouji Maeda , Koji Arafune		assisted RF sputtering		
377	M. Tajima, Y. Ishikawa, H. Kiuchi, A. Ogura	Meiji University	Quantification of low-level carbon in Si by photoluminescence at liquid nitrogen temperature and higher after electron irradiation	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells (CSSC-10)	2018/4/11
378	K. Gotoh, S. Ogura, S. Kato, Y. Kurokawa, K. Fukutani, and N. Usami	Nagoya University, University of Tokyo	Characterization of hydrogen around a-Si:H/c-Si interface by resonance nuclear reaction analysis	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2018/4/11
379	Yuta Shiratori Kazuyoshi Nakada Shinsuke Miyajima	東京工業大学	INTERFACE ANALYSIS OF HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON PASSIVATION LAYER DEPOSITED BY FACING TARGET SPUTTERING	10th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells (CSSC-10)	2018/4/11
380	Takuto Kojima, Kohei Onishi, Atsushi Ogura, Kenji Fukui, Manabu Komoda, Junichi Atobe	Meiji University, Kyocera Corporation	Machine Learning For Automated Etch Pit Counting On As-Sliced Surface Of Multicrystalline Silicon	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion(WCPEC-7), Hawaii	2018/6/11
381	X. Cheng, K. Gotoh, T. Mochizuki and N. Usami	Nagoya University	Controllable optical and electrical properties of Nb doped TiO ₂ films by RF sputtering	the 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/12
382	K. Nakamura ¹ , T. Kawatsu ² , T. Kamioka ^{1,3} , Y. Ohshita ¹	1 Toyota Technological Institute, 2 Komatsu NTC Ltd., 3 Meiji Univ.	Performance Improvement of Front Junction N-type PERT Solar Cell by Wafer Thinning	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/12
383	Tappei Nishihara, Takuto Kojima, Takuya Hiyama, Hideki Matsumura, Takefumi Kamioka, Yoshio Ohshita, Satoshi Yasuno, Ichiro Hirosawa, Atsushi Ogura	Meiji University, Japan Institute of Science and Technology, Toyota Technological Institute, JASRI	Evaluation of ITO/a-Si interface properties by hard X-ray photoemission spectroscopy	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion(WCPEC-7), Hawaii	2018/6/13
384	Kohei Onishi, Takuto Kojima, Kousuke Kinoshita, Yoshio Oshita, Atsushi Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	Evaluation of Lifetime Degradation Caused By Oxygen Precipitation Combined With Metal	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion(WCPEC-7), Hawaii	2018/6/13

			Contamination In CZ-Si For Silicon Cells		
385	M. Cui, K. Gotoh, Y. Kurokawa and N. Usami	Nagoya University	Development of the Passivation Layer for p-type CuI Thin Film Fabricated by the 2-step Method as the Novel Hole Selective Contact of Silicon Heterojunction Solar Cells	the 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/13
386	Jinwoo Kim Yuki Takiguchi Kazuyoshi Nakada Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Silicon Heterojunction Solar Cells with Cu ₂ O:N as p-type Layer	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/13
387	Sachiko Jonai ¹ , Aki Tanaka ² , Kazuo Muramatsu ² , Kyotaro Nakamura ³ , Atsushi Ogura ⁴ , Yoshio Ohshita ³ , Atsushi Masuda ¹	1 National Institute of Advanced Industrial Science Technology, 2 Namics, 3 Toyota Technological Institute, 4 Meiji University	Fluence of Additives in the Electrode Paste for Crystalline Si Solar Cells on Potential-Induced Degradation	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/13
388	Hyunju Lee, Inseol Song, Sang-Won Lee, Soo Hyun Bae, Ji Yeon Hyun, Yoonmook Kang, Haeseok Lee, Donghwan Kim, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, KU-KIST Green School, Korea University, Meiji University	Potential of Chemical Rounding for the Performance Enhancement of a Monolithic Perovskite/Bifacial N-PERT Si Tandem Cell	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/13
389	T. Kamioka ^{1,2} , Y. Hayashi ² , Y. Isogai ² , K. Nakamura ² , Y. Ohshita ² , A. Ogura ¹	1 Meiji Univ., 2 Toyota Technological Institute	Effect of ITO Capping Layer on Interface Work function of MoO _x in ITO/MoO _x /SiO ₂ /Si Contacts	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/13
390	Yuta Shiratori Jinwoo Kim Kazuyoshi Nakada Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Silicon Heterojunction Solar Cell with Intrinsic Hydrogenated Amorphous Silicon Layer Deposited by Facing Target Sputtering	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/14
391	F. Yamada ¹ , T. Kamioka ^{1,2} , Y. Ohshita ¹ , I. Kamiya ¹	1 Toyota Technological Institute, 2 Meiji Univ.	Band profiling of p-Si/ITO interface by Kelvin probe force microscopy under light controlled conditions	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	2018/6/14
392	T. Mochizuki, K. Gotoh,	Nagoya University	Local structure of high performance TiO _x	the 7th World Conference on	2018/6/15

	A. Ohta, Y. Kurokawa, S. Miyazaki, T. Yamamoto, N. Usami		passivating layer revealed by electron energy loss spectroscopy	Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7)	
393	K. Nakamura ¹ , K. Muramatsu ² , N. Yamaguchi ³ , Y. Ohshita ¹	1 Toyota Technological Institute, 2 NAMICS CORPORATION, 3 ULVAC, Inc.,	Selective emitter n-pert solar cell using non mass separation type ion implantation	Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition	2018/6/22
394	神岡武文, 林豊, 磯貝勇樹, 中村京太郎, 大下祥雄, 小椋厚志	明治大学、 豊田工業大学	MoO _x 正孔選択コンタクトにおいてキャップ層が MoO _x 界面仕事関数に与える影響	第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7/12
395	新船幸二, 田中峻平, 原田貴志, 吉田晴彦, 堀田育志, 前田光治	兵庫県立大学	結晶シリコン用 AlMgO _x パッシベーション膜の固定電荷制御	第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7/12
396	新船幸二, 丸金稔弥, 井上人也, 吉田晴彦, 堀田育志, 前田光治	兵庫県立大学	LIA 援用反応性スパッタ法による a-Si:H 膜の作製	第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7/12
397	白取優大 金珍雨 中田和吉 宮島晋介	東京工業大学	対向ターゲットスパッタ法により作製された i-a-Si:H パッシベーション層のシリコンヘテロ接合太陽電池への応用	第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7/12
398	神岡武文 ^{1,2} , 林豊 ² , 磯貝勇樹 ² , 中村京太郎 ² , 大下祥雄 ² , 小椋厚志 ¹	1 明治大, 2 豊田工大	MoO _x 正孔選択コンタクトにおいてキャップ層が MoO _x 界面仕事関数に与える影響	第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7/12
399	Yoichiro Ishikawa, Michio Tajima, and Atsushi Ogura	Meiji University	Quantification of Low-level Carbon in Silicon Crystals by Room-Temperature Photoluminescence after Electron Irradiation	28th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	2018/8/14
400	Kosuke Kinoshita, Takuto Kojima, Kohei Onishi, Yoshio Ohshita, and Atsushi Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	Suppression of Oxygen Precipitation and Dislocation Formation by Controlling Thermal History for CZ-Si Crystal Growth	28th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	2018/8/14
401	Kohei Onishi, Takuto Kojima, Kosuke	Meiji University, Toyota Technological Institute	Lifetime Degradation Caused by Oxygen Precipitation	28th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells &	2018/8/14

	Kinoshita, Yoshio Ohshita, Atsushi Ogura		Combined with Metal Contamination in CZ- Si for Solar Cells	Modules: Materials and Processes	
402	T. Kamioka ^{1,2} , Y. Hayashi ² , Y. Isogai ² , K. Nakamura ² , Y. Ohshita ² , A. Ogura ¹	1 Meiji Univ, 2 Toyota Technological Institute	Electrical characterization of ITO/MoOx/SiOx/n-cSi cell: Interface work function and carrier transport analysis	28th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	2018/8/14
403	M. Tajima	Meiji University	Liquid nitrogen and room temperature photoluminescence due to radiation- induced defects for quantification of low-level carbon in Si	Defects in Semiconductors, Gordon Research Conference	2018/8/20
404	Kosuke Kinoshita, Takuto Kojima, Kohei Onishi, Yoshio Ohshita, and Atsushi Ogura	Meiji University	Effects of Crystal Growth Conditions of n-type CZ-Si for Solar Cells on Oxygen Precipitation and Dislocation Formation through Annealing Process	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials	2018/9/12
405	Yoichiro Ishikawa, Michio Tajima, and Atsushi Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	Quantitative Analysis of Low- level Carbon in Si Using Room- Temperature Photoluminescence after Electron Irradiation	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials	2018/9/12
406	Kohei Onishi, Takuto Kojima, Kousuke Kinoshita, Yoshio Oshita, Atsushi Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	Effects of Metal Contamination with Oxygen Precipitation Lifetime Degradation in CZ-Si for Solar Cells	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials	2018/9/13
407	Xuefeng Han, Satoshi Nakano, Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical investigation on asymmetrical interface of floating zone (FZ) for silicon crystal growth	Sixth European Conference on Crystal Growth (ECCG6)	2018/9/18
408	Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Masato Imai, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analysis of dependence of oxygen on dislocation generation in Si single crystal	Sixth European Conference on Crystal Growth (ECCG6)	2018/9/18
409	Xin Liu, Xue-Feng Han, S. Nakano, H. Harada, Y. Miyamura, and K. Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analyses and experimental validations on transport and control of carbon in in Czochralski	Sixth European Conference on Crystal Growth (ECCG6)	2018/9/18

			silicon crystal growth		
410	X. Cheng, K. Gotoh and N. Usami	Nagoya University	Low temperature processed high conductive Nb doped titanium oxide thin film deposited by RF magnetron sputtering	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/9/18
411	根元亮一、 新船幸二、 吉田晴彦、 佐藤真一、 堀田育志	兵庫県立大学	(La _{1-x} Sr _x)VO ₃ /p-Si (100)の接合の作製と電気特性評価	第 79 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2018/9/18
412	神岡武文、 安野聡、 Lee Hynju、 小島拓人、 西原達平、林豊、 中村京太郎、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大、 豊田工大、 JASRI	MoO _x /SiO ₂ 界面の HAXPES 分析	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会 (愛 知)	2018/9/19
413	原田貴志、 足立良樹、 堀田育志、 吉田晴彦、 前田光治、 新船幸二	兵庫県立大学	ミスト CVD 法による酸 化ガリウム薄膜の作製	第 79 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2018/9/19
414	神岡武文 ^{1,2} 、 安野聡 ³ 、 Hyunju Lee ² 、 小島拓人 ¹ 、 西原達平 ¹ 、 林豊 ² 、 中村京太郎 ² 、 大下祥雄 ² 、 小椋厚志 ¹	1 明治大、 2 豊田工大、 3JASRI	MoO _x /SiO ₂ 界面の HAXPES 分析	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/9/19
415	磯貝勇樹、 神岡武文、 リ ヒュンジュ、 小島信晃、 大下祥雄	豊田工業大学	RPD-ITO 堆積プロセス における光誘起ダメー ジの検討	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/9/19
416	大西康平、 小島拓人、 木下晃輔、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大学、 豊田工業大学	太陽電池用CZ-Siにお ける酸素析出が金属ゲ ッターリングに与える影 響 (2)	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会 (愛 知)	2018/9/20
417	木下晃輔、 小島拓人、 大西康平、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大学、豊田工業大 学	太陽電池用CZ-Siの結 晶成長条件が熱処理後 の酸素析出および転位 形成に与える影響	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会 (愛 知)	2018/9/20
418	望月健矢、 後藤和泰、 黒川康良、 山本剛久、 宇佐美德隆	名古屋大学	電子エネルギー損失分 光法を用いた高パッシ ベーション性能 TiO _x /SiO _x ヘテロ界面の 局所構造の解明	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/9/20

419	扇間政典, 後藤和泰, 黒川康良, 宇佐美德隆	名古屋大学	ITO 製膜時の光照射が a-Si:H/c-Si 界面にお けるパッシベーション 性能に及ぼす影響	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/9/20
420	金 珍雨 白取 優大 中田 和吉 宮島 晋介	東京工業大学	スパッタ法による p 型 エミッタ層を有するシ リコンヘテロ接合太陽 電池,	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/9/20
421	西原達平 ¹ 、 小島拓人 ¹ 、 金井皓輝 ¹ 、 松村英樹 ² 、 神岡武文 ¹ 、 大下祥雄 ³ 、 安野聡 ⁴ 、 廣沢一郎 ⁴ 、 小椋厚志 ¹	1 明治大理工、 2 北陸先端大、 3 豊田工大、 4JASRI	反応性プラズマ蒸着法 による ITO/a-Si 界面 化学結合状態の硬 X 線 光電子分光法による評 価	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/9/20
422	小林滉平、 吉田晴彦、 新船幸二、 佐藤真一、 堀田育志	兵庫県立大学	Al/HfO ₂ /Si 構造におけ るフォーミングプロセ スフリーの抵抗スイッ チング現象	第 79 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2018/9/21
423	佐伯郁弥、 吉田晴彦、 新船幸二、 佐藤真一、 堀田育志	兵庫県立大学	三色超構造の各界面が 容量-電圧特性に与え る影響	第 79 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2018/9/21
424	城内紗千子、 田中亜樹、 村松和郎、 齋藤元希、 中村京太郎、 小椋厚志、 大下祥雄、 増田淳	産総研, ナミックス, 豊田工大	p 型結晶シリコン太陽 電池の電極用ペースト が PID に及ぼす影響 (2)	第 79 回応用物理学会 秋季学術講演会	2018/9/21
425	K. Gotoh, M. Cui, R. Akaishi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Stacks of a-SiO _x :H/a- Si:H Passivation Layer for Low Parasitic Absorption and High Passivation in Silicon Heterojunction Solar Cells	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2018/9/24
426	Kyotaro Nakamura ¹ , Kazuo Muramatsu ² , Aki Tanaka ² , Yoshio Ohshita ¹	1 Toyota Technological Institute, 2 NAMICS CORPORATION	Newly Developed Ag Coated Cu Paste for Si Hetero-Junction Solar Cell	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018)	2018/9/24
427	Hyunju Lee, Inseol Song, Sang-Won Lee, Soohyun Bae, Ji Yeon Hyun, Yoonmook Kang, Haeseok Lee, Atsushi Ogura,	Toyota Technological Institute, KU-KIST Green School, Korea University, Korea University, Meiji University	Potential of Chemical Rounding for the Performance Enhancement of a Pyramid-Textured Bifacial Si Bottom Cell	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018)	2018/9/24

	Donghwan Kim, Yoshio Ohshita				
428	Kyotaro Nakamura ¹ , Kazuo Muramatsu ² , Noboru Yamaguchi ³ , Yoshio Ohshita ¹	1 Toyota Technological Institute, 2 NAMICS CORPORATION, 3 ULVAC, Inc.,	Non Mass Separation Type Ion Implantation System for Bifacial PERT Cell Fabrication	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018)	2018/9/25
429	Fumihiko Yamada, Tekefumi Kamioka, Yoshio Ohshita, Itaru Kamiya	Toyota Technological Institute	Cross-Sectional Work function Measurements on Solar Cell Structures under Light-Controlled Conditions	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018)	2018/9/27
430	Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical Analyses and Experimental Validations on Transport and Control of Carbon in Czochralski Silicon Crystal Growth	IWMCG-9	2018/10/22
431	Ryusuke Yokoyama ¹ , Tsuyoshi Nakamura ¹ , Toshiyuki Fujiwara ¹ , Koichi Kakimoto ²	1, SUMCO Corporation 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Melt Flow Behavior of Industrial Scale Silicon Czochralski Growth with a Transverse Magnetic Field	IWMCG-9	2018/10/22
432	T. Ide ¹ , S. Nakano ² , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , M. Imai ³ , K. Kakimoto ^{1,2}	1, Department of Aeronautics and Astronautics 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 3. University of Miyazaki	Effect of Oxygen on Dislocation Generation in Si Single Crystal	IWMCG-9	2018/10/23
433	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical Analysis on 3D Behavior of Floating Zone (FZ) for Silicon Crystal Growth	IWMCG-9	2018/10/24
434	韓学峰, 劉シン, 中野智, 原田博文, 宮村佳児, 柿本浩一	九大応力研	Numerical simulation on asymmetric interface of floating zone (FZ) for silicon crystal growth	第 47 回結晶成長国内会議 (JCCG-47)	2018/11/1
435	井手智朗, 中野智, 原田博文,	九大院工、 九大応力研	格子間酸素の転位固着効果を考慮したシリコ	第 47 回結晶成長国内会議 (JCCG-47)	2018/11/1

	宮村佳児, 柿本浩一		ン単結晶中転位密度の 数値解析		
436	劉しん, 原田博文, 宮村佳児, 韓学峰, 中野智, 西澤伸一, 柿本浩一	九大応力研	Numerical analyses and experimental validations on transport and control of carbon in in Czochralski silicon crystal growth	第 47 回結晶成長国内 会議 (JCCG-47)	2018/11/1
437	脇田陸、 神岡武文、 リ ヒュンジュ、 大下祥雄、 小島信晃	豊田工業大学	P 型単結晶 Si 太陽電池 の電圧誘起劣化と Na, Li 拡散の関係	豊田工業大学グリー ン電子素子・材料研 究センター最終年度 シンポジウム	2018/11/2
438	X. Cheng, K. Gotoh, H. Lee and N. Usami	Nagoya University	Transparent conductive Nb doped titanium oxide thin film deposited under low temperature by RF magnetron sputtering	14th China SoG Silicon and PV Power Conference	2018/11/8
439	Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Modeling and validation on transport and control of carbon in Czochralski silicon crystal growth	14th China SoG Silicon and PV Power Conference	2018/11/10
440	M. Semma, K. Gotoh, Y. Kurokawa, N. Usami	Nagoya University	Influence of illumination during ITO sputtering on passivation performance at a- Si:H/c-Si interface	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11/16
441	Yoshiki Adachi, Takashi Harada, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Kouji Maeda, Koji Arafune	Univ. Hyogo	Preparation of GaO _x passivation film by mist CVD method	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11/16
442	Hyunju Lee, Changhyun Lee, Yoonmook Kang, Hae-Seok Lee, Donghwan Kim, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, KU-KIST Green School, Korea University, Korea University, Meiji University	Effects of Light Illumination on the Performance of Transition Metal- based Carrier Selective Contacts	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11/16
443	Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	R&D of Common Platform for Si Solar Cell Processes based on Advanced Multiple Technologies	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11/17

444	Tomoro Ide, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Masato Imai, Koichi Kakimoto	Department of Aeronautics and Astronautics, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical simulation of effect of interstitial oxygen on dislocation density in Si single crystal	The 8th Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2018	2018/11/19
445	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	3D Numerical Analysis on Asymmetric Interface of Floating Zone (FZ) for Silicon Crystal Growth	The 8th Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2018	2018/11/19
446	Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analyses and experimental validations on transport and control of carbon in CZ-Si crystal growth	The 8th Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2018,	2018/11/19
447	T. Mochizuki, K. Gotoh, Y. Kurokawa, T. Yamamoto, N. Usami	Nagoya University	Local analysis of TiO _x /SiO _x stack with excellent electrical properties for carrier selective contact	The Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2018	2018/11/19
448	Yoshio Ohshita, Takefumi Kamioka*, Hyunju Lee, Yutaka Hayashi, Kyotaro Nakamura, Atsushi Ogura*	Toyota Technological Institute, *Meiji University	Characterization of electrical properties in carrier selective contact solar cells	The Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2018	2018/11/20
449	Y. Li, K. Gotoh, T. Mochizuki, Y. Kurokawa, N. Usami	Nagoya University	Degradation of passivation performance of crystalline silicon solar cells employing stacks of ultrathin oxide and polycrystalline Si formed by aluminum induced crystallization	第6回応用物理学会 名古屋大学スチュー デントチャプター東 海地区学術講演会	2018/11/25
450	Y. Ohshita, H. Lee, T. Kamioka, and N. Usami	Toyota Technological Institute, Nagoya University	Effects of Surface Doping of Si Absorbers on the Performance of Carrier-Selective Contacts	Materials Research Society Fall Meeting 2018	2018/11/28
451	Hyunju Lee, Changhyun Lee, Yoonmook Kang, Hae-Seok Lee,	Toyota Technological Institute, Korea University, KU-KIST Green	Effects of Tunnel Layers and Light Illumination on the Performance of	The 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit	2018/11/29

	Donghwan Kim, Noritaka Usami, Yoshio Ohshita	School, Korea University, Nagoya University	Electron-Selective TiO ₂ Contacts		
452	望月健矢, 後藤和泰, 黒川康良, 山本剛久, 宇佐美德隆	名古屋大学	超薄膜 TiO _x /結晶 Si 界面における酸素・水素原子の挙動	第 12 回 物性科学領域横断研究会	2018/11/30
453	後藤和泰	名古屋大学	ヘテロ接合の高性能化メカニズムと太陽電池応用	学振 175 委員会 次世代シリコン太陽電池分科会第 10 回研究会	2019/2/12
454	Y. Li, K. Gotoh, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Passivation Performance of Crystalline Silicon Solar Cells Employing Stacks of Ultrathin Oxide and Polycrystalline Si Formed by Aluminum Induced Crystallization	Japan-Korea PV Joint Student Seminar	2019/2/18
455	R. Tsubata, Y. Nakagawa, K. Gotoh, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Explorative Studies of Novel Structures as Carrier Selective Contacts	Japan-Korea PV Joint Student Seminar	2019/2/18
456	S. Miyagawa, T. Mochizuki, K. Gotoh, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Influence of Light Soaking on c-Si Surface Passivation by Atomic Layer Deposited Titanium Oxide	Japan-Korea PV Joint Student Seminar	2019/2/18
457	Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Collaboration of Numerical and Experimental studies on Crystal Growth Processes	International Symposium on Modeling of Crystal Growth Processes and Devices (MCGPD-2019)	2019/2/26
458	松田紘明、 森英喜、 新船幸二、 佐藤真一、 吉田晴彦	兵庫県立大学	ミスド CVD 法により成膜した GaO _x 膜のアニール効果	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/8
459	大西康平、 小島拓人、 木下晃輔、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大、豊田工大	太陽電池用 CZ-Si における酸素析出が金属ゲッターリングに与える影響 (3)	第 66 回応用物理学会 秋季学術講演会 (東京)	2019/3/9
460	西原達平、 神岡武文、 金井皓輝、 大下祥雄、 大川登志郎、 小椋厚志	明治大理工、 豊田工大、 シエンタオミクロン	透明導電膜のスパッタリング堆積による下地へのダメージ評価	第 66 回応用物理学会 秋季学術講演会 (東京)	2019/3/9

461	沓掛健太郎, 神岡武文, 井上憲一, 深見昌吾, 宇佐美德隆, 中原正博, ダムリン マルワ ン, 佐々木拓生, 藤川誠司, 高橋正光	理研 AIP、 明治大、 名古屋大、 東洋アルミ、 コベルコ科研、 量研	放射光 X 線回折パター ンの特徴抽出と空間マ ッピング	第 66 回応用物理学会 秋季学術講演会 (東 京)	2019/3/9
462	神岡武文, 磯貝勇樹, Lee Hyunju, 脇田陸, 原知彦, 林豊, 中村京太郎, 大下祥雄, 小椋厚志	明治大、豊田工大	Si 基板中に導入される RPD プロセスダメージ 層のキャリア再結合特 性	第 66 回応用物理学会 秋季学術講演会 (東 京)	2019/3/9
463	柿本浩一	九大応力研	結晶成長における実験 とシミュレーションの シナジー効果：欠陥を どこまで予測可能か	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/9
464	Xuefeng Han、 Satoshi Nakano、 Xin Liu、 Hirofumi Harada、 Yoshiji Miyamura、 Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analysis of asymmetric three- phase line in the floating zone silicon	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/9
465	白取優大 中光豊 門倉貞夫 宮島晋介	東京工業大学	シリコンヘテロ接合太 陽電池の正孔選択層応 用へ向けた酸化モリブ デンの FTS 法による形 成	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/9
466	望月健矢, 後藤和泰, 黒川康良, 宇佐美德隆	名古屋大学	ALD 法で作製した TiO _x 電子選択層の積層化に よる電気的特性の制御	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/10
467	望月健矢, 後藤和泰, 北條智彦, 黒川康良, 秋山英二, 宇佐美德隆	名古屋大学, 東北大学	ALD 法で作製した法で 作製した TiO _x /SiO _x /結 晶 Si ヘテロ界面のパ ッシベーション効果発現 メカニズム～水素原子 脱離の影響	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/10
468	城内紗千子 ¹ , 田中亜樹 ² , 村松和郎 ² , 中村京太郎 ³ , 大下祥雄 ³ , 増田淳 ¹	1. 産総研, 2. ナミックス, 3. 豊田工大	p 型結晶シリコン太陽 電池セルの SiN _x 反射 防止膜が PID に及ぼす影響	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/10
469	鈴木友康 ¹ , 山口世力 ¹ , 中村京太郎 ^{2, 3} , 増田淳 ⁴ , 大平圭介 ¹	1. 北陸先端大, 2. 豊田工大, 3. 明治大, 4. 産総研	n 型フロントエミッタ 型結晶シリコン太陽電 池モジュールの長時間 電圧誘起劣化における SiO ₂ 膜の影響	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/10

470	石川陽一郎、 田島道夫、 松岡竜太郎、 小椋厚志	明治大学	電子線照射発光活性化 室温 PL 法によるシリ コン結晶中の炭素定量 の誤差要因の検討	第 66 回応用物理学会 秋季学術講演会（東 京）	2019/3/12
471	柿本浩一、 Liu Xin、 中野智、 宮村佳児、 原田博文、 西澤伸一	九大応力研	不均一横磁場下の Si- CZ 結晶成長における酸 素移動現象の理解	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/12
472	Xin Liu、 Xue-Feng Han、 Satoshi Nakano、 Hirofumi Harada、 Yoshiji Miyamura、 Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Dynamic global modeling of the oxygen segregation during the pulling process of Czochralski silicon crystal growth	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/12
473	宮村佳児、 原田博文、 中野智、 西澤伸一、 柿本浩一	九大応力研	CZ 炉内の CO 濃度 (Ⅲ)	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/12
474	N. Usami	Nagoya University	Pathways to high- performance silicon- based heterojunction solar cells	X X III International symposium "Nanophysics & Nanoelectronics"	2019/3/13
475	Hyunju Lee, Changhyun Lee, Yoonmook Kang, Hae-Seok Lee, Donghwan Kim, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Korea University, KU-KIST Green School, Korea University	Effects of Tunnel Oxide Layers on the Performance and Light Stability of Electron-Selective TiO ₂ Contacts	Global Photovoltaic Conference 2019	2019/3/13
476	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	(Invited) Defect Formation by Indium- tin Oxide Reactive Plasma Deposition	Global Photovoltaic Conference 2019 (GPVC2019)	2019/3/13
477	X. Cheng, K. Gotoh, T. Mochizuki, N. Usami	Nagoya University	Surface passivation of low temperature processed titanium oxide/aluminum oxide for silicon substrate	Global Photovoltaic Conference 2019	2019/3/14
478	Kazuhiro Gotoh, Shohei Ogura, Yasuyoshi Kurokawa, Markus Wilde, Katsuyuki Fukutani, Noritaka Usami	Nagoya University, University of Tokyo	Impact of pre- oxidation on hydrogen depth profiles around a- Si:H/c-Si heterointerface	SiliconPV 2019	2019/4/9
479	Yoshio Ohshita ¹ , Takefumi Kamioka ^{1,2} , Yuki Isogai ¹ , Tomoyuki Hara ¹ ,	1. Toyota Technological Institute, 2. Meiji University	Recombination- Center-Defects Generated by Indium- Tin Oxide Reactive Plasma Deposition	9th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics 2019 (SiliconPV 2019)	2019/4/10

	Hyunju Lee ¹ , Kyotaro Nakamura ¹ , Atsushi Ogura ²				
480	Noritaka Usami	Nagoya University	Pathways to high-performance silicon-based solar cells: Overview of photovoltaic research at Nagoya University	Instituts-Kolloquium, Institut fuer Solarenergieforschung in Hameln (ISFH)	2019/4/12
481	大下祥雄 ¹ , 神岡武文 ¹ , Lee Hynju ¹ , 小椋厚志 ² , 小島信晃 ¹ , 鈴木秀俊 ³	1. 豊田工業大学, 2. 明治大, 3. 宮崎大	放射光を用いた太陽電池の評価	第150回結晶工学分科会研究会	2019/4/18
482	Kyotaro Nakamura ¹ , Kazuo Muramatsu ² , Aki Tanaka ² and Yoshio Ohshita ¹	1Toyota Technological Institute, 2NAMICS CORPORATION	Newly Developed Low Cost Metallization Paste for Si Hetero-Junction Solar Cell	SNEC2019 Industry Workshop	2019/6/4
483	Yoshio Ohshita ¹ , Kohei Onishi ² , Ryo Yokogawa ^{2, 5} , Tappei Nishihara ² , Takefumi Kamioka ² , Kyotaro Nakamura ¹ , Tomoyuki Kawatsu ³ , Toshiki Nagai ³ , Noboru Yamada ⁴ , Yukio Miyashita ⁴ , Atsushi Ogura ²	1. Toyota Technological Institute, 2. Meiji University, 3. Komatsu NTC, 4. Nagaoka University of Technology, 5. JSPS Research Fellow DC	Ultra-Thin Lightweight Bendable Crystalline Si Solar Cells for Solar Vehicles	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2019/6/18
484	Sachiko Jonai ^{1,2} , Yasushi Tachibana ³ , Kyotaro Nakamura ⁴ , Yasuaki Ishikawa ¹ , Yukiharu Uraoka ¹ , and Atsushi Masuda ²	1 Nara Institute of Science Technology, 2 National Institute of Advanced Industrial Science Technology, 3 Industrial Research Institute of Ishikawa, 4 Toyota Technological Institute	Roles of SiN _x in potential-induced degradation for p- type crystalline Si photovoltaic modules	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2019/6/18
485	Tappei Nishihira, Takefumi Kamioka, Hiroki Kanai, Yoshio Ohshita, Hideki Matsumura,	Meiji University, Toyota Technological Institute, JAIST, JASRI	Evaluation of ITO/a-Si interface fabricated by RPD technique	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC- 46)	2019/6/20

	Satoshi Yasuno, Ichiro Hirose, and Atsushi Ogura				
486	Takeya Mochizuki, Kazuhiro Gotoh, Yasuyoshi Kurokawa, Noritaka Usami	Nagoya University	Electrical properties of TiO _x bilayer prepared by atomic layer deposition at different temperatures	The 64th IEEE Photovoltaics Specialist Conference	2019/6/20
487	Hyunju Lee, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Effects of Different Tunnel Layers on the Performance and Light Stability of Electron-Selective TiO ₂ Contacts	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2019/6/20
488	Tomoyasu Suzuki ¹ , Seira Yamaguchi ¹ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Masuda ³ , and Keisuke Ohdaira ¹	1 JAIST, 2 Toyota Tech. Inst., 3 AIST	Effect of a SiO ₂ film on the potential- induced degradation of n-type front- emitter c-Si photovoltaic modules	EM-NANO 2019	2019/6/21
489	扇間政典, 後藤和泰, 黒川康良, 宇佐美德隆	名古屋大学	ITO 積層化の a- Si:H/c-Si 界面パッシ ベーション性能に及ぼ す影響	学振 175 委員会 第 16 回 「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2019/7/4
490	山下寛幸, 原田貴志, 吉田晴彦, 堀田育志, 前田光治, 新船幸二	兵庫県立大学	ミスド CVD 法による結 晶シリコン用 TiO _x パッシ ベーション膜の作製	第 16 回 「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2019/7/4
491	白取優大 中田和吉 宮島晋介	東京工業大学	SiH ₄ を用いずに形成し た i-a-Si:H パッシベ ーション層を有するシ リコンヘテロ接合太陽 電池	第 16 回 「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2019/7/4
492	城内紗千子 ^{1,2} , 中村京太郎 ³ , 石河泰明 ¹ , 浦岡行治 ¹ , 増田淳 ²	1 奈良先端大, 2 産総研, 3 豊田工大	結晶 Si 太陽電池の PID に及ぼす ARC 膜の役割	学振 175 委員会第 16 回 「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2019/7/4
493	鈴木友康 ¹ , 山口世力 ¹ , 中村京太郎 ^{2,3} , 増田淳 ⁴ , 大平圭介 ¹	1 北陸先端大, 2 豊田工大, 3 明治大, 4 産総研	n 型フロントエミッタ 型結晶シリコン太陽電 池モジュールの電圧誘 起劣化における SiO ₂ 膜 の効果	学振 175 委員会第 16 回 「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2019/7/4
494	後藤和泰, ビルデ マーカス, 加藤慎也, 小倉正平, 黒川康良, 福谷克之,	名古屋大学, 東京大学	a-Si:H/c-Si ヘテロ構 造のパッシベーション 性能と水素分布におけ る製膜温度の影響	学振 175 委員会 第 16 回 「次世代の太 陽光発電システム」 シンポジウム	2019/7/5

	宇佐美德隆				
495	Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Transient Global Modeling for the Pulling Process of CZ-Si Crystal Growth: Principles, Formulation and Implementation	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19)	2019/7/29
496	Yoshiji Miyamura, Hirofumi Harada, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	CO concentration in CZ furnace	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19)	2019/7/30
497	Satoshi Nakano, Xin Liu, Xuefeng Han, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Effect of seed crystal on dislocation density in Si single crystal	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19)	2019/7/30
498	Daisuke Murakami ¹ , Xin Liu ² , Satoshi Nakano ² , Hirofumi Harada ² , Yoshiji Miyamura ² , Koichi Kakimoto ²	1. Department of Aeronautics and Astronautics 2. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical simulation on oxygen transfer in Si melt under a cusp-shaped magnetic field using a 3D global mode	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19)	2019/7/30
499	Koichi Kakimoto, Xin Liu, Satoshi Nakano, Xue-Feng Han, Daisuke Murakami, Yoshiji Miyamura, Hirofumi Harada, Shin-ichi Nishizawa	RIAM, Kyushu Univ.	NUMERICAL STUDIES ON OXYGEN TRANSFER IN SI MELT UNDER INHOMOGENEOUS MAGNETIC FIELDS OF TMCZ CONDITION USING A GLOBAL MODEL	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19)	2019/8/1
500	Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Shin-ichi Nishizawa, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Transient Global Modeling of CZ-Si crystal growth: Segregation of O & C during Pulling	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19)	2019/8/1
501	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical studies on asymmetric three- phase line in the floating zone silicon	19th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-19)	2019/8/2

502	Hiroki Kanai, Tappei Nishihara, Takefumi Kamioka, Junsuke Matsuzaki, Hirohisa Takahashi, Junya Kiyota, Satoshi Yasuno, Ichiro Hirose, and Atsushi Ogura	Meiji University, ULVAC, JASRI	Evaluation of process damage induced by transparent conductive oxide film deposition for silicon heterojunction solar cells	29th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	2019/8/5
503	宮川晋輔, 後藤和泰, 黒川康良, 宇佐美德隆	名古屋大学	TiO _x /結晶 Si の電氣的 特性における光照射効 果	応用物理学会 若手 チャプター 「太陽光 エネルギー変換材 料・デバイス研究 会」 第1回サマーセ ミナー	2019/8/5
504	津幡亮平, 後藤和泰, 黒川康良, 宇佐美德隆	名古屋大学	キャリア輸送経路にナ ノドットを用いたパッ シベーション膜の作製 と評価	応用物理学会 若手 チャプター 「太陽光 エネルギー変換材 料・デバイス研究 会」 第1回サマーセ ミナー	2019/8/5
505	Tomohiko Hara ¹ , Riku Wakita ¹ , Yuki Isogai ¹ , Takefumi Kamioka ^{1,2} , Yoshio Ohshita ¹	1. Toyota Technological Institute, 2. Meiji University	DLTS analysis of defects induced by reactive plasma deposition	29th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes (2019/08/04-08/07)	2019/8/5
506	Hyunju Lee ¹ , Takefumi Kamioka ² , Atsushi Ogura ² , Yoshio Ohshita ¹	1. Toyota Technological Institute, 2. Meiji University	Effects of phosphorus doping in Si substrates on the band alignment and electrical performance in TiO ₂ electron-selective contacts	29th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes (2019/08/04-08/07)	2019/8/6
507	宇佐美德隆	名古屋大学	太陽電池高性能化への 材料科学的アプロー チ：結晶シリコン太陽 電池を中心に	令和元年度物質科学 研究会 第2回 iMATERIA 研究会	2019/8/20
508	宮川晋輔, 後藤和泰, 黒川康良, 宇佐美德隆	名古屋大学	酸化チタン/結晶シリ コンヘテロ構造におけ る水素プラズマ処理の 検討	新学術「ハイδροジ ェノミクス」 第4 回若手育成スクール	2019/8/23
509	中川裕太, 後藤和泰, 宮本聡, 黒川康良, 宇佐美德隆	名古屋大学	原子層堆積法による結 晶 Si/SiO _x /TiO _x 構造の 作製と熱処理の効果	新学術「ハイδροジ ェノミクス」 第4 回若手育成スクール	2019/8/23
510	後藤和泰, 望月健矢, 北條智彦, 黒川康良, 秋山英二、	名古屋大学, 東北大学	TiO _x /SiO _x /結晶 Si ヘテ ロ界面における水素の 脱離エネルギー	新学術「ハイδροジ ェノミクス」 第4 回若手育成スクール	2019/8/23

	宇佐美德隆				
511	Yutaka Hayashi ¹ , Takefumi Kamioka ^{1,3} , Kazuhiro Gotoh ² , Ryo Ozaki ¹ , Kyotaro Nakamura ¹ , Motoo Morimura ¹ , Shimako Naitou ¹ , Noritaka Usami ² , Atsushi Ogura ³ , Yoshio Ohshita ¹	1. Toyota Technological Institute, 2. Nagoya University, 3. Meiji University	Surface inversion layer effective minority carrier mobility as one of the measures of surface quality of the p-a-Si:H/ i-a-Si:H /c-Si heterojunction solar cell	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2019)	2019/9/4
512	Hyunju Lee, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Performance and Light Stability of Electron-Selective TiO ₂ with an AlO _x Interlayer	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials	2019/9/4
513	Yutaka Hayashi, Takefumi Kamioka, Kazuhiro Gotoh, Ryo Ozaki, Kyotaro Nakamura, Motoo Morimura, Shimako Naito, Noritaka Usami, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Nagoya University, Meiji University	New Analysis Method to Evaluate Amorphous/ Crystalline Si Interface for High Efficiency Heterojunction Solar Cells	SSDM2019	2019/9/5
514	Kohei Onishi, Ryo Yokogawa, Tappei Nishihara, Takefumi Kamioka, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita, Tomoyuki Kawatsu, Toshiki Nagai, Noboru Yamada, Yukio Miyashita, and Atsushi Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute, Komatsu NTC, Nagaoka University of Technology	Sawing damage control for thin flexible Si solar cells	36th European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2019)	2019/9/9
515	Takefumi Kamioka, Tappei Nishihara, Yusuke Hibino, Yutaka Hayashi, Lee Hyunju, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita, and Atsushi Ogura	Meiji University, Toyota Technological Institute	2D Transition Metal Dichalcogenide MoS ₂ for Fingerless Cell Application	36th European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2019)	2019/9/9

516	Yoshio Ohshita ¹ , Takefumi Kamioka ^{1,2} , Kaito Watanabe ¹ , Riku Wakita ¹ , Hyunju Lee ¹ , Kyotaro Nakamura ¹ , Atsushi Ogura ²	1. Toyota Technological Institute, 2. Meiji University	Effects of Si Bulk Defects Generated by SiN _x :H PECVD on Light Induced Degradation	36th European PV Solar Energy Conference and Exhibition (2019/09/09-09/13)	2019/9/11
517	Yoshiki Adachi, Takashi Harada, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Kouji Maeda, Koji Arafune	Univ. Hyogo	Si surface passivation by GaO _x films deposited using a mist chemical vapor deposition process	36th European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2019/9/12
518	Kyotaro Nakamura ¹ , Yoshio Ohshita ¹ , K. Muramatsu ² , Tappei Nishihara ³ , Atsushi Ogura ³	1. Toyota Technological Institute, 2. Namics, 3. Meiji University	Development of Transparent Conductive Oxide for Silicon Heterojunction Solar Cell	36th European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2019/9/12
519	西原達平、 金井皓輝、 横川凌、 廣沢一郎、 安野聡、 大川昇志郎、 小椋厚志	明治大理工、 学振特別研究員、 高輝度光科学研究セン ター、 シエンタオミクロン	実験室系硬 X 線光電子 分光法による埋もれた 界面の化学結合状態評 価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会（北 海道）	2019/9/18
520	村上大祐、刘鑫、 中野智、 原田博文、 宮村佳児、 柿本浩一	九大院工 九大応力研	カスプ磁場印加 CZ 法 におけるシリコン融液 中の酸素輸送の 3 次元 数値解析	2019 年第 80 回応用 物理学会秋季学術講 演会	2019/9/18
521	Xuefeng Han, Satoshi Nakano, Xin Liu, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	九大応力研	3D Numerical investigation on 200 mm (8-inch) floating zone (FZ) silicon process	2019 年第 80 回応用 物理学会秋季学術講 演会	2019/9/18
522	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	九大応力研	Transient global modeling of oxygen and carbon segregations during the pulling process of Czochralski silicon crystal growth	2019 年第 80 回応用 物理学会秋季学術講 演会	2019/9/18
523	根元亮一、 阪永裕士、 Yujun Zhang、 和達大樹、 新船幸二、 吉田晴彦、 堀田育志	兵庫県立大学	(La _{1-x} Sr _x)VO ₃ /p-Si (100)接合の電気特性 の温度依存性	第 80 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/18

524	阪永裕士、 根元亮一、 Yujun Zhang、 和達大樹、 吉田晴彦、 新船幸二、 堀田育志	兵庫県立大学	(La _{1-x} Sr _x)VO ₃ /p-Si (100)接合のエネルギー バンド不連続性の測 定	第 80 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/18
525	白取優大 中田和吉 宮島晋介	東京工業大学	対向ターゲットスパッ タ法による高品質 i-a- Si:H 層の形成とシリコ ンヘテロ接合太陽電池 への応用	第 80 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/18
526	神岡武文、林豊、 後藤和泰、 尾崎亮、 森村元勇、 内藤志麻子、 宇佐美德隆、 大下祥雄、 小椋厚志	明治大、豊田工大、 名古屋大	a-Si:H/c-Si ヘテロ接 合 Si 太陽電池の表面 欠陥・トラップ準位評 価手段 - 表面反転層 ラテラル少数キャリア 等価移動度(1) -	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会（北 海道）	2019/9/19
527	寺垣亮太、 小林晃平、 吉田晴彦、 新船幸二、 神吉滉輝夫、 堀田育志	兵庫県立大学	Al/金属酸化物/Si 構造 における抵抗スイッ チング現象	第 80 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/19
528	小林滉平、 寺垣亮太、 吉田晴彦、 新船幸二、 堀田育志	兵庫県立大学	Al/HfO ₂ /n-Si (100) 構造 の抵抗変化現象の素子 サイズ依存性	第 80 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/19
529	松田紘明、 森英喜、 新船幸二、 吉田晴彦	兵庫県立大学	ミスト CVD 法により成 膜した GaO _x 膜のアニ ール効果(II)	第 80 回 応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/19
530	大下祥雄 ¹ 、 小椋厚志 ²	1. 豊田工業大学、 2. 明治大学	(招待) バンド構造制 御に基づく次世代高効 率結晶シリコン太陽電 池	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会（北 海道大学、札幌市）	2019/9/19
531	中野智、劉鑫、 韓学峰、 柿本 浩一	九大応力研	種結晶を用いたシリコ ン結晶成長における転 位密度の数値解析	2019 年第 80 回応用 物理学会秋季学術講 演会	2019/9/20
532	金井皓樹 ¹ 、 西原達平 ¹ 、 神岡武文 ¹ 、 松崎淳介 ² 、 高橋明久 ² 、 清田淳也 ³ 、 安野聡 ³ 、 廣沢一郎 ³ 、 小椋厚志 ¹	1. 明治大学、 2. ULVAC、 3. JASRI	透明導電膜のスパッタ リング堆積によるプロ セスダメージの評価	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会（北 海道大学、札幌市）	2019/9/20
533	大西康平 ¹ 、 原豊 ¹ 、 西原達平 ¹ 、 神岡武文 ¹ 、 大下祥雄 ² 、 小椋厚志 ¹	1. 明治大学、 2. 豊田工業大学	太陽電池用 Si 基板中 のプラズマプロセス誘 起ダメージ評価	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会（北 海道大学、札幌市）	2019/9/20

534	大西康平 ¹ , 横川凌 ^{1,5} , 西原達平 ¹ , 神岡武文 ¹ , 中村京太郎 ² , 大下祥雄 ² , 河津知之 ³ , 長井俊樹 ³ , 山田昇 ⁴ , 宮下幸雄 ⁴ , 小椋厚志 ¹	1. 明治大学, 2. 豊田工業大学, 3. コマツ NTC 株式会社, 4. 長岡技術大学, 5. 学振特別研究員 DC	薄型フレキシブル Si 太陽電池へ向けたスラ イスダメージ評価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会 (北 海道大学、札幌市)	2019/9/20
535	原知彦 ¹ , 脇田陸 ¹ , 磯貝勇樹 ¹ , 神岡武文 ^{1,2} , 大下祥雄 ¹	1. 豊田工業大学, 2. 明治大学	DLTS 法による RPD 誘起 欠陥の欠陥特性評価	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会 (北 海道大学、札幌市)	2019/9/20
536	杵掛健太郎, 神岡武文, 世木隆, 佐々木拓生, 藤川誠司, 高橋正光	理研 AIP、明治大、 コベルコ科研、量研	放射光 X 線回折パター ンの特徴抽出と空間マ ッピング(II)	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会 (北 海道大学、札幌市)	2019/9/21
537	鈴木友康 ¹ , 山口世力 ¹ , 中村京太郎 ² , 増田淳 ³ , 大平圭介 ¹	1. 北陸先端大、 2. 豊田工大、 3. 産総研	n 型フロントエミッタ 型結晶シリコン太陽電 池モジュールの正バイ アス PID 試験と回復試 験	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会 (北 海道大学、札幌市)	2019/9/21
538	徐原松 ¹ , 山口世力 ¹ , 中村京太郎 ² , 増田淳 ³ , 大平圭介 ¹	1. 北陸先端大、 2. 豊田工大、 3. 産総研	n 型リアエミッター型 c-Si PV モジュールの PID における光照射の 影響	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会 (北 海道大学、札幌市)	2019/9/21
539	城内紗千子 ^{1,2} , 中村京太郎 ³ , 石河泰明 ¹ , 浦岡行治 ¹ , 増田淳 ²	1. 奈良先端大、 2. 産総研、 3. 豊田工大	結晶 Si 太陽電池の ARC 膜とウエハの伝導型が PID に及ぼす固有の現 象	第 80 回応用物理学会 秋季学術講演会 (北 海道大学、札幌市)	2019/9/21
540	K. Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Recent Development of Silicon Crystals for Solar Cells in Japan	GADEST 2019	2019/9/26
541	中野智、劉鑫、 韓学峰、 柿本浩一	九大応力研	シリコン単結晶成長に おける転位密度の種結 晶依存性	第 48 回結晶成長国内 会議 (JCCG-48)	2019/10/30
542	劉鑫, 原田博文, 宮村佳児, 韓学峰, 中野智, 西澤伸一, 柿本浩一	九大応力研	CZ シリコン結晶引き上 げ過程における酸素偏 析のモデル化	第 48 回結晶成長国内 会議 (JCCG-48)	2019/10/30
543	韓学峰, 中野智, 劉鑫, 原田博文, 宮村佳児, 柿本浩一	九大応力研	200 mm (8 インチ) FZ シリコン結晶成長の三 相線に関する 3 次元数 値解析	第 48 回結晶成長国内 会議 (JCCG-48)	2019/10/30
544	Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Crystal Growth of CZ-Si for High Efficiency Cells :	The 29th International Photovoltaic	2019/11/4

			Learn Lessons from the Past	Science and Engineering Conference (PVSEC29) and the 18th China Photovoltaic Conference (CPVC18)	
545	Satoshi Nakano, Xin Liu, Xuefeng Han, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analysis of the effect of seed crystal on dislocation density in Si crystal for solar cells	The 29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC29) and the 18th China Photovoltaic Conference (CPVC18)	2019/11/4
546	Xin Liu, Xue-Feng Han, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Transient global modeling of oxygen and carbon segregations during the pulling process of Czochralski silicon crystal growth	The 29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC29) and the 18th China Photovoltaic Conference (CPVC18)	2019/11/4
547	Xue-Feng Han, Xin Liu, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, and Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical Analysis on Asymmetric Phenomenon in the 200 mm (8 inch) Floating Zone Silicon	The 29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC29) and the 18th China Photovoltaic Conference (CPVC18)	2019/11/4
548	Koji Arafune, Takashi Harada, Haruhiko Yoshida, Yasushi Hotta, Kouji Maeda	Univ. Hyogo	Fabrication of metal-oxide passivation films by mist chemical vapor deposition	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/4
549	Yudai Kuramochi, Toshiya Marukane, Haruhiko Yoshida, Yasushi Hotta, Koji Arafune	Univ. Hyogo	Study of aluminum oxide passivation films deposited by reactive sputtering with low-inductance-antenna	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/4
550	Yuta Shiratori Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Fabrication of Silicon Heterojunction Solar Cells with high-quality i-a-Si:H Deposited by Facing Target Sputtering Technique	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019/11/4

551	Chen Shiyuan Yuta Shiratori Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Deposition of Tungsten Oxide by HWCVD for Hole Transport Layer of Silicon Solar Cells	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29)	2019/11/4
552	Kohei Onishi ¹ , Yutaka Hara ¹ , Tappei Nishihara ¹ , Hiroki Kanai ¹ , Takefumi Kamioka ¹ , Yoshio Ohshita ² , Atsushi Ogura ¹	1. Meiji University, 2. Toyota Technological Institute	Evaluation of plasma induced damage in silicon substrate	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (2019/11/04-11/08)	2019/11/4
553	Hyunju Lee ¹ , Junsin Yi ² , Yoshio Ohshita ¹	1. Toyota Technological Institute, 2. College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University	Light Stability of Ultrathin Electron-Selective TiO ₂ Contacts with an AlO _x Tunnel Layer	The 29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering	2019/11/4
554	Masanori Semma, Kazuhiro Gotoh, Yasuyoshi Kurokawa, Noritaka Usami	Nagoya University	Impact of indium tin oxide double layers deposition on the passivation performance of a-Si:H/c-Si heterocontact	PVSEC-29	2019/11/5
555	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Kazuhiro Gotoh, Ryo Ozaki, Motoo Morimura, Ayako Shimizu, Kyotaro Nakamura, Noritaka Usami, Yoshio Ohshita, Atsushi Ogura	Meiji University, Nagoya University, Toyota Technological Institute	New Analysis Method to Evaluate Amorphous/Crystalline Si Interface for High Efficiency Heterojunction Solar Cells	PVSEC-29	2019/11/5
556	Hyunju Lee ¹ , Takefumi Kamioka ² , Atsushi Ogura ² , Yoshio Ohshita ¹	1. Toyota Technological Institute, 2. Meiji University	Band bending at the TiO ₂ electron-selective contact/n-Si interface directly observed by hard X-ray photoelectron spectroscopy	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (2019/11/04-11/08)	2019/11/5
557	Takefumi Kamioka ^{1,2} , Yutaka Hayashi ² , Kazuhiro Gotoh ³ , Ryo Ozaki ² , Motoo Morimura ² , Ayako Shimizu ³ ,	1. Meiji University, 2. Toyota Technological Institute, 3. Nagoya University	New analysis method to evaluate amorphous/crystalline Si interface for high efficiency	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (2019/11/04-11/08)	2019/11/5

	Kyotaro Nakamura ² , Noritaka Usami ³ , Yoshio Ohshita ² , Atsushi Ogura ¹		heterojunction solar cells		
558	Noboru Yamada ¹ , Kohei Onishi ² , Ryo Yokogawa ² , Tappei Nishihara ² , Takefumi Kamioka ² , Kyotaro Nakamura ³ , Tomoyuki Kawatsu ⁴ , Toshiki Nagai ⁴ , Yuya Kotake ¹ , Yukio Miyashita ¹ , Yoshio Ohshita ³ , Atsushi Ogura ²	1. Nagaoka University of Technology, 2. Meiji University, 3. Toyota Technological Institute, 4. Komatsu NTC Ltd.	Characterization of bendable crystalline Si solar cells made by ultra-thin wafer slicing	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (2019/11/04-11/08)	2019/11/5
559	Tappei Nishihara ¹ , Hiroki Kanai ¹ , Takefumi Kamioka ¹ , Junsuke Matsuzaki ² , Junya Kiyota ² , Yoshio Ohshita ³ , Kyotaro Nakamura ³ , Satoshi Yasuno ⁴ , Ichiro Hirosawa ⁴ , Toshiro Okawa ⁵ , Atsushi Ogura ¹	1. Meiji University, 2. ULVAC, 3. Toyota Technological Institute, 4. JASRI, 5. Scientia Omicron	High mobility transparent conductive oxide film for silicon heterojunction solar cell	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (2019/11/04-11/08)	2019/11/7
560	Yuansong Xu ¹ , Seira Yamaguchi ¹ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Masuda ³ , Keisuke Ohdaira ¹	1. Japan Advanced Institute of Science and Technology, 2. Toyota Technological Institute, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Influence of light illumination on the potential-induced degradation of n-type rear-emitter crystalline Si photovoltaic modules	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (2019/11/04-11/08)	2019/11/7
561	Tomoyasu Suzuki ¹ , Seira Yamaguchi ¹ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Masuda ³ , and Keisuke Ohdaira ¹	1. Japan Advanced Institute of Science and Technology, 2. Toyota Technological Institute, 3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Potential-induced degradation and recovery behaviors of photovoltaic modules with n-type front-emitter crystalline Si cells without SiO ₂	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (2019/11/04-11/08)	2019/11/7

562	T. Nishihara, H. Kanai, T. Okawa, A. Ogura	Meiji University, Scientia Omicron	Non-destructive evaluation of chemical bonding states at buried interface using laboratory hard X-ray photoelectron spectroscopy	2019 International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices - Science and Technology- (2019 IWDTF)	2019/11/18
563	後藤和泰, 三浦裕之, 清水彩子, 宮川晋輔, 中川裕太, 黒川康良, 宇佐美德隆	名古屋大学	分光エリプソメトリーを用いた酸化チタンパッシベーション膜のポストアニール効果に関する研究	第4回フロンティア太陽電池セミナー	2019/11/25
564	宮川晋輔, 後藤和泰, Markus Wilde, 小倉正平, 黒川康良, 福谷克之, 宇佐美德隆	名古屋大学, 東京大学	酸化チタン/結晶シリコンヘテロ構造における水素プラズマ処理の影響	第2回ハイドロジェノミクス研究会	2019/11/25
565	Noritaka Usami	Nagoya University	Role of the Interlayer in Improving Passivating Contact with Atomic Layer Deposited TiO _x on Crystalline Si	2019 MRS Fall Meeting & Exhibit	2019/12/1
566	趙蓉蓉 ¹ , 鈴木友康 ¹ , 山口世力 ¹ , 中村京太郎 ² , 増田淳 ³ , 大平圭介 ¹	1 北陸先端大, 2 豊田工大, 3 産総研	酸化膜無 n 型フロントエミッタ型結晶 Si 太陽電池モジュールの電圧誘起劣化における光照射の効果	令和元年度(2019年)応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会	2019/12/7
567	T. Nishihara, H. Kanai, T. Kamioka, T. Okawa, I. Hirose, S. Yasuno, A. Ogura	Meiji University, Scientia Omicron, JASRI	Laboratory scale hard X-ray photoelectron spectroscopy in comparison with SPring-8	Materials Research Meeting 2019 Materials Innovation for Sustainable Development Goals (MRM2019)	2019/12/13
568	Kazuhiro Gotoh, Takeya Mochizuki, Tomohiko Hojo, Yasuyoshi Kurokawa, Eiji Akiyama, Noritaka Usami	Nagoya University, Tohoku University	Activation energy of hydrogen effusion of high performance TiO _x /SiO _x /c-Si heterocontacts	Material Research Meeting 2019	2019/12/13
569	森暁洋, 山下寛幸, 前田光治, 新船幸二	兵庫県立大学	ミスド CVD 法による酸化チタン薄膜の低温形成	化学工学会 姫路大会 2019	2019/12/16
570	代野宝, 倉持雄大, 前田光治, 新船幸二	兵庫県立大学	LIA スパッタ法により製膜した酸化アルミニウム膜のパッシベーション	化学工学会 姫路大会 2019	2019/12/16

			オン特性に及ぼす熱工程の影響		
571	上田有紗、 倉持雄大、 前田光治、 新船幸二	兵庫県立大学	HIT型太陽電池の自由キャリア吸収抑制に関する検討	化学工学会 姫路大会 2019	2019/12/16
572	城内紗千子 ^{1,2} 松井卓矢 ² 鯉田崇 ² 柴田肇 ² 中村京太郎 ³ 石河泰明 ¹ 浦岡行治 ¹ 増田淳 ²	1 奈良先端科学技術大学院大学 2 産業技術総合研究所太陽光発電研究センター 3 豊田工業大学	PIDにおける結晶Si太陽電池のARC膜の役割およびPID抑止方法	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/17
573	Dong C. Nguyen ¹ , Yasuaki Ishikawa ¹ , Sachiko Jonai ^{1,2} , Kyotaro Nakamura ³ , Atsushi Masuda ² , Yukiharu Uraoka ¹	1 Nara Institute of Science and Technology 2 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology 3 Toyota Technological Institute	The PID delay effect by UV light irradiation for p-type crystalline Si solar modules based on the different refractive index of silicon nitride layer	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/17
574	徐原松 ¹ 、 山口世力 ¹ 、 中村京太郎 ² 、 増田淳 ³ 、 大平圭介 ¹	1 北陸先端大、 2 豊田工大、 3 産総研	n型リアエミッター型結晶Si太陽電池モジュールのPIDにおける光照射の影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/17
575	鈴木友康 ¹ 、 山口世力 ¹ 、 中村京太郎 ² 、 増田淳 ³ 、 大平圭介 ¹	1 北陸先端大、 2 豊田工大、 3 産総研	n型フロントエミッター型結晶Si太陽電池モジュールのPIDにおけるSiO ₂ 膜の影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/17
576	林豊、神岡武文、 後藤和泰、 尾崎亮、 中村京太郎、 森村元勇、 宇佐美德隆、 大下祥雄、 小椋厚志	豊田工大、名古屋大、 明治大	MoO _x CSC/Si太陽電池のPDAによる特性変動(3)ー表面反転層をチャネルとするFET-TEGのS/Dコンダクタンスによる評価(1)ー	第67回応用物理学会 春季学術講演会	2020/3/12
577	原豊、横川凌、 大西康平、 神岡武文、 中村京太郎、 大下祥雄、 河津知之、 長井俊樹、 山田昇、 宮下幸雄、 小椋厚志	明治大、 学振特別研究員、 豊田工大、 コマツNTC、 長岡技大	単結晶Si太陽電池の薄型化へ向けたスライスタメージ評価	第67回応用物理学会 春季学術講演会	2020/3/12
578	朝原将太、 田島道夫、 佐竹雄太、 小椋厚志	明治大学	照射誘起欠陥を含むSi結晶の発光再結合機構	第67回応用物理学会 春季学術講演会	2020/3/12

579	中川裕太, 後藤和泰, ビルデ マーカス, 小倉正平, 黒川康良, 福谷克之, 宇佐美德隆	名古屋大学, 東京大学	核反応解析法と原子間力顕微鏡を用いた TiO _x /SiO _x /Si ヘテロ構造におけるパッシベーション性能の支配要因	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020/3/12
580	宮川晋輔, 後藤和泰, ビルデ マーカス, 小倉正平, 黒川康良, 福谷克之, 宇佐美德隆	名古屋大学, 東京大学	酸化チタン/結晶シリコンヘテロ構造における水素プラズマ処理の効果	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020/3/12
581	鈴木友康 ¹ , 山口世力 ¹ , 中村京太郎 ² , 増田淳 ³ , 大平圭介 ¹	1 北陸先端大、 2 豊田工大、 3 産総研	n 型フロントエミッタ型結晶シリコン太陽電池モジュールの電圧誘起劣化における SiN _x 膜の影響	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会 (上智大学、東京) (2020/03/12~03/15)	2020/3/12
582	趙蓉蓉 ¹ , 鈴木友康 ¹ , 山口世力 ¹ , 中村京太郎 ² , 増田淳 ³ , 大平圭介 ¹	1 北陸先端大、 2 豊田工大、 3 産総研	SiO ₂ 膜の無い n 型フロントエミッタ型結晶 Si 太陽電池モジュールの電圧誘起劣化における光照射の効果	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会 (上智大学、東京) (2020/03/12~03/15)	2020/3/12
583	原豊 ¹ , 横川凌 ^{1,5} , 大西康平 ¹ , 神岡武文 ¹ , 中村京太郎 ² , 大下祥雄 ² , 河津知之 ³ , 長井俊樹 ³ , 山田昇 ⁴ , 宮下幸雄 ⁴ , 小椋厚志 ^{1,6}	1. 明治大理工 2. 豊田工大 3. コマツ NTC 社 4. 長岡技大 5. 学振 DC 6. 再生可能エネルギー研究インスティテュート	単結晶 Si 太陽電池の薄型化へ向けたスライスタメージ評価	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会 (上智大学、東京) (2020/03/12~03/15)	2020/3/12
584	村主圭佑, 根元亮一, 阪永裕士, Yujun Zhang, 和達大樹, 新船幸二, 吉田晴彦, 堀田育志	兵庫県立大学	(La _{1-x} Sr _x)VO ₃ /p-Si 接合の順方向電流特性の組成依存性	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020/3/13
585	白取優大 宮島晋介	東京工業大学	シリコン太陽電池電子選択層応用へ向けたスパッタ法による窒化ガリウムの作製と評価	第 67 回応用物理学会 春季学術講演会	2020/3/15

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	「シリコン太陽電池の発電コスト低減に向けた新プロジェクトを始動」	明治大 HP プレス発表	2015/11/11

2	6 大学コンソーシアム（豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学）	シリコン太陽電池の発電コスト低減に向けた新プロジェクトを始動「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」	@Press ①朝日新聞デジタル ②SankeiBiz 産経新聞社 ③夕刊フジ ④livedoorNews ⑤Infoseek 楽天NEWS ⑥なびポー	2015/11/11
3	6 大学コンソーシアム（豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学）	「シリコン太陽電池の発電コストを2020年に14円/kWhへ、新プロジェクト始動」	環境ビジネスオンライン	2015/11/12
4	6 大学コンソーシアム（豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学）	「明大ら、太陽電池発電コスト低減に向けたNEDOプロジェクトを開始」	OPTRONICS ONLINE	2015/11/12
5	6 大学コンソーシアム（豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学）	「明治大学など6大学、太陽電池の低コスト化研究でコンソーシアム」	日経テクノロジーonline	2015/11/20
6	6 大学コンソーシアム（豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学）	「明治大学、6大学と太陽電池の低コスト化研究」	日本経済新聞 電子版	2015/11/21
7	6 大学コンソーシアム（豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学）	「6大学で太陽電池のコスト低く」	日経産業新聞	2015/12/16
8	明治大学	「Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC2017) で Student Paper Award を受賞しました。」	明治大 HP	2017/11/21
9	明治大学	小島拓人研究員の講演が応用物理学会春季学術講演会の注目講演に選ばれました	明治大 HP	2018/3/5
10	名古屋大学	「太陽光発電の普及に期待！～太陽電池の高性能化に有用な新材料の開発～」	プレス発表 名古屋大学 HP	2018/12/20
11	名古屋大学	「太陽電池の変換効率、酸化チタンで向上へ」	日経新聞	2019/1/7
12	名古屋大学	「名大、シリコン太陽電池で新材料、高効率化に期待」	日経 XTECH	2019/1/8
13	名古屋大学	「結晶シリコン太陽電池の高性能化を実現、名古屋大学が新材料」	スマートジャパン	2019/1/9
14	明治大学	明治大学、「従来検出できなかったSi結晶中の炭素濃度の定量」	日経 xTECH (webサイト) 『応用物理学会から』への掲載	2019/1/15

【その他】

番号	年度	タイトル	氏名	所属
1	2016/3/19	第40回（2016年春季）応用物理学会 講演奨励賞	鈴木涼太	明治大理工

2	2016/5/20	イノベティブ PV 奨励賞	市川寛章	名古屋大学
3	2016/6/12	材料バックキャストテクノロジー研究センター研究奨励賞	市川寛章	名古屋大学
4	2016/7/8	応用物理学会論文奨励賞	高橋勲	名古屋大学
5	2016/11/15	第 26 回学生による材料フォーラム優秀賞	増田翔太	名古屋大学
6	2017/3/14	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 Poster Award 受賞	山田郁彦, 神岡武文, 水野皓登, 大下祥雄, 神谷格	豊田工業大学
7	2017/3/15	Korea Photovoltaic Society, GPVC Daejoo Award	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute
8	2017/5/12	第 42 回 (2017 年春季) 応用物理学会講演奨励賞	白取優大	東京工業大学
9	2017/6/9	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 070305 Spotlights 2017	Hirotsu Kiuchi ¹ , Michio Tajima ¹ , Fumito Higuchi ¹ , Atsushi Ogura ¹ , Nobuhito Iida ² , Shoji Tachibana ² , Isao Masada ² and Eiichi Nishijima ²	1 Meiji University, 2 Tokuyama Corporation,
10	2017/7/5-7	PV Japan 2017 (パシフィコ横浜) 展示会出展	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	NEDO 『高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発』事業
11	2017/10/21	テクノフェア名大 2017	宇佐美・黒川研究室	名古屋大学
12	2017 年度 (第 11 回)	応用物理学会フェロー受賞 『結晶成長の大規模数値解析と半導体結晶の高品質化』	柿本浩一	九州大学
13	2018/6/20-22	PV Japan 2018 (パシフィコ横浜) 展示会出展	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	NEDO 『高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発』事業
14	2018/10/20	テクノフェア名大 2018	宇佐美・黒川研究室	名古屋大学
15	2018/11/19	Young Researcher Poster Award	Takeya Mochizuki	Nagoya University
16	2019/5/21	第 7 回研究部共同利用・共同研究若手萌芽研究最優秀賞	後藤和泰、 望月健矢	名古屋大学
17	2019/7/5	イノベティブ PV 奨励賞	後藤和泰	名古屋大学
18	2019/7/10-12	第 14 回再生可能エネルギー世界展示会&フォーラム (パシフィコ横浜) 展示会出展	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	NEDO 『高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発』事業

B 薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発（産業技術総合研究所）

1. 成果詳細

1-1. ウェハスライス技術に関する研究開発（コマツ NTC 株式会社との連携）

太陽電池用マルチワイヤウエハスライス装置を製造販売するコマツ NTC 株式会社と連携し、同社の産業競争力の強化に資する、ウエハスライス技術高度化に向けた技術開発を行った。本事業において、連携先のコマツ NTC (株) は、別課題にて低カーブロス・薄型ウエハスライス技術の研究開発を推進した。一方で産総研は、こうしたスライス技術の確立に先行して、ウエハ薄型化に伴って発電性能が制約される要因および極薄ウエハを用いた高性能太陽電池の実現可能性を明らかにするための研究開発を行った。具体的には、板厚 50 μm 級の極薄ヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池 (SHJ 太陽電池) を想定し、その高性能化に必要とされる、低温プロセスを用いたパッシベーション技術、光閉じ込め技術、プロセス診断・界面評価技術、極薄ウエハのセル化に必要な要素技術評価のための液相結晶化法による結晶 Si の作製技術、の開発を行った。

<薄型ウエハにおける光閉じ込めの検討>

ウエハ薄型化に伴う発電特性面での課題の一つは、光吸収層である結晶 Si (c-Si) の体積が減ることによる光吸収量および短絡電流密度 (J_{sc}) の低下である。理想的な光閉じ込めの代表例は、仮想的に光の方向をランダムに変化させる Lambert 面であり、光吸収量および J_{sc} の期待値 (iJ_{sc}) を解析的に見積もることが可能である。Lambert 面に近い特性を実現するため、一般には表面テクスチャ構造が用いられ、特に単結晶 Si では光閉じ込めに好適なピラミッドテクスチャが容易に形成できる。ここでは、ピラミッドテクスチャを基本として、ウエハ厚さと iJ_{sc} の相関を実験と理論の両面から評価し、薄型ウエハにおける光閉じ込めに関する検討を行った。コマツ NTC (株) から支給を受けた厚さを 50~400 μm の範囲で制御した Si ウエハに対し表面にピラミッドテクスチャを形成し、さらに反射防止膜として厚さ 100 nm 程度の窒化シリコン膜を形成したうえで、モスアイ構造を持つ反射防止フィルムを適用し表面反射を極限まで抑制した。この太陽電池構造を光学的に模したサンプルに対し、光吸収スペクトルを積分球付き分光光度計で測定し、 iJ_{sc} を評価した。

本研究開発にて得られた iJ_{sc} の結果を図 III-2-(二)-B-1 に示す。今回、最も薄いもので板厚 40 μm を下回るウエハを評価したが、実験的に得られた iJ_{sc} は、板厚に依らず Lambert 面を仮定した理論値 (Lambertian Limit) とほぼ同じ傾向を示した。この結果から、板厚 50 μm 程度の極薄セルにおいても、現行の光閉じ込め構造が有効に機能することが確認された。よって、以降の開発では、ピラミッドテクスチャを基本として薄型セルの検討を進めた。

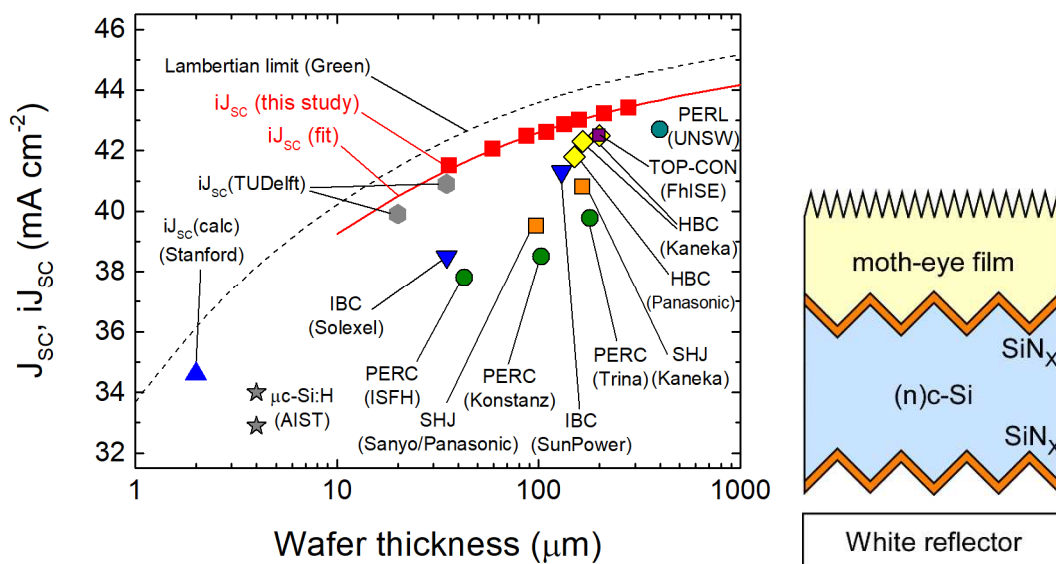


図 III-2-(二)-B-1. 実験および解析的に求めた iJ_{sc} のウエハ厚依存性。比較のため、各種文献に記載された J_{sc} および iJ_{sc} も記載した。右図は今回 iJ_{sc} 評価用に用いた模擬太陽電池サンプルの模式図。

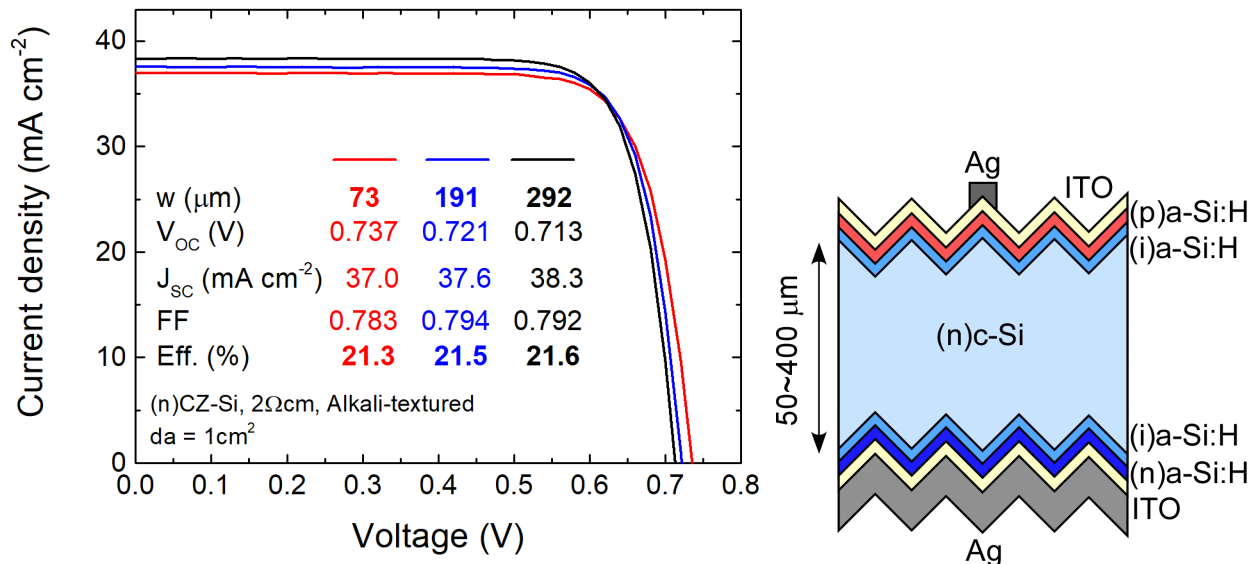
<極薄ウエハ対応セルプロセスの開発>

本研究開発では、(i)a-Si:H層の二段階製膜技術を含む産総研で開発したSHJセルプロセスを元に、実際にコマツNTC(株)より支給されたウエハ厚を調整したn型CZ-Si(抵抗率 $\sim 2 \Omega\text{cm}$)を用いて、一連のSHJセルを作製し、ソーラーシミュレータ(エアマス1.5g、照射強度 100mWcm^{-2})及びソースメジャーユニットを用いて電流-電圧(J-V)特性を評価した。典型的なJ-V特性を図III-2-(ニ)-B-2に示す。開発したSHJセルプロセスにより、ウエハ厚70、191、292 μm の全ての場合において発電効率21%超の比較的良好な特性を得ることができた。また、ウエハ薄型化に伴う典型的なトレードオフ関係である V_{oc} の向上と J_{sc} の低下が明瞭に確認された。以上の結果から、今回構築したSHJプロセスは極薄ウエハに対しても相応の発電効率が得られることが確認された。

次に、より系統的にウエハ厚の影響を調べるため、ウエハ厚を細かく変化させながらSHJセルを作製して発電特性を評価した。前述の J_{sc} 、 V_{oc} 、FF、pFF、効率に加えて、Ag電極を形成する前のセル前駆体のライフタイムを評価しそこから求められるImplied V_{oc} (iV_{oc})とImplied FF (iFF)、並びにpFFを使って得られるpseudo効率(pEffまたは $p\eta$)も併せて評価した。得られた結果を図III-2-(ニ)-B-3に示す。本結果から、以下が明らかとなった。

- (a) J_{sc} はウエハ厚減少とともに単調に減少し、その減少量はLambertian光閉じ込めに較べて大きい。この結果はウエハ厚減少の効果に加え、他の効果が重畳していることを示唆する。
- (b) iV_{oc} および V_{oc} はウエハ厚減少とともに単調に増加し、極薄ウエハでは $iV_{oc} \sim 760 \text{mV}$ を得ることが可能である。一方、電極形成後のJ-V評価で確認された V_{oc} はそれよりやや低く、かつ、ウエハ薄型化に伴って iV_{oc} との乖離が増大した。この要因として、セル面積が小さいことにより周辺効果と、極薄ウエハのハンドリング時にダメージを与えた可能性、などが考えられる。
- (c) FFは J_{sc} や V_{oc} に較べて変化量は小さく、既報の理論解析結果とおおむね整合する。しかし、板厚70 μm を下回る極薄ウエハではpFF、FFともに減少傾向が認められる。また今回のSHJセルでは板厚に依らずpFFとFFの間に0.04程度の差があり直列抵抗損失が大きいことが示唆される。
- (d) 以上の結果から、発電効率は板厚80 μm 程度まではほぼ一定値を示すが、極薄ウエハにおいて減少傾向が認められる。しかしながら、板厚50 μm を下回る領域において発電効率22%以上($p\eta$ としては23%以上)のSHJセルの作製に成功した。極薄SHJセルにおいても高い発電効率が実現できる可能性を示した。

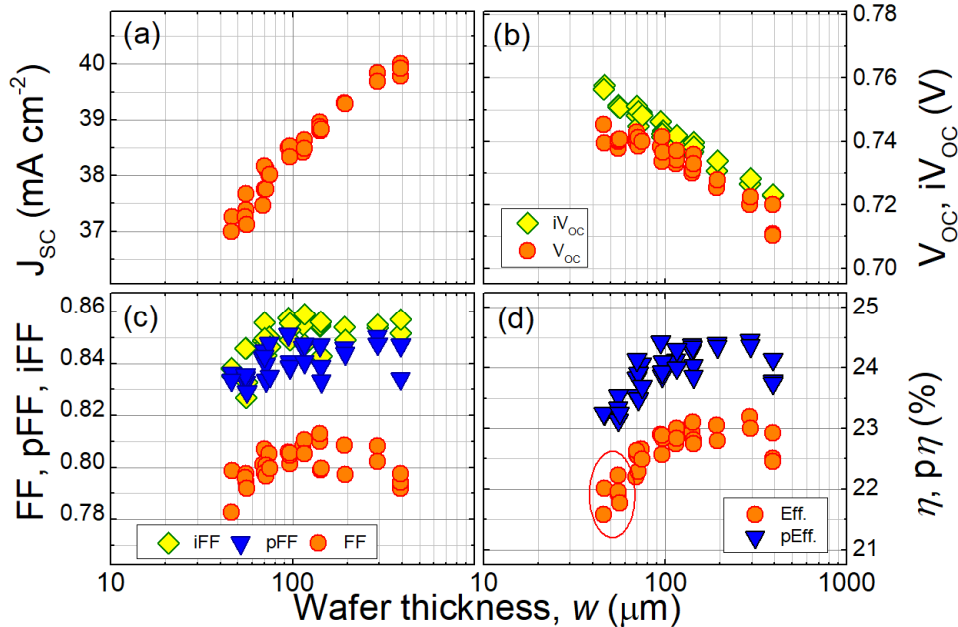
本図で示すようなウエハ厚と発電特性の詳細な比較検討結果は過去に例が無く、本研究開発によって初めて定量的に明らかとなった知見である。



図III-2-(ニ)-B-2. (左) ウエハ厚の異なるSHJセルのJ-V特性の比較。図中の板厚の右側に示す数字は、それぞれ V_{oc} と発電効率である。セル面積は 1cm^2 。(右) 本研究で作製したSHJセルの模式図。

本研究開発で得られたSHJセルと、これまで報告されてきた薄型セル(板厚 $\sim 50 \mu\text{m}$)の発電特性の比較を表III-2-(ニ)-B-1にまとめた。これまでに報告された重要な成果の一つは、米国Solexcel社が2012年に報告した、エピタキシャルリフトオフ法により形成した極薄Siウエハを用いた裏面電極型セルであり、板厚35 μm で発電効率21.2%を達成している(Moslehi, 2012)。裏面電極構造を用いる

ことで表面の遮光損失を減らし、高い J_{sc} が得られていることが特徴であるが、表面パッシベーションに改善余地があり V_{oc} は 0.687 V に留まる。最近では、SHJ セルが薄型ウエハに好適であるとの認識から、我々以外にも、米国やフランスの研究機関で薄型 SHJ セルの研究開発が活発に行われている。フランスの CEA-Liten ではフルサイズ薄型 SHJ セルの開発を進めており、最も薄いもので板厚 44 μm の SHJ セルを試作している。表に示すように、高い V_{oc} を実証しているが、 J_{sc} や FF に課題があり、結果として発電効率は 20% 前後に留まる。一方本研究開発では、小面積セルの検討ではあるものの、板厚 47 μm で発電効率 22.0% を達成し、板厚 50 μm 以下の c-Si セルとしては世界トップレベルの成果を得るとともに、極薄 c-Si セルの可能性をより高いレベルで実証することに成功した。



図III-2-(二)-B-3. 本研究開発で作製した SHJ セルにおけるウエハ厚と発電特性 (J_{sc} 、 V_{oc} 、 iV_{oc} 、FF、pFF、iFF、 η 、p η)。セル面積 4 cm^2 、反射防止フィルムを適用。

表III-2-(二)-B-1. 本研究開発で得られた薄型 SHJ セルの発電特性と、他の研究機関から報告結果の比較

Wafer thickness (μm)	J_{sc} (mA cm^{-2})	V_{oc} (V)	FF	η (%)	pFF
47 (this work)	37.3	0.739	0.799	22.0	0.836
55 (this work)	37.7	0.740	0.797	22.2	0.834
70 (this work)	38.2	0.743	0.798	22.6	0.843
44 (Danel, 2018)	36.09	0.748	0.734	19.8	-
63 (Danel, 2018)	36.06	0.751	0.752	20.4	-
35 (Moslehi, 2012)	38.50	0.687	0.803	21.2	-

<ウエハ厚さがセル特性に及ぼす影響と技術指針>

これまでの実験結果を踏まえて、薄型セルの可能性検証や技術課題を検証する。既報の c-Si セルの限界効率検討においては、ウエハ厚 50~500 μm の範囲でほぼ同程度の発電効率が得られると報告されている。一方、本研究開発で得た実験結果からは、発電効率は板厚 80 μm 程度から減少傾向を示した。その要因は、薄板化に伴う J_{sc} と FF の低下が大きいことである。これらについて数値計算等により追加の検討を行い、技術指針を検討した。

SHJ セルの光学挙動を光線追跡等で計算して光学損失要因を分析すると、ウエハ薄型化により、表裏面での吸収損失と光の再放出損失が増加することが確認された。後者は薄型化に伴って光吸収層の体積が減少すれば当然増加する損失であり、Lambertian Limit でも考慮されている。よって、Lambertian 光閉じ込めと比較して J_{sc} の減少量が增大する理由は、前者の光吸収損失（寄生吸収）であると結論付けられる。赤外域の寄生吸収の主要因は透明導電膜の自由電子吸収 (FCA) であり、これはキャリア濃度を下げる、あるいはキャリア移動度を挙げることで改善できる。実際、キャリア濃度を 1/2 に、キャリア移動度を 2 倍にした $\text{In}_2\text{O}_3\text{:H}$ 膜を SHJ セルに適用することによりウエハ薄型化に

伴う J_{sc} 減少を抑制できることを確認した。すなわち、FCA を抑制することで薄型 SHJ セルの発電効率の向上余地があることが明らかとなった。また、FF の損失について数値解析を行ったところ、薄型ウエハで高い iFF を維持するには、今回実験的に作製した SHJ セルに較べて表面再結合を 1/3 に抑制する必要があることが示唆された。すなわち、さらなる表面パッシベーションの向上により、極薄 SHJ セルの FF を向上でき、ひいては高効率化が実現できると期待される。

<液相結晶化法による結晶 Si の作製>

本テーマにおいては、自立型ウエハとしては、板厚 50 μm 程度までを検討対象としている。しかし、板厚 50 μm を下回るさらに薄い領域について検討を進めることで、より系統的な知見を得られると期待でき、将来技術を検討する上で有益である。このような観点から、支持基板の上に極薄 c-Si 層を形成するための技術開発を推進した。ガラス基板上に成膜したアモルファスシリコン (a-Si) 薄膜をライン状のレーザーあるいは電子ビームでスキャンすることにより瞬間的に熔融・固化する液相結晶化法 (Liquid Phase Crystallization: LPC) に着目した。本研究では、PECVD 法でボロシリケートガラス上に製膜した a-Si 膜に対して CW ラインレーザー (波長 804nm、スポットサイズ $12 \times 0.07 \text{ mm}^2$) でスキャンを行うことで、結晶化を行った。この際に、意図的に P を含有させた a-Si を用意することで、同時に P 拡散を行って極性やキャリア濃度の調整を行った。その結果、スキャン速度 $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ で粒径が最大化し、それ以下のスキャン速度ではむしろ粒径が小さくなった。さらに粒径と少数キャリア寿命に良い相関があることを見出した。

<界面評価技術の開発>

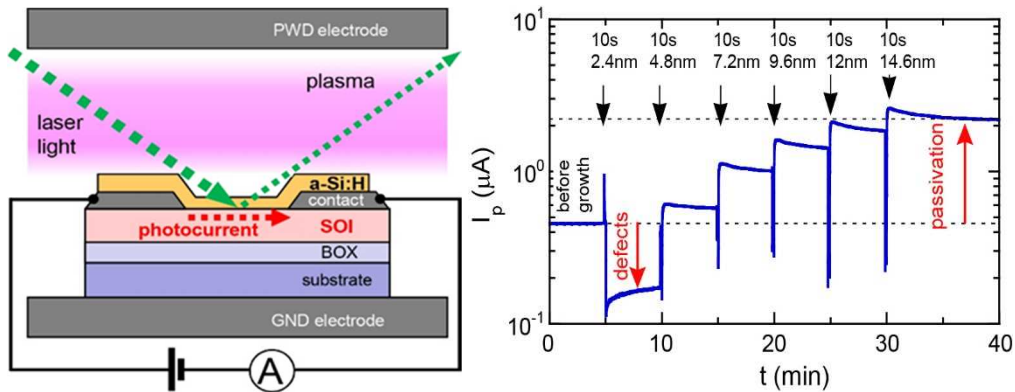
c-Si 太陽電池の高効率化には、Si 表面における欠陥終端、即ち、表面パッシベーションが極めて重要であり、通常、a-Si:H やシリコン窒化膜が用いられる。しかしながら、更なる性能向上を目指すにあたり、欠陥の発生と修復に関する知見が得られておらず、新たなプロセス開発の指針を得ることが難しい状況であった。そこで、本研究では、パッシベーション膜形成時の界面欠陥をその場でリアルタイムに検出する技術を開発した。

図 III-2-(二)-B-4 に、界面欠陥の検出法の概要および実験結果の一例を示す。プラズマ CVD 法を用いた a-Si:H 成長時に Si 基板に流れる光電流をその場で測定した。太陽電池を模擬するシリコン基板には silicon-on-insulator (SOI) を用いた (p 型、10-100ohm cm、活性層膜厚 250nm、表面研磨<100>配向)。可視光レーザー (520nm、1 mW 出力) を SOI に照射し、励起された光キャリアを SOI 表面に形成された電極 (ITO/Ag/ITO) で捕集した。電極は一对のコプラナー型電極で、10V のバイアスを印加して行った。実際の光電流の測定は、プラズマ製膜中で行うため、レーザー光の光強度を時間変調させ、それに同調する光電流の振動成分をロッキングアンプにより検出した。a-Si:H の製膜は、成長温度 160°C、圧力 0.3 torr、 SiH_4 と H_2 ガスの比率 5:1、放電電力 39 mW/cm^2 にて行った。本製膜条件中での光電流の測定結果の一例を図 III-2-(二)-B-4 に示す。成膜は 2.4 nm ずつ 6 回に分けて実施した (図中の矢印部分)。製膜回数の増加 (a-Si:H の厚膜化) に伴い光電流が増加し表面パッシベーションが向上する様子が確認できた。また、光電流は a-Si:H 膜成長時に減少し、成長後のアニール時に一旦急激に増加し、その後ゆっくりと減少する傾向を示した。この光電流の時間変化は、次の様に解釈できる。(i) 膜成長時は、a-Si:H/SOI 界面及び a-Si:H 膜中に欠陥が発生し光電流は減少する。(ii) 成膜直後、欠陥は熱アニールにより終端され光電流は急激に増加する。(iii) アニールの継続によって、界面及び膜中の弱い結合が解離、もしくは、一部の水素が脱離し欠陥が発生し光電流が少し減少する。

同様の実験を、製膜温度や SiH_4 と H_2 ガスの比率を変えて実験を多数回行った。それらの結果を踏まえると、欠陥の発生及び修復に関する以下の知見を得ることができた。①パッシベーション膜の成長初期 (約 3nm 程度以下) に水素原子拡散に伴う欠陥がシリコン基板内に発生する。このシリコン内のバルク欠陥は低温アニールでの回復は困難である。②パッシベーション膜の厚膜化に伴い、シリコン基板内での欠陥発生は抑制され、代わりにパッシベーション膜内に水素原子起因の欠陥が発生する。このタイプの欠陥は、低温アニールによりほぼ完全に修復される。③製膜直後のアニールにより、界面近傍の欠陥は修復される。しかしながら、界面ストレスが高い場合、アニールの継続により、むしろ界面欠陥が増加する。

以上の知見を踏まえると、界面欠陥の低減にむけた技術的課題は以下の通りである。①パッシベーション膜の成膜初期における水素起因のシリコン基板内の欠陥を抑止すること、②パッシベーション膜の低欠陥化を図ること、が必要である。これらの技術的課題を解決する手法の一例として、二段階成膜法を採用し、その有用性を検証した。具体的には、一段階目のパッシベーション膜の成膜に、純シラン製膜を行い、エピタキシャル成長を抑止するとともにウエハ内の水素原子起因の欠陥発生を最

小限に留めた。二段階目の成膜では水素希釈シラン原料を用いて製膜し、パッシベーション膜の低欠陥化を図った。これにより、ウエハ内のキャリアのライフタイムが向上し、太陽電池効率が向上することを検証した。製膜条件等の最適化を行い、効率 21.8%での界面欠陥抑止に関する技術課題の解決策の一例を示すことができた。



図III-2-(二)-B-4. (右) 光電流のその場計測。a-Si:H 成膜中に SOI 内の光電流を計測し欠陥を評価
(左) a-Si:H 成膜及びアニール時の SOI 内部を流れる光電流の時間発展。成膜 (図中の矢印で記載) は 6 回に分けて実施した。

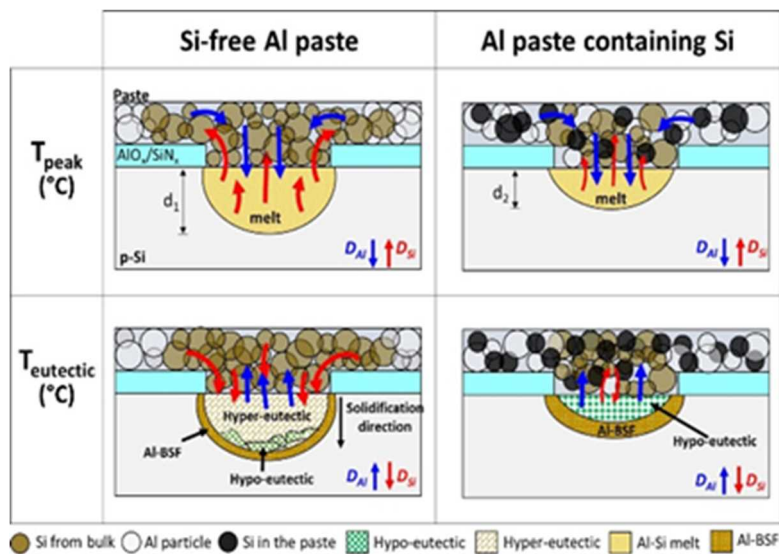
1-2. 高効率・低コストセルプロセスおよび高効率・高信頼性モジュールの開発 (京セラと株式会社の連携)

<高効率・低コストセルプロセス技術>

太陽電池セルおよびモジュールを製造販売する京セラ株式会社と連携し、同社の産業競争力の強化に資する、高効率で信頼性の高いモジュールの実現に向けた技術開発を行った。

セルプロセスに関しては、産総研では PERC セルの特性向上のための技術開発を行った。特に、PERC セルの裏面側の特性の評価および裏面電極部 (局所 Al-BSF 領域) の形成過程の検討を進めた。裏面電極部を形成するための Al ペーストに Si を含有させることで、Al-BSF 層の厚さが厚くなるとともに、Al-Si 反応領域の深さを Si 成分無しの場合に比べ約半分の深さに、Al-BSF 領域内の空孔量を Si 含有無しの場合の約 25%から 5%まで抑えることができた。Al ペースト内の Si 成分は電極焼成・冷却による Al-Si 共晶反応時に基板から Al ペーストへ向かう Si 拡散を抑える働きがあると考えられる。これらを基に、Al ペースト印刷・焼成工程における Al-BSF 領域形成のメカニズムを明らかにするとともに、裏面電極部の特性向上への指針を得た (図III-2-(二)-B-5)。

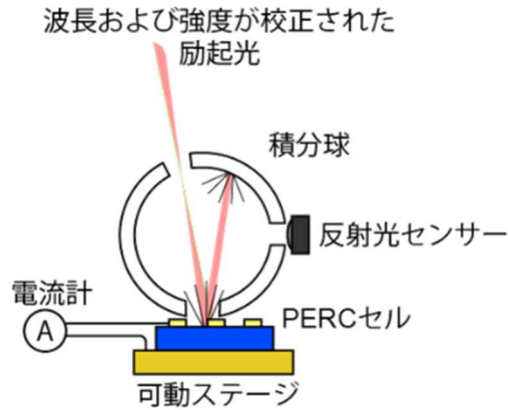
さらに、京セラとは、京セラの標準工程をベースとして、FREA のプロセス工程とを入れ替えることで相互のプロセス評価を実施することで、高効率化に向けたセルプロセスの改善項目を明確にすることができた。



図III-2-(二)-B-5 Al-BSF 領域形成のメカニズム。Si を含有した Al ペーストの方が良好な BSF 層が形成される。

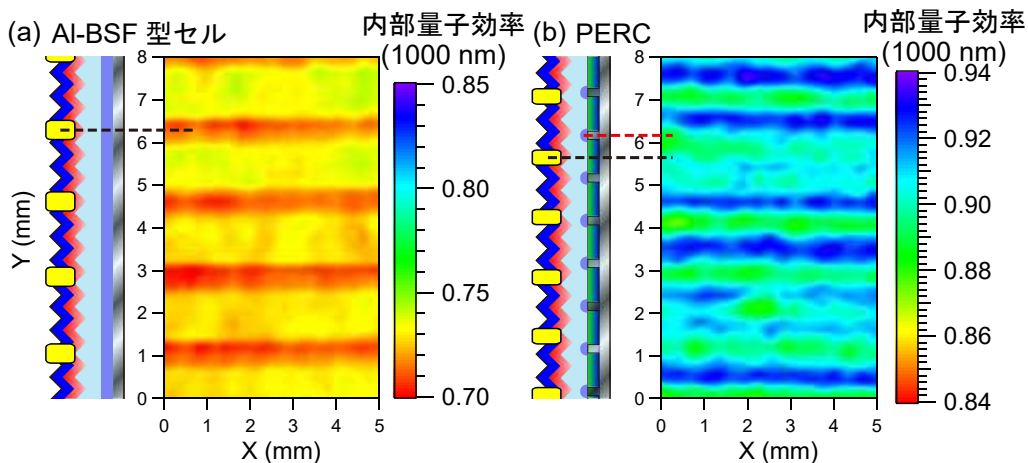
<内部量子効率マッピング法による太陽電池評価法>

従来、内部量子効率は試料全体あるいは試料中のかなり大きな領域の平均が測定され、面内方向の分布は評価されなかった。このため、空間平均の影響でミリメートル程度の小さな構造が作りこまれる PERC 型を始めとした新型の太陽電池の問題箇所の特定が出来ないという問題があった。産総研では、波長および強度がわかっている単色光を 0.2mm のスポット径で太陽電池試料に照射し、拡散反射を含めた全反射を積分球で正確に測定しながら光電流を測定することで励起スポット位置での内部量子効率を測定し、さらに、可動ステージで測定位置を変更ながら内部量子効率の測定を繰り返すことでマッピングを行うことができる新しい手法を開発（内部量子効率マッピング法）した（図Ⅲ-2-(ニ)-B-6）。



図Ⅲ-2-(ニ)-B-6 内部量子効率のマッピング法の測定系。外部量子効率と反射率が同一の点で同時に図れるため、内部量子効率を正確に測定できる。

（図Ⅲ-2-(ニ)-B-7）は Al-BSF セル及び PERC セルの IQE をマッピングした結果である。波長 1000 nm の IQE は Al-BSF が 74% なのに対し PERC は 1000 nm で 94% と高く、裏面のパッシベーションが良好であることが V_{oc} の向上に寄与していることがわかった。このように小スポット径での励起光により太陽電池の部量子効率を高精度で測定できるようになり、これを以って太陽電池のサブミリ程度の大きさの構造が太陽電池の性能にどの程度影響を与えているかを見積もれることが示された。



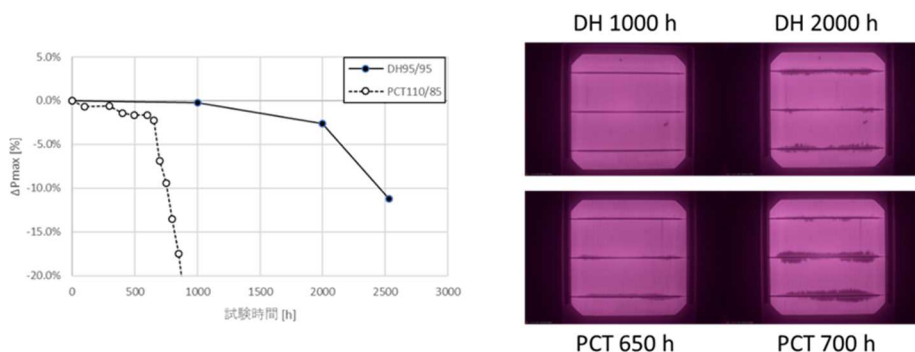
図Ⅲ-2-(ニ)-B-7 Al-BSF セル及び PERC セルの IQE をマッピングした結果。波長 1000 nm でスキャンしているののでセルの裏面側の情報が得られている。

<高効率・高信頼性モジュール技術>

結晶 Si PV モジュールの故障シナリオにおいて、モジュールの最大使用寿命を与えるのは、湿熱ストレスによる電極腐食故障であると考えられている。この電極腐食故障は、PV モジュールの標準的な封止材である ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) の加水分解により発生した酢酸が、フロントコンタクト（銀電極）内部のガラスフリットを侵食し、セル-コンタクト間の直列抵抗を増加させることで引き起こされるということが広く受け入れられている。

通常、湿熱ストレス試験は、damp heat (DH) 試験で行われるが、我々はより試験時間を短くするために、Pressure Cooker Test (PCT) を用いた試験を行った。電極腐食故障において、電極が腐食した箇所

は、Electroluminescence (EL) 観察において暗部として観察される。図Ⅲ-2-(ニ)-B-8 に示すように、DH 試験と PCT とで劣化モードが変わることなく、PCT の方が劣化をより短期間 (約 1/3) で再現することを確認した。



図Ⅲ-2-(ニ)-B-8 DH 試験 (95°C/95%RH) および PCT (110°C/85%RH) により劣化させたモジュールの Pmax の推移と EL 像

EVA の加水分解を引き起こす水分は、湿熱ストレス環境に暴露された PV モジュールのエッジや配線取り出しスリットから侵入するため、それらの箇所から広がる EL 暗部が観察されている。しかし、我々が行った PCT/EL 観察では、従来のエッジから広がる暗部ではなく、モジュールのインターコネクタ(セル間を接続し電流を取り出すための配線)から広がる暗部が確認された (図Ⅲ-2-(ニ)-B-8)。同様の劣化パターンは、95°C/95%RH 環境での DH 試験でも発生することを確認した。

よく知られているエッジからの劣化と異なり、インターコネクタからの劣化パターンは、従来の水分の侵入と発生した酢酸による電極腐食メカニズムだけでは十分説明できない。そのため、従来のエッジからの劣化を near-edge 劣化、インターコネクタからの劣化を near-IC 劣化として区別し、その詳細を調査した。その結果、near-IC 劣化メカニズムのとして、図Ⅲ-2-(ニ)-B-9 に示すような、ガルバニック腐食のカソード反応による Sn 化合物被覆 Ag 電極での界面ガラス層の優先的劣化を初めて提案した。劣化のメカニズムは下記の通りである。

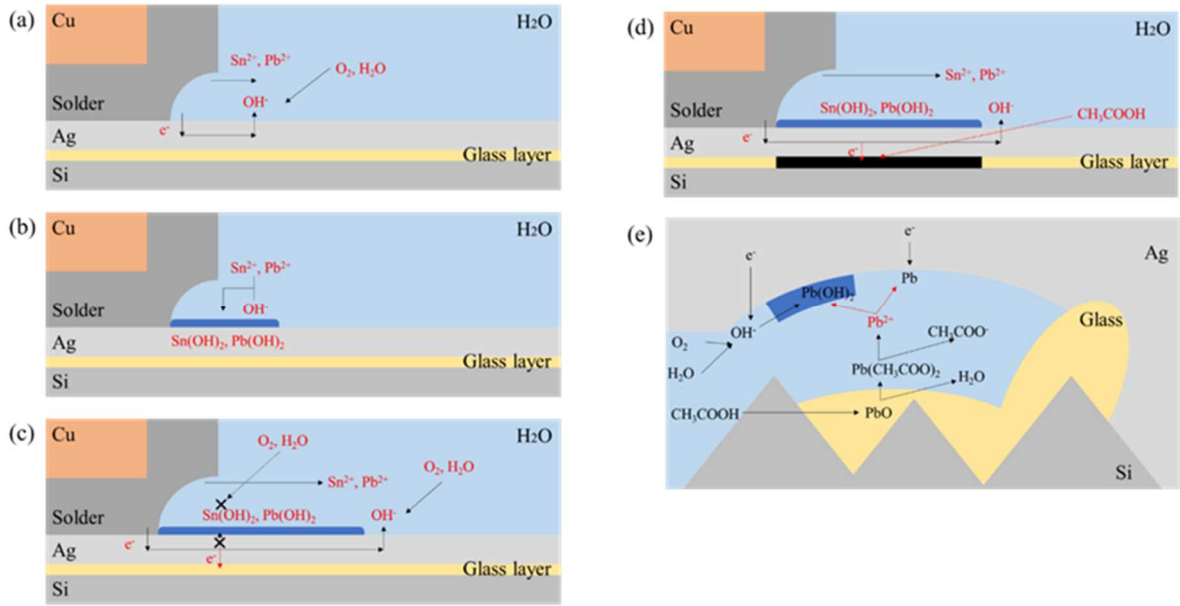
I. 湿熱ストレスにより、モジュール中に水分が侵入し、インターコネクタ被覆はんだと Ag バスバー電極との間でのガルバニック腐食により、はんだが溶出する(アノード反応)。その一方で、カソード反応として、水と溶存酸素が Ag 電極表面で電子を受け取り、OH⁻イオンが発生する。

II. 液中に溶出した Sn²⁺と Pb²⁺が、Ag 電極表面から発生した OH⁻イオンと反応して、腐食生成物を作り Ag 電極表面に析出する。

III. ステップ b の反応が進行するが、腐食生成物で覆われた Ag フィンガー電極ではカソード反応に必要な O₂, H₂O と e⁻が結びつくことが阻害され、腐食生成物の析出が止まり、腐食生成物での被覆はインターコネクタから離れた Ag フィンガー電極へと範囲が広がる。

IV. 一方で、Ag 電極表面が腐食生成物に覆われた箇所では、消費されなかった一部の e⁻が、界面ガラス層での反応で消費されるようになる。

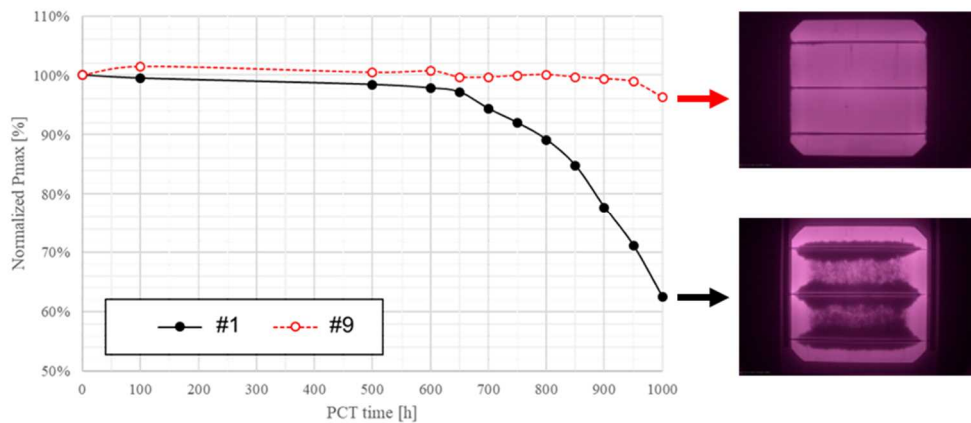
ステップ d における Ag フィンガー電極/Si 界面での反応。界面ガラス層の成分である PbO が酢酸によって溶解し Pb²⁺の形で溶出するが、この反応サイクルにガルバニック腐食のカソード反応により発生する電子が関与することで、Pb²⁺を還元、あるいは電極ポア部分で OH⁻イオンを作ることによって Pb(OH)₂の形でポア内壁へ析出させ、ポア内部の Pb²⁺の濃度を下げ、PbO 溶出反応サイクルを加速させる。



図Ⅲ-2-(二)-B-9 提案されたガルバニック腐食による Sn 化合物被覆 Ag 電極での界面ガラス層の優先的劣化メカニズムの模式図。

Near-IC 劣化に及ぼすモジュール部材と構造の影響の調査から、湿熱劣化に対する耐久性を向上させるためには、鉛フリーはんだ、CF タブ付、ガラス-ガラス構造の使用が有効であることを示した。

図Ⅲ-2-(二)-B10 は、従来型モジュール（鉛はんだ、はんだタブ付け、ガラス-バックシート構造）である#1 と、上記の 3 要素を使用し耐久性を向上させたモジュールである#9 に対する PCT による最大出力 P_{max} の推移、および 1000 h の PCT の後での EL 像を示している。従来型モジュール#1 は、600 h 以降で near-IC 劣化の広がりに対応した FF および P_{max} の低下を示し、1000 h の PCT の後では初期 P_{max} から約 40% の低下を示す。それに対し、モジュール#9 は、1000 h の PCT の後でも初期 P_{max} からの低下は 5% 以下であり、EL 像も電極の顕著な劣化を示しておらず、PCT での湿熱劣化に対する耐久性が向上していることがわかる。 P_{max} が初期値から 5% 低下するまでの時間を寿命の目安とすると、耐久性向上モジュールの PCT での湿熱劣化寿命は、従来型モジュールと比べて約 1.5 倍に増加した。



図Ⅲ-2-(二)-B-10 従来型モジュール（#1）と耐久性向上モジュール（#9）に対する PCT での最大出力 P_{max} の推移、および 1000 h の PCT の後での EL 像。

また、京セラ作製のモジュールについて各種の単体/複合ストレス試験を行い、上記の成果を含めた劣化メカニズムの解析を行うとともに、京セラの UV+湿熱ストレスに基づいた寿命予測手法の開発に貢献した。これらの成果を基に共同で特許(国内および PCT)を出願した。

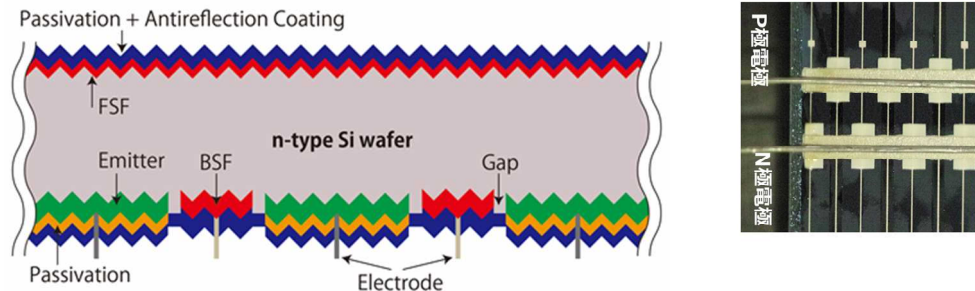
これにより、京セラが開発したモジュールが、国内市場 35 年相当以上の UV+湿熱ストレスに対して十分な耐久性を有していることを実証することができた。

1-3. 高効率・低コストセルプロセス技術および薄型セルを用いた高信頼性高効率モジュール技術 (共通基盤技術)

＜スクリーン印刷法を用いた裏面電極型結晶シリコン太陽電池＞

従来の裏面電極型セルは、高効率を優先にしたため、蒸着やメッキの技術を用いたものが多く、高コストなため必ずしも市場に受け入れられているとは言えない。このため、本開発では、PERCセルの設備・作製プロセスをなるべく変更することなく高効率な裏面電極型セルを実現することを目的とした。このため、通常の下面電極型結晶シリコン太陽電池に使用される蒸着法などに比べてスループットが高く安価で作製することが期待できるスクリーン印刷法を用いた電極形成技術を検討した。

また、年間発電量を向上させるため、図III-2-(ニ)-B11に示すような両面受光タイプのセル構造とした。

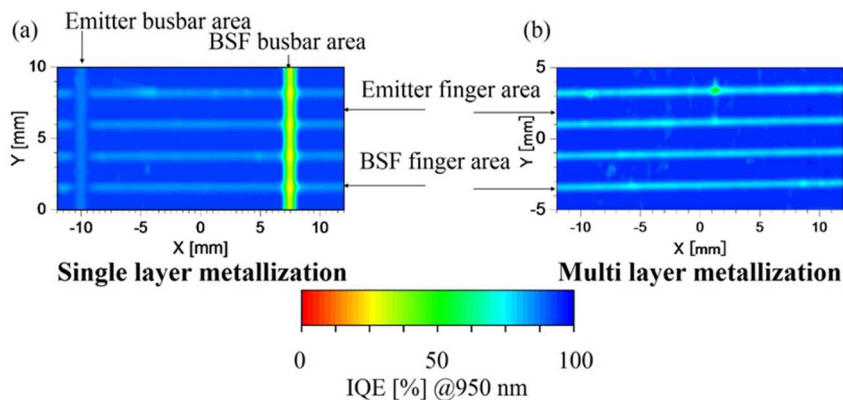


図III-2-(ニ)-B-11 両面受光一裏面電極型セルの構造(左)とセルの表面側に写真(右)。セルの表面側には電極がない構造となっている。

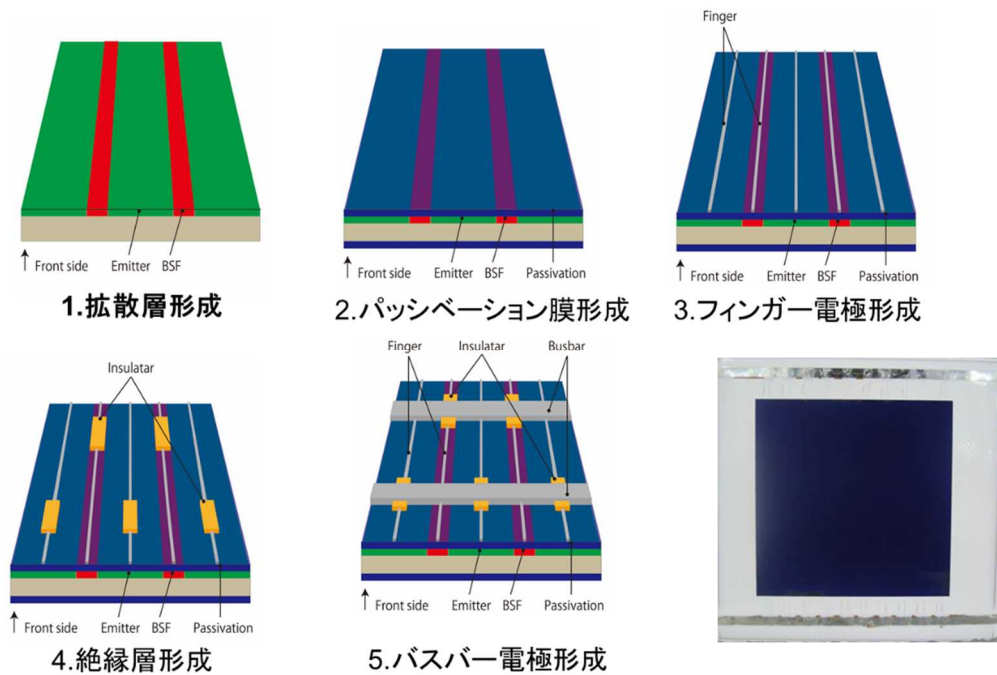
両面受光-裏面電極型結晶シリコン太陽電池において、BSF領域での電氣的遮蔽損失がセル特性を制限している原因の一つである。セル特性の改善のためには、BSF領域、特にバスバー部分での電氣的遮蔽損失の抑制が課題となる。本研究では、電極形成工程において、ファイヤースルーペースト、絶縁ペースト、ノンファイヤースルーペーストを組み合わせることで、BSFバスバー領域における電氣的遮蔽損失の抑制を試みた。

電極形成およびpn接合パターンの異なる2つのセルを作製した。1つはファイヤースルーペーストのみを使用して作製し、もう1つはファイヤースルーペースト、絶縁ペースト、ノンファイヤースルーペーストを組み合わせることで作製したセルである。

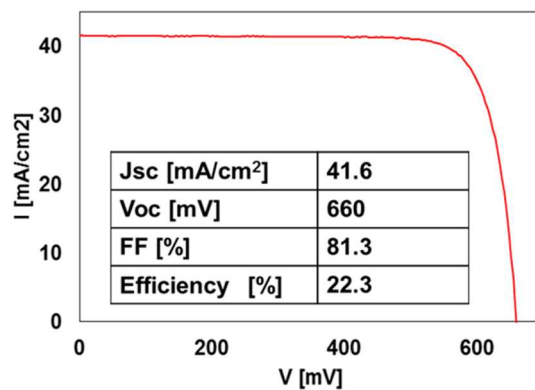
それぞれのセルのバスバー領域を含む位置での内部量子効率マッピング測定結果を図III-2-(ニ)-B12に示す。ファイヤースルーペーストのみで作製したサンプルではバスバー部分特にBSF領域において内部量子効率が低い値を示していることがわかる。対して、ペーストを組み合わせることで作製したサンプルでは、フィンガー領域のパターンのみが確認でき、バスバー部分での内部量子効率の低下は見られない。以上の結果から、ファイヤースルーペースト、絶縁ペースト、ノンファイヤースルーペーストを組み合わせることで、BSF領域、特にバスバー部分での電氣的遮蔽損失を抑制することが可能となることが分かった。



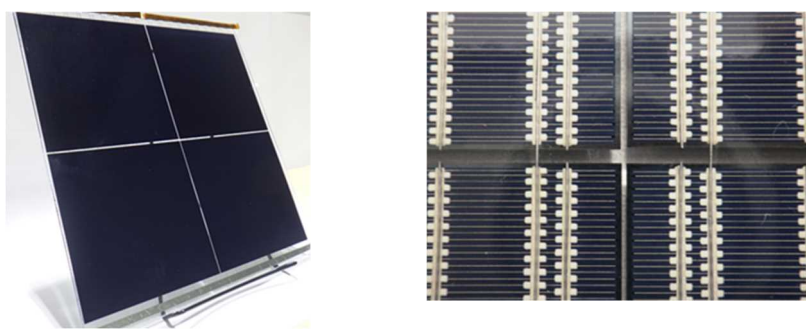
図III-2-(ニ)-B-12 異なるプロセスで作製したセルの内部量子効率マッピング。バスバー電極の下の拡散層領域で量子効率が低下している(左)。拡散層領域がないセル(右)では良好な特性が得られることがわかった。



図III-2-(二)-B-13 両面受光-裏面電極型セルの作製プロセスと裏面側の写真(右下)



図III-2-(二)-B-14 作製した両面受光-裏面電極型セルの電流—電圧特性



図III-2-(二)-B-15 両面受光-裏面電極型セルを用いて作製したモジュール(セル：4枚)
表面側の写真(右)および裏面側の写真(左)。細線ワイヤを用いてセル間の配線を行っている。

これらの結果を基に、両面受光—裏面電極型セルを作製した。セルの作製プロセスを図III-2-(二)-B-13に示す。要素プロセスの改善を進め、これまでにセル変換効率22.3% (図III-2-(二)-B-14)を達成した。両面特性は最大で0.84程度であった。さらに、開発した両面受光—裏面電極型セルを用いて4セルモジュールを作製し (図III-2-(二)-B-15)、変換効率19.4%を得た。

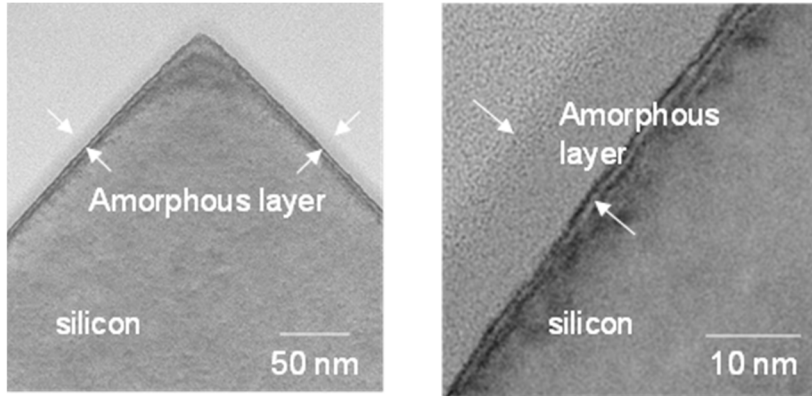
裏面電極型セルを用いたモジュールの変換効率については、目標を達成することはできなかったが、低コストのための簡易プロセス要素技術指針、モジュール高効率化のための技術指針については新しい知見を提示することができた。

<結晶シリコン太陽電池におけるイオン注入技術の開発>

イオン注入とステンシルマスク（注入マスク）を利用した裏面電極型セルのセルフアラインプロセスの開発を行った。ステンシルマスクを用いることで、フォトリソグラフィなどを用いなくてもリン（P）やボロン（B）の拡散領域のパターニングが容易になるため、プロセスの簡略化が期待できる。

最初に、イオン注入の注入条件とその後のアニール条件の検討を行った。

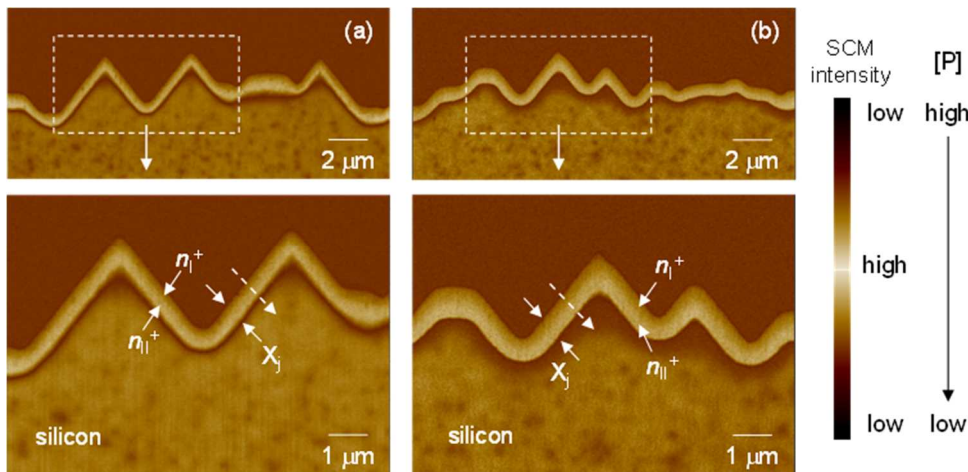
結晶シリコン太陽電池基板の表面には 4 つの(111)面で囲まれたテクスチャ構造が形成されているため、テクスチャ構造においても均一な深さの拡散層の形成が必要である。イオン注入条件の検討を行い、図Ⅲ-2-(ニ)-B-16 示すような均一な厚さのアモルファス層（リンの注入層）を形成した。



図Ⅲ-2-(ニ)-B-16 テクスチャ表面へリンイオンを注入したときに形成されたアモルファス層

イオン注入プロセスにおいて注入条件と同じく重要な技術が熱処理である。イオン注入によって形成されたアモルファス層は熱処理に伴う固相成長によって結晶層へ回復し、リンなどの注入元素はシリコン基板内へ拡散しつつ置換型位置へ配置されドーパントとしての役割を果たす。この時、窒素や酸素といった熱処理の雰囲気によってドーパントの表面偏析あるいは内方拡散の促進が生じ、ピークや深さが異なる様々なプロファイルを形成することが可能である。図Ⅲ-2-(ニ)-B-17 はリン注入後の活性化アニールを窒素雰囲気とウェット酸化雰囲気で行ったときのリン拡散層の走査型容量顕微鏡像である。

テクスチャの凹凸に沿った均一な深さのリン拡散層が形成されている。窒素雰囲気と比較してウェット酸化雰囲気では接合（図中 X_j ）が深く、酸化膜への偏析により表面リン濃度が高くなっている。これにより J_{sc} 、 V_{oc} が高くなり、リン注入による A1-BSF 型セルとしては世界最高の変換効率(19.4%)を達成した（2017 年発表当時）。

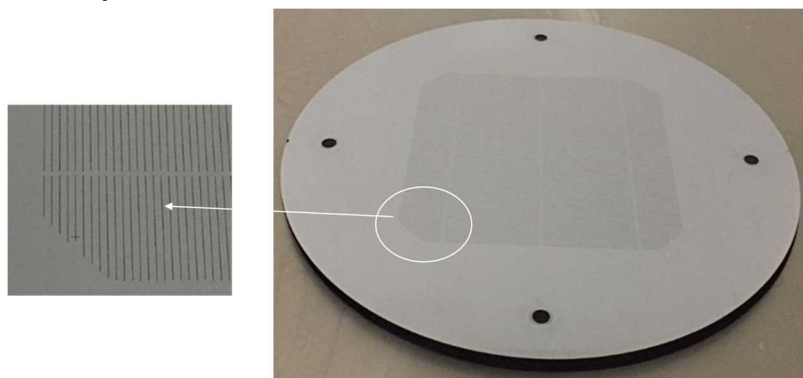


図Ⅲ-2-(ニ)-B-17 A1-BSF 型セルのリン注入の活性化アニールを(a)窒素雰囲気と(b)ウェット酸化雰囲気で行ったときの走査型容量顕微鏡像。 X_j が接合深さである。

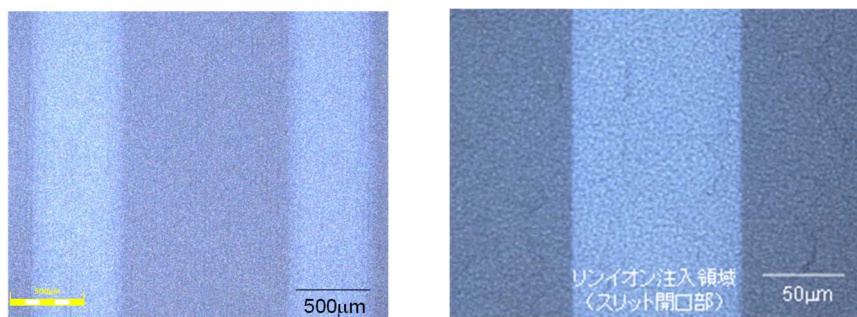
ステンシルマスクの開発において、当初は成型が容易なカーボン製マスクを使用した。図Ⅲ-2-(ニ)-B-19(左)はカーボン製マスクを使用してリン注入を行ったときの基板表面のレーザー顕微鏡像である。注入された領域にはアモルファス層が形成されているため、レーザー顕微鏡像から注入領域を識別する

ことが可能である。図Ⅲ-2-(ニ)-B-19(左)において、コントラストが明るい縦方向の線がリンの注入領域である。このカーボンマスクを使用したときの注入幅は 500 μm であるが、カーボンの加工精度から最小でも 200-300 μm が限界である。さらに注入領域と未注入領域の境界がぼやけており、注入領域のエッジラフネスが非常に大きい。これはマスクの加工精度に起因するものである。マスク材料にカーボンを用いる限りこのラフネスは改善できないため、マスク材料そのものを見直す必要があった。

今回新たに半導体のドライエッチング技術を用いて直径 300 mm のシリコン基板 (厚さ 775 μm) に貫通穴加工を施し、注入マスクとした。図Ⅲ-2-(ニ)-B-18 は本研究で作製した太陽電池業界初のシリコン製注入マスクである。スリット幅は 100 μm であり、従来のおよそ 1/3 の幅まで狭めることができた。図Ⅲ-2-(ニ)-B-19(右) は本マスクを用いてリン注入を行ったときのレーザー顕微鏡像である。注入領域の幅も約 100 μm のラインパターンが形成されており、さらに注入領域と未注入領域の境界はカーボンマスクを使用して注入したそれに比べてシャープであることが分かった。また、レーザー顕微鏡の測長機能を使い任意の 19 箇所での注入領域の幅を測長した結果より、注入幅のバラツキは 2 μm 程度に抑えられることがわかった。

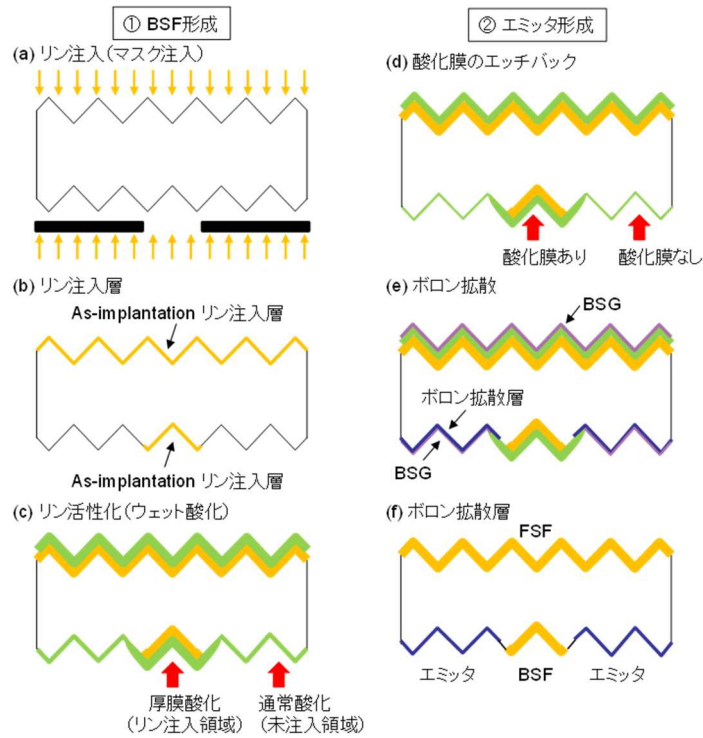


図Ⅲ-2-(ニ)-B-18 300mm シリコン基板にスリット加工を施した業界初のステンシルマスク

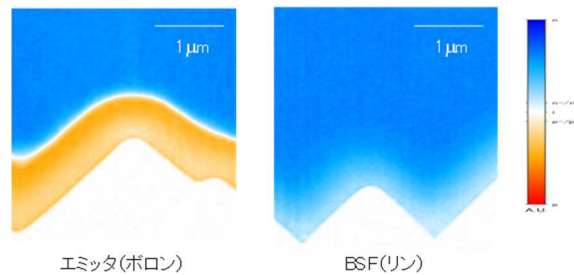


図Ⅲ-2-(ニ)-B-19 カーボン製マスク (左) とシリコン製マスク (右) によるリン注入像。シリコン製のマスクによって注入領域の細線化と線幅のばらつきを抑えることができた。

図Ⅲ-2-(ニ)-B-20 は本研究において提案したセルフアラインプロセスフローである。図Ⅲ-2-(ニ)-B-19 に示すようにこのマスクを用いてスリットの開口部すなわち BSF 領域にリンイオンを注入した後、リン活性化のためのウェット酸化を施した。リン注入層の酸化レートは非常に大きいため、BSF のリン注入層には厚い酸化膜が形成される。この特徴を活かして酸化膜をエッチバックすると、リン注入領域のみに酸化膜が残る。BSF 上に残る酸化膜をマスクとして、リンの未注入領域のみにボロンを拡散した。図Ⅲ-2-(ニ)-B-21 はエミッタ領域と BSF 領域の走査型容量顕微鏡像である。エミッタ領域にはボロン層が、BSF 領域にはリン層が形成されている。これにより一枚のマスク注入プロセスでリン層 (BSF) とボロン層 (エミッタ) の形成が可能となった。



図Ⅲ-2-(ニ)-B-20 本研究において提案したセルフアラインプロセスフロー。



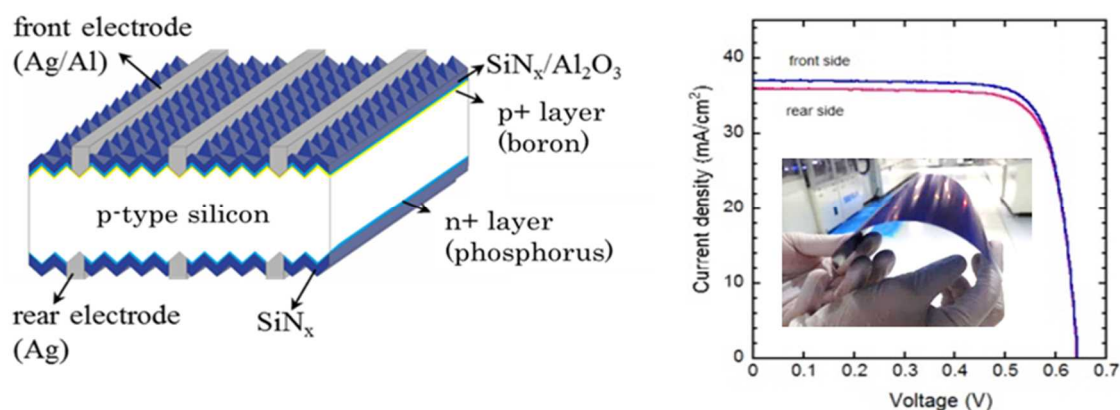
図Ⅲ-2-(ニ)-B-21 エミッタ領域とBSF領域の走査型容量顕微鏡像。ステンシルマスクが一枚の場合でも、エミッタ領域とBSF領域にボロンとリンとをそれぞれ注入することができる。

<薄型セルを用いたモジュール化技術の開発>

太陽電池の低コスト化のためには、変換効率を低下させることなく、セルを薄型化することが有効であるが、セルの薄型化によって、作製工程途中でのセルの割れや欠けが発生しやすく生産歩留まりが落ちてしまう懸念がある。このため実際に薄型ウエハを用いて、セル及びモジュールの作製を行い、セルやモジュールの作製プロセスの各工程における問題点を抽出した。

薄型セルとして、セルの厚さ $80\mu\text{m}$ のP型、両面受光一裏面接合型セルを作製した。作製したセルの構造を図Ⅲ-2-(ニ)-B-22左図に示す。両面受光型にすることで、受光面 (p^+ 層側) と裏側 (n^+ 層側) の電極パターンを同じパターンにすることが可能となるため、電極焼成後のウエハの反りを低減することができる。さらに、両面受光型にすることで裏面側から入射した光によっても発電がなされるので年間を通じた実効的な発電量の増加を図ることができる。一般的に、このタイプの両面受光型セルは、n型ウエハを用いることが多いが、今回は、コスト低減を図る観点からP型ウエハを使用し、pn接合は裏面側にある裏面接合型セルを作製した。

作製したセルの代表的な電気的特性を図Ⅲ-2-(ニ)-B-22右図に示す。受光面側の変換効率 18.7%、裏面側の変換効率 18.1%が得られた。セルが薄いため J_{sc} が低下しているが、 V_{oc} は通常のN型両面受光セルと同程度であった。また、P型のウエハを用いているが、表面側と裏面側との変換効率の比 (バイフェイシャリティ) は、96.8%と高い値を示した。

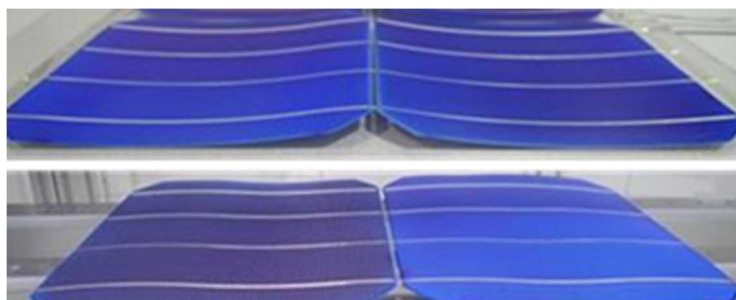


図Ⅲ-2- (二) -B-1-22 厚さ $80 \mu\text{m}$ 、P 型両面受光裏面接合セルの構造(左)と電気的特性(右)

今回、市場品のセルの厚さの約半分の厚さ ($80 \mu\text{m}$) のセルを 60 枚作製することで、現状のプロセス工程の各工程での歩留まりを調べた。SiN 膜成膜装置の搬送系の問題(薄型セルに対応できていない)により、SiN 膜の成膜工程において歩留まりが大きく低下しているが、その他のプロセスでは極端な歩留まりの低下は見られなかった。その各工程でもセル割れはほぼ搬送系のトラブルによるもので、 $80 \mu\text{m}$ の厚さのセルでは、薄型ウエハに対応したウエハの搬送系の検討が必要であることがわかった。また、両面受光セルは、構造上表裏対称なのでセルの反りは殆どないが、この薄さでは、自重でたわみが発生するため、セルカセットの構造の検討も必要である。

次に、作製された厚さ $80 \mu\text{m}$ のセルを用いて、セル数 4 枚のモジュールを作製し、薄型セルのモジュール化における課題の抽出を行った。

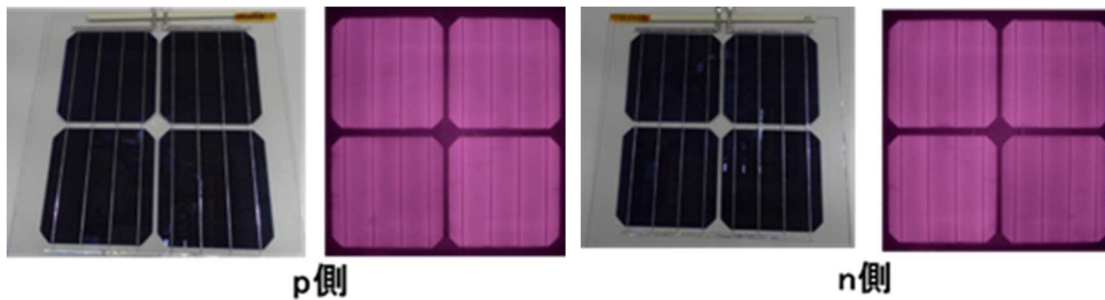
セル間の配線工程(タブストリング作製工程)においては、インターコネクタとセルの接続を半田で行った場合、セルにかかる応力が高いことが見込まれたので、導電性フィルム(conductive film(CF))を用いてセルを直列に接続した。しかしながら、厚さ $80 \mu\text{m}$ の薄型セルの場合、CF を用いても配線時生じる応力にセルが耐えられず大きくセルが反ってしまうことがわかった(図Ⅲ-2-(二)-B-23)。セルの反り方は作製条件によって異なるが、今回は、ストリング作製時の CF の加圧時の温度・加圧条件などの条件をあわせることで反りの低減を図った。一方、この後のラミネート工程においては、セルの割れ欠けは発生しなかった。このため、モジュールの作製工程においては、タブストリング工程の改善が必要であることがわかった。



図Ⅲ-2-(二)-B-23 タブストリング時のウエハの形状の一例。セルが薄いため、配線時の応力によりセルの反りが生じている(コマツ NTC との共同研究)。

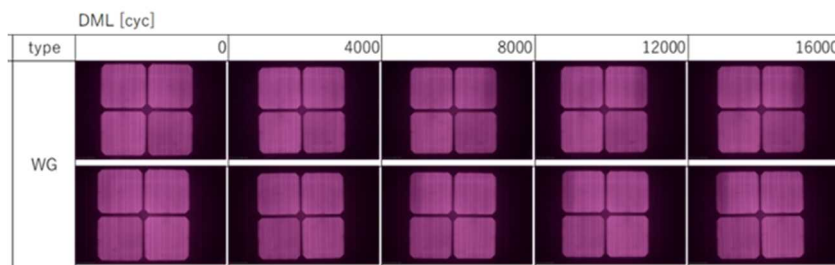
このようにセルの厚さが $80 \mu\text{m}$ となると、セル作製時のセルの割れや欠けとともに、モジュール作製における配線工程でのセルの反りが問題になることを、コマツ NTC とともに明らかにした。本実験から、現状のモジュール作製装置をそのまま厚さ $80 \mu\text{m}$ の薄型セルに適用することは困難であり、薄型セルに適したストリング方法の検討が必要である。

次に、セル間配線が良好なストリングを用いて 4 セルのモジュールを作製した。作製されたモジュールは、厚さ 0.85 mm のガラスを用いており、ガラス/EVA/セル/EVA/ガラス構造(ダブルガラス構造)とした。図Ⅲ-2-(二)-B-24 に外観写真と EL 画像を示す。本モジュールでは、セルの割れ欠けもなく良好な EL 画像が観測された。モジュールの変換効率は、受光面側(p⁺側)が、16.5%、裏面側(n⁺側)が 16.6% となり、セルに比べて約 2% 変換効率の低下がみられた。



図Ⅲ-2-(ニ)-B-24 作製したモジュールの写真と EL 画像

さらに、作製したモジュールを用いて機械的荷重試験（DML 試験）を行い、±4000Pa（1 サイクル 1 分）の正負の荷重をかけることで、モジュール内の配線不良やセルの割れなどを調べた。16000 サイクルまで試験を実施したが、受光面側（p⁺側）の FF の低下により、P_{max} が 8000 サイクル以降で 1%程度低下した程度で、J-V パラメータに大きな低下は見られなかった。図Ⅲ-2-(ニ)-B-25 に示すとおり、EL 像は、顕著なセルの割れや欠けなどは見られず、従来のセルと同等の特性を示している。



図Ⅲ-2-(ニ)-B-25 DML 試験における EL 画像

以上より、セルを薄くした場合は、セルの割れ欠けへの対策が必要であるが、それ以上に、モジュール作製でのセルの反りが問題になることを明らかにした。本実験から、現状のモジュール作製装置をそのまま厚さ 80 μm の薄型セルに適用することは困難であり、セル面積を小さく（ハーフカットセルなど）するか、薄型セルに適したストリング方法の検討が必要となると考えられる。

2. 実用化・事業化見通し

ウエハスライス技術に関する研究開発では、産総研は、連携先企業のコマツ NTC が進めるマルチワイヤソー装置の研究開発において極めて重要な基礎的知見であるウエハ厚さとセル効率の相関について詳細なデータを得ており、この成果は装置設計にフィードバックされ実用化に貢献する見込みである。また産総研は、コマツ NTC が行った薄型ウエハスライス技術開発において、切り上がりウエハの表面ダメージ等の品質評価を担当し、技術開発の加速に貢献した。

高効率・低コストセルプロセスおよび高効率・高信頼性モジュールの開発においては、産総研は、連携研究先の京セラ株式会社が進めるセルプロセスの改善およびモジュールの信頼性の向上技術を共同で開発した。セル開発においては、京セラと産総研とのプロセスの相互評価を行うことにより、プロセスの改善を進め、京セラで作製されるセルの変換効率向上を図った。また、モジュールの信頼性向上技術においては、産総研独自のモジュールの劣化解析とともに、京セラ製のモジュールを産総研において各種試験を行い共同で解析することで、信頼性に関する問題点の把握と開発の方向性を得ることができた。本成果を基にして UV+湿熱ストレスに基づいたモジュールの寿命予測手法の開発につながる事ができた。これらは、京セラの太陽電池モジュールの事業化に直結するテーマであり、本プロジェクトを通じて特に京セラの高信頼性モジュールの事業化に貢献することができた。

イオン注入技術については、産総研が開発したステンシルマスク（業界初）を装置メーカーのイオン注入装置に実際に搭載し、量産を仮定した多数枚のウエハを用いての性能評価を行った。その結果、従来のカーボン製のステンシルマスクよりも拡散層の細線化が可能で、耐久性も問題がないことが実証され、次期ステンシルマスクとして期待できることが明らかとなった。

3. 波及効果

国際機関の予測によれば、結晶シリコン太陽電池の分野では、材料コスト低減のためにウエハの薄型化が進むことが予想されている。今回、ウエハスライス技術に関する研究で実施した極薄ウエハを用いたセルおよびそれを用いたモジュールの開発で得られた知見は、薄型化の可能性や限界を見極める上で極めて有益であり、国内の太陽電池関連産業全体に貢献するものである。また国内においては、太陽光発電の適地が減り立地制約の解消や多用途化が求められている中、軽量・フレキシブル化が重要な開発要素になっている。薄型セルおよびモジュールの開発で得られた知見は、結晶シリコン太陽電池に新たな付加価値をもたらす国内産業の差別化に貢献できると考えられる。

また、太陽光発電モジュールは屋外で数十年にわたる使用が想定されるが、製品開発においては開発期間が限られているため、モジュールの信頼性と耐久性を調査するために、フィールドでの曝露試験に加えて、室内での加速試験が行われている。現在、広く使われている性能認証試験として、IEC61215/JISC8990があり、その中で damp heat (DH) 試験は、temperature cycle (TC) 試験と合わせて重要な試験として、85℃/85%RH 環境に 1000h の曝露が行われている。しかし、これらの性能認証試験は、モジュール設置後数年以内の初期の故障を検出することを目的としており、モジュールの長期の信頼性を保証するものではない。したがって、各モジュールメーカーでは、試験時間を延長した DH 試験や、より高温高湿条件での pressure cooker test (PCT) を使って、長期信頼性の調査が試みられている。今回、京セラと共同で開発した新規のモジュールの湿熱試験方法やモジュールの寿命予測手法（特許出願済み）は、将来の寿命予測技術の標準化においても重要な指標となるものとして期待される。

4. 今後の展開

太陽電池は再生可能エネルギーの重要な柱であり、革新的環境イノベーション戦略においても、太陽電池の更なる普及拡大に向けた多用途化が必要とされており、その中で軽量・フレキシブル化が重要な課題と考えられている。薄型セルおよび薄型セルを用いたモジュールの開発で得られた知見は、まさに軽量・フレキシブル太陽電池に直結するものであり、太陽電池の普及拡大に繋がる研究開発をさらに進めていく。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	2	2	0	6(1)	10(1)
論文	2	2	8	5	8	25
研究発表・講演 (うち国際会議)	5(4)	21(9)	42(26)	24(12)	23(12)	115(63)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他(受賞及び展示会)	0	2	2	3	2	9

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	産総研	特願 2016-170095	国内	2016/8/31	審査請求	太陽電池の評価手法及び評価装置	望月敏光、 坂田功、 白澤勝彦、 高遠秀尚
2	産総研	特願 2017-065927	国内	2017/3/29	審査請求	絶縁膜と絶縁膜の製造方法、および太陽電池と太陽電池の製造方法	棚橋克人 森谷正昭 木田康博、 高遠秀尚
3	産総研	特願 2018-046910	国内	2018/3/14	出願	太陽電池用のシリコン基板、	棚橋克人 高遠秀尚

						太陽電池及びその製造方法	
4	産総研	特願 2018-046875	国内	2018/03/14	出願	太陽電池及びその製造方法	棚橋克人 高遠秀尚
5	産総研	特願 2020-045616	国内	2020/03/16	出願	太陽電池および半導体装置の製造方法	棚橋克人 高遠秀尚
6	産総研 京セラ	特願 2020-039351	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム出願	白澤勝彦、 高遠秀尚、 伊野裕司、 新楽浩一郎、 内田眞輔、 黒瀬卓也、 矢田伸二、 藤原京介
7	産総研 京セラ	特願 2020-039352	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	白澤勝彦、 高遠秀尚、 伊野裕司、 新楽浩一郎、 内田眞輔、 黒瀬卓也、 矢田伸二、 藤原京介
8	産総研 京セラ	特願 2020-039355	国内	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	白澤勝彦、 高遠秀尚、 伊野裕司、 新楽浩一郎、 内田眞輔、 黒瀬卓也、 矢田伸二、 藤原京介
9	産総研 京セラ	PCT/JP2020/009892	PCT	2020/3/6	出願	情報処理装置、制御方法、及びプログラム	白澤勝彦、 高遠秀尚、 伊野裕司、 新楽浩一郎、 内田眞輔、 黒瀬卓也、 矢田伸二、 藤原京介
10	産総研	特願 2020-070181	国内	2020/04/09	出願	太陽電池及びその製造方法	立花福久、 白澤勝彦

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	T. Mochizuki, C. Kim, M. Yoshita, J. Mitchell, Z. Lin, S. Chen, H. Takato, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama	産総研	Solar-Cell Radiance Standard for Absolute Electroluminescence Measurements and Open-Circuit Voltage Mapping of Silicon Solar Modules	Journal of Applied Physics 119, 034501 (2016)	有	2016/1/19
2	S. Nunomura, I. Sakata, K. Matsubara	産総研	Impact of band tail distribution on carrier trapping in hydrogenated	J. Non-Cryst. Solids 436, 44 (2016).	有	2016/2/12

			amorphous silicon for solar cell applications			
3	S. Joonwichien, K. Shirasawa, S. Simayi, K. Tanahashi, and H. Takato	産総研	Thermal treatment effects on flat-band voltage shift in atomic-layer-deposited alumina or aluminum oxide/Silicon nitride passivation stack	Energy Procedia (Vol. 92, PP. 353-358)	有	2016/7/1
4	S. Simayi, Y. Kida, K. Shirasawa, T. Suzuki, and H. Takato	産総研	Method of Removing Single-Side Doped Layer While Maintaining Pyramid Textured Surface of n-type Bifacial Solar Cells	IEEE Journal of Photovoltaics (Vol. 7, No. 2, PP. 458-462)	有	2016/7/1
5	S. Nunomura, H. Katayama, and I. Yoshida	産総研	Hydrogen atom kinetics in capacitively coupled plasmas	Plasma Sources Sci. Technol. 26, 055018 (2017).	有	2017/4/6
6	K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, S. Utsunomiya, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Impact of post-implantation annealing conditions on electrical characteristics of phosphorus-implanted emitter crystalline silicon solar cell	IEEE Journal of Photovoltaics (Vol. 7, No. 3, PP. 741-746)	有	2017/5/1
7	S. Nunomura, I. Sakata, K. Matsubara	産総研	Electronic properties of ultrathin hydrogenated amorphous silicon	Appl. Phys. Express 10, 081401 (2017)	有	2017/7/13
8	S. Simayi, T. Mochizuki, Y. Kida, K. Shirasawa, H. Takato	産総研	Internal quantum efficiency mapping analysis for a > 20%-efficiency n-type bifacial solar cell with front-side emitter formed by BBr ₃ thermal diffusion	Japanese Journal of Applied Physics, 56-10, pp.102303	有	2017/9/1
9	Supawan Joonwichien, Satoshi Utsunomiya, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Improved Rear Local Contact Formation Using Al Paste Containing Si for Industrial PERC Solar Cell	IEEE Journal of Photovoltaics, 8(1), 54-58 (2018)	有	2017/11/17
10	Hiroshi Umishio, Takuya Matsui, Hitoshi Sai, Takeaki Sakurai, and Koji Matsubara	産総研	Impact of carrier doping on electrical properties of laser-induced liquid-phase-crystallized silicon thin films for solar cell application	Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 57, 021302	有	2018/1/11
11	Supawan Joonwichien, Satoshi Utsunomiya, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Implementation of selective emitter for industrial-sized PERCs using wet chemical etch-back process”	IEEE Journal of Photovoltaics, 8(3), 703-709 (2018).	有	2018/3/7
12	T. Tachibana, K. Tanahashi, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and	産総研	Evaluation of carrier collection probability in bifacial interdigitated-back-contact crystalline silicon	Jpn. J. Appl. Phys. 57, 040315 (2018)	有	2018/3/16

	H. Takato		solar cells by the internal quantum efficiency mapping method			
13	Mickael Lozac'h, Shota Nunomura, Hitoshi Sai, Koji Matsubara	産総研	Passivation property of ultrathin SiO _x :H/a-Si:H stack layers for solar cell applications	Solar Energy Materials and Solar Cells 185 (2018) 8-15	有	2018/5/9
14	Hitoshi Sai, Hiroshi Umishio, Takuya Matsui, Shota Nunomura, Tomoyuki Kawatsu, Hidetaka Takato, and Koji Matsubara	産総研	Impact of silicon wafer thickness on photovoltaic performance of crystalline silicon heterojunction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 57, 08RB10 (2018)	有	2018/7/3
15	T. Mochizuki, S. Joonwichien, K. Tanahashi, K. Shirasawa, H. Takato	産総研	Internal quantum efficiency mapping for evaluation of rear surface of passivated emitter and rear cell	APPLIED PHYSICS EXPRESS, 11-, pp.086601-, 2018/07	有	2018/7/9
16	Hitoshi Sai, Po-Wei Chen, Hung-Jung Hsu, Takuya Matsui, Shota Nunomura, and Koji Matsubara	産総研	Impact of intrinsic amorphous silicon bilayers in silicon heterojunction solar cells	Journal of Applied Physics 124, 103102 (2018)	有	2018/9/11
17	Supawan Joonwichien, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Satoshi Utsunomiya, Katsuhiko Shirasawa, Hidetaka Takato	産総研	Assisted passivation by a chemically grown SiO ₂ layer for p-type selective emitter-passivated emitter and rear cells	Solar Energy Materials and Solar Cells, 186, 84-91 (2018).	有	2018/11/1
18	Shota Nunomura, Isao Sakata, and Koji Matsubara	産総研	In-situ detection of interface defects in a-Si:H/c-Si heterojunction during plasma processing	Applied Physics Express 12, 051006 (2019)	有	2019/4/9
19	Mickaël Lozac'h, Shota Nunomura, Hiroshi Umishio, Takuya Matsui, and Koji Matsubara	産総研	Roles of hydrogen atoms in p-type Poly-Si/SiO _x passivation layer for crystalline silicon solar cell applications	Japanese Journal of Applied Physics 58, 050915 (2019)	有	2019/4/23
20	T. Tachibana, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	An Investigation of Internal Quantum Efficiency of Bifacial Interdigitated Back Contact (IBC) Crystalline Silicon Solar Cell	IEEE Journal of Photovoltaics, 9, 1526 (2019)	有	2019/9/5
21	Katsuto Tanahashi, Tomihisa Tachibana, Koji Sueoka, Masaaki Moriya, Yasuhiro Kida, Satoshi Utsunomiya, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Effect of oxygen precipitation in silicon wafer on electrical characteristics of fully ion-implanted n-type PERT solar cells	ECS Journal of Solid State Science and Technology, 8(10), pp. P596-P601 (2019)	有	2019/10/11

22	Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa and H. Takato	産総研	Investigation of Degradation Mode Spreading Interconnectors by Pressure-Cooker Testing of Photovoltaic Cells	IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 10, no. 1, pp. 188-196	有	2019/11/15
23	Hitoshi Sai, T. Oku, Y. Sato, M. Tanabe, and T. Matsui	産総研	Potential of very thin and high - efficiency silicon heterojunction solar cells	Progress in Photovoltaics 27, 1061 (2019)	有	2019/12/1
24	Mickaël Lozac'h, Shota Nunomura, Koji Matsubara	産総研	Double-sided TOPCon solar cells on textured wafer with ALD SiO _x layer	Solar Energy Materials and Solar Cells 207 (2020) 113057.	有	2019/12/17
25	Supawan Joonwichien, Masaaki Moriya, Satoshi Utsunomiya, Yasuhiro Kida, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Mechanism of Metallization-induced Losses in the Rear-side of Fully Screen-printed p-type PERC solar cells	IEEE Journal of Photovoltaics, 10 (2), 407-416 (2020).	有	2020/1/14

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	布村正太、坂田功、松原浩司	産総研	太陽電池用 a-Si:H のキャリア捕捉とデバイス特性	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/14
2	K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, N. Suzuki, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Two-Dimensional Carrier Distribution in Phosphorus Implanted Emitter Observed by Scanning Capacitance Microscopy	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2015/9/14
3	T. Mochizuki	産総研	Voc Evaluation of Solar Cells and Modules Using Absolute El Images	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2015/9/17
4	S. Nunomura	産総研	Silicon-based thin-film and heterojunction solar cells	Symposium on Advanced Solar Cells, KVS (Plenary talk)	2016/2/17
5	S. Joonwichien, S. Simayi, K. Shirasawa, K. Tanahashi, H. Takato	産総研	Thermal treatment effects on flat-band voltage shift in atomic-layer-deposited alumina or aluminum oxide/silicon nitride passivation	6 th international Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2016	2016/3/7
6	布村正太、坂田功、松原浩司	産総研	EFFECTS OF CARRIER TRAPPING ON SOLAR CELL PERFORMANCES	The Photovoltaic Technical Conference 2016	2016/5/11
7	S. Joonwichien, K. Shirasawa, S. Simayi, K. Tanahashi, and H. Takato	産総研	WET OXIDATION EFFECTS ON THE ELECTRICAL AND INTERFACE PROPERTIES OF ALD Al ₂ O ₃ AND ALD-AlO _x /SiN _x PASSIVATION STACKS FOR PERC SOLAR CELLS	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2016/6/20
8	K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, S. Utsunomiya,	産総研	IMPLANTATION OF PHOSPHORUS INTO PYRAMIDAL TEXTURE IN SILICON SOLAR CELL	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2016/6/20

	T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato				
9	S. Simayi, T. Fukuda, K. Shirasawa, N. Suzuki, and H. Takato	産総研	Optimize the front side boron emitter by removing the boron depleted area with less damages on the texture pyramids	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2016/6/20
10	S. Nunomura, I. Sakata, and K. Matsubara	産総研	Measurements of carrier transport and trapping in semiconductor films during plasma processing	15th International Conference on Plasma Surface Engineering	2016/9/14
11	望月敏光, Joonwichien Supawan, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	内部量子効率マッピングによる PERC 裏面の評価	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/16
12	棚橋克人, 森谷正昭, 木田康博, 宇都宮智, 福田哲生, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	イオン注入プロセスによる結晶シリコン太陽電池の高効率化	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/16
13	Shalamujiang Simayi、木田康博、 白澤勝彦、 鈴木竜暢、高遠秀尚	産総研	低濃度ボロン領域除去による、n-PERT 表面の改善	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/16
14	K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, S. Utsunomiya, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Phosphorus-implanted emitter crystalline silicon solar cell with Al-BSF	21st International Conference on Ion implantation Technology	2016/9/26
15	T. Tachibana, K. Tanahashi, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Back contact n-type silicon solar cell with one side etching	CSSC-9&Si-Materials	2016/10/10
16	T. Mochizuki, S. Joonwichien, M. Jonathon, K. Tanahashi, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Evaluation of Rear Surfaces of PERC Solar Cells Using Internal Quantum Efficiency Mapping	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/26
17	望月敏光	産総研	ヘテロ界面の光学計測技術	学振 175 委員会 次世代シリコン太陽電池分科会 第 5 回研究会	2016/11/7
18	S. Nunomura, I. Sakata, and K. Matsubara	産総研	Carrier transport and trapping during a-Si:H growth - for more efficient solar cells- (招待講演)	The 26th annual meeting of MRS-J	2016/12/20
19	Shalamujiang Simayi、木田康博、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	n 型バイフェシナルセル用エッチバックボロンエミッタの再結合解析	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/14
20	立花福久、 望月敏光、 棚橋克人、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	量子効率マッピングを用いた裏面電極型 Si 太陽電池の評価	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/14

21	Supawan. Joonwichien, 白澤勝彦, 木田康博, 宇都宮智, 森谷正昭, 高遠秀尚	産総研	Improving the local Al-contacts for PERC cells: void formation suppression using Al paste consisting of Si content, and it impacts on cell performance	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3/14
22	海汐寛史, 松井卓矢, 齋均, 櫻井岳暁, 松原浩司	産総研	太陽電池応用に向けたガラス基板上への液相結晶化シリコン薄膜の形成と評価	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3/15
23	Adrien Bidiville, 松井卓矢, 齋均, 松原浩司	産総研	a-Si:H 太陽電池の局在準位評価 (2)-局在準位生成のフェルミ準位依存性	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3/17
24	Adrien Bidiville, 松井卓矢, 齋均, 松原浩司	産総研	a-Si:H 太陽電池の局在準位評価 (3)-太陽電池のロス解析-	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3/17
25	齋均 ¹ , 海汐寛史 ¹ , 布村正太 ¹ , 松井卓矢 ¹ , 河津知之 ² , 高遠秀尚 ¹ , 松原浩司 ¹	1 産総研, 2 コマツ NTC	極薄ウエハを用いた a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池の検討	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3/17
26	望月敏光 ¹ , 伊藤明 ² , 棚橋克人 ¹ , 中西英俊 ² , 川山巖 ³ , 斗内政吉 ³ , 白澤勝彦 ¹ , 高遠秀尚 ¹	1 産総研, 2 SCREEN, 3 大阪大学	レーザーテラヘルツエミッション 顕微鏡による AlO/Si 膜の電界効果 パッシベーションの評価	第 64 回応用物理学会春季 学術講演会	2017/3/17
27	S. Joonwichien, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Effects of different Al pastes with different particle sizes on rear local contact and passivated emitter and rear cell performance	7th international Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2016	2017/4/4
28	S. Joonwichien, K. Shirasawa, S. Utsunomiya, and H. Takato	産総研	Effect of Si content in Al paste on Local Al Rear Contacts in PERC Cell	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017/6/26
29	H. Sai ¹ , H. Umishio ¹ , T. Matsui ¹ , S. Nunomura ¹ , H. Takato ¹ , T. Kawatsu ² , and K. matsubara ¹	1 産総研, 2 コマツ NTC	Potential of a a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with very thin wafers	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017/6/28
30	S. Nunomura, I. Sakata, K. Matsubara	産総研	Electronic transport properties of a-Si:H passivation layers for silicon hetero-junction solar cells	The 2017 E-MRS Spring Meeting and Exhibit	2017/5/22
31	A. Bidiville, T. Matsui, H. Sai, K. Matsubara	産総研	Investigation of interface and bulk localized states in a-Si:H solar cells	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017/6/29
32	S. Nunomura, I. Sakata, K. Matsubara	産総研	Characterization of electronic carrier transport in semiconductor films during plasma processing (invited talk)	The International Conference on Phenomena in Ionized Gases	2017/7/10

33	Joonwichien Supawan、木田康博、宇都宮智、森谷正昭、白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	Applying selective emitter to industrial PERC cells using a screen-printed resist masking combined with wet chemical etch-back process	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/5
34	立花福久、棚橋克人、望月敏光、白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	スクリーン印刷電極で作製した裏面電極型結晶シリコン太陽電池	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/6
35	Shalamujiang Simayi、木田康博、白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	エッチバックプロセスにより形成されたボロン選択エミッタ両面受光太陽電池	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/6
36	望月敏光、伊藤明、中西英俊、棚橋克人、森谷正昭、宇都宮智、木田康博、川山巖、斗内政吉、白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	レーザーテラヘルツ放射顕微鏡(LTEM)によるシリコンバックコンタクト型太陽電池セルの内部電場イメージング	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/6
37	棚橋克人、森谷正昭、Shalamujiang Simayi、木田康博、宇都宮智、福田哲生、白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	イオン注入法で作製した両面受光型結晶シリコン太陽電池セル	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/6
38	棚橋克人、森谷正昭、立花福久、木田康博、宇都宮智、福田哲生、白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	イオン注入法で作製した裏面電極型結晶シリコン太陽電池セル	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/6
39	布村正太、坂田功、松原浩司	産総研	極薄 a-Si:H のギャップ内準位とキャリア捕捉	2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/6
40	齋均、海汐寛史、松井卓矢、布村正太、河津知之、高遠秀尚、松原浩司	産総研、筑波大、コマツ NTC	極薄ウエハを用いた a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池の検討(2)	2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/6
41	海汐寛史、松井卓矢、齋均、櫻井岳暁、松原浩司	産総研、筑波大	ラインレーザーを用いた液相結晶化シリコン薄膜の形成と評価：レーザー स्क्यान速度依存性	2017 年 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/6
42	棚橋克人、森谷正昭、Shalamujiang Simayi、木田康博、宇都宮智、白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	Fully Ion Implanted n-Type Silicon Bifacial Solar Cell with 20.1% Efficiency	EU PVSEC 2017	2017/9/25
43	S. Nunomura, I. Sakata, K. Matsubara	産総研	Electronic Properties of Ultrathin a-Si:H Passivation Layers for Silicon Heterojunction Solar Cells	EU PVSEC 2017	2017/9/25
44	M. Lozac'h, S. Nunomura,	産総研	SiO _x :H PASSIVATION LAYER FABRICATED BY ATOMIC LAYER	EU PVSEC 2017	2017/9/25

	H. Sai, T. Matsui, and K. Matsubara		DEPOSITION FOR HETEROJUNCTION SOLAR CELLS		
45	布村正太	産総研	(招待講演) In-situ diagnostics of processing plasmas & semiconductor films for high-efficiency silicon hetero-junction (SHJ) solar cells	AVS 64th International Symposium and Exhibition	2017/11/2
46	棚橋克人, 森谷正昭, Shalamujiang Simayi, 木田康博, 宇都宮智, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	FULLY ION IMPLANTED N-TYPE BIFACIALSILICON SOLAR CELL	PVSEC-27	2017/11/1
47	立花福久, 棚橋克人, 望月敏光, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	EVALUATION OF CARRIER COLLECTION PROBABILITY IN BACK CONTACTED SILICON SOLAR CELL WITH INTERNAL QUANTUM EFFICIENCY MAPPING	PVSEC-27	2017/11/1
48	Joonwichien Supawan, 木田康博, 宇都宮智, 森谷正昭, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	Wet chemical etch-back selective emitter for PERC solar cells	PVSEC-27	2017/11/16
49	望月敏光, 伊藤明、 中西英俊、 棚橋克人、 森谷正昭、 宇都宮智、 木田康博, 川山巖、 斗内政吉、 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	MAPPING OF INTERNAL FIELD BETWEEN LOCALIZED CONTACTS IN BACK-CONTACT CELLS USING LASER TERAHERTZ EMISSION MICROSCOPE (LTEM)	PVSEC-27	2017/11/1
50	齋均、海汐寛史、 松井卓矢、 布村正太、 河津知之、 高遠秀尚、松原浩司	産総研	Impact of Wafer Thickness on a-Si:H/c-Si Heterojunction Solar Cells	PVSEC-27	2017/11/16
51	布村正太、坂田功、 松原浩司	産総研	CHARACTERIZATION OF ELECTRONIC PROPERTIES OF A-SI:H PASSIVATION LAYERS FOR SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS	PVSEC-27	2017/11/16
52	海汐寛史、 松井卓矢、齋均、 櫻井岳暁、松原浩司	産総研、 筑波大	Preparation and evaluation of liquid-phase-crystallized silicon thin films on glass for photovoltaic application	PVSEC-27	2017/11/16
53	望月敏光、 Joonwichien Supawan, 立花福久、 Shalamujiang Simayi, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	Internal Quantum Efficiency Mapping for Evaluation of Rear Side of Solar Cells	2nd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photo voltaic Modules, 2017	2017/11/16
54	望月敏光, 伊藤明、 中西英俊、 立花福久、 棚橋克人、川山巖、 斗内政吉、 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	Evaluations of Silicon Solar Cells using Laser Terahertz Emission Microscope (LTEM)	the 4th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2017) (招待講演)	2017/11/21

55	立花福久、 棚橋克人、 望月敏光、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	Effects of passivation layer on base region in back contact silicon solar cells with screen printed electrode	8th workshop on back contacts solar cell and module technology	2017/11/1
56	Mickaël Lozac'h, 布村正太、齋均、 松井卓矢、松原浩司	産総研	Characterization of SiO _x :H Ultra-thin Films Fabricated by Plasma Atomic Layer Deposition for Advanced Passivation Layers applied to Heterojunction Solar Cells	27th Annual Meeting of MRS-J	2017/12/6
57	望月敏光	産総研	太陽電池開発のための結晶シリコンのライフタイム評価・イメージング手法	学振「結晶加工と評価技術」第145委員会第156回研究会「先端計測と太陽電池研究」	2017/12/14
58	布村正太	産総研	(基調講演) State of the art silicon heterojunction solar cell devices ~ plasma processing for high-quality passivation~	2018 2nd International Symposium on Energy Research and Application	2018/2/5
59	立花福久、 棚橋克人、 望月敏光、 白澤勝彦、 高遠秀尚	産総研	スクリーン印刷電極を用いた両面受光一裏面電極型結晶シリコン太陽電池の作製と評価	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/17
60	齋均、松井卓矢、 布村正太、 海汐寛史、 河津知之、 高遠秀尚、松原浩司	産総研、 筑波大、 コマツ NTC	自立・超薄型ウエハによる高効率結晶シリコン太陽電池の実現に向けて	第65回応用物理学会春季学術講演会(招待講演)	2018/3/17
61	布村正太、坂田功、 松原浩司	産総研	極薄 a-Si:H のギャップ内準位と輸送特性~水素希釈とアニールの効果~	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/18
62	布村正太、坂田功、 松原浩司	産総研	プラズマ誘起欠陥の発生と修復~イオン照射に伴う残留欠陥の形成~	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/19
63	布村正太、坂田功、 松原浩司	産総研	プラズマ誘起欠陥の発生と修復~欠陥修復の活性化エネルギー~	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/19
64	伊野裕司、 浅尾秀一、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	プレッシャークッカー試験・動的機械荷重試験での結晶 Si 太陽電池モジュールの劣化モード解析	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/18
65	棚橋克人、 福田哲生、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	A novel approach for suppression of oxygen precipitation in CZ silicon wafers of solar cells by pre-thermal treatment	8th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (Silicon PV 2018)	2018/3/19
66	Joonwichien Supawan, 木田康博、 宇都宮智、 森谷正昭、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	Refractive index of PECVD-SiN _y films effects on the rear side passivation for PERC-type solar cell	8th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (Silicon PV 2018)	2018/3/19
67	望月敏光、伊藤明、 中西英俊、 棚橋克人、 森谷正昭、 宇都宮智、 木田康博、川山巖、 斗内政吉、	産総研	Imaging of Internal Field and Junction Leaks of Back Contact Si Solar Cells with a Laser Terahertz Emission Microscope	8th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (Silicon PV 2018)	2018/3/19

	白澤勝彦, 高遠秀尚				
68	齋均、松井卓矢、 布村正太、 河津知之、 高遠秀尚、松原浩司	産総研, コマツ NTC	Impact of wafer thickness on the photovoltaic performance in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells	8th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (Silicon PV 2018)	2018/3/19
69	T. Tachibana, K. Tanahashi, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Fabrication of Bifacial Interdigitated-Back-Contact Crystalline Silicon Solar Cell	10th international workshop on crystalline silicon for solar cells (CSSC-10), Sendai	2018/4/9
70	Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Effect of soldering on the module degradation along bus bar in DH test and PCT for crystalline Si PV modules	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, Hawaii (USA)	2018/6/14
71	T. Tachibana, K. Tanahashi, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Bifacial interdigitated-back-contact (IBC) crystalline silicon solar cell: fabrication and evaluation by internal quantum efficiency mapping	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikoloa, Hawaii (USA)	2018/6/15
72	Hitoshi Sai, Takuya Matsui, Shota Nunomura, and Koji Matsubara	産総研	Interplay between intrinsic bi-layers and overlying doped layers in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells	8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/6/13
73	Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, H. Takato		DEGRADATION RELATED TO THE INTERCONNECTOR FOR CRYSTALLINE SILICON PV MODULES BY ACCELERATION TESTS	Grand Renewable Energy 2018 (GRE2018), Yokohama, Japan	2018/6/20
74	齋均、 松井卓矢、 布村正太、 松原浩司	産総研	a-Si:H/c-Si ヘテロ接合 (SHJ) 太陽電池における界面 i 層の微細構造と発電特性の相関	学振第 175 委員会 第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7/12
75	Supawan Joonwichien, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Satoshi Utsunomiya, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Modifying the ratio between highly and lightly doped emitters for PERC with a selective emitter structure using wet chemical etch-back process	European PV Solar Energy Conference and Exhibition 2018 (EU PVSEC 2018), Brussels (Belgium)	2018/9/24
76	Katsuto Tanahashi, Tomihisa Tachibana, Masaaki Moriya, Yasuhiro Kida, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	FULLY ION-IMPLANTED IBC SILICON SOLAR CELL WITH GAP STRUCTURE BETWEEN EMITTER AND BSF BY SELF-ALIGNED PROCESS,	34th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018), Brussels (Belgium)	2018/9/24
77	T. Tachibana, K. Tanahashi, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Effect of Light Absorption from Rear Side in Bifacial Interdigitated-Back-Contact (IBC) Crystalline Silicon Solar Cell	34th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018), Brussels (Belgium)	2018/9/24

78	Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	The influence of module structure on degradation modes of multi-crystalline silicon photovoltaic modules by dynamic mechanical loading test	34th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018), Brussels (Belgium)	2018/9/24
79	Supawan Joonwichien, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Satoshi Utsunomiya, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Reduced recombination losses for PERC cell using a selective emitter structure formed by screen-printed resist masking combined with etch-back process	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/20
80	棚橋克人、 立花福久、 森谷正昭、 木田康博、 宇都宮智、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	セルフアラインプロセスで作製したエミッター-BSF 間のギャップ付きイオン注入裏面電極型結晶シリコン太陽電池セル	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/20
81	立花福久、 望月敏光、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	両面受光-裏面電極型結晶シリコン太陽電池の量子効率評価	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/20
82	齋均, 陳柏璋, 許宏榮, 松井卓矢, 布村正太, 松原浩司	産総研, 台湾交通大	a-Si:H/c-Si ヘテロ接合 (SHJ) 太陽電池の発電特性と界面 i 層の微細構造の相関	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/20
83	海汐寛史, 松井卓矢, 齋均, 櫻井岳暁, 松原浩司	産総研, 筑波大	液相結晶化シリコン薄膜に対する水素プラズマパッシベーションの効果: レーザースキャン速度依存性	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/21
84	伊野裕司、 浅尾秀一、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	結晶シリコン PV モジュールの高温高湿試験による劣化におけるインターコネクタのタブ付け条件の影響	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/21
85	Hitoshi Sai, P.-W. Chen, H.-J. Hsu, T. Matsui, S. Nunomura, K. Matsubara	産総研	a-Si:H/c-Si heterojunction technologies for realizing very thin c-Si solar cells	1st International Symposium on Silicon Heterojunction Solar Cells	2018/10/25
86	Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	The influence of module structure on degradation modes of silicon photovoltaic modules by dynamic mechanical loading test	3 rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2018 (SAYURI-PV 2018)	2018/10/31
87	Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Comparison of glass/glass and glass/backsheet mini-modules by accelerated test	NREL PV Reliability Workshop 2019, Lakewood, Colorado (USA) (招待講演)	2019/2/28
88	立花福久、 望月敏光、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	裏面電極型結晶シリコン太陽電池における電氣的遮蔽損失の低減	2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3/9

89	今井友貴, 齋均, 小沢将征, 田辺まゆみ, 松井卓矢, 藤原裕之	岐阜大, 産総研	超薄型 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太 陽電池の光学損失解析	2019 年第 66 回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/9
90	齋均, 佐藤芳樹, 奥登志喜, 田辺まゆみ, 松井卓矢, 松原浩司	産総研	超薄型 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合 (SHJ) 太陽電池の温度特性	2019 年第 66 回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/9
91	坂元智成, 新築浩一郎, 黒瀬卓也, 内田眞輔, 矢田伸二, 井上志朗, 伊野裕司, 浅尾秀一, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研 京セラ	結晶 Si 太陽電池モジュールの湿 熱ストレス寿命に及ぼす UV 光の 影響と添加剤の影響	2019 年第 66 回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
92	伊野裕司, 浅尾秀一, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	導電性フィルムタブ付による結晶 シリコン PV モジュールの PCT イ ンターコネクタ沿い劣化の抑制	2019 年第 66 回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
93	Hitoshi Sai, Y. Sato, T. Oku, M. Tanabe, T. Matsui, and K. Matsubara	産総研	Improved Temperature Coefficients in Very Thin Silicon Heterojunction Solar Cells	Silicon PV 2019	2019/4/8
94	Supawan Joonwichien, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Satoshi Utsunomiya, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Phosphorus gettering of impurities at low-temperature annealing for enhancing the performance of <i>p</i> -type PERC	9th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV2019), Leuven (Belgium),	2019/4/8
95	T. Tachibana, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and H. Takato,	産総研	Impact of Electrical Shading Loss Suppression on Interdigitated-Back-Contact Si Solar Cells with Screen Printing Metallization Concepts	9th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics 2019 (SiliconPV2019), Leuven (Belgium)	2019/4/10
96	Supawan Joonwichien, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Satoshi Utsunomiya, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Metal-induced recombination losses associated with Si present within passivation layers and aluminum paste for PERCs	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), Chicago (USA)	2019/6/16
97	Hitoshi Sai	産総研	Challenges and Prospects of Very Thin (<50 μ m) Crystalline Silicon Solar Cells	AM-FPD 2019 (招待講演)	2019/7/2
98	布村正太, 坂田功, 佐藤愛子, Mickael Lozac'h, 松原浩司	産総研	SHJ 太陽電池作製時における界面 欠陥の発生と修復	第 16 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2019/7/4
99	Hitoshi Sai	産総研	Challenges and Prospects of Very Thin (<50 μ m) Crystalline	AM-FPD 2019 (招待講演)	2019/7/2

			Silicon Solar Cells		
100	布村正太, 坂田功、 佐藤愛子、Mickael Lozac' h、松原浩司	産総研	SHJ 太陽電池作製時における界面 欠陥の発生と修復	第 16 回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2019/7/4
101	棚橋克人、 立花福久、 森谷正昭、 木田康博、 宇都宮智、 白澤勝彦、 高遠秀尚	産総研	イオン注入両面受光型シリコン太 陽電池の特性に与える酸素析出の 影響	第 80 回応用物理学会秋季 学術講演会	2019/9/18
102	立花福久、 棚橋克人、 望月敏光、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	スクリーン印刷法による多層印刷 構造を用いた両面受光－裏面電極 型結晶シリコン太陽電池の作製と 評価	第 80 回応用物理学会秋季 学術講演会	2019/9/20
103	布村正太, 坂田功、 松原浩司	産総研	プラズマ誘起欠陥の発生と修復 ~ 欠陥抑止半導体プラズマプロセス にむけ~	第 80 回応用物理学会秋季 学術講演会	2019/9/19
104	伊野裕司、 浅尾秀一、 白澤勝彦、 高遠秀尚	産総研	プレッシャークッカー試験による ダブルガラス構造を有する結晶シ リコン PV ミニモジュールの劣化評 価	第 80 回応用物理学会秋季 学術講演会	2019/9/21
105	Supawan Joonwichien, Yasuhiro Kida, Masaaki Moriya, Satoshi Utsunomiya, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	A comparative study of front and rear surface passivation techniques of nitric acid oxidation of silicon on phosphorus-diffused and non- diffused textured surfaces for p-type bifacial PERCs	EU PVSEC 2019, Marseille (France)	2019/9/12
106	齋均、佐藤芳樹、 奥登志喜、 田辺まゆみ、 松井卓矢	産総研	Impact of wafer thickness on temperature coefficients in silicon heterojunction solar cells	36th EU PVSEC	2019/9/11
107	松井卓矢、 海汐寛史、齋均	産総研	Challenges for silicon heterojunction solar cells: Toward thinner device and new contact development	2nd International Workshop on SHJ Solar Cells	2019/11/11
108	Y. Ino, T. Sakamoto, K. Niira, T. Kurose, S. Uchida, S. Yada, S. Inoue, K. Fujiwara, S. Asao, K. Shirasawa, H. Takato	産総研 京セラ	Lifetime Prediction of Crystalline Si PV Modules under UV-Hygrothermal Stress	29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering, Xi' an (China)	2019/11/6
109	Y. Ino, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Investigation of degradation in crystalline silicon PV mini-module with glass-glass structure by pressure cooker test	29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering, Xi' an (China)	2019/11/7
110	T. Tachibana, K. Tanahashi, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and	産総研	Bifacial IBC crystalline silicon solar cell: fabrication with multi-layer metallization structure using	29th International Conference on Photovoltaic Science and Engineering, Xi' an	2019/11/8

	H. Takato		screen printing technology	(China)	
111	Y. Ino, T. Sakamoto, K. Niira, T. Kurose, S. Uchida, S. Yada, S. Inoue, K. Fujiwara, S. Asao, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研 京セラ	Lifetime Prediction of Crystalline Si PV Modules under UV-Hygrothermal Stress	4th International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2019 (SAYURI-PV 2019)	2019/11/19
112	布村正太、坂田功、 松原浩司	産総研	プラズマ誘起欠陥の発生と修復 ~c-Si への水素拡散と欠陥~	2020 年 第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/12
113	Mickaël Lozac’h, 布村正太, 松原浩司	産総研	Development of Double-sided TOPCon Solar Cells on Textured Silicon Wafer using ALD-SiO _x	2020 年 第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/13
114	立花福久、 棚橋克人、 浅尾秀一、 伊野裕司、 白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	両面受光-裏面電極型結晶シリコ ン太陽電池モジュールの作製と評 価	2020 年 第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/15
115	Supawan Joonwichien, Satoshi Utsunomiya, Masaaki Moriya, Yasuhiro Kida, Katsuhiko Shirasawa, and Hidetaka Takato	産総研	Formation of Local Rear Contacts Stimulated by Al-Si Interdiffusion within Different Al Grid Widths	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), Calgary (Canada) Virtual	2020/6/15

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

○受賞

番号	発表者	タイトル	会議名	受賞名
1	T. Tachibana, K. Tanahashi, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and H. Takato	Effect of Light Absorption from Rear Side in Bifacial Interdigitated-Back-Contact (IBC) Crystalline Silicon Solar Cell	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2018)	ポスター賞

○展示会への出展

番号	展示会名	開催年月
1	第 11 回再生可能エネルギー世界展示会 (パシフィコ横浜)	2016 年 6 月 29 日-7 月 1 日
2	第 5 回ふくしま復興・再生可能エネルギー産業フェア 2016(ビッグパ レット福島)	2016 年 10 月 19 日-20 日
3	第 12 回再生可能エネルギー世界展示会 (パシフィコ横浜) 併催フォーラム「AIST-FREA (産総研-福島再生可能エネルギー研究 所) セッション」(7 月 6 日) においても関連成果を発表	2017 年 7 月 5 日-7 日

4	第6回ふくしま復興・再生可能エネルギー産業フェア 2017(ビッグパレット福島)	2017年11月8日-9日
5	第13回再生可能エネルギー世界展示会 (パシフィコ横浜)	2018年6月20日-22日
6	第7回ふくしま復興・再生可能エネルギー産業フェア 2018(ビッグパレット福島)	2018年10月19日-20日
7	第14回再生可能エネルギー世界展示会 (パシフィコ横浜)	2019年7月10日-12日
8	第8回ふくしま復興・再生可能エネルギー産業フェア 2019(ビッグパレット福島)	2019年10月30日-31日

1. 成果詳細

1.1 テクスチャ Si 表面のパッシベーションと新規テクスチャ形成法の開発

テクスチャ Si 表面での再結合速度 $< 3 \text{ cm/s}$ を目標に、薄板 Si 基板にも適用可能なテクスチャ形成法とその洗浄法の開発を行った。有機不純物除去を目的に、平坦およびテクスチャ c-Si ウエハに対し、濃硫酸処理を 15 min 行い、超純水による洗浄後、HF 溶液により表面酸化膜を除去し、エピタキシャル成長抑止のために H_2O_2 処理を行った。HF 処理、 H_2O_2 処理時には、撥液性の制御のため、一部の処理でメタノールを混入している。この洗浄後、Cat-CVD 法で Si ウエハ表面に SiN_x (76 nm)/a-Si (10 nm) 積層膜の堆積を行った。各試料の実効少数キャリア寿命 (τ_{eff}) を μ -PCD で測定し、パッシベーション性能を評価した。比較のため、硫酸洗浄を行っていない試料も作製、評価した。

硫酸処理を行っていない試料では、1 ms を大きく下回る τ_{eff} となった。この結果より、有機物除去のための薬液処理の重要性が再認識され、硫酸処理の効果を検証した。図 III-2-(二)-C-1 に、硫酸処理時の薬液温度と τ_{eff} の関係を示す。平坦基板上では、薬液処理温度にかかわらず、10 ms を超える高い τ_{eff} が得られた。この値は、バルク結晶 Si の少数キャリア寿命にせまる値である。Si 表面での再結合が極限まで抑えられていることを示しており、Cat-CVD 膜の高いパッシベーション性能を表している。一方、テクスチャ基板においては、室温付近での薬液処理では、2 ms 程度の τ_{eff} が得られた。薬液処理を行わない場合と比べ τ_{eff} の改善が見られ、薬液処理の有効性は確認されたが、その効果は不十分である。一方、薬液処理時の温度を向上すると、 τ_{eff} は単調に増大し、140°C で硫酸処理を行った試料において、 $\sim 8 \text{ ms}$ という高い τ_{eff} が得られた。それ以上の昇温においては、 τ_{eff} は飽和傾向を示した。また、 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ 処理との比較において、硫酸原液で処理を行った試料で、より良好な τ_{eff} が得られた。なお、得られた τ_{eff} は、Si バルク内での再結合が無いと仮定した場合の表面再結合速度 1.8 cm/s に対応しており、目標値である 3 cm/s 未満を達成した。

この硫酸による表面洗浄のポテンシャルを定量化するために、厚さの異なる平坦 Si ウエハを用いた試料の τ_{eff} から、 $\tau_{\text{eff}}^{-1} = \tau_{\text{bulk}}^{-1} + 2S/W$ (S は表面再結合速度、 W はウエハ厚) の関係を用い、表面再結合速度を見積もった。図 III-2-(二)-C-2 に、 τ_{eff}^{-1} と W^{-1} の関係を示す。このグラフの傾きが $2S$ に、縦軸との切片が τ_{eff}^{-1} に対応する。切片から得られる τ_{eff} は、12.4 ms となった。この値は、ウエハ購入時に記載されていた仕様書の値ともよく一致しており、本測定の妥当性を支持する。傾きから得られた S は 0.18 cm/s となり、これまでの他機関からの報告も含め、最高水準の値が得られた。この結果は、Cat-CVD 膜の高いパッシベーション性能と、硫酸処理の有用性を顕著に示している。

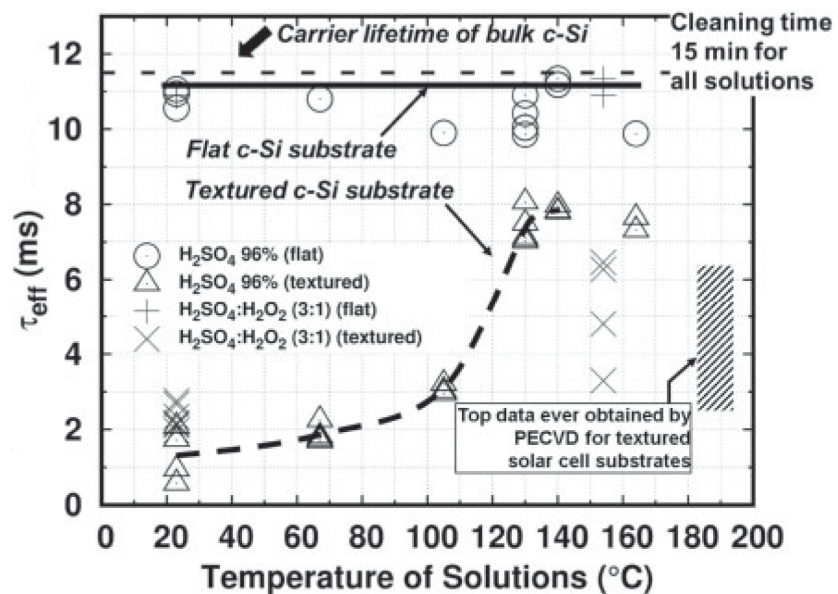
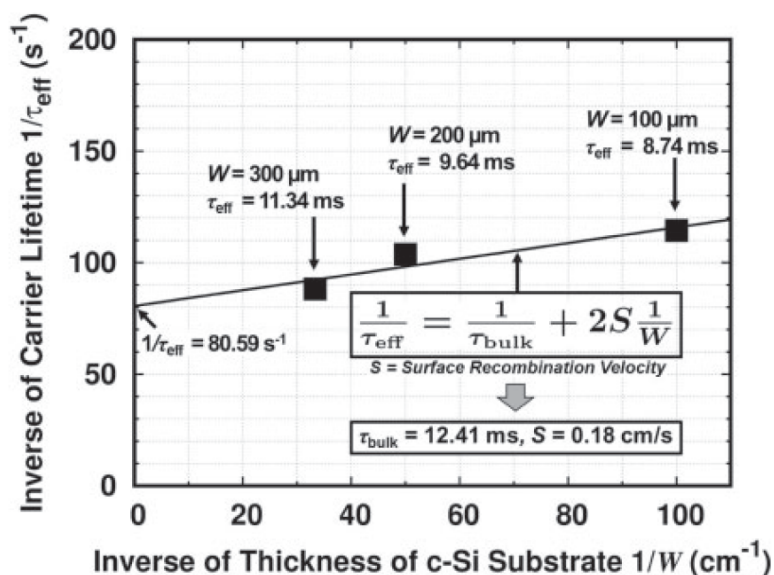
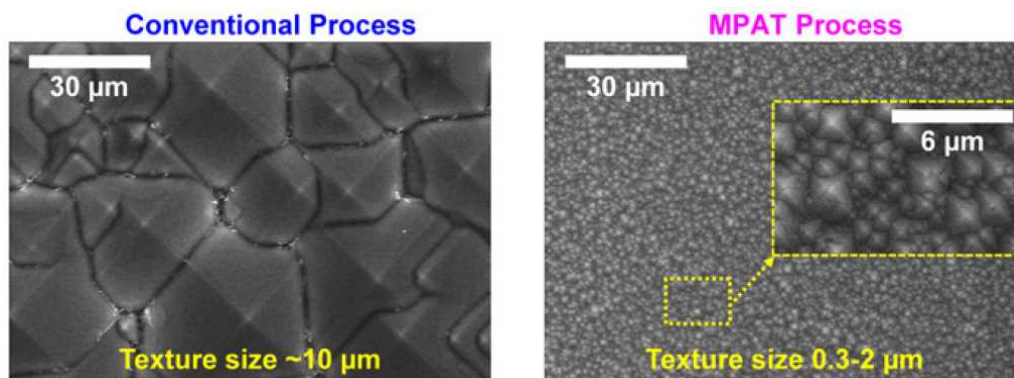


図 III-2-(二)-C-1 硫酸処理時の薬液温度と τ_{eff} の関係



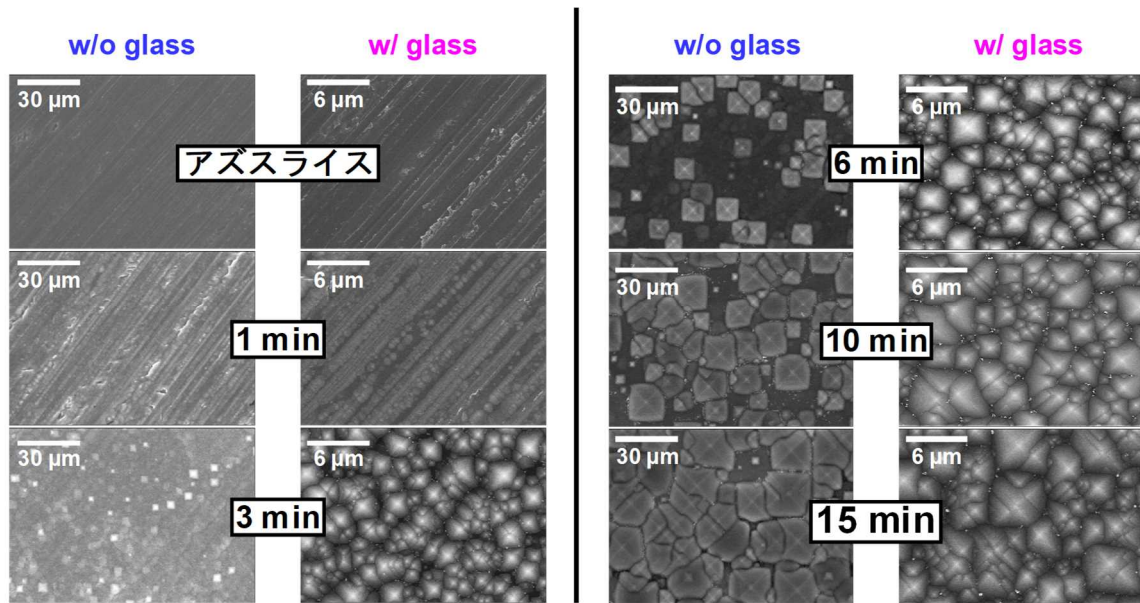
図III-2-(二)-C-2 τ_{eff}^{-1} と Si ウエハ厚の逆数の関係

また、市販のテクスチャ用アルカリ溶液を用いると、10 μm 程度のサイズのピラミッド構造からなる凹凸表面が形成される。このピラミッドサイズの低減に向け、アルカリ溶液中にガラス微粒子を混入する手法 (microparticle-assisted texturing: MPAT) を試みた。市販の薬液 (SUN-X 600、和光純薬工業) に対し、直径 100 μm 前後のガラス微粒子を混入したものと、比較のため添加を行っていないもので、同じ処理温度および時間で処理を行った。ガラス微粒子を薬液中で十分に分散させるため、攪拌子を 250 rpm で回転させながら処理を行った。図III-2-(二)-C-3 に、市販薬液のみ、および MPAT で処理を行った Si 表面の走査電子顕微鏡 (SEM) 像を示す。市販薬液のみで処理を行った場合、10 μm 程度のサイズのピラミッドからなる表面が形成される。一方、MPAT 処理を行った場合には、ピラミッドのサイズが劇的に低減し、0.3-2 μm 程度の微小ピラミッドからなるテクスチャ表面が得られることが分かった。



図III-2-(二)-C-3 市販薬液のみ、および MPAT で処理を行った Si 表面の SEM 像

量産でのセル作製工程においては、ワイヤーソーで切り出された Si ウエハに対する処理が必要である。図III-2-(二)-C-4 に、アズスライス基板に対し市販薬液でのアルカリ処理および MPAT 処理を行った試料の表面 SEM 像を示す。市販薬液においては、15 min の処理後も、ピラミッドが形成されていない箇所が見られる。一方、MPAT 処理を行った試料では、3 min 程度の処理時間で、ほぼ全面がピラミッド構造で覆われている。また、アズスライス基板に対し MPAT を行った Si ウエハの両面に SiN_x/a-Si を堆積し、 τ_{eff} を測定したところ、7.2 ms という高い τ_{eff} が得られ、アズスライスから MPAT で形成したウエハでも、平坦基板から作製したものと同等のパッシベーション性能が得られることが分かった。また、通常の工程では、アズスライス基板は、まず、ソーダダメージ層の除去を行い、その後、テクスチャ形成を行うが、本研究では、ソーダダメージ除去を行わず、アズスライス基板に直接 MPAT を実施することで、短い薬液処理時間と高い τ_{eff} を実現した。量産工程においてソーダダメージ除去処理を省略できる可能性を示す結果である。さらに、本手法は、市販のセルサイズである 156 mm 角の Si ウエハに対しても適用可能であることを実証した。

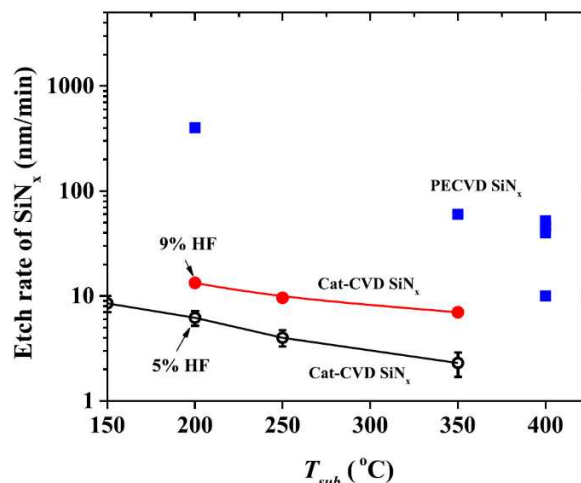


図III-2-(ニ)-C-4 アズスライス基板に市販薬液でのアルカリ処理およびMPAT処理を行った試料の表面SEM像

1.2 薬液耐性の高いSiN_x膜の開発

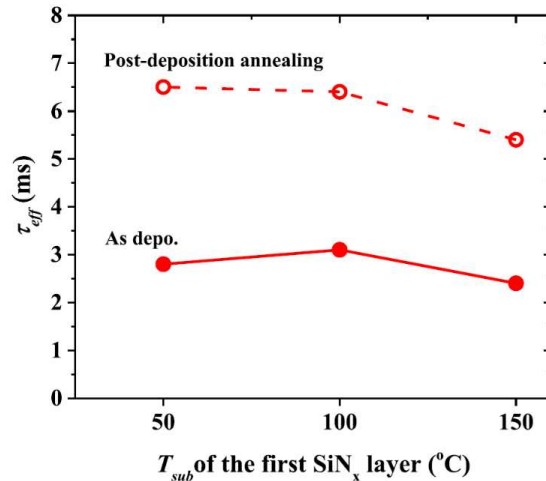
HBC太陽電池の作製工程は、裏面のパターンニング構造を完成させてから光入射側の薄膜を堆積するか、あるいは、表側の製膜を完了してから裏面の工程を実施するかに大別される。特に後者においては、先に堆積したSiN_x膜が、裏面プロセス時の薬液処理を受けるため、高い化学耐性を有する必要がある。Cat-CVDは、水素含有量が低く、緻密なSiN_x膜の形成が可能であるため、高い薬液耐性の薄膜が得られることが知られている。本研究では、後者のプロセスを選択した際に要求される、高薬液耐性のSiN_x膜の開発を目指した。5%HF溶液でのエッチングレート < 5 nm/minを目標とした。

パッシベーション性能の側面から考えると、膜中により多くのHが含まれるSiN_x膜、すなわち低温で堆積した膜の利用が望ましい。一方、薬液に対する耐性を考慮すると、より緻密な膜の利用が望ましく、高温で形成した膜を利用した方が有利である。これらの考えに基づき、基板と接する第一層を低温(50-150 °C)で、薬液と接する第二層を高温(150-350 °C)で堆積する試みを行った。図III-2-(ニ)-C-5に、SiN_xの堆積温度とHF溶液でのエッチングレートの関係を示す。比較のため、プラズマCVDで堆積したSiN_x膜のエッチングレートの文献値も示してある。Cat-CVDで、基板温度350 °Cで形成したSiN_x膜は、9%HFに対しても10 nm/min未滿、5%HFに対しては3 nm/min程度の低いエッチングレートが得られ、目標を達成した。同じ温度でプラズマCVDにより形成したSiN_x膜では、60 nm/minを超えるエッチングレートとなっており、Cat-CVD膜の緻密さにより、高い薬液耐性を実現できることが分かった。



図III-2-(ニ)-C-5 SiN_x堆積時の基板温度とHFでのエッチングレートの関係

図Ⅲ-2-(二)-C-6 に、積層 SiN_xパッシベーション膜の第一層堆積時の基板温度と τ_{eff} の関係を示す。第二層の SiN_x膜は、高い薬液耐性が得られた基板温度 350 °C で形成している。ポストアニール前の試料で 3 ms 程度、ポストアニール後には 6 ms を超える τ_{eff} が得られた。この試料では、第一層の SiN_x 堆積前にもアニールを実施しており、この際に形成された SiO_x 中に生成する正の固定電荷がポストアニールにより増大し、パッシベーション性能を高めたと考えられる。a-Si を用いていないため、寄生吸収の問題もなく、高い薬液耐性とパッシベーション性能も兼ね備えた、HBC 太陽電池の光入射側薄膜として最適な SiN_x の作製に成功した。



図Ⅲ-2-(二)-C-6 第一層堆積時の基板温度と τ_{eff} の関係

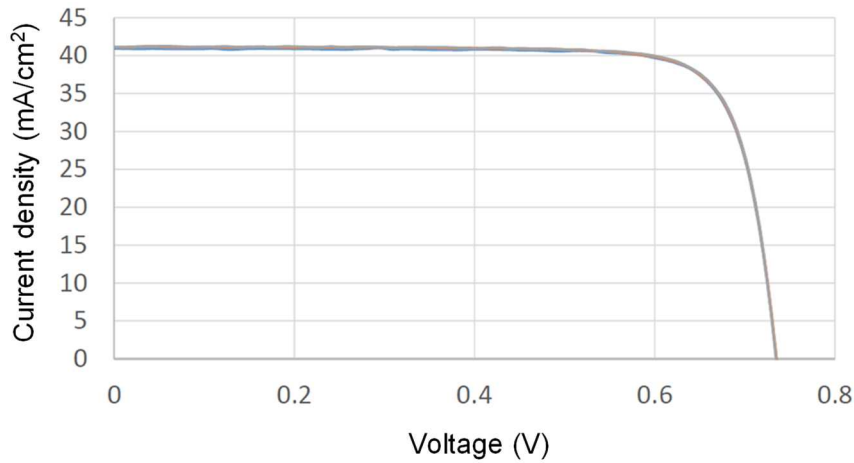
1.3 HBC 太陽電池への Cat-CVD SiN_x膜の利用

HBC 太陽電池の光入射側表面に用いる SiN_x膜は、高いパッシベーション性能に加え、高い光透過率も要求される。また、裏面の a-Si 層および金属電極を先に形成し、表面側の SiN_x膜を後から堆積するプロセスにおいては、SiN_x膜堆積時の試料の過度な昇温により、耐熱性の低い裏面 a-Si 膜のパッシベーション性能が悪化するのを防ぐ必要もある。Cat-CVD においては、触媒体からの熱輻射による試料の昇温があるため、特に注意を要する。

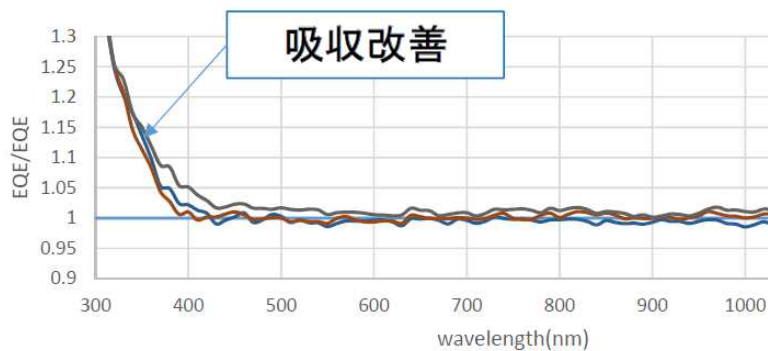
本研究において、Cat-CVD の量産機を模した、試料を垂直方向に設置する構造の Cat-CVD 装置を導入した。この Cat-CVD 装置で、実際の HBC 太陽電池表面に SiN_x膜を堆積し、HBC 太陽電池の製造への Cat-CVD の適用可能性とそのポテンシャルを検証した。本テーマは、共同研究先企業であり、HBC 太陽電池の作製プロセスに高い技術を有するシャープ株式会社との連携のもとで遂行した。シャープ社が HBC セル作製および評価を、JAIST が SiN_x膜堆積を担当した。

図Ⅲ-2-(二)-C-7 に、光照射面側に Cat-CVD で SiN_x膜を堆積した HBC セルの $J-V$ 特性を示す。また、表Ⅲ-2-(二)-C-1 には、この HBC セルの発電性能と、比較のため、シャープ社のプラズマ CVD で SiN_x膜を堆積した参照用 HBC セルの発電性能を示す。参照用 HBC セルと比べ、特に J_{sc} が向上しており、その結果として、高い変換効率 (24.6%) が得られた。両セルの EQE スペクトルの比較を図Ⅲ-2-(二)-C-8 に示す。Cat-CVD SiN_x膜を用いたセルにおいて、短波長感度の改善が確認された。このことから、 J_{sc} の増大は、特に短波長領域の光吸収の差に起因すると考えられる。Cat-CVD では、原料ガスの分解効率が高く、製膜中の原子状水素濃度も高いため、200 °C 以下の低温でも、緻密な SiN_x膜が形成できることが知られている。屈折率~2.0 を有する PECVD SiN_x膜と比較すると、Cat-CVD SiN_xでは、膜が緻密な分、同じ屈折率を得るための膜中 Si/N 比は小さくなり、光透過性が高い膜が得られているものと考えられる。また、参照用 HBC セルと比べて、 V_{oc} の低下は見られず、触媒体からの熱輻射による裏面 i-a-Si のパッシベーション性能の劣化が抑えられることも分かった。

同じ Cat-CVD SiN_x膜を有する HBC セルにおいて、セル中央部でアパーチャーを通して測定した際の特性能も表Ⅲ-2-(二)-C-1 に示している。フルサイズセルと比較すると、 J_{sc} が大幅に向上し、25%を超える優れた変換効率を得られた。使用した製膜チャンバーにおける面分布に課題があることを示唆しているが、一方で、Cat-CVD SiN_x膜が HBC 太陽電池の表面膜として高いポテンシャルを有することも明らかとなった。



図III-2-(二)-C-7 Cat-CVD SiN_x膜を光入射面に堆積したHBC太陽電池のJ-V特性



図III-2-(二)-C-8 参照用セルのEQEで規格化したCat-CVD SiN_x膜を有するHBCセルの相対EQEスペクトル

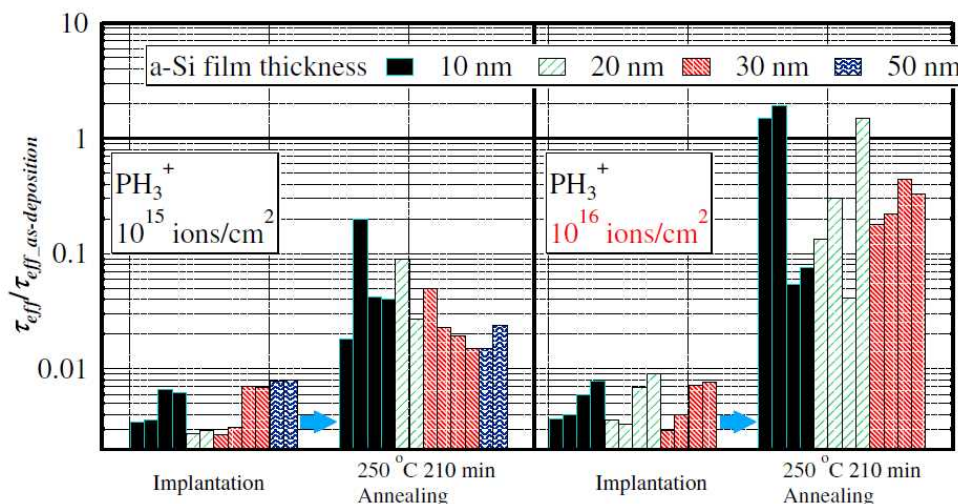
表III-2-(二)-C-1 HBCセルの発電性能

	Eff. (%)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)
PECVD SiN _x (Reference)	24.5	734.6	40.9	81.4
Cat-CVD SiN _x	24.6	734.8	41.2	81.2
Cat-CVD SiN _x (aperture)	25.1	734.5	41.7	81.8

1.4 非質量分離型プラズマイオン注入によるa-Siの極性反転

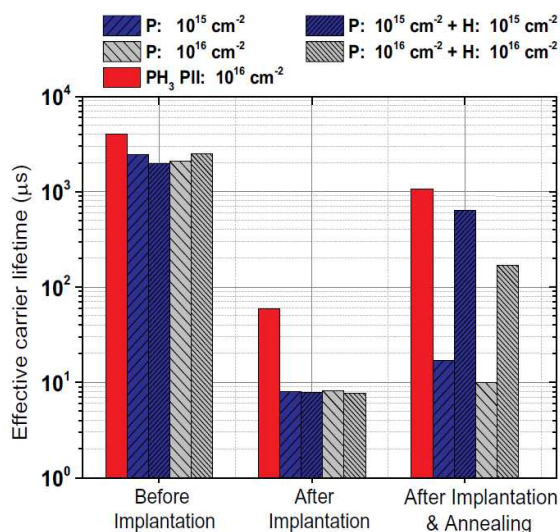
HBC太陽電池の製造コスト低減のために、裏面のドーパ a-Si のパターニング工程の簡略化は最も重要な要素の一つである。フォトリソグラフィを用いる従来の方法では低コスト化は見込めず、簡便なパターニング法の確立が不可欠である。一つのアプローチとして、まず全面にどちらかの極性のドーパ a-Si を堆積し、その後、ハードマスクなどを通して部分的にイオン注入を行うことで極性を反転（カウンタードーパ）し、p/n のパターニングを行う方法が考えられる。従来のイオン注入装置は、所望のイオンを選択的に注入するための質量分離機構の存在により、装置が巨大になることに加え、装置コストも高くなるため、低コスト太陽電池の製造には不向きであった。我々は、株式会社アルバックの協力を得ながら、低コスト化と小型化が可能な非質量分離型のプラズマイオン注入装置(PVI-3000)を用いて a-Si への PH₃ のイオン注入を行い、HBC太陽電池プロセスへの適用可能性を検証した。

一般に、イオン注入を行うと、薄膜、結晶、界面への損傷が起きる。HBC太陽電池において、a-Si/結晶界面への不可逆な損傷は致命的であるため、まず、PH₃ のイオン注入による界面への損傷の程度や回復の可能性を検証した。図III-2-(二)-C-9 にイオン注入後およびポストアニール後の初期値で規格化した τ_{eff} を示す。イオン注入直後には、元の 1/100 程度（絶対値では ~10 μ s）まで τ_{eff} が低減しており、イオン注入により結晶や界面への損傷が起きていることが分かる。その後、250 °Cでのポストアニールを行うと、 τ_{eff} はイオン注入前の水準まで回復した。このことから、PH₃ の非質量分離イオン注入による損傷は、ポストアニールにより回復可能であることが明らかとなった。



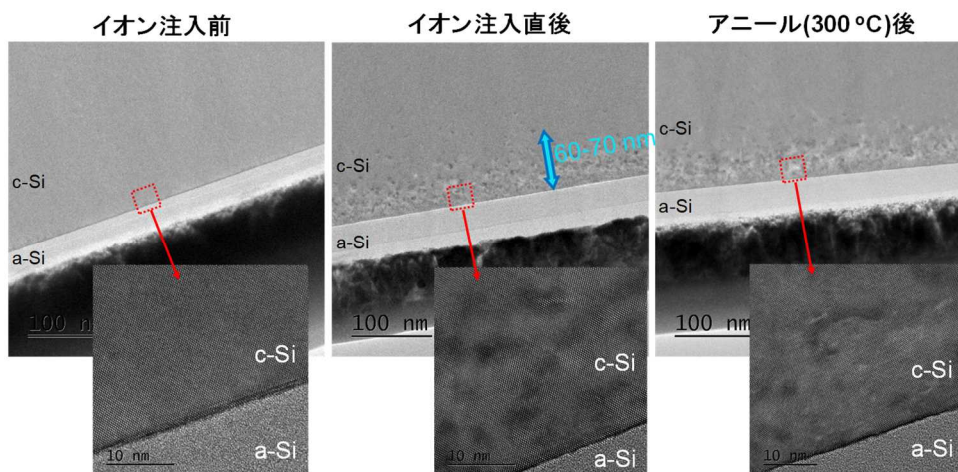
図III-2-(二)-C-9 PH₃イオン注入後およびポストアニール後の初期値で規格化した τ_{eff}

このポストアニールによる τ_{eff} の回復について、質量分離型イオン注入装置も併用しながら注入するイオン種を変化させ、回復機構を調査した。図III-2-(二)-C-10に、各種イオン注入前後およびポストアニール後の試料の τ_{eff} を示す。PH₃イオンを注入した場合、ポストアニール後の τ_{eff} は、ほぼ初期値と同水準の1 ms程度まで回復している。同様の回復効果は、質量分離型イオン注入装置でPとともにHを注入した試料においても見られる。一方で、Hを注入せずPのみを注入した試料においては、 τ_{eff} の顕著な回復は見られなかった。この結果より、イオン注入時に損傷を受けた試料の τ_{eff} の回復には、Hの有無が大きく関わっていることが明らかとなった。また、非質量分離型装置でのPH₃イオンの注入により、PとHが同時に注入されることで、ポストアニール後の界面特性がむしろ良好なものになるという事実は、低コスト化の観点からも重要である。



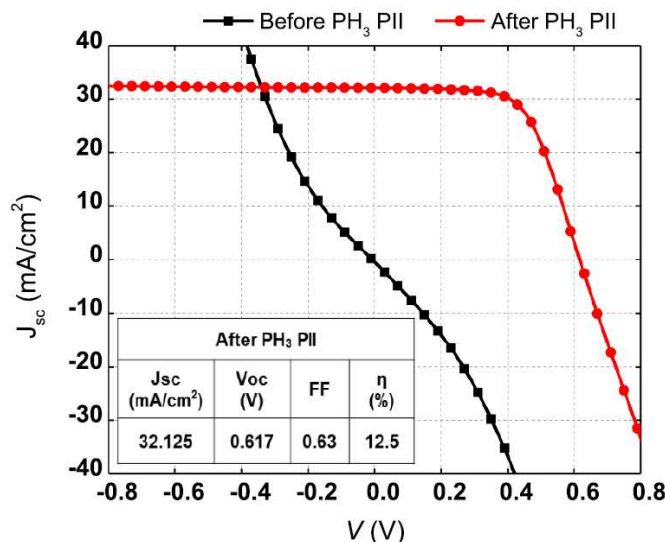
図III-2-(二)-C-10 イオン注入前後およびポストアニール後の試料の τ_{eff}

図III-2-(二)-C-11に、PH₃イオン注入前後およびポストアニール後の試料の断面透過電子顕微鏡(TEM)像を示す。イオン注入前には見られなかったc-Si内の欠陥が、イオン注入後には表面から60-70 nm程度の深さに存在していることが確認される。この欠陥層は、ポストアニール後の像でも確認される。一方で、ポストアニール後の試料は、1 ms以上の良好な τ_{eff} を示しており、結晶構造の乱れがキャリア再結合には大きな影響を与えない機構が存在することが示唆される。また、二次イオン質量分析により、Pは概ねa-Siの膜厚内に収まっており、一方、H原子は、c-Si表面から60 nm程度の深さまで侵入していることが分かり、欠陥生成の原因がHであることが示唆された。また、欠陥層が存在しながら τ_{eff} が回復する機構としては、この注入されたHが結晶欠陥中の未結合手を終端しているためであると考えられる。



図III-2-(二)-C-11 イオン注入前後およびポストアニール後の試料の断面TEM像

p-a-Si への PH_3 注入により形成した n-a-Si について、太陽電池への利用可能性を検証するために、SHJ 太陽電池を作製し、動作確認を行った。図III-2-(二)-C-12 に、作製した SHJ 太陽電池の J - V 特性を示す。比較のため、p-a-Si への PH_3 のイオン注入を行っていないセルの特性も示している。イオン注入を行っていないセルは、両面に p-/i-a-Si を有する表裏対称構造であるため、発電性能は示さず、原点を通る点対称な J - V 特性を示す。一方、イオン注入後のセルでは、明瞭な発電性能を確認した。この結果より、プラズマイオン注入により形成した n-a-Si の、SHJ 太陽電池への利用可能性を実証した。ハードマスクを通したイオン注入により、HBC 太陽電池のドーパ a-Si のパターニングへの活用が期待される。



図III-2-(二)-C-12 p-a-Si への PH_3 イオン注入で形成した n-a-Si を有する SHJ 太陽電池の J - V 特性

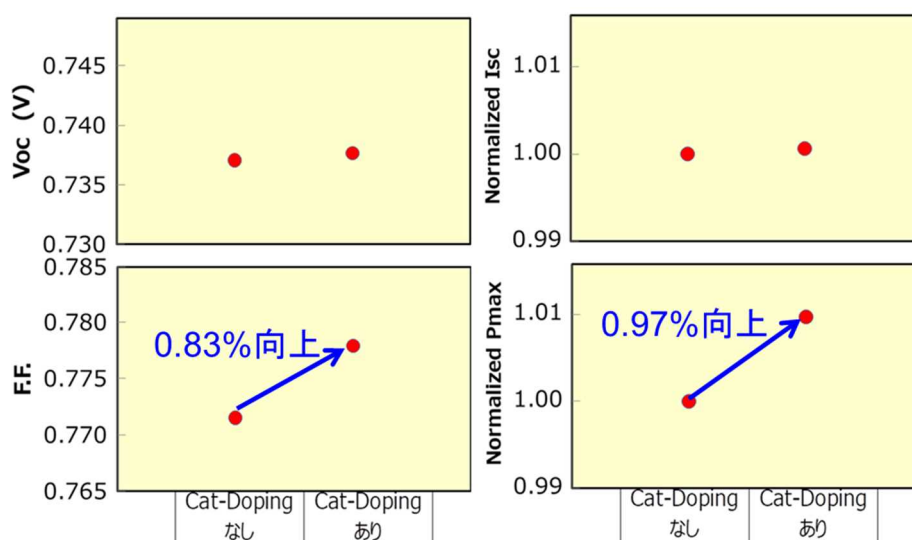
1.5 SHJ 太陽電池への P Cat ドーピングの適用

Cat ドーピングは、ドーピングガスである PH_3 もしくは B_2H_6 を加熱触媒体線での接触分解反応により分解し、その分解種に試料を曝すことで、ドーピングを行う技術である。c-Si 表面に Cat ドーピングを行うと、厚さ~10 nm の極薄ドーパ層が形成される。このドーパ層は、電界効果パッシベーションに利用でき、少数キャリア寿命の向上や SHJ セルの V_{oc} の改善に寄与することを、過去の研究で明らかにしている。これらの先行研究は、数 cm 角程度の小面積試料において得られた結果であり、量産サイズの SHJ セルにおいて、P Cat ドーピングによりどの程度の特性改善が得られるのか、検証が必要であった。本研究では、P Cat ドーピングによる SHJ 太陽電池の特性改善、特に開放電圧の向上 (100 μm 厚の c-Si 基板において V_{oc} 750 mV) を目標に、共同研究先企業であるパナソニック株式会社との連携の上で、検討を進めた。テクスチャ c-Si 基板の片面に P Cat ドーピングを行い、その上に、薄い i-a-Si 膜を JAIST で製膜した。その後の i-, n-, p-a-Si の堆積、透明導電膜(TCO)の製膜、Ag 電極の形成および発電性能

の評価は、パナソニック社にて実施した。P Cat ドーピングは、2%PH₃ガス（He 希釈）の流量 20 sccm、基板温度 200 °C、圧力 1 Pa、処理時間 60 s にて行い、触媒体温度を 800-1300 °C の範囲で系統的に変化させた。

図Ⅲ-2-(ニ)-C-13 に、触媒体温度 800 °C で P Cat ドーピングを行った SHJ セル、および Cat ドーピングを行っていない参照用 SHJ セルの V_{oc} 、 I_{sc} 、FF、最大電力(P_{max})を示す。 I_{sc} と P_{max} は、Cat ドーピングを行っていない参照用セルの特性を基準に規格化している。Cat ドーピングを行ったセルにおいて、 V_{oc} のわずかな改善と FF の顕著な向上が見られ、相対値で 1% 程度の P_{max} 向上を確認した。 V_{oc} および FF の向上は、過去の小面積セルでの検証時にも見られていたが、実用サイズの SHJ セルにおいても、Cat ドーピングの有効性を確認した。なお、1000 °C を超える触媒体温度で Cat ドーピングを行った SHJ セルにおいては、 V_{oc} がむしろ低下し、0.71 V を下回る結果となった。原因として、PH₃ の分解により生じた原子状水素が c-Si 表面をエッチングし、表面再結合速度が増大してしまったことが考えられる。P Cat ドーピング時の触媒体温度の選定が、SHJ 太陽電池の特性向上を引き出す上で重要であることが明らかになった。

一連のセル試作において、Cat ドーピングを行ったセルで得られた V_{oc} の最高値は 0.739 V であった。この値は、100 μm 厚のセルでの V_{oc} に換算すると 0.741 V となる。本研究での V_{oc} の目標値である 0.750 V には届かなかったものの、高い水準の値が得られた。また、今回のセル試作には、本学からパナソニック社までの輸送工程が入っており、これがセル性能に影響している可能性も考えられる。パナソニック社では、~100 μm 厚の SHJ セルで 0.750 V という V_{oc} をすでに得ている。今回の検討で、P Cat ドーピングの量産サイズセルへの有効性も確認できたことから、同一機関内での一貫生産を行えば、0.750 V を超える V_{oc} が実現できると期待される。



図Ⅲ-2-(ニ)-C-13 P Cat ドーピングを行った SHJ セルと比較用セルの発電性能

1.6 触媒体寿命の向上

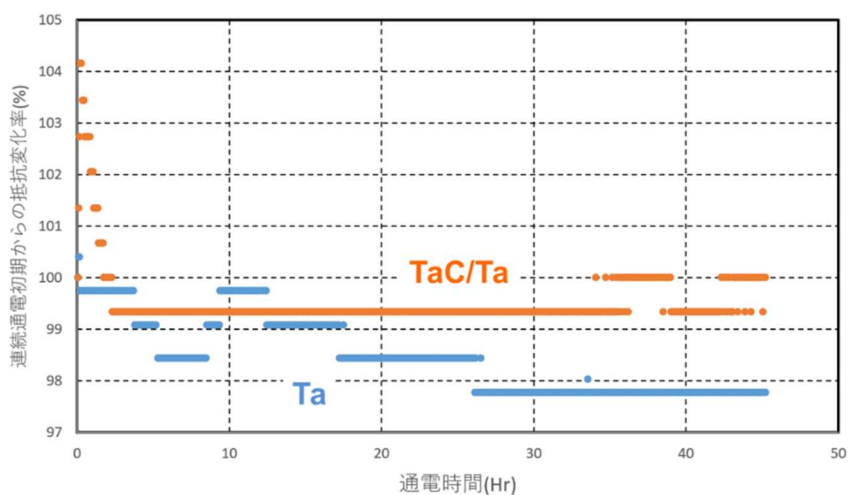
触媒体寿命 60 日以上を実現する基盤技術の確立を目標に、協力企業である株式会社アルバックとの連携の上で、触媒体寿命の向上に取り組んだ。特に、触媒体の表面を事前に炭化しておくことで、連続製膜時の触媒体の抵抗変化を抑制できることを、過去の研究で明らかにしており、この知見に基づき、本研究では、Ta 触媒体線の事前炭化による寿命向上を試みた。まず、量産サイズの試験チャンバーにおいて、触媒体線の均一な炭化が可能であることの確認を行った。炭化には CH₄ ガスを用いた。図Ⅲ-2-(ニ)-C-14 に、使用した試験チャンバーの外観と内部、炭化処理後の Ta 線表面を示す。長尺の触媒体全体において、炭化を示す変色が均一に起きていることを確認した。

炭化処理後の Ta 線を用い、寿命試験を行った。触媒体劣化の指標には、通電加熱時の抵抗値を用いた。触媒体表面に変質があれば、金属材料の抵抗率と放射率の変化により抵抗値が変化するため、抵抗値の安定は劣化の抑止を意味する。p 型 a-Si の堆積を想定し、SiH₄、B₂H₆、H₂ の混合ガス雰囲気下での耐久試験を実施した。図Ⅲ-2-(ニ)-C-15 に、初期値で規格化した触媒体の抵抗値の通電時間依存性を示す。炭化処理を行っていない Ta 触媒体線においては、処理時間の増大に伴う抵抗値の漸減が見られる。一方、表面を事前に炭化処理した Ta 触媒体線では、通電開始直後に抵抗値の大きな変動が見られるも

のの、その後の抵抗値変化は抑えられており、40 時間程度にわたり一定の抵抗値を示している。装置の安全な運用上、60 日間の実時間試験は実施できなかったが、抵抗値変化、すなわち触媒体の変性を抑制する手段を見出したことから、60 日間の連続製膜を実現できる基盤技術は確立したと考える。



図Ⅲ-2-(二)-C-14 寿命試験に用いたチャンバーの外観（左）、内部（中）、炭化処理後の Ta 触媒体表面（右）



図Ⅲ-2-(二)-C-15 初期値で規格化した触媒体抵抗値の通電時間依存性

2. 実用化・事業化見通し

本研究で開発した、炭化処理を施した長寿命触媒体線については、アルバック社の Cat-CVD の量産機において採用される可能性がある。また、プラズマイオン注入による a-Si の極性制御技術に関しても、アルバック社や他機関とも連携し、量産セルの製造技術として成熟させるべく、開発を継続する。MPAT による微細テクスチャ形成技術に関して、本研究開発期間内に、国内外のセルメーカーおよび研究機関より試作の申し出があったことから、量産セル用のウエハの製造工程への展開が見込まれている。Cat-CVD で形成した SiN_x 膜、a-Si 膜の高いパッシベーション性能は、本研究において、量産サイズのセルの性能向上にも寄与できることを実証した。今後、国内外での量産セル製造において、汎用技術として発展していくと期待される。

3. 波及効果

Cat-CVD で形成する SiN_x 膜の特長として、高いパッシベーション性能に加え、100 °C 程度の低温で形成しても高い膜密度を維持できることが知られており、膜への酸素、水蒸気侵入による屈折率の経年変化の抑止につながると期待される。本研究期間内に、連携先機関において、高温高湿試験における Cat-CVD SiN_x 膜の高い屈折率安定性が実際に確認された。SiN_x 膜の屈折率変化は、発電性能に加え、モジュールの意匠性にも影響を与える。特に意匠性維持が重要となる建物壁面などに設置される建材一体型太陽光発電設備における意匠性維持に貢献すべく、2020 年 7 月開始の新たな NEDO プロジェクトで研究開発を行い、その有用性を実証する予定である。

4. 今後の展開

プラズマイオン注入による a-Si の極性制御技術については、裏面電極型での使用を想定されるサイズのパターニングを含め、量産技術化への検討を引き続き進め、セルメーカーへの技術移転を目指す。また、Cat-CVD SiN_x 膜の壁面設置モジュール応用についても、前述の新規 NEDO プロジェクトにおいて開発を行う。このプロジェクトでは、タンデムセルの利用による高効率化を目指しており、トップ層材料の候補の一つとして、ペロブスカイト層を検討している。Cat-CVD SiN_x 膜には、反射防止、パッシベーション、膜自体の屈折率維持（意匠性維持）に加え、ペロブスカイト層を水分による劣化から保護するバリア性能も求められる。壁面設置モジュールの長期信頼性を総合的に下支えする高機能薄膜としての活用を目指し、その基盤技術の開発を遂行する。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	1 (1)	0	0	0	1 (1)
論文	6	4	3	2	2	17
研究発表・講演 (うち国際会議)	13 (4)	20 (9)	20 (9)	17 (11)	8 (3)	78 (36)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020 年 08 月 31 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学	特願 2019-506017	国内 /PCT	2017 年 3 月 13 日	出願	「ヘテロ接合型太陽電池の製造方法、ヘテロ接合型太陽電池およびヘテロ接合型結晶シリコン電子デバイス」	松村英樹 大平圭介 小山晃一

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	T. Ohta, K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Low temperature boron doping into crystalline silicon by boron-containing species generated in Cat-CVD apparatus.	Thin Solid Films	有	2015年5月
2	T. C. Thi, K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Effect of hydrogen on passivation quality of SiN _y /Si-rich SiN _x stacked layers deposited by catalytic chemical vapor deposition on c-Si wafers	Thin Solid Films	有	2015年5月
3	H. Matsumura, K. Higashimine, K. Koyama, K. Ohdaira.	JAIST	Comparison of crystalline-silicon/amorphous-silicon interface prepared by plasma enhanced chemical vapor deposition and catalytic chemical vapor deposition.	J. Vac. Sci. Tech. B	有	2015年5月
4	S. Tsuzaki, K. Ohdaira, T. Oikawa, K. Koyama, H. Matsumura	JAIST	Improvement in passivation quality and open-circuit voltage in silicon heterojunction solar cells by the catalytic doping of phosphorus atoms.	Japanese Journal of Applied Physics	有	2015年6月
5	T. Oikawa, K. Ohdaira, K. Higashimine, H. Matsumura	JAIST	Application of crystalline silicon surface oxidation to silicon heterojunction solar cells.	Current Applied Physics	有	2015年10月
6	L. T. Anh, N. T. Cuong, P. T. Lam, M. Manoharan, H. Mizuta, H. Matsumura	JAIST	First-principles study of hydrogen-enhanced phosphorus diffusion in silicon.	Journal Applied Physics	有	2016年1月
7	J. Seto, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Catalytic doping of phosphorus and boron atoms onto hydrogenated amorphous silicon films.	Japanese Journal of Applied Physics	有	2016年4月
8	S. P. Le, T. Ui, T. Q. Nguyen, H.-A. Shih, T. Suzuki	JAIST	Low-frequency noise in AlTiO/AlGaN/GaN metal-insulator-semiconductor heterojunction field-effect transistors	Journal of Applied Physics	有	2016年5月
9	K. Ohdaira, T. Oikawa, K. Higashimine, H. Matsumura	JAIST	Suppression of the epitaxial growth of Si films in Si heterojunction solar cells by the formation of ultra-thin oxide layers	Current Applied Physics	有	2016年9月
10	T. Ohori, M. Akabori, S. Hidaka, S. Yamada	JAIST	Characterization of spin-orbit coupling in gated wire structures using Al ₂ O ₃ /In _{0.75} Ga _{0.25} As/In _{0.75} Al _{0.25} As inverted heterojunctions	Journal of Applied Physics	有	2016年9月
11	C. T. Nguyen, K. Koyama,	JAIST シャープ(株)	Novel chemical cleaning of textured crystalline silicon	Japanese Journal of	有	2017年4月

	S. Terashima, C. Okamoto, S. Sugiyama, K. Ohdaira, H. Matsumura,		for realizing surface recombination velocity <0.2 cm/s using passivation Cat-CVD SiN _x /a-Si stacked layers	Applied Physics		
12	K. Koyama, N. Yamaguchi, D. Hironiwa, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST (株)アルバック	Simple fabrication of back contact hetero-junction solar cells by plasma ion-implantation	Japanese Journal of Applied Physics	有	2017年7月
13	K. Ohdaira, T. C. Thi, H. Matsumura	JAIST	Passivation of textured crystalline silicon surfaces by catalytic CVD silicon nitride films and catalytic phosphorus doping	Japanese Journal of Applied Physics	有	2017年9月
14	C. T. Nguyen, K. Koyama, H. T. C. Tu, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Texture size control by mixing glass micro-particles with alkaline solution for crystalline silicon solar cells	Journal of Materials Research	有	2018年7月
15	H. T. C. Tu, K. Koyama, C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	High-quality surface passivation of c-Si with chemical resistance and optical transparency by using Cat-CVD SiN _x double layers and an ultra-thin SiO _x film	Japanese Journal of Applied Physics	有	2018年7月
16	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Control of solution wettability on fine-textured crystalline silicon surface to obtain high-quality passivation for solar cells	Applied Physics Letters	有	2019年3月
17	H. T. C. Tu, K. Koyama, N. Yamaguchi, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST (株)アルバック	Conversion of the conduction type of a catalytic-chemical-vapor-deposited p-type a-Si by PH ₃ plasma ion implantation	Thin Solid Films	有	2019年8月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	K. Koyama, K. Higashimine, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Photo-Carrier Generation at a-Si Layer in SiN _x /a-Si Stacked Passivation with Extremely Low Surface Recombination Velocity.	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (New Orleans)	2015年6月
2	T. C. Thi, K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Defect termination on c-Si surfaces by hydrogen for improvement in the passivation quality of Cat-CVD SiN _x and SiN _x /P Cat-doped layers.	5th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (Niigata, Japan)	2015年6月
3	小山晃一、 寺嶋茂樹、 東嶺孝一、 大平圭介、 松村英樹	JAIST	SiN _x /a-Si 積層パッシベーションにおける Cat-CVD 法と PECVD 法の比較	第 12 回 Cat-CVD 研究会 (名古屋大)	2015年7月
4	T. C. Thi, K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Reduction in interface state density at the interfaces of Cat-CVD SiN _x /c-Si and SiN _x /P Cat-doped layer/c-Si structures	第 12 回 Cat-CVD 研究会 (名古屋大)	2015年7月
5	瀬戸純一、 大平圭介、 松村英樹	JAIST	Cat-doping 法を用いた a-Si 膜への B および P のドーピング	第 12 回 Cat-CVD 研究会 (名古屋大)	2015年7月
6	及川貴史、 大平圭介、 東嶺孝一、 松村英樹	JAIST	極薄酸化膜形成による a-Si 堆積時のエピタキシャル成長抑止	第 12 回 Cat-CVD 研究会 (名古屋大)	2015年7月
7	H. Matsumura, K. Higashimine, K. Koyama, K. Ohdaira, S. Yokoyama	JAIST	Atomic scale study on interface of amorphous-silicon/crystalline-silicon.	26th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (Aachen, Germany)	2015年9月
8	瀬戸純一、 大平圭介、 松村英樹	JAIST	P の Cat doping を施した a-Si 膜に対する活性化アニール	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会 (名古屋国際会議場)	2015年9月
9	瀬戸純一、 大平圭介、 松村英樹	JAIST	a-Si パッシベーション膜への Cat-doping による結晶 Si の少数キャリア寿命の変化	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東京工業大学)	2016年3月
10	小山晃一、 山口昇、 田中美和、 鈴木英夫、 大平圭介、 松村英樹	JAIST (株)アルバック	a-Si/c-Si ヘテロ接合太陽電池の a-Si 層へのプラズマドーピング	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東京工業大学)	2016年3月
11	C. T. Nguyen, K. Koyama, S. Terashima, C. Okamoto, S. Sugiyama, K. Ohdaira,	JAIST シャープ(株)	Effect and optimization of chemical cleaning before deposition of Cat-CVD passivation films to realize extremely low surface recombination	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会 (東京工業大学)	2016年3月

	H. Matsumura		velocity on flat and textured structures		
12	H. T. C. Tu, K. Koyama, S. Terashima, H. Matsumura	JAIST	Low temperature Cat-doping of phosphorous atoms into crystalline silicon through ultrathin SiO ₂ layer	第 63 回応用物理学会春季 学 術 講 演 会 (東 京 工 業 大 学)	2016年3月
13	C. T. Nguyen, K. Koyama, S. Terashima, C. Okamoto, S. Sugiyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST シャープ(株)	Effect of chemical cleaning before deposition of Cat-CVD passivation films to realize extremely low surface recombination velocity on textured structure	2016 MRS Spring Meeting & Exhibit (Phoenix, USA)	2016年3月
14	C. T. Nguyen, K. Koyama, S. Terashima, C. Okamoto, S. Sugiyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST シャープ(株)	Cat-CVD passivation realizing extremely low surface recombination velocity < 0.2 cm/s in solar cell structure	IEEE Photovoltaic Specialist Conference (Portland, USA)	2016年6月
15	H. T. C. Tu, S. Terashima, K. Koyama, C. T. Nguyen, H. Matsumura	JAIST	Combination of plasma-damage-less Cat-CVD with a new low temperature impurity doping method, Cat-doping, for improvement of solar cell performance	Euro-Photovoltaic Science and Technology Conference (Munich, Germany)	2016年6月
16	小山晃一、 山口昇、 田中美和、 鈴木英夫、 大平圭介、 松村英樹	JAIST (株)アルバック	Cat-CVD a-Si 膜へのプラズマ イオンドーピング	第13回Cat-CVD研究会 (北見工業大学)	2016年7月
17	大平圭介、 瀬戸純一、 松村英樹	JAIST	a-Si への Cat ドーピング のパッシベーション能力への影響	第13回Cat-CVD研究会 (北見工業大学)	2016年7月
18	H. T. C. Tu, K. Koyama, S. Terashima, C. T. Nguyen, H. Matsumura	JAIST	Phosphorous Cat-doping for improving performance of ultra-thin thermal-SiO _x /Cat-CVD SiN _x stacked passivation	第13回Cat-CVD研究会 (北見工業大学)	2016年7月
19	H. T. Pham, M. Akabori	JAIST	Morphological, structural and optical properties of ZnO nanowires on (111) oriented masked substrates by electrochemical method	第3回有機・無機エレクトロニクスシンポジウム (金沢)	2016年7月
20	H. T. C. Tu, K. Koyama, S. Terashima, C. T. Nguyen, H. Matsumura	JAIST	Improving of passivation quality of Cat-CVD silicon-nitride single layer on crystalline-silicon: how can Cat-doping be applied?	9th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (Philadelphia, USA)	2016年9月
21	K. Koyama, N. Yamaguchi,	JAIST (株)アルバック	A plasma ion implantation to Cat-CVD-Si passivation	9th International Conference on Hot Wire	2016年9月

	M. Tanaka, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura		films	(Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (Philadelphia, USA)	
22	C. T. Nguyen, K. Koyama, S. Terashima, H. T. C. Tu, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Chemical resistant silicon nitride prepared by Cat-CVD for solar cell application	9th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (Philadelphia, USA)	2016年9月
23	K. Ohdaira, T.C. Thi, K. Koyama, J. Seto, H. Matsumura	JAIST	Cat-CVD silicon nitride films and catalytic impurity doping for application to silicon- based solar cells	9th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (Philadelphia, USA)	2016年9月
24	X. T. Pham, M. Schmidt, T. T. Phan, M. Akabori, M. Koyano	JAIST	Fabrication of suspended ultrathin layer of $\text{Mo}_{0.97}\text{Nb}_{0.03}\text{S}_2$ for measurement of thermal conductivity	第13回日本熱電学会学術講演 会 (東京)	2016年9月
25	H. T. C. Tu, K. Koyama, C. T. Nguyen, S. Terashima, H. Matsumura	JAIST	How do we apply Cat- doping to improve passivation quality of SiN_x single layer prepared by Cat-CVD on crystalline silicon?	第77回応用物理学会秋季学術 講演会 (朱鷺メッセ、新潟市)	2016年9月
26	小山晃一、 山口昇、 田中美和、 鈴木英夫、 大平圭介、 松村英樹	JAIST (株)アルバック	イオン注入を用いた裏面電極へ テロ接合太陽電池製造工程の簡 略化—— $\alpha\text{-Si}/\text{c-Si}$ パンペー ション電極の伝導型制御	第77回応用物理学会秋季学術 講演会 (朱鷺メッセ、新潟市)	2016年9月
27	H. T. Pham, M. Akabori	JAIST	Selective area growth of well-ordered ZnO nanowires on (111) oriented masked substrates by electrochemical method	第77回応用物理学会秋季学術 講演会 (朱鷺メッセ、新潟市)	2016年9月
28	K. Koyama, N. Yamaguchi, M. Tanaka, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST (株)アルバック	Simple fabrication of back contact hetero- junction solar cells by plasma-ion-implantation	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (Singapore)	2016年10月
29	K. Ohdaira, J. Seto, H. Matsumura	JAIST	Catalytic phosphorus and boron doping to amorphous silicon films	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (Singapore)	2016年10月
30	H. T. Pham, M. Akabori	JAIST	Raman and photoluminescence spectra of ZnO nanowires growth on (111) oriented masked substrates by electrochemical method	The 5th International Conference on Nanostructures, Nanomaterials and Nanoengineering	2016年10月

31	小山晃一	JAIST	Cat-CVD法とイオン注入を用いたヘテロ接合太陽電池の安価な作製法	学振175委員会・次世代シリコン太陽電池分科会第5回研究会 (北陸先端科学技術大学院大学)	2016年11月
32	小山晃一、 山口昇、 田中美和、 鈴木英夫、 大平圭介、 松村英樹	JAIST (株)アルバック	非質量分離型イオン注入によるa-Si/c-Siヘテロ接合界面のP、H分布	第64回応用物理学会春季学術講演会 (パシフィコ横浜)	2017年3月
33	C. T. Nguyen, K. Koyama, H. T. C. Tu, S. Terashima, H. Matsumura	JAIST	Quick formation of sub-micron scale and low reflectivity texture structures for crystalline-silicon solar cells	第64回応用物理学会春季学術講演会 (パシフィコ横浜)	2017年3月
34	H. Matsumura, C. T. Nguyen, K. Koyama, K. Higashimine, K. Ohdaira	JAIST	Cat-CVD: Damage-free thin-film-deposition technique for fabrication of high efficiency solar cells	BIT's 6th Annual World Congress of Advanced Materials-2017 (Xi'an, China)	2017年6月
35	K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Entrance of low-cost fabrication of back-contact heterojunction solar cells by using plasma ion implantation	The 44th IEEE Photovoltaic Specialist Conference (Washington, D.C.)	2017年6月
36	小山晃一、 大平圭介、 松村英樹	JAIST	Cat-CVD a-Si/c-Siヘテロ接合界面のイオン注入によるHの影響	第14回Cat-CVD研究会 (リーガホテル ゼスト高松)	2017年7月
37	小西武雄、 大平圭介	JAIST	Cat-CVD法を用いて作製したSiヘテロ接合太陽電池に対するスパッタダメージの影響	第14回Cat-CVD研究会 (リーガホテル ゼスト高松)	2017年7月
38	C. T. Nguyen, K. Koyama, H. T. C. Tu, S. Terashima, H. Matsumura	JAIST	A novel formation of low reflectivity sub-micron textures on solar cell crystalline silicon with various thicknesses down to 50 μm	第14回Cat-CVD研究会 (リーガホテル ゼスト高松)	2017年7月
39	H. T. C. Tu, K. Koyama, C. T. Nguyen, S. Terashima, T. Konishi, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Excellent passivation of n-type crystalline Si by SiN _x double layers with high chemical resistivity	第14回Cat-CVD研究会 (リーガホテル ゼスト高松)	2017年7月
40	小西武雄、 大平圭介	JAIST	Cat-CVD法で作製したSiヘテロ接合セルに対するスパッタダメージの検討	日本学術振興会第175委員会第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (名古屋大学)	2017年7月
41	小山晃一、 大平圭介、 松村英樹	JAIST	イオン注入を用いたa-Si/c-Siヘテロ接合界面のHの影響	日本学術振興会第175委員会第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (名古屋大学)	2017年7月
42	小山晃一、 山口昇、	JAIST (株)アルバック	非質量分離型イオン注入によりp-a-Siをn-a-Siに反	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017年9月

	廣庭大輔、 鈴木英夫、 大平圭介、 松村英樹		転させて作製した a-Si/c-Si ヘテロ接合太陽電池	(福岡国際会議場)	
43	小西武雄、 小山晃一、 大平圭介、 松村英樹	JAIST	a-Si 上に金属を直接堆積した Si ヘテロ接合太陽電池の検討	第78回応用物理学会秋季学術講演会 (福岡国際会議場)	2017年9月
44	H. Matsumura, K. Koyama, C. T. Nguyen, K. Higashimine, K. Ohdaira	JAIST	Cat-CVD technology preparing excellent quality passivation films for high efficiency crystalline silicon solar cells	3rd International Conference on Advanced Energy Material (University of Surrey, Guildford, England)	2017年9月
45	C. T. Nguyen, K. Koyama, T. C. T. Huynh, S. Terashima, H. Matsumura	JAIST	A Novel procedure for fabricating sub-micron textures on various thick crystalline-silicon solar cells down to 50 μm with low-reflectivity in wide wavelength	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (Amsterdam)	2017年9月
46	K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Low-cost fabrication of patterned electrodes in hetero-junction back-contact silicon solar cells by plasma ion-implantation	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (Amsterdam)	2017年9月
47	K. Konishi, K. Ohdaira	JAIST	ITO sputtering damage to silicon heterojunction solar cells with Cat-CVD a-Si films and its recovery	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (Amsterdam)	2017年9月
48	H. T. C. Tu, K. Koyama, C. T. Nguyen, S. Terashima, T. Konishi, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Chemically resistive and high quality transparent silicon nitride passivation layers for back-contact crystalline silicon solar cells	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (大津)	2017年11月
49	K. Ohdaira, T. C. Thi, S. Tsuzaki, T. Oikawa, J. Seto, K. Koyama, H. Matsumura	JAIST	Application of catalytic chemical vapor deposition to the fabrication process of high-efficiency crystalline silicon solar cells	13th China SoG Silicon and PV Power Conference (Wyndham Xuzhou East, China)	2017年11月
50	C. T. Nguyen, K. Koyama, H. T. C. Tu, S. Terashima, H. Matsumura	JAIST	A novel procedure for preparation of sub-micron textures on crystalline-silicon used for solar cells with low-reflectivity in wide-wavelength and thickness down to 50 μm	2017 MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston)	2017年11月
51	小西武雄、 小山晃一、 大平圭介、	JAIST	a-Si 上に金属を直接堆積した Si ヘテロ接合太陽電池の検討(2)	第65回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学)	2018年3月

	松村英樹				
52	C. T. Nguyen, K. Koyama, H. T. C. Tu, K. Ohdaira, H. Matsumura,	JAIST	Texture size control by adding glass micro-particles into an alkaline solution used for crystalline silicon solar cells	第65回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学)	2018年3月
53	H. T. C. Tu, K. Koyama, N. Yamaguchi, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST (株)アルバック	Plasma ion implantation: a promising method for fabricating the low cost interdigitated back contact silicon heterojunction solar cell	第65回応用物理学会春季学術講演会 (早稲田大学)	2018年3月
54	H. T. C. Tu, K. Koyama, N. Yamaguchi, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST (株)アルバック	Low cost fabrication of back contact crystalline-silicon heterojunction solar cells with n-a-Si layers partially converted from p-a-Si by phosphine (PH ₃) plasma ion-implantation	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7) (Waikoloa, Hawaii)	2018年6月
55	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	An excellent method to control texture size and reflectivity of crystalline silicon solar cells only by mixing glass micro-particles with an alkaline texturing solution	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7) (Waikoloa, Hawaii)	2018年6月
56	T. Konishi, K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Performance of silicon heterojunction solar cells with various metal-electrodes directly formed on a-Si films without insertion of TCO	World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7) (Waikoloa, Hawaii)	2018年6月
57	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Extremely high passivation quality on textured crystalline silicon made by microparticle-assisted texturing process for solar cells	日本学術振興会第175委員会 第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (ホテルさつぽろ芸文館)	2018年7月
58	Huynh Thi Cam Tu、 小山晃一、 山口昇、 鈴木英夫、 大平圭介、 松村英樹	JAIST (株)アルバック	非質量分離型イオン注入により p-a-Si を n-a-Si に変換した Si ヘテロ接合太陽電池への熱処理効果	日本学術振興会第175委員会 第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (ホテルさつぽろ芸文館)	2018年7月
59	T. Konishi, K. Ohdaira	JAIST	Influence of ITO sputtering on the performance of silicon heterojunction solar cells with Cat-CVD amorphous silicon films	10th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (HWCVD10) (北九州国際会議場)	2018年9月
60	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Excellent passivation quality of MPAT crystalline silicon	10th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated	2018年9月

			textures for solar cells by using proper chemical cleaning and Cat-CVD SiN _x /a-Si stacked layers	Chemical Vapor Deposition (HWCVD10) (北九州国際会議場)	
61	H. T. C. Tu, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Annealing behavior of Cat-CVD p-type a-Si for c-Si surface passivation and its superiority over PECVD counterparts ITO sputtering damage to silicon heterojunction solar cells with Cat-CVD a-Si films and its recovery	10th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (HWCVD10) (北九州国際会議場)	2018年9月
62	H. T. C. Tu, K. Koyama, N. Yamaguchi, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST (株)アルバック	Conversion of conduction type of Cat-CVD p-type a-Si by ion implantation	10th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (HWCVD10) (北九州国際会議場)	2018年9月
63	H. Matsumura, K. Koyama, K. Ogawa, S. Terashima, T. Konishi, T. Baba, Y. Takeuchi, K. Ohdaira	JAIST (株)VIC インター ナショナル	A simplest Cat-CVD apparatus without direct substrate heating system	10th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (HWCVD10) (北九州国際会議場)	2018年9月
64	H. Matsumura	JAIST	Current status of Cat-CVD technology - history of research and current status of industrial implementation (invited)	10th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition (HWCVD10) (北九州国際会議場)	2018年9月
65	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Controlling solution surface tension for the cleaning of small size textured Si surface to obtain extremely low surface recombination velocity of 0.6 cm/s	第79回応用物理学会秋季学術講演会 (名古屋国際会議場)	2018年9月
66	Huynh Thi Cam Tu, 山口昇、 鈴木英夫、 大平圭介、 松村英樹	JAIST (株)アルバック	プラズマイオン注入による良好なパッシベーション品質を持つカウンタドープ n-a-Si 層の形成	第79回応用物理学会秋季学術講演会 (名古屋国際会議場)	2018年9月
67	C. T. Nguyen, H. T. C. Tu, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Extremely low surface recombination velocity of 0.6 cm/s obtained on textured crystalline silicon prepared by microparticle-assisted texturing (MPAT) process for solar cells	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV (Seoul, Korea)	2018年11月
68	H. T. C. Tu, N. Yamaguchi, H. Suzuki, K. Ohdaira,	JAIST (株)アルバック	Formation of counter-doped n-a-Si films with good passivation quality by plasma ion	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV (Seoul, Korea)	2018年11月

	H. Matsumura		implantation		
69	H. T. C. Tu, K. Higashimine, N. Yamaguchi, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST (株)アルバック	Counter doping of boron doped a-Si by plasma ion implantation —the dependence of passivation quality of counter-doped n-a-Si films on boron concentration—	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019年3月
70	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Formation of fine-textured surface on as-cut crystalline silicon wafers by micro particle-assisted texturing (MPAT)	第66回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2019年3月
71	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Control of texture size on as-cut crystalline silicon by microparticle-assisted texturing (MPAT) process	The 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (Chicago, Illinois)	2019年6月
72	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Control of solution wettability on textured c-Si prior to Cat-CVD of SiN _x /a-Si for obtaining extremely low surface recombination velocity of 0.6 cm/s	第16回Cat-CVD研究会 (BIZ SPACE 姫路)	2019年7月
73	H. T. C. Tu, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Effect of annealing temperatures on surface passivation quality of Cat-CVD p-a-Si on c-Si	第80回応用物理学会秋季学術講演会 (北海道大学)	2019年9月
74	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Microparticle-assisted texturing (MPAT) process: almost one order cost-reduction, and toward mass production of low-cost and high-performance crystalline-silicon solar cells	第80回応用物理学会秋季学術講演会 (北海道大学)	2019年9月
75	大平圭介、 Nguyen Cong Thanh、 Tu Huynh Thi Cam、 松村英樹	JAIST	高効率結晶Si太陽電池のためのプロセス技術開発(招待講演)	第80回応用物理学会秋季学術講演会 (北海道大学)	2019年9月
76	H. T. C. Tu, N. Yamaguchi, H. Matsumura, K. Ohdaira	JAIST (株)アルバック	Effect of boron concentration on counter-doping of boron doped amorphous silicon by PH ₃ plasma ion implantation	The 29th International PV Science and Engineering Conference (PVSEC-29) (Xi'an, China)	2019年11月
77	C. T. Nguyen, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Microparticle-assisted texturing (MPAT) process on as-cut crystalline silicon-controllable texture size, low optical reflectivity, quick formation, extremely low material loss and toward mass-production	2019 MRS Meeting & Exhibit (Boston, Massachusetts, USA)	2019年12月

78	Huynh Thi Cam Tu, 山口昇、 大平圭介	JAIST (株)アルバック	カウンタドープ n-a-Si 層を 用いたシリコンヘテロ接合 太陽電池の性能	第 67 回応用物理学会春季学術 講演会 (予稿発行のみ)	2020 年 2 月
----	-----------------------------------	-------------------	--	-------------------------------------	------------

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

D CIS 太陽電池高性能化技術の研究開発（産業技術総合研究所、東京工業大学、学校法人立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学）

1. 成果詳細

本事業は、NEDO が 2014 年 9 月に策定した、「太陽光発電開発戦略」で掲げる発電コスト低減目標の達成に資する研究開発として、CIS 太陽電池を用いた発電コストで、2020 年に 14 円/kWh（グリッドパリティ）、2030 年に 7 円/kWh（ジェネレーションパリティ）を達成するために必要な、共通基盤技術の開発を行うことを目的とし実施された。以下に各研究機関で得られた主要成果をまとめる。

光吸収層の高品質化による CIS 太陽電池の高効率化（産業技術総合研究所）

産業技術総合研究所では「CIS 光吸収層の高品質化による CIS 太陽電池の高効率化」を目指し、(1) バッファ層/CIS 光吸収層界面の高品質化技術の開発、(2) CIS 結晶の高品質化技術の開発、(3) 新規透明導電膜材料の探索と CIS/Mo 界面の制御技術の開発、に取り組んだ。成果概要を下記にまとめる。

(1) バッファ層/CIS 光吸収層界面の高品質化技術の開発

カリウム (K) やルビジウム (Rb)、セシウム (Cs) など比較的重いアルカリ金属の CIS 膜表面照射処理によって、RbInSe₂ などの異相層がバッファ層/CIS 光吸収層界面に形成されることの直接観察に世界で初めて成功した。この異相層による界面再結合抑制効果の可能性のほか、CIS 薄膜中の粒界やバルク結晶中におけるアルカリ金属の効果など、CIS 太陽電池デバイス性能向上メカニズムはアルカリ金属によってもたらされる複数効果の表れであることを見出し、後述されるデバイス性能向上に資する知見を得ることに成功した。また、Rb や Cs などの重いアルカリ金属添加効果は、Ga 組成比 GGI (GGI: [Ga]/([Ga] + [In])) が 0.3 程度の比較的低い光吸収層を用いた場合にはデバイス性能向上効果があるが、GGI 比が高い、例えば極端な例として CuGaSe₂ (GGI~1) を光吸収層とした太陽電池デバイスにおいては、デバイス性能の向上はほとんど見られないことも分かり、アルカリ金属種と母体材料物性の組み合わせも重要であることを明らかにした。

(2) CIS 結晶の高品質化技術の開発

熱光照射処理による効率向上効果と銀 (Ag) の添加によって性能向上を実現し、効率 22.2% を達成した。また、熱光照射処理によるキャリア密度向上効果はアルカリ金属を全く含まない CIS 太陽電池デバイスやバッファ層を全く用いないデバイス構造においても観察される CIS 材料固有の物性であることを発見した（従来は、光照射効果は用いるバッファ層材料などに依存するため、バッファ層材料等由来の現象である可能性も残されていた）。一方で、アルカリ金属添加によってキャリア密度は無アルカリ CIS 太陽電池デバイスと比較して大きく向上することを発見し、熱光照射または熱バイアス印加によって促進される準安定アクセプタ形成とアルカリ金属効果との関連性を明確にした（詳細なメカニズムについてはまだ不明な部分が残される）。CIS 光吸収層では、ダブルグレーディング構造の採用による性能向上が蒸着製膜 CIS において歴史的に広く行われてきた。ここでは、表面側のグレーディング (GGI 比) を制御することで開放電圧と短絡電流密度を制御することで、ベースラインとなる小面積セル効率を向上させた。

(3) 新規透明導電膜材料の探索と CIS/Mo 界面の制御技術の開発

新規な透明導電膜材料である、水素・タングステン添加酸化インジウム (IWOH) の応用によって、4 セル直列接続ミニモジュール構造 (約 4 cm²) で効率 20.9% を達成した。集積型構造 CIS 太陽電池デバイスとしては世界最高性能である。IWOH は反応性プラズマ堆積法 (RPD) により製膜した。IWOH を表面透明電極層として用いた場合には特に波長 500-1100 nm 領域における光吸収の改善が顕著となり、すなわち短絡電流密度の向上に大きく貢献した。また、これまで CIS/MoSe₂/Mo 接続によって形成される裏面界面における再結合損失はあまり注目されていなかったが、シミュレーションと Mo 電極層引き剥がし実験の併用により、裏面再結合の影響が無視できないことを確認した。具体的には、CIS 光吸収層形成後に Mo 裏面界面から CIS 層を引き剥がすことにより、CIS 光吸収層のフォトルミネッセンス発光寿命が向上することが確認され、CIS 光吸収層と Mo 裏面電極層との接触（正確な界面構造はセレン化モリブデンの存在があるため CIS/MoSe₂/Mo とされる）が必ずしも理想的なオーミック接触となって

おらず、キャリア再結合中心が残存する可能性が示唆された。同時に、今後 Na 添加による $\text{MoSe}_2:\text{Na}$ の物性評価と共に CIS 光吸収層/裏面電極層界面の制御によって更なる高効率化に向けた改善余地があることが示唆された。

界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化（東京工業大学）

$\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) 太陽電池の構造は、 $n\text{-ZnO}/n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}/\text{Mo}/$ 青板ガラスであり、多くのヘテロ接合界面を有する。異種材料で構成されるヘテロ接合界面には欠陥が生成されやすく、界面制御は極めて重要な研究開発課題である。なかでも $n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}$ 界面は、光入射側であるため光励起されたキャリアが流れる部分であるとともに、太陽電池の pn 接合を形成する最も重要な界面となっている。本課題では、この $n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}$ ヘテロ接合界面の界面制御による CIGS 太陽電池の高効率化技術を開発した。

CIGS 太陽電池において入射光は、 $n\text{-ZnO}$ 透明導電膜を通して光吸収層である CIGS に吸収される。光励起された電子は $n\text{-ZnO}$ に、正孔は裏面の Mo 電極に収集される。このとき、光入射側である $n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}$ ヘテロ接合界面では、バンドの曲がりにより電子が多数キャリア、正孔が少数キャリアとなっている。このためヘテロ接合界面に欠陥が多く存在すると、少数キャリアである正孔濃度に比例した界面再結合が生じ、変換効率の低下を招く。このため CIGS よりも禁制帯幅の広い材料系を $n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}$ 界面に挿入、正孔濃度を減少させることにより、界面再結合速度を抑制することができる。この材料系の候補としては、Cu が欠損状態である Cu 欠損相があげられる。例えば Cu 組成が約 11% である $\text{Cu}(\text{InGa})_3\text{Se}_5$ は、 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 組成に比べて禁制帯幅が 0.3eV 広く、しかも禁制帯幅の増加分はほぼ全て価電子帯側に生じるという特性を有する。このため、ヘテロ接合界面に約 0.3eV の正孔障壁 (ΔE_v 、価電子帯オフセット) が形成可能となる。

必要とされる正孔障壁の高さ

本研究開発では最初に、この Cu 欠損層の挿入効果についてデバイス解析を行った。デバイス解析では、CIGS 太陽電池の光吸収層のバンド構造を単傾斜構造とした。ヘテロ界面には界面欠陥層と Cu 欠損層を導入し、Cu 欠損層の ΔE_v を変化させて太陽電池特性を評価した。 ΔE_v は、0~0.3eV まで変化させた。 ΔE_v の変化に対して短絡光電流 (J_{sc}) と曲線因子 (FF) は若干の増加傾向を示すものの大きく変化しないことが示された。これに対して開放端電圧 (V_{oc}) は、 ΔE_v の増加に対して初期の 0.55V から 0.65V へと大きく増加し、 ΔE_v の値が 0.15eV を超えると飽和傾向を示した。これに伴い変換効率は、16%から 20%へと増加した。以上より、 $n\text{-CdS}/p\text{-CIGS}$ ヘテロ接合界面にワイドギャップ材料を挿入し、価電子帯オフセット (ΔE_v) を設けることは、CIGS 太陽電池の変換効率向上に有効であることが明らかとなった。また、このときの ΔE_v の大きさとしては、0.15eV 以上が必要とされることが解析により示された。

Se 照射による Cu 欠損層の均一化と太陽電池特性

本研究開発においては、3段階法により CIGS 光吸収層を作製した。CIGS 表面の Cu 欠損層の制御を行うため、2段階目と3段階目にインターバルを設け、CIGS 光吸収層を形成する段階と最表面層を形成する段階とを明確に分離した (Se 照射法)。即ち、

- t_a : 基板温度が最高温度に達する時刻 (t_p) から2段階目の製膜終了時刻 (t_{2nd}) の間
- t_{Se} : 2段階目と3段階目の間に Se 元素だけを照射する時間
- t_{3rd} : 3段階目の製膜時間

の3段階に成長プロセスを区分した。3段階法において2段階目前半では、1段階目で製膜した $(\text{In}, \text{Ga})_2\text{Se}_3$ が Cu-Se と反応して CIGS 膜が成長する。その後、2段階目の後半、 t_a 時間が長くなるほど Cu および Se が過剰となり、CIGS 表面には Cu-Se 相が析出する。この Cu-Se 相は低抵抗であり太陽電池特性を悪化させる。このため、3段階目 (t_{3rd}) において $\text{In}(\text{Ga})\text{-Se}$ を照射することにより再び表面を CIGS とする。このとき、2段階目と3段階目の間に Se 元素だけを照射する時間 (t_{Se}) を設けることにより、CIGS 膜表面の Cu-Se 相を均一化させる。この Se 照射時間を設けた3段階法は、本研究開発において新たに考案した方法であり、これにより CIGS 膜表面に均一な Cu 欠損層が形成可能となった。

以上の研究開発により、Se 照射無しの変換効率 17.8% ($V_{oc}=0.646$ V, $J_{sc}=39.0$ mA/cm², FF=70.5%) が、Se 照射法を用いて均一な ΔE_v 層を表面に設けることにより、開放電圧は+30mV とな

り、 $V_{oc} \times J_{sc}$ は 26.3 mW/cm^2 が得られた。これより開放端電圧 V_{oc} を $+30\text{mV}$ 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 26.2 \text{ mW/cm}^2$ を得るとの最終目標が達成された。このときの表面層は定比組成の $\text{Cu}(\text{InGa})_3\text{Se}_5$ ではなく、Cu 欠損状態の CIGS であることが分かり、 ΔE_v の実測値として約 0.15eV が得られた。

Cu 欠損層の成長モデル

以上の実験結果を元に、3段階法における表面 Cu 欠損層の形成モデルを考察した。2段階目の製膜終了直後 ($t_{3rd} = 0$ 分) では、CIGS 膜表面に不均一に Cu-Se 相が残留する。この残留 Cu-Se 相の量は、2段階後半の t_a 時間により制御される。この過剰 Cu-Se 相を CIGS へと変えるのが3段階目である。3段階目の成長温度では表面の Cu-Se 相は溶融している。従って3段階目において $\text{In}(\text{Ga})\text{-Se}$ を照射すると溶融 Cu-Se から Cu が供給され、CIGS が成長すると考えられる。 t_{3rd} の時間が短い場合には、過剰に堆積された Cu-Se 相が3段階目で照射される $\text{In}(\text{Ga})\text{-Se}$ と反応し切れず未反応のまま CIGS 膜表面に残留する。さらに t_{3rd} の時間を取ると、CIGS 膜表面の Cu-Se 相が3段階目で照射した $\text{In}(\text{Ga})\text{-Se}$ と反応、膜表面から Cu-Se が枯渇する。しかしながら引き続き $\text{In}(\text{Ga})\text{-Se}$ が照射されるため、バルク CIGS から Cu が拡散することにより CIGS のさらなる成長が進行する。このとき、 $\text{In}(\text{Ga})\text{-Se}$ の供給に対してバルクからの Cu の拡散が遅いため、Cu-Se 枯渇後の CIGS 層の Cu 組成は Cu 欠損になると予想される。この状態からさらに $\text{In}(\text{Ga})\text{-Se}$ を供給すると、Cu 欠損層の膜厚が厚くなるとともに、バルク CIGS の Cu 組成も Cu 欠乏へと変化する。以上より3段階法においては、①成長過程により必然的に表面に Cu 欠損層が生じること、②この Cu 欠損層の厚さは Cu-Se 相の堆積時間である t_a および3段階目の成長時間 t_{3rd} により制御可能であること、③Cu 欠損層の形成とバルク CIGS の Cu 組成 (Cu 欠乏) が切り離せないことが明らかとなった。

バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発 (立命館大学)

pn 接合界面のキャリア再結合低減によって V_{oc} を向上させるには、界面欠陥低減とバンド制御によるキャリア分離が有効である。CIS 太陽電池に用いられている Zn 系透明電極 (2 元) である ZnO:B は、CIS よりも伝導帯位置が 0.1eV 程度低いと考えられる。バッファ層が厚い場合や CIS 表面で埋込型接合が形成されている場合には、バッファ層と CIS 間の伝導帯不連続量 (CBO) が界面のキャリア再結合に大きな影響を与える。一方、バッファ層での光吸収を抑えて短波長損失を極限まで低下させるにはバッファ層の薄膜化が効果的であるが、この場合には pn 接合がバッファ層/CIS 間で完全に形成されるのではなく、透明電極 (TCO) が影響するため、TCO と CIS 間の CBO を整合させる必要がある。また、TCO はバッファ層よりもキャリア濃度が高いために、バッファ層/CIS 間よりも、TCO/CIS 間で pn 接合を形成した方が拡散電位を大きくすることができると考えられる。

本研究では、伝導帯位置を制御できる材料として $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O}$ などの Zn 系 3 元混晶薄膜を用いて、CBO 制御可能な TCO を開発するとともに、デバイス内の総合的なバンドラインナップの最適化を実現するために、同材料系を用いた高抵抗バッファ層を開発した。さらに、CIS 表面の改質技術を組み合わせることによって、オールドライプロセスで 22% を超える高効率 CIS 太陽電池を実現した。

(1) TCO の伝導帯位置制御による効率向上

出光興産株式会社によって作製された CIS/Mo/ガラス基板を用いて、TCO の伝導帯位置制御による効率向上の検討を行った。スパッタ法で $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O:Al}$ を作製し、その Mg 比で伝導帯位置を制御した。CIS 基板上に第一バッファ層として $\text{Cd}_{0.75}\text{Zn}_{0.25}\text{S}$ を、第二バッファ層として $\text{Zn}_{0.79}\text{Mg}_{0.21}\text{O}$ を堆積し、その上に、TCO として Mg 比を変化させた $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O:Al}$ を堆積し、グリッド電極を設けることで太陽電池を完成した。また、比較となる従来構造として、 ZnO:Al/ZnO/CdS を TCO、第二バッファ、第一バッファとする太陽電池を作製した。 $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O:Al}$ を用いた前者の太陽電池の V_{oc} は Mg 比の増加によって上昇し、Mg 比が 0.12 の時に最大で 694mV という従来構造よりも 21mV 高い値が得られた。この時の $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O:Al}$ の E_g は 3.76eV であった。また、この時に効率も最大となり 20.6% が得られた。効率向上のポテンシャルを示す指標である $V_{oc} \times J_{sc}$ 値は 27.5mW/cm^2 であった。一方で、Mg 比が 0.12 を超えると $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O:Al}$ の抵抗率の上昇により FF が大きく減少し、高い効率を得ることができなかった。今回の成果は本プロジェクト開始前にシミュレーションで予想していたが、本プロジェクトによって世界で初めて、TCO の伝導帯位置制御による V_{oc} および効率の向上を実証した。

(2) CIS 表面の改質と (Zn, Mg)O を用いたオールドライブプロセスでの高効率化

出光興産株式会社で開発された Cs 処理を施した CIS 基板を用いて、表面改質技術の開発とバンド制御したデバイス構造の最適化を行った。まず、CIS 表面の改質、即ち、エージング処理（減圧雰囲気下での長期間保持）の効果を検証した。バッファ層である (Zn, Mg)O をスパッタ法で成膜する前に、CIS 基板を減圧雰囲気下で長期間（10 ヶ月間）保持することによって表面が改質され、効率が低い CIS 太陽電池を作製することが可能であることがわかった。これは、表面酸化が進んだこと、さらに、InS あるいは In_2S_3 と同定される化合物が検出されていることから、In-O-S 系化合物が表面に形成されることで、スパッタダメージに対するバッファ、あるいは、キャリア分離に有効な価電子帯オフセットが形成されたためであると考えられる。上記のようにエージング処理を施した Cs 処理 CIS 基板に、洗浄を一切行わずに、スパッタ法で $\text{Zn}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}$ を直接形成し、さらに TCO として MOCVD 法で $\text{Zn}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}:\text{B}$ を形成し、その後グリッド電極、反射防止膜としての LiF を堆積することで CIS 太陽電池を作製した。その結果、効率 22.6% が得られ、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値で 29.0 mW/cm^2 、 V_{oc} では従来構造よりも 30mV 高い値が得られ、本プロジェクトの最終目標を達成した。

本研究では、CIS の表面改質技術を開発し、かつ、(Zn, Mg)O 系材料を用いたバンドアライメントの最適化を行うことで、従来のウェットプロセスを用いないオールドライブプロセスで、世界で初めて効率 22% を超える CIS 太陽電池を実現することに成功した。

エピタキシャル成長を利用した CIS 太陽電池の高効率化指針の解明（東京理科大学）

本研究では、CIGS 単結晶薄膜をエピタキシャル成長法により作製し、格子欠陥、結晶粒界などがデバイス特性へ及ぼす影響を多結晶薄膜 CIGS 太陽電池と比較検討することで、CIGS 太陽電池/モジュールの高効率化への指針を明らかにすることを目標とした。上記の目標を達成するため、(1) Mo 裏面電極層のエピ成長技術開発、(2) CIGS 光吸収層のエピ成長技術開発、(3) エピ成長 CIGS 太陽電池の作製技術開発および多結晶薄膜 CIGS 太陽電池との特性比較、の 3 項目に取り組んだ。成果概要を下記にまとめる。

(1) Mo 裏面電極層のエピ成長技術開発

低温バッファ層の概念を金属 Mo 薄膜に適用した新規スパッタ法を開発した。基板としてサファイア単結晶基板を用い、DC マグネトロンスパッタ法で低温バッファ層を堆積した後、基板温度 800°C で製膜した。その結果、Mo(110)面がサファイア(0001)面に平行にエピ成長した結晶粒界の無い良質なエピ成長 Mo 薄膜を得た。

(2) CIGS 光吸収層のエピ成長技術開発

CIGS 薄膜のエピ成長は MBE 装置を用い、上記で開発した Mo エピ膜を下地として、3 段階法で製膜した。生成膜は表面平坦性に優れ、結晶粒界が極めて少ないエピ膜となった。また、高分解 TEM 観察の結果、CIGS/Mo 間に六方晶 MoSe_2 層が存在し、各層間のエピタキシャル関係は $\text{Mo}(110)//\text{MoSe}_2(0001)//\text{CIGS}(112)$ であった。さらに CdS バッファ層を堆積した結果、CdS(111)面が CIGS(112)面に平行にエピ成長していること、CIGS/CdS 界面では、Cd が CIGS 膜中に 50nm 程度まで拡散しており、Cd 拡散が結晶粒界でなく、結晶粒内で起こることを明らかにした。

(3) エピ成長 CIGS 太陽電池の作製技術開発および多結晶薄膜 CIGS 太陽電池との特性比較

上記の CIGS エピ膜を光吸収層とした $\text{Al}/\text{Ni}/\text{ZnO}:\text{Al}/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CIGS}/\text{Mo}/\text{サファイア}$ 構造の太陽電池を作製した。最初に、比較対象用の多結晶薄膜 CIGS 太陽電池の高効率化技術開発を実施した。その結果、アルカリ金属処理 CIGS 太陽電池では、CIGS 製膜後に極少量の In を照射することで変換効率が向上すること、およびアルカリ金属と熱・光照射 (HLS) の複合処理により CIGS 太陽電池の変換効率が改善できることを初めて実証した。この HLS 処理に暗状態で加熱処理を加えることでキャリア濃度制御が可能となり、さらに、変換効率を改善できた。また、アルカリ金属と熱・バイアス印加 (HBS) の複合処理による変換効率の改善を見出した。次に、上記の成果をエピ CIGS 薄膜太陽電池に適用し、多結晶 CIGS 薄膜太陽電池とのセル特性比較を行い、以下の結論を得た。

アルカリ金属処理を行ったエピ CIGS 太陽電池でもキャリア濃度が増加し、開放電圧と変換効率が改善される。この結果はアルカリ金属/HLS 処理による効果が結晶粒界特有な現象でないことを示唆

する。エピ CIGS 太陽電池の方が多結晶太陽電池に比べて開放電圧が高く変換効率も高い。エピ CIGS 薄膜では、結晶粒界が極めて少なく、光生成キャリアの再結合中心となる欠陥が少ないことが主因と考えられる。したがって、今後 CIGS セル/モジュールの高効率化には結晶粒界の低減が効果的であり、特に、ワイドギャップ CIGS では結晶粒界が再結合中心となるため、大粒径化が重要と考えられる。

結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援（筑波大学）

CIS 太陽電池小面積セルにおいて光電変換効率 23%を達成するための技術開発について、当機関では特に、CIS 太陽電池において再結合電流損失を誘起する欠陥準位に焦点を絞り、(1)バンドギャップ中の欠陥準位の検出と原因究明、(2)点欠陥や Cu_2Se 等の不純物欠陥の分布解明、(3)欠陥低減化技術の開発を行ない、変換効率 23%の達成に向けた欠陥低減化技術開発の支援を行った。成果概要を下記にまとめる。

(1) CIS 試料のアルカリ処理による再結合過程の変化と欠陥評価

CIS 試料にアルカリ処理を施すと、開放起電圧が数 10 mV 向上し、変換効率の向上に寄与する。本研究項目ではこの処理による再結合過程の変化を、新規開発した波長依存電流-電圧解析法により評価し、欠陥評価と組み合わせて開放起電圧の向上する要因について考察を行った。

まず、CIS 試料のアルカリ処理による再結合過程の変化を、波長依存電流-電圧解析法により評価した。単色光フラックスの違いによる再結合過程の変化を (a)未処理、(b)カリウム処理 CIS 試料について解析した結果、未処理試料では、500nm 単色光（光の侵入長 100 nm）に比べ 950 nm 光（光の侵入長 750 nm）照射時のキャリア収集ロスが大きい。一方、カリウム処理試料では、波長依存性に顕著な違いが現れなかった。このことは、未処理試料で特に表面から離れた領域で生成した光キャリアが電極への収集前に再結合していることを示唆している。なお同様の効果はセシウム処理試料でも現れた。

このアルカリ処理の効果については、界面パッシベーション層の形成、バンド揺らぎの抑制、不純物除去など諸説あり、またバルク、界面、空乏層のどの位置の再結合を効果的に抑制しているのかは不明瞭であった。当機関ではアルカリ処理による CIS 太陽電池の電気特性の変化と欠陥準位の相関を裏付けるべく、光容量法ならびにアドミッタンススペクトロスコピー法による欠陥準位評価に取り組んだ。その結果、CIS 太陽電池のアルカリ処理後に、バンドギャップ内の欠陥準位 ($E_v+0.8$ eV: III_{Cu} アンチサイトに起因) 応答が減少し、さらにはバンド揺らぎを示唆するアーバックエネルギーの減少を確認した。このことは、アルカリ処理には界面改質だけでなく、空乏層やバルクも改質し欠陥準位を低減していることを示唆している。続いて、バルク、界面、どの再結合が変換効率に影響を与えるかを調べるため、熱平衡状態ならびに開放状態でのバルク、空乏層、界面再結合速度を導出した。その結果、CIS 太陽電池はアルカリ処理によりバルク、空乏層、界面全ての領域での再結合速度が減少したが、そのうちバルク再結合速度の抑制効果が最も高いことが明らかになった。すなわち、アルカリ処理は特に界面再結合よりもバルク再結合の抑制に効果的に働き、開放起電圧の改善により変換効率を向上させていることが明らかになった。

(2) 数値解析ならびにデバイスシミュレーションによる再結合評価

再結合過程の詳細を解析するには、数式を用いた解析が有効であるが、CIS 太陽電池内部にはバンド構造のグレーディングがあるため膜中不均一な内部電界が生じ、光生成キャリアのドリフトを考慮する必要がある。この複雑な光生成キャリアや再結合を理解するため、デバイスシミュレータを用いて再結合過程を考察した。このシミュレーションにおいて、欠陥準位は膜中均一な位置におき、CIS 吸収層において $E_v+0.7$ eV の位置に固定した。この欠陥準位の密度を $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ と $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ の二通り用意し、500 nm と 950 nm の単色光の照射条件（フラックスは一定）で計算した電流電圧特性を評価した結果、欠陥密度 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ の時には波長により曲線因子ならびに開放起電圧に差が現れた。一方 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ の時にはその差が現れず、研究項目 (1) で実施した実験結果を再現した。

(3) 変換効率 25%に向けた開発指針の構築

変換効率 25%の CIS 太陽電池開発に向け、その指針を決めるべく、輻射再結合にかかる再結合係数

B を Van-Roosebroeck-Shockley の式を用いて見積もった。その結果、再結合定数 B は $7 \times 10^{11} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ と見積もられた。この値を用いて数値解析を行った結果、現行の蛍光寿命を 100 ns から 190 ns に伸ばしつつ、吸収損を減らして短絡電流を 38.5mA から 41.1 mA まで向上させると、変換効率 25% が実現可能であることが判明した。これに対し、短絡電流の値が変化しないとすると、寿命を理論限界の 500 ns まで伸ばしても変換効率 24.3% にとどまることが明らかになった。以上の解析より、キャリア再結合、すなわち欠陥の低減と光吸収損の低減が今後重要になることを突き止めた。

積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発（鹿児島大学）

Cu(In, Ga)(S, Se)₂ (CIS) 系太陽電池の性能向上に必要な開放電圧及び短絡電流の増大には、開放電圧の上限を規定する拡散電位の実測と界面損失の主な起源であるヘテロ界面におけるバンド接続状態の定量的評価に基づくプロセス制御が必要とされ、電池構造を縦貫する領域でのバンドプロファイルと CIS 層形成後の処理による電子構造変化の実験的解明と改善指針の導出が望まれていた。当機関は、連携研究機関であるソーラーフロンティア・昭和シェル/出光興産 (SF 社) から供給されたセレン化・硫化法による CIS 層を中心に、高品質光吸収層の電子構造、同層を基幹とする電池構造内のヘテロ界面のバンド接続、電池構造を縦貫するバンドプロファイルの実験的決定に取り組み、高性能電池における電子構造の特徴の明確化、変換効率 23% の達成に向けた電子構造改善指針の導出を試みた。電子構造の深さ方向プロファイルを評価するための技術として窓層/バッファ、バッファ/CIS 層界面形成、CIS/Mo 界面露出、「その場」アルカリ処理技術、表面光起電力分光システムを開発した。それらと電子分光法による評価により窓層から Mo 電極に至る電池構造を縦貫するバンドプロファイルの *in-situ* 決定に初めて成功した。また、バッファ/CIS 界面のバンド接続がほぼ理想的であること、この界面の拡散電位がアルカリ処理により増大し、処理による開放電圧の増大に対応すること、CIS 層内にバンドギャップ二重傾斜、裏側に Back Surface Field が存在することを明らかにした。以下に得られた成果を要約する。

(1) CIS 層表面の状態、電子構造、CdS バッファ/CIS 光吸収層界面のバンド接続

20% を超える変換効率を発現する SF 製の CIS 層表面は、三段階蒸着法による CIS 表面が Cu 欠損の導入により価電子帯上端 (VBM) が選択的に下降した Cu 欠損相からなることとは異なり、低い Ga/III 族比、高い S/VI 族比、化学量論に近いアニオン/カチオン比を持ち、VBM と伝導帯下端 (CBM) が共にフェルミ準位から遠ざかることでワイドギャップしたカルコパイライト相であることを明らかにした。VBM は CuInSe₂ と比べて下降しており、後述するように CIS 内部が CuInSe₂ に近い電子構造を持つことを考慮すると、この表面が再結合を抑制するホールミラー構造を持つことが示された。この表面と CdS バッファの界面はキャリア分離の駆動力となる界面誘起バンド湾曲 (iibb) が 0.4 eV 以上と大きいと共に、これにより CIS と CdS の CBM の大きな差が吸収されることで、伝導帯オフセット (CBO) がほぼゼロの、界面再結合抑制のために理想的な伝導帯接続状態にあることを明らかにした。また、CdS/CIS/Mo 構造の光起電力を光アシストケルビンプローブにより *in-situ* 評価したところ、CdS-CIS 内部間の CBM 差にほぼ等しい約 0.45 V が得られ、この界面が拡散電位のほぼ総量に開放電圧に変換される優れた光応答性を持つことを明らかにした。

(2) CIS 層内バンドギャップ傾斜、CIS 層裏面、Mo 電極界面の電子構造

表面光起電力分光スペクトルの閾値から決定した SF 社製 CIS 構造のバンドギャップの最小値は 1.05 eV であり、元素置換無し CuInSe₂ に近い狭ギャップ領域が存在することが確認された。また、これは三段階蒸着法による CIS の中で高効率を発現するものと同様であった。一方、超高真空リフトオフにより露出させた SF 社製 CIS 層の裏側表面は組成が Ga/III 族比 > 0.6、S/VI 族比 ≤ 0.4 と表面と比べて反転していること、CBM=1.0-1.1 eV、バンドギャップ約 1.6 eV の高 CBM、広ギャップ相であることが明らかとなった。これらから SF 社製の高品質 CIS 層内にバンドギャップの二重傾斜が存在することが実証された。CIS 内部から裏面表面に向かう CBM 上昇は 0.3 eV 以上と見積もられ、裏面側に有効な Back Surface Field が形成されていると考えられた。

一方、超高真空中で露出させた Mo 電極表面の電子構造は CIS 裏面より狭いギャップ、低 CBM を持つアルカリドープ Mo(S, Se)₂ 相；アルカリ濃度=数 at.% と解釈できることが見出された。このとき VBM は Mo 電極側の方が 0.1 eV 程度低エネルギーにある試料が大半であった。アルカリを含む

CIS/Mo 界面のバンド接続の決定には、極高真空中測定等による仕事関数の決定が必要であるが、この結果は CIS/Mo 界面が必ずしも理想的なオーミック接触となっていない可能性を示唆しており、性能向上に向けた研究の余地があることが示された。

(3) アルカリ処理が CdS/CIS 界面バンド接続に及ぼす影響

K 処理、Cs 処理ともに CIS 層表面のバンド端が無処理表面より上昇することが見出され、アルカリ処理がホール濃度を上昇させることが分かった。一方、アルカリ処理 CIS 上に堆積したの CdS の CBM は無処理上のものと等しく、アルカリ処理により CIS-CdS 間の CBM 差が増大することが分かった。界面ダイポール、捕獲電荷が変化しなければ CBM 上昇と iibb 増大は同期し CBO は変化しないが、実測結果は Cs 処理表面上の界面では iibb が CBM 上昇に同期して増大したが、K 処理界面の iibb は不変あるいは僅かに減少した。CdS/Cs 処理界面では理想的伝導帯接続を維持しつつ拡散電位、iibb が増大する、開放電圧、短絡電流の両面で有利な電子構造が実現することが明らかとなった。K 処理試料では界面ダイポールが発生したと考えられた。アルカリ処理効果は変換効率 20%以上の高特性領域での更なる改善に有効であるが、アルカリ元素依存性の起源を含めて最適化に向けた検討の余地があると考えられる。

理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究 (龍谷大学)

CIS 太陽電池小面積セルにおいて光電変換効率 23%を達成するための技術開発について、当機関では特に、高効率 CIS 太陽電池の材料設計の観点から、(1) $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ 系光吸収層の材料設計に関する研究、(2) $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$ 擬二元系における $\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{In})$ 比の制御に関する研究、(3) $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ 系光吸収層の表面および粒界に関する研究を行ない、変換効率 23%の達成に向けた変換効率向上に対する支援を行った。成果概要を下記にまとめる。

(1) $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ 系光吸収層の材料設計に関する研究

CIS 太陽電池で世界最高の変換効率を達成している出光興産では、 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ (CIGSSe)系固溶体を光吸収層に用いている。当機関では $\text{Cu}(\text{Ga}_x\text{In}_{1-x})(\text{S}_y\text{Se}_{1-y})_2$ 系化合物半導体について、 $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ 比 (x)や $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ (y)比の変化が CIGSSe 系化合物の電子構造に与える影響について詳細に検討し、CIGSSe 系固溶体の禁制帯幅とバンド構造(価電子帯上端(VBM)と伝導帯下端(CBM)の準位)の $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ 比 (x)と $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ (y)比をパラメーターとした 3次元マップを作成した。本研究により、 CuInSe_2 - CuGaSe_2 系や CuInS_2 - CuInSe_2 系のボーイングパラメーター (b)がそれぞれ、0.189 や 0.085 と小さく、 CuInS_2 - CuGaS_2 系や CuGaS_2 - CuGaSe_2 系では、0.472 や 0.256 と比較的大きいことが明らかになった。今回作成した三次元マップを用いると、 $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ 比と $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ 比から CIGSSe 系固溶体の禁制帯を推定することが出来る。CIGSSe 系固溶体のバンド構造(価電子帯上端(VBM)と伝導帯下端(CBM)の準位)の $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ 比と $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ 比をパラメーターとした 3次元マップも作成した。CIGSSe 系固溶体の VBM の準位は $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ 比が変化してもほとんど変化しない。それに対して、CBM は大きく上昇する。このことから、 $\text{CuIn}(\text{S}, \text{Se})_2$ の In の Ga 置換により禁制帯幅が広がるのは CBM の上昇による。一方、 $\text{Cu}(\text{Ga}, \text{In})\text{Se}_2$ の Se を S で置換する場合は、 $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ 比の増加とともに VBM が低下し、CBM が上昇する。この電子構造のマップから、CIGSSe 系固溶体の VBM と CBM の準位を $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ 比や $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ 比から予測することが出来るようになった。CIS 系化合物の元素置換によるバンド構造の変化は、当機関が以前から提案している $[\text{CuSe}_4]^{7-}$ と $[\text{InSe}_4]^{5-}$ クラスターの分子軌道ダイアグラムに基づいて推定できることを確認した。

(2) $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3$ 擬二元系における $\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{In})$ 比の制御に関する研究

$(1-x)\text{Cu}_2\text{Se}-(x)\text{In}_2\text{Se}_3$ 系化合物の結晶構造と電子構造について詳細に研究し、次のことを明らかにした。結晶構造は $0.5 \leq x \leq 0.55$ の範囲ではカルコパイライト型 CuInSe_2 相、 $0.60 \leq x \leq 0.65$ ではカルコパイライト型 CuInSe_2 相とスタンナイト型 CuIn_3Se_5 相の混合相、 $0.70 \leq x \leq 0.75$ ではスタンナイト型 CuIn_3Se_5 相、 $0.80 \leq x \leq 0.85$ ではスタンナイト型 CuIn_3Se_5 相と六方晶 CuIn_5Se_8 相の混合層相へと変化する。カルコパイライト型 CuInSe_2 相の禁制帯幅は $\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{In})$ 比 (x)が変化してもほとんど変わらない。それに対して、スタンナイト型 CuIn_3Se_5 相では x が大きくなると禁制帯幅も大きくなる。カルコパイライト型 CuInSe_2 相では、 x が大きくなると VBM と CBM が平行して深くなる。スタンナイト型 CuIn_3Se_5 相の VBM はカルコパイライト型 CuInSe_2 相の VBM のほぼ延長線上の値に対して、CBM はカルコパイライ

ト相からスタンナイト相に変化する際に段階的に浅くなる。そして、スタンナイト型 CuIn_3Se_5 相でもカルコパイライト相と同様に $\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{In})$ 比(x)の増大とともにVBMとCBMの両方とも深くなり、その傾きはカルコパイライト相よりも大きい。このように、 $\text{Cu}/(\text{Cu}+\text{In}(\text{Ga}))$ 比を変化させることによって、電子構造を制御出来ることを明らかにした。

(3) $\text{Cu}(\text{Ga}, \text{In})(\text{S}, \text{Se})_2$ 光吸収層の表面および粒界に関する研究

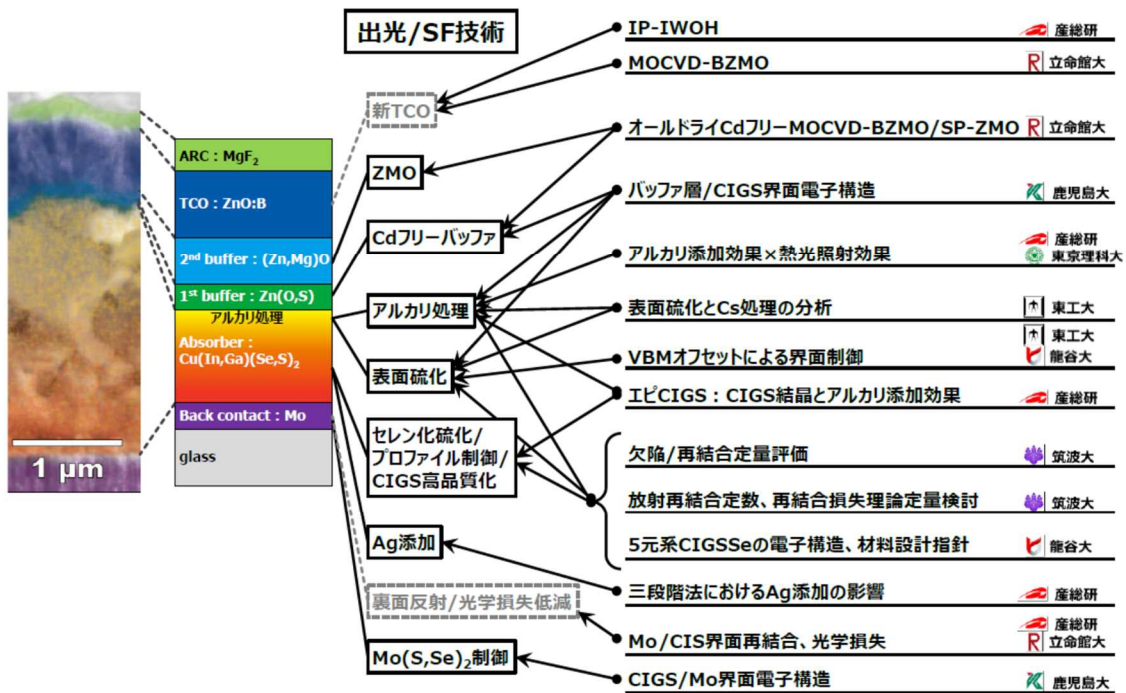
CIGSSe 光吸収層の電子構造に基づいて、高効率 CIS 太陽電池の光吸収層の深さ方向の組成分布について提案した。裏面側の $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ 比を高くすることでCBMの準位を高くし、伝導電子に対する障壁をつくり、裏面電極界面での再結合を低減する。表面側は、 $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ 比を高くしてVBMを深くすることで正孔に対する障壁をつくり、バッファ層との界面での再結合を低減させる。表面の $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ 比を高くする方法として $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 膜を作製した後で硫化処理を行う事で可能となる。硫化処理は表面と同様に粒界の $\text{S}/(\text{S}+\text{Se})$ 比を高くすることが出来る。そうすると、粒界のVBMが深くなり、正孔の障壁が形成され、粒界での再結合を低減することが出来る。 $\text{Cu}(\text{Ga}, \text{In})(\text{S}, \text{Se})_2$ 光吸収層の表面に関する研究の一環として、深さ分解 XAFS 法を用いて、三段階法で作製した $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 膜とセレン化/硫化法で作製した $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ 膜を用いてCs処理の効果について研究した。Cs処理は、三段階法で作製した $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 膜の $\text{Cu}/(\text{Ga}+\text{In})$ 比を低下させたが、セレン化/硫化法で作製した $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ 膜については変化を与えなかった。本実験から、高効率太陽電池に用いられているCs処理は、表面だけではなく薄膜内部の効果で変換効率の向上に寄与していることが明らかになった。

2. 実用化・事業化見通し

本研究開発事業は CIS 太陽電池モジュールの高性能化を通じた発電コストの低減を目指し、事業会社である出光興産（ソーラーフロンティア：SF）と産業技術総合研究所、および6大学が参画するコンソーシアムを結成して実施した。

出光興産では、コンソーシアムにおける基盤的研究を通じて得られた物質・デバイスに関する知見を CIS 太陽電池の製造プロセスに反映することによって、デバイスの高性能化に繋げた。その結果、CdフリーCIS小面積セルにおいて23.4%、CdフリーCISサブモジュールにおいて19.8%の変換効率を達成した。さらにこれらの成果は子会社であるソーラーフロンティアの量産工場へ移転され、CIS量産モジュールの高出力化に活かされている。製品モジュール出力は本事業開始前より15W引き上げられ現在185Wクラスとなっている。市場における発電コストも大幅に低減され13.3円/kWhとなり、最終目標である14円/kWhが達成された。さらに量産ラインにおいてはモジュール変換効率16.1%(197.2W)の試作モジュールが製造できており、今後よりいっそうの高出力化と発電コストの低減が期待される。

研究連携コンソーシアムでは、出光興産が開発するモジュールの高効率化・高性能化に関する共通基盤技術を開発した。図III-2-(二)-D-1には、出光興産/SFにおける技術と研究連携コンソーシアムが開発した基盤技術との関連を示す。特に本研究開発では、n型バッファ層からCIGSSe表面における評価・分析ならびにアルカリ処理技術に関して著しい進展と理解があった。ZnMgO バッファ層の開発は出光興産におけるZnMgO第2バッファ層の導入へ、バッファ層/p-CIGSSe界面の評価・正孔障壁導入は硫化プロセスの理解と最適化に繋がり、出光興産における高性能化技術開発の加速に貢献した。また、さらなる変換効率向上を目指すためには、バルク再結合成分の8割を占める非輻射再結合の低減が重要であること、 MoSe_2 裏面界面でのバンド接続の理解が必要であることなど、高効率化に向けた新たな研究開発課題を明らかにした。



■ 示唆に富んだ知見は出光/SFの材料物性、デバイス、プロセスの理解や設計に活かされている

図III-2-(二)-D-1 出光興産/SFにおける技術と研究連携コンソーシアムが開発した基盤技術との連携

3. 波及効果

本研究開発の波及効果を、この開発技術が最終的に実用化されたときに想定される経済的効果、市場規模、省エネルギー効果の概算値で示す。

2015年にMETIで策定された「長期エネルギー需給見通し」では、2030年度における総発電電力量の内7%を太陽光発電が占めるとしている。このとき太陽光発電に必要な設備容量は59.6GWとなる。この設備容量は、環境省の報告によるCO₂排出係数を用いると、CO₂削減量として4,375万トン/年に相当する。このCO₂削減量は、約束草案の削減目標量3.8億トンCO₂/年の約11.5%に相当する。さらに普及拡大が加速、2030年以降2050年までの間にさらに100GWの太陽電池が導入されると仮定すると、2050年における累積導入量は約160GWに達する。これは、CO₂の削減量1.6億トンCO₂/年に相当し、2050年の温室効果ガス削減量(11.2億トン)のおよそ14%を占め、NESTI2050で掲げるCO₂排出80%削減の目標に大きく貢献する。

一方、省エネルギーの観点から一次エネルギーの原油換算で考えると、2030年度の総発電量の7%は、1,909万kℓ/年(原油)の使用削減に相当する。また、仮に160GWの太陽電池が導入された場合には、5,124万kℓ/年(原油)となる。資源エネルギー庁は、徹底した省エネルギーによりエネルギー需要を2013年度比13%の削減(5,030万kℓ/年)を目指しており、省エネルギー効果にも大きく貢献することとなる。このように本研究開発は、低炭素社会へ向けたCO₂削減、省エネルギー効果による社会への貢献など、その波及効果は大きい。

4. 今後の展開

本研究の研究開発で得られた技術・知見は、そのまま軽量・柔軟な高性能太陽電池の開発に適用することが可能である。「脱炭素社会」の実現のためには、再生可能エネルギーが主力電源の一翼を担うことが必須であり、再生可能エネルギーの研究の最終的な目標もそこにある。再生可能エネルギーが主力電源の一翼を担うためには、その前に克服しなければならない多くの課題が残されている。その一つは、設置場所の制約の問題である。統合イノベーション戦略推進会議が2020年1月21日に策定した「革新的環境イノベーション戦略」によると、太陽光発電システム設置の適地が減少する問題が次第に深刻となっていることが重要な問題として指摘されている。従って、再生可能エネルギーの主力電源化を図るためには、設置場所の制約を克服する、革新的な太陽光発電技術の開発が急務である。

設置場所の制約を克服するためには、耐荷重性能の低い場所や曲面を有する場所にも設置可能な、柔

軟・軽量・高効率な新しい太陽電池を開発することが技術開発の一つとなる。また、そのような太陽電池が開発されれば、新規用途の開拓が可能になり、その観点からも再生可能エネルギーの大幅な導入拡大を図ることが可能になる。

本研究課題で開発した CIS 太陽電池は、薄膜太陽電池であるため、軽量・柔軟な太陽電池に適用することが可能であり、その点において現時点において主流となっている結晶シリコン系の太陽電池とは大きく異なる。また CIS 太陽電池は、変換効率や耐久性の点において、薄膜太陽電池の中では最も優れたものの一つである。また、CIS 太陽電池を含むカルコパイライト系の化合物薄膜太陽電池は、エネルギー禁制帯幅を広範囲に制御することが可能であるため、タンデム太陽電池を構成することが可能であり、更なる高性能化の可能性を秘めている。特に CIS 系材料をボトムセルに選択すると、軽量・柔軟なタンデム太陽電池という、更に新しい種類の太陽電池を開発することが可能となる。

図Ⅲ-2-(二)-D-2には、CIS 太陽電池の多用途展開を示す。太陽光発電システムのさらなる普及、浸透のために CIS 太陽電池モジュールの軽量化を図ることにより、耐荷重性能が低い屋根への設置、曲率を持った防音壁への設置など新たな用途拡大の道が拓ける。また、多接合化による超高効率太陽電池の開発により、電動航空機などへの展開が可能となる。このような新規用途を開拓して再生可能エネルギーの大幅な導入拡大を図ることが、CIS 太陽電池による「脱炭素社会」の実現に向けた今後の展開となる。

cis太陽電池			接合		技術開発項目
			特徴	Eg制御, 耐久性, 高信頼性	
軽量	特徴 耐久性, 耐衝撃性, 耐陰影性, 形状自由性	ベンダブル	単接合 耐荷重が低い屋根設置, RE100, 防音壁 	多接合 バス, 自家用車 	軽量基板
		フレキシブル	用途拡大 ステッカー型, シール型 	飛行機 	
技術開発項目		高効率化	広Eg材料開発, 接合技術開発, 低χ・広Eg窓層開発		

図Ⅲ-2-(二)-D-2 CIS 太陽電池の多用途展開

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	2 (0)	4 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (0)
論文	5	17	21	22	21	86
研究発表・講演 (うち国際会議)	12 (4)	59 (31)	70 (42)	45 (27)	30 (17)	216 (121)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	1	2	2	1	1	7

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	学校法人 立命館	特願 2017-24303	国内	2017/2/13	出願公 開	薄膜太陽電池	峯元高志、 チャントナ ジ ャカパン
2	(国研) 産業技術総 合研究所	特願 2017-035420	国内	2017/02/27	取下	太陽電池及び その製造方法	石塚尚吾
3	(国研) 産業技術総 合研究所	特願 2017-122558	国内	2017/06/22	取下	太陽電池およ びその製造方 法	西永慈郎
4	(国研) 産業技術総 合研究所	特願 2017-151265	国内	2017/08/04	取下	太陽電池およ びその製造方 法	西永慈郎
5	東京理科大 学	特願 2017-196357	国内	2017/10/6	出願公 開	薄膜太陽電池 の製造方法	杉山睦, 中 時夫, イブール カリ, 松浦純平
6	(国研) 産業技術総 合研究所	特願 2019-501293 (特許 6738078)	国内	2018/02/16	特許査 定	太陽電池及び その製造方法	石塚尚吾

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査 読	発表年月
1	T. Nishimura, Y. Hirai, Y. Kurokawa, A. Yamada	東京工業大 学	Fabrication of Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells with a single graded band profile	Physica Status Solidi (b), Vol. 252, 6, 1235-1238 (2015)	有	2015/5
2	T. Nishimura, Y. Hirai, Y. Kurokawa, A. Yamada	東京工業大 学	Control of valence band offset at CdS/Cu(In, Ga)Se ₂ interface by inserting wide-bandgap materials for suppression of interfacial recombination in Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, 08KC08 (2015)	有	2015/7
3	N. Terada, S. Yoshimoto, K. Chochi, T. Fukuyama, M. Mitsunaga, H. Tampo, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Sakai, T. Kato, H. Sugimoto	鹿児島大 学, 産業技 術総合研究 所	Characterization of electronic structure of Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ absorber layer and CdS/Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ interfaces by <i>in-situ</i> photoemission and inverse photoemission spectroscopies	Thin Solid Films vol. 583, pp. 166 - 170 (2015).	有	2015
4	上川由紀子, 西永慈郎, 石塚尚吾, 柴田肇, 仁木栄	産業技術総 合研究所	Effects of Mo surface oxidation on Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells fabricated by three- stage process with KF post- deposition treatment	Japanese Journal of Applied Physics, 55, 022304 (2016)	有	2016/1

5	T. Maeda W. Gong T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties and band structures of CuInSe ₂ , CuIn ₃ Se ₅ , and CuIn ₅ Se ₈ phases in Cu-poor Cu ₂ Se-In ₂ Se ₃ pseudo-binary system	Jpn. J. Appl. Phys., 55, 04ES15 (2016).	有	2016/3
6	S. Ishizuka, P. J. Fons, A. Yamada, Y. Kamikawa- Shimizu, H. Shibata	産業技術総合研究所	Interface oxygen and heat sensitivity of Cu(In,Ga)Se ₂ and CuGaSe ₂ solar cells	Applied Physics Letters 108, 203902-1-5 (2016)	有	2016/5
7	J. Nishinaga, Y. Kamikawa, T. Koida, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Degradation mechanism of Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells induced by exposure to air	Japanese Journal of Applied Physics 55, 072301 (2016).	有	2016/6
8	T. Umehara, S. Iinuma, A. Yamada	東京工業大学	Investigation of the effects of rear surface recombination on the Cu(In,Ga)Se ₂ solar cell performances	Electronic Materials Letters, Vol. 12, No. 4, 479-483 (2016)	有	2016/7
9	T. Nishimura, S. Toki, H. Sugiura, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Interfacial quality improvement of Cu(In,Ga)Se ₂ thin film solar cells by Cu-depletion layer formation	Appl. Phys. Express, Vol. 9, pp. 092301 (2016)	有	2016/8
10	T. Koida, J. Nishinaga, H. Higuchi, A. Kurokawa, M. Iioka, Y. Kamikawa- Shimizu, A. Yamada, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Comparison of ZnO:B and ZnO:Al layers for Cu(In,Ga)Se ₂ submodules	Thin Solid Films 614, 79 (2016).	有	2016/9
11	T. Umehara, K. Nakada, A. Yamada.	東京工業大学	Impact of roll-over-shaped current-voltage characteristics and device properties of Ag(In,Ga)Se ₂ solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 56, 012302-1-012302-5 (2016)	有	2016/12
12	A. Uedono, M. M. Islam, T. Sakurai, C. Hugenschmidt, W. Egger, R. Scheer, R. Krause- Rehberg, K. Akimoto	筑波大学	Vacancy behavior in Cu(In _{1-x} Ga _x)Se ₂ layers grown by a three-stage co-evaporation process probed by monoenergetic positron beams	Thin Solid Films 603, (2016) 418-423.	有	2016
13	Mohamm A. Halim, M. M. Islam, X. Luo, T. Sakurai, N. Sakai, T. Kato,	筑波大学, 産業技術総合研究所	A comparative study on charge carrier recombination across the junction region of Cu ₂ ZnSn(S,Se) ₄ and Cu(In,Ga)Se ₂ thin film solar cells	AIP Advances 6, (2016), 035216.	有	2016

	H. Sugimoto, H. Tampo, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto					
14	X. Hao, K. T. Chowdhury, T. Sakurai, Y. Kamikawa- Shimizu, S. Ishizuka, A. Yamada, H. Shibata, K. Akimoto	筑波大学, 産業技術総 合研究所	The Influence of Sodium in High Ga-Content Cu(In _{1-x} ,Ga _x)Se ₂ (CIGS) Solar Cells	Proceedings of the 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016, 3CV.4.17, 1213- 1215.	有	2016
15	I. Khatri, H. Fukai, H. Yamaguchi, M. Sugiyama T. Nakada	東京理科大 学	Investigation of the Potassium Fluoride Post-deposition Treatment on Cu(In,Ga)Se ₂ Thin Films and Solar Cells	Solar Energy Materials and Solar Cells, 155 (2016) 280-287.	有	2016
16	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Time-resolved photoluminescence of Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ thin films and temperature dependent current density-voltage characteristics of their solar cells on surface treatment effect.	Curr. Appl. Phys. 17 (2017) 461- 466.	有	2017/1
17	K. Ueda, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties of CuGa ₃ S ₅ , CuGa ₃ Se ₅ and CuIn ₃ (S,Se) ₅ and CuGa ₃ (S,Se) ₅ systems	Thin Solid Films, 633, 23-30 (2017).	有	2017/1
18	T. Koida	産業技術総 合研究所	Amorphous and crystalline In ₂ O ₃ -based transparent conducting films for photovoltaics	Physica Status Solidi, A 214- 2, pp.1600464	有	2017/2
19	T. Maeda, C. Zhao, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic, optical, and electronic properties of (Cu,Li)InS ₂ system	Thin Solid Films, 633, 172-178 (2017).	有	2017/3
20	T. Maeda, W. Gong T. Wada	龍谷大学	CuInSe ₂ , CuIn ₃ Se ₅ and CuIn ₅ Se ₈ phases, in Cu-poor Cu ₂ Se-In ₂ Se ₃ pseudo-binary system - their crystal structures, optical properties and electronic structures -	Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 4, 77- 83 (2017).	有	2017/3
21	T. Maeda, Y. Yu, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties and band diagrams of CuGaS ₂ , CuGa ₃ S ₅ , and CuGa ₅ S ₈ phases in Cu-poor Cu ₂ S-Ga ₂ S ₃ pseudo-binary system	Jpn. J. Appl. Phys., 56, 04CS12 (2017)	有	2017/3
22	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Thin-film Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ - based solar cell with (Cd,Zn)S buffer layer and Zn _{1-x} Mg _x O window layer	Prog. Photovolt. 25 (2017) 431- 440.	有	2017/3
23	J. Chantana, T. Minemoto	立命館大学	Recent Progress of Cu(In,Ga)Se ₂ and Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ -based Solar Cells.	AAPPS Bulletin 27 (2017) 7-13.	有	2017/4

24	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Aluminum-doped Zn _{1-x} Mg _x O as transparent conductive oxide of Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ -based solar cell for minimizing surface carrier recombination	Prog. Photovolt. 25 (2017) 996-1004.	有	2017/6
25	T. Umehara, F. A. B. M. Zulkifly, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Conduction band offset engineering in wide-bandgap Ag(In,Ga)Se ₂ solar cells by hybrid buffer layer	Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 56, 08MC09 (2017)	有	2017/7
26	J. Nishinaga, T. Koida, S. Ishizuka, Y. Kamikawa, H. Takahashi, M. Iioka, H. Higuchi, Y. Ueno, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Effects of long-term heat-light soaking on Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells with KF postdeposition treatment	Applied Physics Express 10, 092301 (2017)	有	2017/8
27	X. Zhang, A. Yamada	東京工業大学	High-temperature fabrication of Ag(In,Ga)Se ₂ thin films for applications in solar cells	Phys. Status Solidi (A), Vol. 214, No. 10, 1700042 (2017)	有	2017/8
28	T. Koida, Y. Ueno, J. Nishinaga, H. Higuchi, H. Takahashi, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells with Amorphous In ₂ O ₃ -Based Front Contact Layers	ACS Applied Materials & Interfaces, 9, 29677-29686 (2017)	有	2017/8
29	Y. Udaka, S. Takaki, K. Isowaki, T. Nagai, H. Tampo, K. M. Kim, S. Kim, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Sakai, T. Kato, H. Sugimoto N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	Electronic Structure of Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ Surface and CdS/Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ Interface	Physical Status Solidi B vol.254, 1600178 (2017).	有	2017
30	N. Takehiko, S. Kim, H. Tampo, K. M. Kim, H. Shibata, S. Takaki, K. Kawasaki, S. Kawamura, T. Shimamura, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	Band Alignment of CdS/Cu ₂ ZnSnSe ₄ Heterointerface and Solar Cell Performances	MRS ADVANCES, vol.2 (53), pp.3157 - 3162, (2017).	有	2017
31	T. Nagai, Y. Udaka,	産業技術総合研究所,	Electronic structure of CZTSe surface and CdS/CZTSe	Japanese Journal of Applied	有	2017

	S. Takaki, K. Isowaki, S. Kawamura, K. Kawasaki, H. Tampo, K. M. Kim, S. Kim, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki N. Terada	鹿児島大学	heterointerface	Physics vol. 56, 065701 (2017).		
32	X. Zhang, M. Kobayashi, A. Yamada	東京工業大学	Comparison of Ag(In,Ga)Se ₂ /Mo and Cu(In,Ga)Se ₂ /Mo Interfaces in Solar Cells	ACS Applied Materials and Interfaces, Vol. 9, No. 19, pp. 16215-16220 (2017)	有	2017
33	X. Hao, S. Wang, K. Akimoto, T. Kato, H. Sugimoto, T. Sakurai	筑波大学	An optimized photolithography recipe for Cu(In _{1-x} Ga _x)(S _y Se _{1-y}) ₂ (CIGSSe) solar cells	Proceeding of IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2017. DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366118	有	2017
34	M. M. Islam, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto, T. Sakurai	産業技術総合研究所, 筑波大学	Study of defect properties in CuGaSe ₂ thin-film solar-cells using Admittance Spectroscopy	Proceeding of the IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), 2017. DOI: 10.1109/PVSC.2017.8366492	有	2017
35	I. Khatri, K. Shudo, J. Matsuura, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Comparative study of water and ammonia rinsing processes of potassium fluoride-treated Cu(In,Ga)Se ₂ thin film solar cells	Japanese Journal of Applied Physics, 56 (2017) 08MC12-1~6	有	2017
36	I. Khatri, M. Sugiyama T. Nakada	東京理科大学	Effects of combined additional indium deposition and potassium fluoride post-deposition treatments on Cu(In,Ga)Se ₂ thin film solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25 (2017) 871-877.	有	2017
37	S. Kim, J. Nishinaga, Y. Kamikawa, S. Ishizuka, T. Koida. H. Tampo, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki	産業技術総合研究所	Reduced recombination in a surface-sulfurized Cu(InGa)Se ₂ thin-film solar cell	Japanese Journal of Applied Physics	有	2018/1
38	J. Chantana, Y. Ishino, K. Kawabata, T. Minemoto	立命館大学	Examination of electrical and optical properties of Zn _{1-x} Mg _x O:Al fabricated by radio frequency magnetron co-	Thin Solid Films 646 (2018) 105-111.	有	2018/1

			sputtering.			
39	S. Ishizuka, J. Nishinaga, M. Iioka, H. Higuchi, Y. Kamikawa, T. Koida, H. Shibata, P. Fons	産業技術総合研究所	Si-Doped Cu(In, Ga)Se ₂ Photovoltaic Devices with Energy Conversion Efficiencies Exceeding 16.5% without a Buffer Layer	Advanced Energy Materials 8, 1702391 (2018).	有	2018/1
40	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Heterointerface recombination of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ -based solar cells with different buffer layers.	Prog. Photovolt. 26 (2018) 127- 134.	有	2018/2
41	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	20%-efficient Zn _{0.9} Mg _{0.1} O:Al/Zn _{0.8} Mg _{0.2} O/ Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cell prepared by all dry process through combination of heat- light soaking and light soaking process	ACS Appl. Mater. Interfaces 10 (2018) 11361- 11368.	有	2018/3
42	T. Nishimura, S. Toki, H. Sugiura, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Effect of Cu-deficient layer formation in Cu(In, Ga)Se ₂ solar-cell performance	Progress in Photovoltaics: Res. & Appl., vol. 26, 291-302 (2018)	有	2018/3
43	Y. Kamikawa, J. Nishinaga, S. Ishizuka, T. Tayagaki, H. Guthrey, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki	産業技術総合研究所	Effect of thermal annealing on the redistribution of alkali metals in Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells on glass substrate	Journal of Applied Physics 123, 093101 (2018)	有	2018/3
44	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Investigation of correlation between open-circuit voltage deficit and carrier recombination rates in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ -based thin- film solar cells.	Appl. Phys. Lett. 112 (2018) 151601-1-5.	有	2018/4
45	T. Nishimura, H. Sugiura, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Characterization of Interface Between Accurately Controlled Cu-Deficient Layer and Cu(In, Ga)Se ₂ Absorber for Cu(In, Ga)Se ₂ Solar Cells	Physica Status Solidi (RRL), Vol. 12, No. 8, 1800129 (2018)	有	2018/5
46	T. Koida, J. Nishinaga, Y. Ueno, H. Higuchi, H. Takahashi, M. Iioka, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Impact of front contact layers on performance of Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells in relaxed and metastable states	Progress in Photovoltaics 26, 789 (2018)	有	2018/5
47	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Enhancement of photovoltaic performances of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cell through combination of heat- light soaking and light	Prog. Photovolt. 26 (2018) 868- 876.	有	2018/6

			soaking processes.			
48	T. Kusumoto, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic, optical, and electronic properties of Li-doped $\text{CuIn}(\text{S}, \text{Se})_2$, $(\text{Cu}, \text{Li})\text{In}(\text{S}, \text{Se})_2$	Jpn. J. Appl. Phys., 57, 08RC15 (2018).	有	2018/7
49	A. Shigemi, T. Wada	龍谷大学	First-principles studies on the interface between light-absorbing layer and Mo back electrode in $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$, $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$, and Cu_2SnS_3 solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 57, 08RC17 (2018).	有	2018/7
50	S. Kim, T. Aihara, J. Nishinaga, H. Tampo, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki	産業技術総合研究所	Reduced potential fluctuation in a surface sulfurized $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$	Japanese Journal of Applied Physics	有	2018/7
51	T. Hayakawa, T. Nishimura, H. Sugiura, N. Suyama, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Control of Donor Concentration in n-Type Buffer Layer for High-Efficiency $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ Solar Cells	IEEE J. of Photovoltaics, Vol. 8, No. 6, 1-6 (2018)	有	2018/8
52	T. Nishimura, H. Sugiura, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Accurate control and characterization of Cu depletion layer for highly efficient $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ solar cells	Progress in Photovoltaics, vol. 27, pp. 171 (2018)	有	2018/10
53	S. Kim, H. Tampo, S. Hajime, K. Matsubara, S. Niki	産業技術総合研究所	Effect of Combined Alkali (KF + CsF) Solar Cells Post-Deposition Treatment on $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$	Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters	有	2018/10
54	S. Wang, H. Hagiya, T. Nazuka, Y. Takabayashi, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, M. M. Islam, K. Akimoto, T. Sakurai	産業技術総合研究所, 筑波大学	Depth Profile of Impurity Phase in Wide Bandgap $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ Film Fabricated by 3-stage Process	Journal of Electronic Materials, 47, 4944-4949 (2018).	有	2018
55	S. Wang, X. Hao, M. M. Islam, T. Kato, H. Sugimoto, K. Akimoto, T. Sakurai	筑波大学	Influence of potassium treatment on electronic properties of $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)(\text{Se}_{1-y}\text{S}_y)_2$ solar cells studied by steady state photo-capacitance and admittance spectroscopy	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RC13 (2018)	有	2018
56	Y. Ando, S. Ishizuka, S. Wang, J. Chen, M. M. Islam, H. Shibata,	産業技術総合研究所, 筑波大学	Relationship between bandgap grading and carrier recombination for $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ -based solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RC08 (2018)	有	2018

	K. Akimoto, T. Sakurai					
57	M. M. Islam, S. Wang, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto, T. Sakurai	産業技術総合研究所, 筑波大学	Deep level emission in polycrystalline CuGaSe ₂ thin-films observed by micro-photoluminescence	Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RC02 (2018)	有	2018
58	M. M. Islam, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto, T. Sakurai	産業技術総合研究所, 筑波大学	Characterization of Defect Properties in Wide-Gap CuGaSe ₂ Thin-Film Solar-Cells	Nanoscience and Nanotechnology Letters 10, 559-564 (2018)	有	2018
59	T. Kusumoto, A. Kai T. Maeda T. Wada	龍谷大学	Crystallographic, optical, and electronic properties of (Cu, Li)GaS ₂	Thin Solid Films, 672, 192-198 (2019).	有	2018/12
60	I. Khatri, K. Shudo, J. Matsuura, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Impact of heat-light soaking on potassium fluoride treated CIGS solar cells with CdS buffer layer	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 26 (2018) 171-178.	有	2018
61	J. Matsuura, K. Shudo, I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Tunable carrier concentration of NaF-treated CIGS solar cells using heat-light soaking and subsequent heating	Physica Status Solidi - Rapid Research Letters, 12 (2018) 1800053.	有	2018
62	J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto.	立命館大学	Characterization of Cd-Free Zn _{1-x} Mg _x O:Al/Zn _{1-x} Mg _x O/Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cells fabricated by an all dry process using ultraviolet light excited time-resolved photoluminescence.	ACS Appl. Mater. Interfaces 11 (2019) 7539-7545.	有	2019/1
63	T. Koida, Y. Ueno, J. Nishinaga, Y. Kamikawa, H. Higuchi, M. Iioka, H. Takahashi, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Current status of transparent conducting oxide layers with high electron mobility and their application in Cu(In, Ga)Se ₂ mini-modules	Thin Solid Films 673, 26 (2019)	有	2019/1
64	S. Ishizuka	産業技術総合研究所	CuGaSe ₂ Thin Film Solar Cells: Challenges for Developing Highly Efficient Wide-Gap Chalcopyrite Photovoltaics	Phys. Status Solidi A 216 (2019) 1800873	有	2019/1
65	T. Koida, J. Nishinaga, Y. Ueno, H. Higuchi, H. Takahashi, M. Iioka, Y. Kamikawa, H. Shibata,	産業技術総合研究所	Improved efficiency of Cu(In, Ga)Se ₂ mini - module via high - mobility In ₂ O ₃ :W, H transparent conducting oxide layer	Progress in Photovoltaics 27 (2019) 491-500	有	2019/3

	S. Niki					
66	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Structures of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ Solar Cells for Minimizing Open-Circuit Voltage Deficit: Investigation of Carrier Recombination Rates	Prog. Photovolt. 27 (2019) 630-639.	有	2019/4
67	J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Characteristics of Zn _{1-x} Mg _x O:B and its application as transparent conductive oxide layer in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cells with and without CdS buffer layer	Solar Energy 184 (2019) 553-560.	有	2019/5
68	T. Nishimura, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Examination of a Cu-Deficient Layer on Cu(In, Ga)Se ₂ Films Fabricated by a Three-Stage Process for Highly Efficient Solar Cells	Applied Energy Materials, 2, 7, 5103-5108 (2019)	有	2019/6
69	Y. Wang, T. Muryobayashi, K. Nakada, Z. Li, A. Yamada	東京工業大学	Correlation between carrier recombination and valence band offset effect of graded Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells, 201, 110070 (2019)	有	2019/7
70	S. Ishizuka, N. Taguchi, P. J. Fons	産業技術総合研究所	Similarities and Critical Differences in Heavy Alkali-Metal Rubidium and Cesium Effects on Chalcopyrite Cu(In, Ga)Se ₂ Thin-Film Solar Cells	J. Phys. Chem. C 2019, 123, 17757-17764.	有	2019/7
71	K. Beppu, S. Yamazoe, A. Yamada, K. Nitta, T. Uruga, T. Wada	龍谷大学, 東京工業大学	Structural analysis of Cu(In, Ga)Se ₂ thin-films by depth-resolved XAFS	Jpn. J. App. Phys. 58, 105502 (2019).	有	2019/10
72	J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura, Y. Kimoto, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	22%-efficient Cd-free Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cell by all-dry process using Zn _{0.8} Mg _{0.2} O and Zn _{0.9} Mg _{0.1} O:B as buffer and transparent conductive oxide layers	Prog. Photovolt. 28 (2020) 79-89.	有	2019/10
73	J. Chantana, T. Nishimura, Y. Kawano, N. Suyama, A. Yamada, Y. Kimoto, H. Sugimoto, T. Kato, T. Minemoto	立命館大学	Aging Effect of a Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ Absorber on the Photovoltaic Performance of Its Cd-Free Solar Cell Fabricated by an All-Dry Process: Its Carrier Recombination Analysis	Adv. Energy Mater. (2019) 1902869-1-10.	有	2019/10
74	H. Nishihara T. Wada	龍谷大学	First-principles studies of chalcopyrite-type (Cu, Li)GaS ₂ and (Cu, Li)InS ₂ systems	Jpn. J. App. Phys. 59, SCCB18 (2020).	有	2019/12
75	T. Wada, R. Nakanishi, M. Yanagita, T. Maeda	龍谷大学	Materials Design of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ Absorber in CIGSSe Solar Cells by Using 3D Mapping of Electronic	Proc. 36th European Photovoltaic Solar Energy	有	2019/12

			Structures	Conference and Exhibition, pp604-607 (2019).		
76	T. Nagai, T. Shimamura, K. Tanigawa, Y. Iwamoto, H. Hamada, N. Ohta, S. Kim, H. Tampo, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	Band Alignment of the CdS/Cu ₂ Zn(Sn _{1-x} Ge _x)Se ₄ Heterointerface and Electronic Properties at the Cu ₂ Zn(Sn _{1-x} Ge _x)Se ₄ Surface: $x = 0, 0.2,$ and $0.4.$	ACS applied materials & interfaces 11(4) 4637 - 4648	有	2019
77	A. Lafuente-Sampietro, J. Chen, S. Wang, X. Hao, M. M. Islam, T. Kato, H. Sugimoto K. Akimoto, T. Sakurai	筑波大学	Wavelength dependent J-V characteristics of CuIn _{1-x} Ga _x (S,Se) ₂ solar cells and carrier recombination	Applied Physics Express 12, Art.061001 (2019)	有	2019
78	I. Khatri, J. Matsuura, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Effect of heat-bias-soaking on cesium fluoride-treated CIGS thin film solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 27 (2019) 22-29.	有	2019
79	J. Matsuura, I. Khatri, T-Y. Lin, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Impact of heat-light soaking and heat-bias soaking on NaF-treated CIGS thin film solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 27 (2019) pp.623-629.	有	2019
80	Y. Ando, I. Khatri, H. Matsumori, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Epitaxial CIGS Thin Films on Mo Back Contact for Solar Cells	Physica Status Solidi A, 216 (2019) 1900164.	有	2019
81	I. Khatri, T-Y. Lin, T. Nakada M. Sugiyama,	東京理科大学	Effect of Electron Irradiation on CsF - Free and CsF - Treated CIGS Solar Cells	Physica Status Solidi Rapid Research Letter, 13 (2019) 1900415.	有	2019
82	I. Khatri, T-Y. Lin, T. Nakada M. Sugiyama,	東京理科大学	Proton Irradiation on Cesium-Fluoride-Free and Cesium-Fluoride-Treated Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells and Annealing Effects under Illumination	Physica Status Solidi Rapid Research Letter, 13 (2019) 1900519	有	2019
83	J. Chantana, Y. Ishino, Y. Kawano, T. Nishimura, T. Minemoto	立命館大学	Mobility improvement of Zn _{1-x} Mg _x O:Al prepared under room temperature by co-sputtering through optimizations of Al and Mg contents	Mater. Sci. Semicond. Process 109 (2020) 104921-1-7.	有	2020/1

84	J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura, Y. Kimoto, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto.	立命館大学	Effect of Alkali Treatment on Photovoltaic Performances of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ Solar Cells and Their Absorber Quality Analyzed by Urbach Energy and Carrier Recombination Rates	ACS Appl. Energy Mater. 3 (2020) 1292-1297.	有	2020/1
85	S. Ishizuka, P. J. Fons	産業技術総合研究所	Polycrystalline CuGaSe ₂ thin film growth and photovoltaic devices fabricated on alkali-free and alkali-containing substrates	J. Cryst. Growth, 532, 125407 (2020)	有	2020/2
86	T. Maeda, R. Nakanishi, M. Yanagita, T. Wada	龍谷大学	Control of electronic structure in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ for high efficiency solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 59, SGGF12 (2020)	有	2020/3

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Impact of KF-PDT on Cu(In _{1-x} , Ga _x)Se ₂ Thin Film Solar Cells	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム 福島県郡山市 ホテル華の湯 2015-05-28~29	2015/5
2	R. Kamada, 他	産業技術総合研究所	Evaluation of “rollover” in Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ thin film solar cells using Suns-Voc measurements	42 nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2015/6
3	上川由紀子、 西永慈郎、 山田昭政、 柴田肇、 仁木栄	産業技術総合研究所	CIGS solar cells fabricated on Mo back-contacts/SLG with varied Mo surface condition	31 st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2015/9
4	I. Khatri, H. Yamaguchi, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Investigation of the Potassium Fluoride Post-deposition Treatment with and without Se Vapor on CIGS Solar Cell Performance	2015年 第76回応用物理学会秋季学術講演会 名古屋国際会議場 2015-9-13~16.	2015/9
5	T. Umehara, S. Iinuma, Y. Kurokawa, A. Yamada	東京工業大学	Investigation of the effects of rear surface recombination on the Cu(In, Ga)Se ₂ solar cell performances	25th International photovoltaic science & engineering conference, Nov. 15-20, Busan, Korea (2015)	2015/11
6	I. Khatri, H. Fukai, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Investigation on the cell performance of potassium fluoride modified CIGS solar cell	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25) Nov. 15-20, Korea (2015)	2015/11
7	前田 毅、 宮イゲン、 西谷 幹彦、 和田 隆博	龍谷大学	CuIn ₃ Se ₅ および CuGa ₃ Se ₅ の電子構造	2016年第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/3

8	上川由紀子	産業技術総合研究所	CIGS 薄膜太陽電池の変換効率抑制要因の解明と高効率化技術の開発	2016 年 第 63 回 応用物理学会 春季学術講演会	2016/3
9	上田健太、 前田毅、 和田隆博	龍谷大学	CuIn ₃ Se ₅ および CuGa ₃ Se ₅ への硫黄の固溶効果	2016 年第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/3
10	細木恵、 西谷幹彦、 前田毅、 和田隆博	龍谷大学	Cu(In, Ga)S ₂ 系固溶体の光学評価とバンドラインナップ	2016 年第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/3
11	I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Effect of Additional Indium Deposition after Cu(In, Ga)Se ₂ Thin Film Growth for Potassium Fluoride Post-deposition Treatment	2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学 2016-3-19~22.	2016/3
12	山上武、 寺本真浩、 Ishwor Khatri, 杉山睦、 中田時夫	東京理科大学	Mo エピタキシャル膜に及ぼす低温バッファ層の効果	2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 東京工業大学 2016-3-19~22.	2016/3
13	川端晃樹、 J. Chantana, T. Suwansichon 加藤拓也、 杉本広紀、 峯元高志	立命館大学	フォトルミネッセンスを用いた Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池のスパッタリングダメージの定量化.	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡、新潟)	2016/5
14	I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Effect of rinsing processes of potassium fluoride treated CIGS thin film before chemical bath deposition of buffer layer	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム 長岡市シティホールプラザ「アオーレ長岡」2016-5-19~20	2016, 5
15	山上武、 寺本真浩、 Ishwor Khatri, 金子智、 杉山睦、 中田時夫	東京理科大学	低温バッファ層を用いた裏面電極用 Mo スパッタ膜のエピタキシャル成長	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム 長岡市シティホールプラザ「アオーレ長岡」2016-5-19~20	2016/5
16	T. Koida	産業技術総合研究所	Amorphous and crystalline In ₂ O ₃ -based transparent conducting films for photovoltaics	European Materials Research Society Spring Meeting 2016, E-MRS / MRS-J joint symposium on Materials Frontier for Transparent Advanced Electronics II	2016/5
17	K. Isowaki, T. Fukuyama, S. Kawamura, K. Kawasaki, T. Umehara, A. Yamada, N Terada	鹿児島大学	Characterization of electronic structure of Ag(In, Ga)Se ₂ surface and Ag(In, Ga)Se ₂ interface	2016 Spring Meeting European Materials Research Society, May 2-6, 2016.	2016/5
18	S. Ishizuka	産業技術総合研究所	Developments in CuGaSe ₂ solar cells toward highly efficient wide-gap	2016 Spring Meeting European Materials Research Society, May	2016/5

			Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	2-6, 2016.	
19	T. Maeda, C. Zhao, A. Kai, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties of (Cu, Li)InS ₂ and (Cu, Li)GaS ₂ systems	2016 Spring Meeting European Materials Research Society, May 2-6, 2016.	2016/5
20	K. Ueda, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties of CuIn ₃ (S, Se) ₅ and CuGa ₃ (S, Se) ₅ systems	2016 Spring Meeting European Materials Research Society, May 2-6, 2016.	2016/5
21	鯉田崇、 西永慈郎、 樋口博文、 飯岡正行、 黒川温子、 上川由紀、 柴田肇、 仁木栄	産業技術総合研究所	Comparative studies of transparent conductive oxide layers for application in Cu(In, Ga)Se ₂ modules	The 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, June 20-24, 2016	2016/6
22	Y. Kamikawa, J. Nishinaga, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Effects of Thermal Annealing and KF Post Deposition on Photovoltaic Property of CIGS Solar Cell	The 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, June 20-24, 2016	2016/6
23	J. Nishinaga, Y. Kamikawa, T. Koida, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Mechanism of Early-Stage Degradation of CIGS Solar Cells Induced by Air Exposure	The 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, June 20-24, 2016	2016/6
24	J. Nishinaga, Y. Kamikawa, T. Koida, H. Shibata, S. Niki,	産業技術総合研究所	Mechanism of early-stage degradation of CIGS solar cells induced by air exposure	The 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, June 20-24, 2016	2016/6
25	X. Hao, K. T. Chowdhury, T. Sakurai, Y. Kamikawa- Shimizu, S. Ishizuka, A. Yamada, H. Shibata, K. Akimoto	筑波大学, 産業技術総合研究所	The Influence of Sodium in High Ga-Content Cu(In _{1-x} , Ga _x)Se ₂ (CIGS) Solar Cells	The 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Munich, June 20-24, 2016	2016/6
26	S. Toki, T. Nishimura, H. Sugiura, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Improvement of Cu(In, Ga)Se ₂ photovoltaic performance by adding Cu-poor compounds Cu(In, Ga) ₃ Se ₅ at Cu(In, Ga)Se ₂ /CdS interface	43rd IEEE Photovoltaic Specialist Conference (Portland, Oregon, USA).	2016/6
27	T. Sakurai	筑波大学	Study of Defects in Widegap CIGS Solar Cells	International Union of Materials Research Societies- International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM), Suntec, Singapore, Jul. 5-8, 2016 <Invited>	2016/7
28	T. Maeda, W. Gong,	龍谷大学	Optical properties and electronic structures of	20th International Conference on Ternary	2016/9

	M. Nishitani, T. Wada		CuIn ₃ Se ₅ and CuGa ₃ Se ₅	and Multinary Compounds, Sep. 5-9, 2016.	
29	T. Nagai, Y. Udaka, S. Takaki, K. Isowaki, S. Kawamura, K. Kawasaki, H. Tampo, K. M. Kim, S. Kim, H. Shibata, N. Terada, K. Matsubara S. Niki	産業技術総 合研究所	Electronic Structure of CdS/Cu ₂ ZnSnSe ₄ Interface	20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds, Sep. 5-9, 2016.	2016/9
30	Y. Udaka, S. Takaki, K. Isowaki, T. Nagai, H. Tampo, K. M. Kim, S. Kim, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Sakai, T. Kato, H. Sugimoto N. Terada	産業技術総 合研究所, 鹿児島大学	Electronic Structure of Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ Surface and CdS/Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ Interface	20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds, Sep. 5-9, 2016.	2016/9
31	M. Islam, A. Uedono, T. Sakurai, C. Hugenschmidt, W. Egger, R. Scheer, A. Dalla, R. Krause- Rehberg, K. Akimoto	筑波大学	Study of Post-growth Se- annealing on the Properties of CuGaSe ₂ -layers Grown by Three-stage Evaporation Process	2016 International conference on Solid State Materials and Devices (SSDM), Tsukuba, Sep. 27-29, 2016.	2016/9
32	Y. Kamikawa	産業技術総 合研究所	Effects of alkali treatments and thermal annealing on the property of CIGS solar cell	2016 International conference on Solid State Materials and Devices (SSDM), Tsukuba, Sep. 27-29, 2016.	2016/9
33	T. Maeda, Y. Yu T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties and band diagrams of CuGaS ₂ , CuGa ₃ S ₅ , and CuGa ₅ S ₈ phases in Cu-poor Cu ₂ S-Ga ₂ S ₃ pseudo-binary system	2016 International conference on Solid State Materials and Devices (SSDM), Tsukuba, Sep. 27-29, 2016.	2016/9
34	寺田教男	鹿児島大学	正・逆光電子分光法による多元 化合物・デバイスの評価	2016年第77回応用物理 学会秋季学術講演会, 2016年9月13日~16 日 < 招待講演 >	2016/9

35	前田毅、 上田健太、 辻健助、 和田隆博	龍谷大学	CuGaSe ₂ -Ga ₂ Se ₃ 系化合物の結晶構造と光学的性質	第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、2016年9月13日～16日	2016/9
36	櫻井岳暁、 Islam Md., H. Xia、 秋本克洋、 石塚尚吾、 反保衆志、 柴田肇、 仁木栄、 酒井紀行、 加藤拓也、 杉本広紀	筑波大学、 産業技術総合研究所	電気・光学的評価法による多元系化合物の物性解明	第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、2016年9月13日～16日<招待講演>	2016/9
37	M. M. Islam, A. Uedono, T. Sakurai, C. Hugenschmidt, W. Egger, R. Scheer, A. Dalla, R. Krause-Rehberg, K. Akimoto	筑波大学	Effect of Post-deposition Se-annealing on the defect distribution in CuGaSe ₂ Thin-films and Solar-cells	第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、2016年9月13日～16日	2016/9
38	X. Hao, H. Hagiya, T. Sakurai, A. Yamada, S. Ishizuka, Y. Kamikawa, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto	筑波大学、 産業技術総合研究所	The device performance improvement by reducing the secondary phase of Cu _{2-δ} Se in Cu(In _{1-x} ,Ga _x)Se ₂ (CIGS) solar cells	第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、2016年9月13日～16日	2016/9
39	杉浦大樹、 西村昂人、 土岐爽真、 中田和吉、 山田明	東京工業大学	Cu(In, Ga) ₃ Se ₅ 層を有するCu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池におけるCdSO ₄ 表面処理によるCd拡散効果の実験的検証	第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、2016年9月13日～16日	2016/9
40	梅原猛、 小林拓己、 中田和吉、 山田明	東京工業大学	ハイブリッドバッファ層導入による高バンドギャップ・高効率Ag(In, Ga)Se ₂ 薄膜太陽電池の開発	第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、2016年9月13日～16日	2016/9
41	渡辺基、 中田和吉、 山田明	東京工業大学	チオ尿素処理を施したCu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池におけるTRPL測定	第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、2016年9月13日～16日	2016/9
42	西村昂人、 土岐爽真、 杉浦大樹、 中田和吉、 山田明	東京工業大学	三段階法におけるインターバル時間導入によるCu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池の高効率化	第77回応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟、2016年9月13日～16日	2016/9
43	安藤優汰、 山上武、 首藤晃佑、 松浦純平、 Ishwor Khatri、 杉山睦	東京理科大学	CIGS エピタキシャル薄膜のフォトルミネッセンス特性	2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会、新潟朱鷺メッセ 2016-9-12～15	2016/9

	中田時夫				
44	松浦純平, 首藤晃佑, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	KF 処理を行った CIGS 太陽電池への熱・光照射効果	2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟朱鷺メッセ 2016-9-12~15	2016/9
45	I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Diffusion behavior of alkali metals after KF-PDT on CIGS thin films fabricated onto soda lime glass substrates	2016 年 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟朱鷺メッセ 2016-9-12~15	2016/9
46	和田隆博	龍谷大学	CuInSe ₂ 系太陽電池 -高効率化技術と材料科学-	触媒学会(東日本支部)主催 第1回 東日本キャタリシスセミナー	2016/9
47	T. Nishimura, S. Toki, H. Sugiura, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Structural, Electrical, and Compositional Analysis of Surface and Grain Boundary for Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells by EBSD/SSRM/TEM-EDX	20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (Saale, Germany. ICTMC-20)	2016/9
48	T. Koida	産業技術総合研究所	Transparent conductive oxides for photovoltaics	日本-スイス合同ワークショップ ” Hydrogen technology and energy storage”	2016/10
49	石塚尚吾、 上川由紀子、 西永慈郎、 柴田肇	産業技術総合研究所	Effects of post p-n junction formation process conditions on CuGaSe ₂ thin-film solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (PVSEC-26), Singapore (2016)	2016/10
50	J. Chantana, T. Suwansichon, K. Kawabata, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto.	立命館大学	Investigation of heterointerface recombination of Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ solar cells with different buffer layers.	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (PVSEC-26), Singapore (2016)	2016/10
51	T. Umehara, L. Meng, T. Kobayashi, K. Isowaki, S. Kawamura, S. Takagi, K. Kawasaki, N. Terada, A. Yamada.	東京工業大学, 鹿児島大学	High Efficiency Ag(In,Ga)Se ₂ Thin Film Solar Cells by Hybrid Buffer Layer	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (PVSEC-26), Singapore (2016)	2016/10
52	M. Watanabe, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Thiourea treatment for Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (PVSEC-26), Singapore (2016)	2016/10
53	T. Nishimura, S. Toki, H. Sugiura, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Interface-quality Improvement by Controlling Cu _(2-x) Se layer in Three-stage Method for High Efficiency Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (PVSEC-26), Singapore (2016)	2016/10

54	K. Shudo, J. Matsuura, I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Effect of heat-light soaking on KF-treated CIGS thin film solar cells	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Marina Bay Sands Sands Expo and Convention Centre, Singapore, Oct. 24-28 (2016)	2016/10
55	I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Effects of rinsing solution on KF-treated CIGS thin film solar cells	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Marina Bay Sands Sands Expo and Convention Centre, Singapore, Oct. 24-28 (2016)	2016/10
56	T. Sakurai	筑波大学	Characterization of carrier recombination processes in Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells	International Conference on Technologically Advanced Materials and Asian Meeting on Ferroelectricity, University of Delhi, India, Nov.7-11, 2016 <Invited>.	2016/11
57	石塚尚吾	産業技術総合研究所	CIGS 太陽電池の表面・界面に残された課題	2016年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会、産総研福島再生可能エネルギー研究所、郡山、2016年12月9日-10日<招待>	2016/12
58	I. M. Monirul, I. Shogo, S. Hajime, N. Shigeru, A. Katsuhiro, S. Takeaki	産業技術総合研究所, 筑波大学	Photoluminescence Study of Polycrystalline CuGaSe ₂ Thin-Films Grown by Three-stage Evaporation Method	2016年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会、産総研福島再生可能エネルギー研究所、郡山、2016年12月9日-10日	2016/12
59	安藤佑太、 Xia Hao、 萩谷秀樹、 M. M. Islam、 上川由紀子、 石塚尚吾、 山田昭政、 柴田肇、 秋本克洋、 櫻井岳暁	産業技術総合研究所, 筑波大学	Cu(In _{1-x} ,Ga _x)Se ₂ 太陽電池の欠陥相の膜厚プロファイルと低減効果	2016年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会、産総研福島再生可能エネルギー研究所、郡山、2016年12月9日-10日	2016/12
60	和田隆博	龍谷大学	CIS系太陽電池の課題と展望	応用物理学会結晶工学分科会第21回結晶工学セミナー 半導体結晶：	2017/1

				シリコン vs 化合物- パワーデバイスと太陽 電池基板材料の課題と 展望 -	
61	T. Minemoto, J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto.	立命館大学	Conduction band control of transparent electrode in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cells	Global Photovoltaic Conference 2017 (Gwangju, Korea).	2017/3
62	前田毅、 中島成太郎、 和田隆博	龍谷大学	第一原理計算を用いた CuIn ₅ Se ₈ , CuGa ₅ Se ₈ , CuIn ₅ S ₈ , CuGa ₅ S ₈ の相の評価と電子構造	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会、パシフ ィコ横浜、横浜、2017 年 3 月 14 日-17 日	2017/3
63	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto.	立命館大学	Application of Zn _{1-x} Mg _x O:Al to transparent conductive oxide of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cell.	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会、パシフ ィコ横浜、横浜、2017 年 3 月 14 日-17 日	2017/3
64	杉浦大樹, 西村昂人, 土岐爽真, 中田和吉, 山田明	東京工業大 学	Cu-poor 層を有する Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池における Cd 及び Zn 拡散効果の実験的検 証	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会、パシフ ィコ横浜、横浜、2017 年 3 月 14 日-17 日	2017/3
65	西村昂人, 土岐爽真, 杉浦大樹, 中田和吉, 山田明	東京工業大 学	Cu(In, Ga)Se ₂ 表面 Cu 欠損層制 御による Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池 高効率化	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会、パシフ ィコ横浜、横浜、2017 年 3 月 14 日-17 日	2017/3
66	安藤佑太、 X. Hao、 M. M. Islam、 石塚尚吾、 柴田肇、 秋本克洋、 櫻井岳暁	産業技術総 合研究所、 筑波大学	高効率 Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池の ための禁制帯グレーディング制 御	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会、パシフ ィコ横浜、横浜、2017 年 3 月 14 日-17 日	2017/3
67	M. M. Islam, H. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto, T. Sakurai	産業技術総 合研究所、 筑波大学	Study of the electrical properties of CuGaSe ₂ thin- film solar-cells using admittance spectroscopy	第 64 回応用物理学会春 季学術講演会、パシフ ィコ横浜、横浜、2017 年 3 月 14 日-17 日	2017/3
68	松浦純平, 首藤晃佑, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大 学	KF 処理 CIGS/CdS 太陽電池の 熱・光照射効果	2017 年 第 64 回応用物 理学会春季学術講演会 パシフィコ横浜 2017-3-14~17	2017/3
69	I. Khatri, Kosuke Shudo, J. Matsuura, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大 学	Comparative study of heat- light soaking on KF- and CsF-treated CIGS solar cells	2017 年 第 64 回応用物 理学会春季学術講演会 パシフィコ横浜 2017-3-14~17	2017/3
70	Takeaki Sakurai	筑波大学	Characterization of carrier recombination processes in Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	Global PhotoVoltaic Conference (GPVC 2017), Kimdaejung Convention Center, Gwangju, Korea, Mar. 15-17, 2017 <Invited>	2017/3

71	Takeaki Sakurai	筑波大学	Impact of deep defects in Cu(In,Ga)Se ₂ based solar cells	DPG (Deutsche Physikalische Gesellschaft) Conferences 2017, Technical University of Dresden, Germany, Mar.20-24, 2017 <invited>	2017/3
72	T. Nagai, S. Kim, H. Tampo, K. M. Kim, H. Shibata, S. Takaki, K. Kawasaki, S. Kawamura, T. Shimamura, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	Band Alignment of CdS/Cu ₂ ZnSnSe ₄ Heterointerface and Solar Cell Performances	2017 Spring Meeting Materials Research Society, April 17-21, (Phoenix, USA) 2017	2017/4
73	T. Wada, T. Maeda, M. Watanabe	龍谷大学	Optical properties and band structures of Cu-deficient phases, Cu(In,Ga) ₃ Se ₅ , Cu(In,Ga) ₅ Se ₈ in Cu-poor Cu ₂ Se-(In,Ga) ₂ Se ₃ pseudo-binary system	2017 Spring Meeting Materials Research Society, April 17-21, (Phoenix, USA) 2017	2017/4
74	T. Minemoto, J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto.	立命館大学	(Zn,Mg)O transparent electrode and buffer layer for junction control in Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ solar cells.	2017 Spring Meeting Materials Research Society, April 17-21, (Phoenix, USA) 2017.	2017/4
75	K. Ueda, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties of Cu(In,Ga) ₃ Se ₅	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/5
76	T. Maeda, S. Nakashima, K. Ueda, T. Wada	龍谷大学	First-principles studies of CuIn ₅ Se ₈ , CuGa ₅ Se ₈ , CuIn ₅ S ₈ , and CuGa ₅ S ₈	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/5
77	A. Yamada	東京工業大学	Cu-deficient layer as an efficiency booster; analysis, growth and characterization <Invited>	8th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech 8), Stuttgart, Germany (2017)	2017/5
78	J. Chantana, Y. Ishino, T. Minemoto.	立命館大学	Investigation of Zn _{1-x} Mg _x O:Al film by Ratio Frequency Magnetron Co-Sputtering as Transparent Conductive Oxide layer.	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C, June 25-30, 2017	2017/6
79	M. M. Islam, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto, and T. Sakurai	産業技術総合研究所, 筑波大学	Study of defect properties in CuGaSe ₂ thin-film solar-cells using Admittance Spectroscopy	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C, June 25-30, 2017	2017/6

80	X. Hao, S. Wang, K. Akimoto, T. Kato, H. Sugimoto, and T. Sakurai	筑波大学	An optimized photolithography recipe for $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}, \text{Ga}_x)(\text{S}_y, \text{Se}_{1-y})_2$ (CIGS _{Se}) solar cells	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, D.C, June 25-30, 2017	2017/6
81	T. Yamagami, Y. Ando, I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Growth and properties of epitaxial $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ thin films deposited by three-stage process for solar cells	IEEE, 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), Marriott Wardman Park Hotel, Washington D.C., USA, Jun. 25-30 (2017)	2017/6
82	上川由紀子、 西永慈郎、 石塚尚吾、 柴田肇	産業技術総合研究所	$\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 太陽電池の PDT における副次的アニール効果	第 14 回 175 委員会「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (招待講演)	2017/7
83	T. Wada, T. Maeda	龍谷大学	Optical properties and band structures of $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ and Cu-deficient Phases, $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})_3\text{Se}_5$ and $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})_5\text{Se}_8$	The 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2017)	2017/7
84	T. Koida, Y. Ueno, J. Nishinaga, H. Higuchi, H. Takahashi, H. Shibata	産業技術総合研究所	Application of amorphous In_2O_3 -based front contact layers in $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ solar cells	10th International symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics	2017/7
85	和田隆博、 前田毅	龍谷大学	X 線回折による結晶構造評価と CIS 系太陽電池に関する状態図	日本学術振興会 産学協力研究委員会 次世代の太陽光発電システム第 175 委員会「化合物薄膜太陽電池分科会」第 7 回研究会「化合物薄膜太陽電池 夏の学校 2017」	2017/8
86	鯉田崇	産業技術総合研究所	太陽電池デバイスにおける酸化物半導体材料の役割	半導体界面制御技術 第 154 委員会 第 104 回研究会 酸化物半導体：現状と今後の進展	2017/8
87	Takashi Koida	産業技術総合研究所	In_2O_3 -based transparent conducting oxide films with high electron mobility: potential of the materials, reliability, and use in photovoltaics	The 15th International Conference on Advanced Materials	2017/8
88	Y. Kamikawa, J. Nishinaga, S. Ishizuka, T. Tayagaki, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Thermal Annealing Effect of KF-PDT on the Property of CIGS Solar Cell on Glass Substrate	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	2017/9
89	T. Koida, Y. Ueno,	産業技術総合研究所	Application of In_2O_3 -based transparent conducting oxide	33rd European Photovoltaic Solar	2017/9

	J. Nishinaga, H. Higuchi, H. Takahashi, H. Shibata		layers in Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells	Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)	
90	A. Yamada	東京工業大学	Improvement in Performance of CIGS Solar Cells by Surface Modification <Invited>	Solid State Devices and Materials, Sendai, Japan (2017)	2017/9
91	久保臣悟, 澤田剛, 川村末洋, 島村拓也, 岩本悠矢, 谷川昂平, 寺田教男, 加藤拓也, 杉本広紀, 石塚尚吾, 柴田肇, 松原浩司, 仁木栄	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	ケルビンプローブ顕微鏡による CIGSSe 層内粒界の電子構造評価	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9
92	西永慈郎, 鯉田崇, 石塚尚吾, 上川由紀子, 柴田肇, 仁木栄	産業技術総合研究所	長時間Heat-Light SoakingによるKF処理CIGS太陽電池の高効率化	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9
93	和田隆博	龍谷大学	「CIS 太陽電池:キーテクノロジーの開発はどのように行われたかー多元系化合物太陽電池のこれまでとこれから」	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9
94	西村昂人, 陳顯文, 杉浦大樹, 中田和吉, 山田明.	東京工業大学	Se 照射プロセスを導入した Cu(In,Ga)Se ₂ 太陽電池のカソードルミネッセンス法を用いた欠陥特性評価	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9
95	陳顯文, 西村昂人, 中田和吉, 洪儒生, 山田明	東京工業大学	Investigating of Se Irradiation Process for Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells by Time Resolved-Photoluminescence Measurement	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9
96	山田繁, 梅原猛, 小林拓己, 中田和吉, 山田明.	東京工業大学	アルカリ処理による Ag(In,Ga)Se ₂ 薄膜太陽電池の高効率化	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9
97	S. Wang, X. Hao, K. Akimoto, T. Kato, H. Sugimoto, T. Sakurai	筑波大学	Optimization of photolithography process for high performance CIGSSe solar cells	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9
98	安藤佑太, S. Wang, J. Chen, M. M. Islam,	筑波大学, 産業技術総合研究所	禁制帯グレーディング制御を行った Cu(In,Ga)Se ₂ 太陽電池の再結合解析	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9

	石塚尚吾, 柴田肇, 秋本克洋, 櫻井岳暁				
99	M. M. Islam, S. Wang, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto, T. Sakurai	産業技術総 合研究所, 筑波大学	Micro-photoluminescence study of the polycrystalline CuGaSe ₂ thin-films evaporated by three-stage process	第 78 回応用物理学会秋 季学術講演会, 福岡国 際会議場, 2017 年 9 月 5 日-8 日	2017/9
100	松浦純平, 首藤晃佑, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大 学	NaF 処理 CIGS 太陽電池の熱・ 光照射による開放電圧の改善	2017 年 第 78 回応用物 理学会秋季学術講演会 福岡国際会議場 2017-9-5~8	2017/9
101	I. Khatri, K. Shudo, J. Matsuura, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大 学	Junction properties of KF- and CsF-treated CIGS solar cells	2017 年 第 78 回応用物 理学会秋季学術講演会 福岡国際会議場 2017-9-5~8	2017/9
102	安藤優汰, 山上武, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大 学	CIGS 薄膜のエピタキシャル成 長と太陽電池の試作	2017 年 第 78 回応用物 理学会秋季学術講演会 福岡国際会議場 2017-9-5~8	2017/9
103	Takeaki Sakurai	筑波大学	Relation of thin-film growth on defect generation in Cu(In, Ga)Se ₂	The 6th Global Conference on Materials Science and Engineering (CMSE 2017), Beijing, China, October 25, 2017 <invited>	2017/10
104	I. Khatri, K. Shudo, J. Matsuura, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大 学	Comparative study of heat light soaking on MF (M = K, Cs) treated CIGS solar cells with CdS buffer layer	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27), Lake Biwa Otsu Prince Hotel, Shiga, Japan, Oct. 12-17 (2017)	2017/10
105	Y. Ando, T. Yamagami, I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大 学	Epitaxial CIGS thin films on Mo back contact for solar cells	he 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27), Lake Biwa Otsu Prince Hotel, Shiga, Japan, Oct. 12-17 (2017)	2017/10
106	J. Matsuura, K. Shudo, I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大 学	Enhancement of open-circuit- voltage by heat-light soaking for NaF-based alkali treated CIGS solar cells	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC- 27), Lake Biwa Otsu Prince Hotel, Shiga, Japan,	2017/10

				Oct. 12-17 (2017)	
107	S. Kubo, T. Sawada, T. Shimamura, T. Kato, H. Sugimoto, S. Ishizuka, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	CHARACTERIZATION OF ELECTRONIC STRUCTURE OF GRAIN BOUNDARIES IN CIGSe AND CIGSSe ABSORBERS BY KELVIN PROBE FORCE MICROSCOPY	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
108	S. Kawamura, Y. Iwamoto, K. Tanigawa, T. Kato, N. Sakai, H. Sugimoto, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	IMPACT OF KF-POST DEPOSITION TREATMENT ON SURFACE ELECTRONIC STRUCTURE OF CIGSSe AND CIGSe ABSORBERS	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
109	T. Nagai, K. Kawasaki, S. Kawamura, S. Takaki, T. Shimamura, H. Tampo, S. Kim, H. Shibata, S. Niki, K. Matsubara, N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	BAND OFFSET AT THE INTERFACE BETWEEN CDS BUFFER AND CZTGSSE ABSORBER LAYER	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
110	J. Nishinaga, T. Koida, S. Ishizuka, Y. Kamikawa, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Impact of long-term heat- light soaking on CIGS solar cells with KF post- deposition treatment	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
111	T. Kusumoto, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties, and electronic properties of (Cu, Li)In(S, Se) ₂ system	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
112	S. Nakashima, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	First principles studies on phase stabilities and electronic structures of stannite-type CuIn ₅ Se ₈ and related compounds, CuIn ₅ S ₈ , CuGa ₅ Se ₈ , CuGa ₅ S ₈ , AgIn ₅ Se ₈ , AgIn ₅ S ₈ , AgGa ₅ Se ₈ , and AgGa ₅ S ₈	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
113	A. Shigemi, T. Wada	龍谷大学	First principles studies on formation of MoSe ₂ at interface between absorber and Mo layers in Cu(In, Ga)Se ₂ and Cu ₂ ZnSn(S, Se) ₄ solar cells	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11

114	M. Nishitani, T. Wada	龍谷大学	Concept of back contact in CIGS solar cells for higher efficiency	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
115	T. Ishida, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties of chalcopyrite-type $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)\text{InSe}_2$ and stannite-type $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)\text{In}_3\text{Se}_5$ and $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)\text{In}_5\text{Se}_8$ systems	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
116	T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	First Principles Studies on Effects of Light and Heavy Alkali Elements in $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ Solar Cells	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
117	S. Wang, X. Hao, M. M. Islam, K. Akimoto, T. Kato, H. Sugimoto, T. Sakurai	筑波大学	Influence of KF treatment on electronic properties of CIGSSe solar cells studied by admittance spectroscopy	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
118	A. Kaneko, A. Sadono, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Effects of substrate temperature on controlling interfacial quality of $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ solar cells by Se annealing	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
119	T. Kobayashi, T. Umehara, S. Yamada, K. Nakada, A. Yamada	東京工業大学	Analysis of Crystal Growth and Diffusion Process in Chalcopyrite Photovoltaic Materials	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
120	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Analysis of recombination rates in $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{S}, \text{Se})_2$ -based solar cells with CdS , $\text{ZnS}(\text{O}, \text{OH})$, and $(\text{Cd}, \text{Zn})\text{S}$ buffer layers.	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
121	Y. Ando, S. Ishizuka, S. Wang, J. Chen, M. M. Islam, H. Shibata, K. Akimoto, T. Sakurai	産業技術総合研究所, 筑波大学	Relation between bandgap grading and carrier recombination for $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ -based solar cells	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
122	M. M. Islam, S. Wang, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto, T. Sakurai	産業技術総合研究所, 筑波大学	Deep level emission in polycrystalline CuGaSe_2 thin-films observed by micro-photoluminescence	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11

123	T. Koida, Y. Ueno, J. Nishinaga, H. Higuchi, H. Takahashi, H. Shibata	産業技術総合研究所	Amorphous In ₂ O ₃ -Based Front Contact Layers for Cu(In, Ga)Se ₂ Solar Cells	27th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC27), Shiga, Japan, Nov. 12-17, 2017	2017/11
124	Takeaki Sakurai	筑波大学	Relation of Thin-Film Growth with defect Generation in High Efficiency Cu(In, Ga)Se ₂ based Solar Cells	2017 Global Research Efforts on Energy and Nanomaterials (GREEN 2017), Taipei, Taiwan, December 23, 2017 <invited>	2017/11
125	J. Chen, S. Wang, X. Hao, M. M. Islam, T. Kato, H. Sugimoto, K. Akimot, T. Sakurai	筑波大学	Influence of the wavelength of incident light on open-circuit voltage for Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ based solar cells	2017 年度応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会, 龍谷大学 瀬田学舎 REC ホール, 2017 年 11 月 18 日	2017/11
126	Takashi Koida, Yuko Ueno, Hajime Shibata	産業技術総合研究所	Roles of Dopant Species and Crystallization Processes on Transport Properties in In ₂ O ₃ -Based Transparent Conducting Oxide Films	第 27 回日本 MRS 年次大会 シンポジウム C: 先進機能性酸化物材料—作製プロセスおよび物性評価—	2017/12
127	T. Koida, Y. Ueno, J. Nishinaga, H. Higuchi, H. Takahashi, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Cu(In, Ga)Se ₂ Solar Cells with Polycrystalline ZnO- and Amorphous In ₂ O ₃ -Based Front Contact Layers	第 27 回日本 MRS 年次大会 シンポジウム C: 先進機能性酸化物材料—作製プロセスおよび物性評価—	2017/12
128	上田健太、 前田 毅、 和田隆博	龍谷大学	Cu(In, Ga)Se ₂ , Cu(In, Ga) ₃ Se ₅ , Cu(In, Ga) ₅ Se ₈ 系太陽電池材料の結晶構造と光学的性質	第 56 回セラミックス基礎科学討論会	2018/1
129	Takashi Koida, Yuko Ueno, Hajime Shibata	産業技術総合研究所	In ₂ O ₃ -based transparent conducting oxide films with high electron mobility: Effects of dopant species and crystallization processes	SPIE Photonics West	2018/1
130	T. Wada, T. Maeda	龍谷大学	Band engineering of Cu(In, Ga)Se ₂ for high efficiency CIGS solar cells	Global Photovoltaic Conference (GPVC2018)	2018/3
131	S. Wang, X. Hao, J. D. Chen, M. M. Islam, K. Akimoto, T. Kato, H. Sugimoto, T. Sakurai	筑波大学	Performance improvement of CIGS solar cell by alkali metal	2018 Joint Symposium on Energy Materials Science and Technology, Tsukuba, Japan, March 8-9, 2018.	2018/3
132	J. Chen, S. Wang, X. Hao, M. M. Islam, T. Kato,	筑波大学	A recombination analysis of the incident light wavelength dependence of the open-circuit voltage in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar	2018 Joint Symposium on Energy Materials Science and Technology, Tsukuba, Japan, March 8-9,	2018/3

	H. Sugimoto, K. Akimoto, T. Sakurai		cells	2018.	
133	川村末洋, 岩本悠矢, 谷川昂平, 加藤拓也, 杉本広紀, 柴田肇, 松原浩司, 仁木栄, 寺田教男	産業技術総 合研究所, 鹿児島大学	CdS/KF 処理 Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ 界面の電子構造評価	第 65 回応用物理学会春 季学術講演会, 早稲田大 学・西早稲田キャンパ ス, 2018 年 3 月 17 日- 20 日	2018/3
134	永井武彦, 川村末洋, 高木信一, 川崎健太, 島村拓也, 反保衆志, Kim Shinho, 柴田肇, 松原浩司, 仁木栄, 寺田教男	産業技術総 合研究所, 鹿児島大学	CdS/Cu ₂ Zn(SnGe)Se ₄ ヘテロ界面 における電子状態解明	第 65 回応用物理学会春 季学術講演会, 早稲田大 学・西早稲田キャンパ ス, 2018 年 3 月 17 日- 20 日	2018/3
135	西永慈郎, 鯉田崇, Kim Shinho, 石塚尚吾, 上川由紀子, 柴田肇, 仁木栄	産業技術総 合研究所	KF処理CIGS太陽電池の電流注入 による高効率化	第 65 回応用物理学会春 季学術講演会, 早稲田大 学・西早稲田キャンパ ス, 2018 年 3 月 17 日- 20 日	2018/3
136	早川貴宏, 西村昂人, 杉浦大樹, 中田和吉, 山田明	東京工業大 学	Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池における CdS バッファ層のキャリア濃度 制御	第 65 回応用物理学会春 季学術講演会, 早稲田大 学・西早稲田キャンパ ス, 2018 年 3 月 17 日- 20 日	2018/3
137	安藤佑太, S. Wang, J. Chen, M. M. Islam, 石塚尚吾, 柴田肇, 秋本克洋, 櫻井岳暁	産業技術総 合研究所, 筑波大学	禁制帯グレーディング制御を行 った Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池の再 結合解析 II	第 65 回応用物理学会春 季学術講演会, 早稲田 大学・西早稲田キャン パス, 2018 年 3 月 17 日 -20 日	2018/3
138	J. Chen, S. Wang, X. Hao, M. M. Islam, T. Kato, H. Sugimoto, K. Akimoto, T. Sakurai	筑波大学	Recombination analysis of Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ solar cells using monochromatic incident light	第 65 回応用物理学会春 季学術講演会, 早稲田大 学・西早稲田キャンパ ス, 2018 年 3 月 17 日- 20 日	2018/3
139	上川由紀子, 西永慈郎, 石塚尚吾, 柴田肇, 仁木栄	産業技術総 合研究所	CIGS 太陽電池の高効率化に向 けて ～アルカリ金属の挙動に 関する研究～	第 65 回応用物理学会春 季学術講演会, 早稲田大 学・西早稲田キャンパ ス, 2018 年 3 月 17 日- 20 日(招待)	2018/3

140	松浦純平, 首藤晃佑, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	NaF 処理 CIGS 太陽電池の熱・ バイアス印加効果	2018 年 第 65 回応用物 理学会春季学術講演会 早稲田大学 2018-3-17~20	2018/3
141	I. Khatri, J. Matsuura, Y. Ando, K. Shudo, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Effect of heat-bias-soaking on CsF-treated CIGS thin film solar cells	2018 年 第 65 回応用物 理学会春季学術講演会 早稲田大学 2018-3-17~20	2018/3
142	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto.	立命館大学	Combination of heat-light soaking and light soaking for performance improvement of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cell.	8th Forum on New Materials (Perugia, Italy).	2018/6
143	T. Ishida, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Crystal structures and optical properties of (Cu _{1- x} Ag _x)InSe ₂ and (Cu _{1- x} Ag _x)In ₅ Se ₈ systems	2018 E-MRS Spring Meeting and Exhibit	2018/6
144	T. Kusumoto, A. Kai, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties of (Cu, Li)GaS ₂ system	2018 E-MRS Spring Meeting and Exhibit	2018/6
145	T. Maeda, N. Kitagawa, T. Wada	龍谷大学	Crystallographic and optical properties of (InGa) ₂ Se ₃ , precursor compound for Cu(In, Ga)Se ₂ film fabricated by three stage process	2018 E-MRS Spring Meeting and Exhibit	2018/6
146	N. Terada, S. Kawamura, Y. Iwamoto, K. Tanigawa, T. Shimamura, T. Kato, H. Sugimoto, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki	鹿児島大 学, 産業技術総 合研究所	Electronic structure of surface and interface of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ -based structure	2018 Spring Meeting European Materials Research Society, June 18-22, 2018. (Invited)	2018/6
147	S. Kubo, T. Sawada, T. Shimamura, T. Kato, H. Sugimoto, S. Ishizuka, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総 合研究所, 鹿児島大学	CHARACTERIZATION OF ELECTRONIC STRUCTURE OF GRAIN BOUNDARIES IN CIGSSe AND CIGSSe ABSORBERS BY KELVIN PROBE FORCE MICROSCOPY	2018 Spring Meeting European Materials Research Society, June 18-22, 2018. (Invited)	2018/6
148	T. Koida, J. Nishinaga, Y. Ueno, H. Higuchi, H. Takahashi, M. Iioka, H. Shibata, S. Niki	産業技術総 合研究所	Effects of front contact layers on performances of Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	2018 Spring Meeting European Materials Research Society, June 18-22, 2018.	2018/6

149	T. Hayakawa, T. Nishimura, H. Sugiura, N. Suyama, K. Nakada, A. Yamada.	東京工業大学	Control of donor concentration in n-type buffer layer for high-efficiency Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Hawaii, USA (2018)	2018/6
150	T. Nagai, T. Shimamura, H. Tampo, S. Kim, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	Characterization of CdS/Cu ₂ Zn(Sn, Ge)Se ₄ heterointerface	Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, June 17-22, 2018.	2018/6
151	Y. Kamikawa, J. Nishinaga, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Influence of CdS thickness on the photovoltaic property of Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells fabricated by three-stage process with KF-PDT	Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition, June 17-22, 2018.	2018/6
152	J. Nishinaga, T. Koida, S. Ishizuka, Y. Kamikawa, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Effects of heat-light soaking and current injection by positive bias on CIGS solar cells with KF post-deposition treatment	E-MRS 2018 Spring Meeting	2018/6
153	S. Kim, J. Nishinaga, H. Tampo, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Reduced recombination in a surface-sulfurized Cu(InGa)Se ₂ thin-film solar cell	GRE2018	2018/6
154	Y. Kamikawa, J. Nishinaga, S. Ishizuka, H. Shibata	産業技術総合研究所	異なる Cu/III 比を有する CIGS 太陽電池の特性評価	日本学術振興会第 175 委員会 第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7
155	T. Sakurai, K. Akimoto	筑波大学	Study of Defects in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ -based Solar Cells	The International Union of Materials Research Societies-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM), Daejon, South Korea, Aug. 19-24, 2018 <Invited>	2018/8
156	和田隆博、 前田毅	龍谷大学	X 線回折による結晶構造評価と CIS 系太陽電池に関する状態図	日本学術振興会 産学協力研究委員会 次世代の太陽光発電システム第 175 委員会「化合物薄膜太陽電池分科会」第 7 回研究会「化合物薄膜太陽電池 夏の学校 2018」	2018/8
157	K. Beppu, A. Yamada, K. Nitta, T. Uruga, T. Wada	龍谷大学, 東京工業大学	Structural Analysis of the Cu(Ga, In)Se ₂ Thin-Films by Depth-Resolved XAFS”	21st International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-21)	2018/9

158	T. Maeda, T. Wada	龍谷大学	Band engineering of Cu chalcogenides for high efficiency solar cells	21st International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-21)	2018/9
159	S. Wang, Y. Ando, S. Ishizuka, H. Shibata, M.M. Islam, K. Akimoto, T. Sakurai	筑波大学, 産業技術総合研究所	Analysis of Recombination Property of CIGS Solar Cells with Gradient Bandgap	2018 International conference on Solid State Materials and Devices (SSDM), University of Tokyo, Tokyo, Sep.11-13, 2018.	2018/9
160	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto.	立命館大学	Cd-free Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cell with conversion efficiency of over 20% fabricated by all-dry process.	21st International Conference on Ternary and Multinary Compounds (Boulder, USA).	2018/9
161	Y. Ando, I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Epitaxial CIGS thin films on Mo back contact for solar cells	21st International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-21), Boulder, Colorado, USA, Sep.9-13 (2018)	2018/9
162	J. Matsuura, I. Khatri, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Combined effects of heat-light soaking and subsequent heating on NaF-treated CIGS thin film solar cells	21st International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-21), Boulder, Colorado, USA, Sep.9-13 (2018)	2018/9
163	T. Nagai, T. Shimamura, H. Tampo, S. Kim, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	CHARACTERIZATION OF CdS/Cu ₂ Zn(Sn, Ge)Se ₄ HETEROINTERFACE	35 th European Photovoltaics Science and Engineering Conference, Sep. 24-28, 2018.	2018/9
164	T. Koida, J. Nishinaga, Y. Ueno, H. Higuchi, H. Takahashi, M. Iioka, Y. Kamikawa, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Cu(In, Ga)Se ₂ mini-modules with high-mobility In ₂ O ₃ :W, H transparent conducting oxide layers	35 th European Photovoltaics Science and Engineering Conference, Sep. 24-28, 2018.	2018/9
165	S. Kim, J. Nishinaga, H. Tampo, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Reduced recombination in a surface-sulfurized Cu(InGa)Se ₂ thin-film solar cell	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2018/9
166	岩本悠矢、 谷川昂平、 高木佑誠、 西園由朗、 平井義晃、 加藤拓也、 杉本広紀、 柴田肇、	産業技術総合研究所, 鹿児島大学	CdS/アルカリ処理 Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ 界面の電子構造評価	第79回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、名古屋、2018年9月18日~21日	2018/9

	松原浩司、 仁木栄、 寺田教男				
167	永井武彦、 島村拓也、 反保衆志、 Kim Shinho、 柴田肇、 松原浩司、 仁木栄、 寺田教男	産業技術総 合研究所、 鹿児島大学	CdS/Cu ₂ ZnGeSe ₄ ヘテロ界面にお ける電子状態評価	第 79 回応用物理学会秋 季学術講演会、名古屋 国際会議場、名古屋、 2018 年 9 月 18 日～21 日	2018/9
168	西原弘訓、 前田 毅、 和田隆博	龍谷大学	第一原理計算による (Cu, Li)GaS ₂ 系固溶体に関する 研究	第 79 回応用物理学会秋 季学術講演会、名古屋 国際会議場、名古屋、 2018 年 9 月 18 日～21 日	2018/9
169	早川貴宏、 陶山直樹、 中田和吉、 山田明	東京工業大 学	Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池の pn 接 合位置と Eg, min 位置との相関	第 79 回応用物理学会秋 季学術講演会、名古屋 国際会議場、名古屋、 2018 年 9 月 18 日～21 日	2018/9
170	上殿明良、 Islam M. M.、 櫻井岳暁、 秋本克洋	筑波大学	陽電子消滅による CIGS 薄膜中 の空孔型欠陥の検出	第 79 回応用物理学会秋 季学術講演会、名古屋 国際会議場、名古屋、 2018 年 9 月 18 日～21 日<招待講演>	2018/9
171	櫻井岳暁、 M. M. Islam、 秋本克洋、 平井義晃、 加藤拓也、 杉本広紀	筑波大学	Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ 系太陽電池の 欠陥準位検出と再結合解析	第 79 回応用物理学会秋 季学術講演会、名古屋 国際会議場、名古屋、 2018 年 9 月 18 日～21 日<招待講演>	2018/9
172	I. Khatri, J. Matsuura, Y. Ando, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大 学	Comparative study of KF- and CsF-PDT on CIGS Thin Films and Solar Cells	2018 年 第 79 回応用物 理学会秋季学術講演会 名古屋国際会議場 2018-9-18~21	2018/9
173	Takashi Koida, Yuko Ueno, Hajime Shibata	産業技術総 合研究所	Reliability of In ₂ O ₃ -based transparent conducting oxide films with high electron mobility fabricated at low temperatures	7th International Symposium on Transparent Conductive Materials	2018/10
174	T. Koida, J. Nishinaga, Y. Ueno, H. Higuchi, H. Takahashi, M. Iioka, H. Shibata, S. Niki	筑波大学, 産業技術総 合研究所	Improved power conversion efficiency in Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells and minimodules via In ₂ O ₃ -based window electrodes with high electron mobility	4th EMRS & MRS-J Bilateral Symposium on Advanced Oxides and Wide Bandgap Semiconductors	2018/10
175	T. Koida	産業技術総 合研究所	Environmental and thermal stability of high-mobility In ₂ O ₃ -based transparent conducting oxide films fabricated at low process temperatures	First International Workshop on Silicon Heterojunction Solar Cells	2018/10

176	陳敬東、 櫻井岳暁、 Islam M. M.、 秋本克洋、 平井義晃、 加藤拓也、 杉本広紀	筑波大学	Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ 太陽電池のセシウム処理に対する再結合解析	2018 年度 応用物理学会 「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会、東京理科大、東京、2018 年 11 月 30 日-12 月 1 日	2018/11
177	寺田教男	鹿児島大学	電子分光による化合物薄膜太陽電池構造の評価	第 3 回フロンティア太陽電池セミナー、2018 年 12 月 13 日、14 日 <招待講演>	2018/12
178	T. Koida, J. Nishinaga, Y. Ueno, H. Higuchi, H. Takahashi, M. Iioka, H. Shibata, S. Niki	産業技術総合研究所	Effects of high-mobility transparent conducting oxide layers in Cu(In, Ga)Se ₂ minimodules with efficiencies up to 20.9%	第28回日本MRS年次大会	2018/12
179	Takashi Koida, Yuko Ueno, Hajime Shibata	産業技術総合研究所	Reliability aspects of high-mobility In ₂ O ₃ -based transparent conducting oxide films fabricated at low process temperatures	第28回日本MRS年次大会	2018/12
180	Takeaki Sakurai, Alban Lafuente-Sampietro, Jingdong Chen, Takuya Kato, Hiroki Sugimoto	筑波大学	Study of recombination in thin-film Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cells	International Symposium on Solar Energy Materials, Konan Univ., Japan, Jan. 25-26, 2019 <invited>	2019/1
181	谷川昂平、 岩本悠矢、 高木佑誠、 西園由朗、 西永慈郎、 永井武彦、 仁木栄、 寺田教男	産業技術総合研究所、 鹿児島大学	CdS/エピタキシャル Cu(In, Ga)Se ₂ 界面の電子構造評価	第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019 年 3 月 9 日-12 日	2019/3
182	永井武彦、 岩本悠矢、 谷川昂平、 濱田博也、 太田信義、 反保衆志、 Kim Shinho、 柴田肇、 松原浩司、 仁木栄、 寺田教男	産業技術総合研究所、 鹿児島大学	Cu ₂ Zn(Sn, Ge)Se ₄ 表面および CdS/Cu ₂ Zn(Sn, Ge)Se ₄ ヘテロ界面の電子状態評価	第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019 年 3 月 9 日-12 日	2019/3
183	J. Seughwan, 陶山直樹、 中田和吉、 山田明	東京工業大学	Se 照射プロセスによる Cu(In, Ga)Se ₂ 表面 Cu-Se 相の変化	第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019 年 3 月 9 日-12 日	2019/3
184	小林拓己、 下山達大、 松尾拳、 中田和吉、	東京工業大学	Ga/(Ga+In) 比が三段階法の Cu 過剰段階に与える影響	第 66 回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、2019 年 3 月 9 日-12 日	2019/3

	山田明				
185	石塚尚吾、 田口昇、 金信浩、 上川由紀子、 永井武彦、 反保衆志、 柴田肇	産業技術総 合研究所	カルコパイライト太陽電池のアルカリ金属効果	第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 2019 年 3 月 9 日-12 日 (招待)	2019/3
186	T. Koida, Y. Ueno, J. Nishinaga, H. Higuchi, H. Takahashi, M. Iioka, Y. Kamikawa, H. Shibata, S. Niki	産業技術総 合研究所	Current status of high-mobility transparent conducting oxide films and their application in Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells and mini-modules	Global Photovoltaic Conference 2019	2019/3
187	K. Tanigawa, S. Ajisaka, R. Takahashi, Y. Iwamoto, J. Nishinaga, T. Nagai, H. Tampo, H. Shibata, S. Ishizuka, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総 合研究所, 鹿児島大学	Electronic Structure of Surface and Interface of Epitaxial Cu(In,Ga)Se ₂ -Based Structure	2019 Spring Meeting Materials Research Society, April 22-26, 2019. (Invited)	2019/4
188	T. Nagai, Y. Iwamoto, K. Tanigawa, H. Hamada, N. Ota, H. Tampo, S. Kim, H. Shibata, K. Matsubara, S. Niki, N. Terada	産業技術総 合研究所, 鹿児島大学	Determination of the conduction band and valence band offset at the CdS/Cu ₂ Zn(Sn _{1-x} Ge _x)Se ₄ heterointerface: $x = 0$ to 1	2019 Spring Meeting Materials Research Society April 22-26, 2019.	2019/4
189	H. Nishihara T. Wada	龍谷大学	First-principles study of (Cu, Li)GaS ₂ system	The 7th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2019)	2019/6
190	Y. Kamikawa, M. Nardone, J. Nishinaga, H. Shibata, S. Ishizuka	産業技術総 合研究所	Assessing the impact of back-contact recombination on CIGS cells with improved crystal quality	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)	2019/6
191	I. Khatri, T-Y. Lin, T. Nakada, M. Sugiyama	東京理科大学	Self-Maintain CIGS Solar Cells for Space Application	32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2019-p-16, Aossa, Fukui, Japan, June 15-21	2019/6

				(2019)	
192	Wang Yazhi, 無量林登也, 中田和吉, 山田明	東京工業大 学	Relation between valence band offset effect and carrier recombination at CdS/Cu(In, Ga)Se ₂ interface	第16回「次世代の太陽 光発電システム」シン ポジウム、2019年7 月、宮崎	2019/7
193	J. Seughwan, 陶山直樹, 中田和吉, 山田明	東京工業大 学	Cu-Se相及びSe照射プロセス のCIGS太陽電池特性への影響 解析	第16回「次世代の太陽 光発電システム」シン ポジウム、2019年7 月、宮崎	2019/7
194	Takeaki Sakurai	筑波大学	Investigation of electrical properties in highly efficient Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ based thin film solar cells	The 76th Summer Annual Conference of the Korean Vacuum Society, Vivaldi Park, Seoul, Korea, Aug. 13, 2019 <Invited>	2019/8
195	K. Nakada, T. Kobayashi, T. Shimoyama, A. Yamada	東京工業大 学	Analysis of growth mechanism in Ga-rich Cu(In, Ga)Se ₂ thin films	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Marseille, France (2019)	2019/9
196	T. Maeda, M. Yanagita, R. Nakanishi, T. Wada	龍谷大学	Control of electronic structure in Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ for high efficiency solar cells	2019 International conferences regarding science and technology in devices and material (SSDM2019)	2019/9
197	T. Wada, M. Yanagita, T. Maeda	龍谷大学	Materials design of Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ absorber in CIGS solar cells by using 3D mapping of electronic structures	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference (36th EU PVSEC)	2019/9
198	鯨坂徳文, 高橋蓮司, 高木佑誠, 平井義晃, 加藤拓也, 杉本広紀, 寺田教男	鹿児島大学	CdS/Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ 構造の電 子状態:界面バンド湾曲、表面 光起電力の評価	第80回応用物理学会秋 季学術講演会、北海道 大学、札幌、2019年9 月18日~21日	2019/9
199	高木佑誠, 岩本悠矢, 谷川昂平, 西永慈郎, 永井武彦, 反保衆志, 柴田肇, 石塚尚吾, 寺田教男	産業技術総 合研究所, 鹿児島大学	エピタキシャルCu(In, Ga)Se ₂ 太 陽電池構造のバンドプロファイ ルの評価	第80回応用物理学会秋 季学術講演会、北海道 大学、札幌、2019年9 月18日~21日	2019/9
200	石塚尚吾, 田口昇, 金信浩, 西永慈郎, 上川由紀子	産業技術総 合研究所	銅系化合物薄膜のアルカリ金属 効果	第80回応用物理学会秋 季学術講演会、北海道 大学、札幌、2019年9 月18日~21日	2019/9
201	H. Tangara, J. Not, J. Schick,	筑波大学	Influence of Rubidium Treatment on the Electronic Properties of Cu(In, Ga)Se ₂	第80回応用物理学会秋 季学術講演会、北海道 大学、札幌、2019年9	2019/9

	S. Zahedi-Azad, A. Lafuente Sampietro, R. Scheer, T. Sakurai		Solar Cells with Different Ga Content	月 18 日～21 日	
202	山田明	東京工業大 学	30%以上の超高効率を目指した CIS 系タンデムセルの開発 (招 待講演)	第 80 回応用物理学会秋 季学術講演会、北海道 大学、札幌、2019 年 9 月 18 日～21 日	2019/9
203	無量林登也、 中田和吉、 山田明	東京工業大 学	三段階法における In 照射プロ セスの導入及び太陽電池特性の 評価	第 80 回応用物理学会秋 季学術講演会、北海道 大学、札幌、2019 年 9 月 18 日～21 日	2019/9
204	Ji Seunghwan, 早川貴宏, 陶山直樹, 中田和吉, 山田明	東京工業大 学	Se 照射プロセス及び 3 段階目 製膜時間が Cu 欠損層形成に与 える影響の解析	第 80 回応用物理学会秋 季学術講演会、北海道 大学、札幌、2019 年 9 月 18 日～21 日	2019/9
205	早川貴宏, WangYazi, 陶山直樹, 中田和吉, 山田明	東京工業大 学	KF 同時蒸着が Cu(In, Ga)Se ₂ 太 陽電池に与える影響	第 80 回応用物理学会秋 季学術講演会、北海道 大学、札幌、2019 年 9 月 18 日～21 日	2019/9
206	S. Ishizuka, J. Nishinaga, Y. Kamikawa, S. Kim, T. Koida, H. Shibata, N. Taguchi, S. Niki	産業技術総 合研究所	Recent CIGS Photovoltaic Research Activity at AIST	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference (36th EU PVSEC, invited)	2019/9
207	T. Wada M. Yanagita T. Maeda	龍谷大学	Materials design of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ absorber in CIGS solar cells by using 3D mapping of electronic structures	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference (36th EU PVSEC)	2019/9
208	和田隆博	龍谷大学	CuInSe ₂ 化合物薄膜太陽電池 ～ 材料の特徴と太陽電池の開発～	山梨大学「グリーンエ ネルギー変換工学」第 8 回国際セミナー	2019/10
209	A. Lafuente- Sampietro, K. Yoshida, K. Akimoto, N. Sano, T. Sakurai	筑波大学	Effect of the double grading on the electric field and the generation rate in Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	The 29th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC29), Xian, China, November 4-8, 2019.	2019/11
210	T. Maeda, T. Ishida, T. Wada	龍谷大学	Materials designs of (Cu _{1-x} Ag _x)InSe ₂ and Cu/Ag-poor (Cu _{1-x} Ag _x)In ₅ Se ₈ systems for Ag-alloyed CuInSe ₂ -based solar cell application	The 29th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC29), Xian, China, Nov. 4- 8, 2019.	2019/11
211	H. Tangara, A. Lafuente Sampietro, J. Not, S. Zahedi-Azad,	筑波大学	Study of Defects properties in Rubidium Treated CIGS Solar Cells: Analysis of Recombination mechanism	The 29th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC29), Xian, China, Nov. 4-	2019/11

	J. Schick, R. Scheer and T. Sakurai			8, 2019.	
212	J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura, Y. Kimoto, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	立命館大学	Impact of alkali treatment in Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ on its quality and carrier recombination	The 29th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC29), Xian, China, Nov. 4-8, 2019.	2019/11
213	濱田博也, 太田信義, 石松晃太, 松延達生, 菊永拓也, 宮崎尚, 青野裕美, 寺田教男	鹿児島大学	化合物太陽電池用 Ga ドープ酸化亜鉛系薄膜の作製	応用物理学会九州支部学術講演会, 2019 年 11 月 23 日(土) ~ 24 日(日)	2019/11
214	Shogo Ishizuka	産業技術総合研究所	Effects of alkali-metals in CIGS and related multinary compounds	International Workshop on Ternary and Multinary Compounds (IWTC2019, invited)	2019/11
215	I. Khatri, T-Y. Lin, M. Sugiyama, T. Nakada	東京理科大学	Cesium-Related Compound-An Emerging Chalcogenide Material and Its Influence on CIGS Thin-Film Solar Cells	Materials Research Society, 2019 Fall Meeting, Symposium EL04: Emerging Chalcogenide Electronic Materials-From Theory to Applications, Boston, MA, USA, Dec.1-06 (2019)	2019/12
216	楠本峻大, 前田 毅, 和田隆博	龍谷大学	AgInS ₂ および AgGaS ₂ への Li 固溶効果	第 58 回セラミックス基礎科学討論会 2020/1/9~10, ウィンクあいち (愛知県産業労働センター)	2020/1

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

番号	年度	タイトル	主催	発表年月
1	2016 年度	PVJapan2016 に「龍谷大学 理工学部 和田研究室」 として出展	一般社団法人 太陽光発電協会	2016/6/29
2	2017 年度	PVJapan2017 に「龍谷大学 理工学部 和田研究室」 として出展	一般社団法人 太陽光発電協会	2017/7/5
3	毎年度	AIST 太陽光発電 研究成果報告会 (エポカルつくば)	産業技術総合研究所	

E 高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発（産業技術総合研究所）

1. 成果詳細

はじめに

ヘテロ接合結晶系太陽電池の変換効率を制限する要因の一つとして、短絡電流密度 (J_{sc}) が比較的低い点が挙げられる。これは主にアモルファスシリコン (a-Si:H) 窓層における光学的な寄生吸収ロスが大きいことに起因する。a-Si:H の寄生吸収を抑制して J_{sc} を改善する手法の一つとして、可視光領域で光吸収係数の小さいナノ結晶シリコン(nc-Si:H)やその合金、非シリコン系の金属酸化物などの適用が考えられる。本研究では、ヘテロ接合結晶系太陽電池の寄生吸収損失低減を目的とした(i)シリコン系および(ii)非シリコン系のキャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発を推進した。

(1) テーマ毎の成果

(i) シリコン系高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの研究開発

nc-Si:H は a-Si:H と同じプラズマ CVD を用いて原料ガスを変えことなく製膜することができるため、生産ラインに大きな変化を加える必要がないことが利点と言える。製膜条件の調整により、シリコン薄膜をアモルファスから透明性及び導電性に優れたナノ結晶に材料制御することができ、さらに、酸素などの添加によってワイドギャップアモルファス Si 相にナノ結晶 Si 相が混在する複合材料を製膜することも可能で、更なる吸収損失低減が期待出来る。しかし、nc-Si:H の製膜速度は a-Si:H に比べて一般的に遅くなるため、実用性の観点からは、顕著な性能の改善が認められない限り nc-Si:H は産業で用いられない。これまでの研究開発では、nc-Si:H をヘテロ接合結晶系太陽電池の窓層に使用した結果が報告され、a-Si:H を用いた場合と同等の性能が示されているが、太陽電池の性能（変換効率）という点で、a-Si:H に対する nc-Si:H の優位性は明らかにされていない。両者の性能比較を行うためには、高い水準の性能を有するヘテロ接合結晶系太陽電池において検討する必要がある。本研究では、ヘテロ接合結晶系太陽電池の寄生吸収損失低減を目的として、nc-Si:H 系のキャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発を推進した。特に、両面電極型ヘテロ接合結晶系太陽電池において (p)nc-Si:H を窓層とした太陽電池を作製し、従来の (p)a-Si:H を用いたヘテロ接合結晶系太陽電池の性能をベンチマークとして、 V_{oc} や FF を損ねることなく吸収損失を低減し、 J_{sc} を 2%以上向上させるキャリア選択性パッシベーションコンタクトの技術開発指針を得ることを目標とした。

図 III-2-(二)-E-1 は、ヘテロ接合結晶系太陽電池のエミッタ層 (p 層) として、異なる放電周波数 (VHF (65 MHz) と RF (13.53 MHz)) で製膜した (p)nc-Si:H を用いたものと、比較として一般的な (p)a-Si:H を用いた場合の太陽電池パラメータ ((a) V_{oc} 及び iV_{oc} 、(b) FF 及び pFF、(c) J_{sc} 、(d) 変換効率) について、p 層膜厚依存性を調べたものである。なお、これらの太陽電池はテクスチャを形成した結晶 Si 基板を用いているが、図 III-2-(二)-E-1 の横軸に示す p 層膜厚はフラットな表面に製膜した呼び値 (nominal thickness) であることに注意されたい。図 III-2-(二)-E-1 (a) と (b) より、 V_{oc} 及び FF は p 層膜厚が厚くなるに従って増加し、それらが飽和する (p)nc-Si:H の膜厚 (VHF : ~15 nm、RF : ~25 nm) は (p)a-Si:H の場合 (~5 nm) に比べて 3-5 倍厚いことが分かる。少数キャリアライフタイム測定から評価される implied- V_{oc} (iV_{oc}) は表面パッシベーションの良否を表す指標と見做せるが、p 層の種類や膜厚に大きく依存せず、 $iV_{oc} > 700$ mV が得られている。したがって、(p)nc-Si:H を用いたセルでみられる V_{oc} の顕著な p 層膜厚依存性は、p 層がパッシベーションに与える影響ではなく、その正孔選択性に与える影響を反映していると言える。加えて、各 p 層で得られる最大の V_{oc} の平均値を比較すると、VHF 放電 (p)nc-Si:H で 716 mV ($t=15$ nm)、RF 放電 (p)nc-Si:H で 719 mV ($t=43$ nm)、(p)a-Si:H で 712 mV ($t=8$ nm)、となり、僅かながら (p)nc-Si:H が (p)a-Si:H より勝る結果となった。

図 III-2-(二)-E-1 (c) に示す J_{sc} は、どの p 層においても膜厚が厚くなるにしたがって低下している。しかし、(p)nc-Si:H を用いたセルは (p)a-Si:H のそれより p 層膜厚増加に伴う J_{sc} の減少の程度が小さいことが分かる。VHF と RF 放電で製膜した (p)nc-Si:H を比較すると、特に $t > 15$ nm において、VHF 放電よりも RF 放電の (p)nc-Si:H を用いたセルでより高い J_{sc} が得られた。この理由の一つとして、RF 放電の (p)nc-Si:H では VHF 放電よりも製膜温度が低いことが挙げられる。これは製膜温度の低温化により、原子状水素によるアモルファス相のエッチング速度が選択的に増加することに起因すると考えることができる。さらに、RF 放電は VHF 放電よりも B のドーピング濃度が少ない条件で最適化でき、その結果、より透光性の高い (p)nc-Si:H が得られた可能性がある。

図 III-2-(二)-E-1 (d) より、変換効率が最大となる p 層膜厚は、p 層膜厚に対する V_{oc} 及び FF の増加と J_{sc} の減少のトレードオフで決まることがわかる。最大変換効率が得られる最適な p 層膜厚は材料や条件によって異なり、それぞれの最適膜厚と得られる最高変換効率は、(p)nc-Si:H については VHF 放電：

t~15 nm で 22.4%、RF 放電 : t~32 nm で 22.4%、(p)a-Si:H については t~4 nm で 22.2%であった。

表 III-2-(二)-E-1 に、RF 放電で製膜した (p)nc-Si:H (t~25 nm) と (p)a-Si:H (t~5 nm) を用いたセルについて、p 層以外のセル構造を最適化した際の太陽電池パラメータを示す (Cell-A および Cell-Ref.)。図 III-2-(二)-E-1 で示したセルに対する変更点は、(i) ウエハ厚さを 280 μm から 200 μm に薄型化、(ii) Ag グリッド電極の厚さを 2.5 μm から 5 μm に厚膜化、(iii) セル面積を 1 cm^2 から 4 cm^2 に増加、などである。具体的な効果としては、p 層の材料や条件に依らず、(i) と (iii) は高 V_{oc} 化、(ii) は高 FF 化につながった。これらのセル構造の最適化により、 J_{sc} の他、 V_{oc} 、FF についても (p)nc-Si:H を用いたセルが (p)a-Si:H のものを僅かに上回る結果となった。特に、(iii) Ag-grid 電極の最適化によりセルの直列抵抗損失が低下したため、FF に有意な差が生じた。(p)a-Si:H を (p)nc-Si:H に置き換えることによる FF の改善は、後述するように、(p)nc-Si:H の導電率が (p)a-Si:H より高いことによる TC0/p コンタクト抵抗の低減に起因していると考えられる。その他、ライフタイム評価から (p)nc-Si:H の製膜によりパッシベーション性能も僅かに向上する効果が確認されている。(p)nc-Si:H の製膜には (p)a-Si:H に比べて 100 倍以上の高水素希釈条件を使用するため、(p)nc-Si:H を製膜する際に生成する原子状水素が下地の (i)a-Si:H や (i)a-Si:H/c-Si 界面に供給され、それがパッシベーションを改善する効果を与えるものと考えられる。

表 III-2-(二)-E-1 では、さらなる太陽電池の高電流化を検討するために、(p)nc-Si:H の膜厚を t~25 nm から ~19 nm に薄膜化したサンプルの I-V パラメータについても示している (Cell-B)。単純に p 層膜厚を薄くすると、図 III-2-(二)-E-1 に示すように特に FF が大きく低下するために、Cell-B では (p)nc-Si:H の結晶性と導電性を両立するような不純物プロファイリングを行った。この結果、Cell-Ref. と比較して V_{oc} 、FF を損ねることなく J_{sc} を 0.8 mA cm^{-2} 改善でき、本事業の最終目標である $J_{sc}:+2\%$ を達成した。

また、更なる高効率化を目指した検討として、上記の (i) から (iii) のセル最適化に加えて、(iv) TC0 の改良を加えた (Cell-C)。具体的には、In 系透明電極の改良として、Sn に代わる新しいドーパントを添加することや、製膜手法を最適化することにより、標準的な ITO を用いたセルに比べて、特に V_{oc} と FF に顕著な改善が認められた。その結果、これまでの試験の中では最も性能の高い 23.5% (第三者測定) を得た。

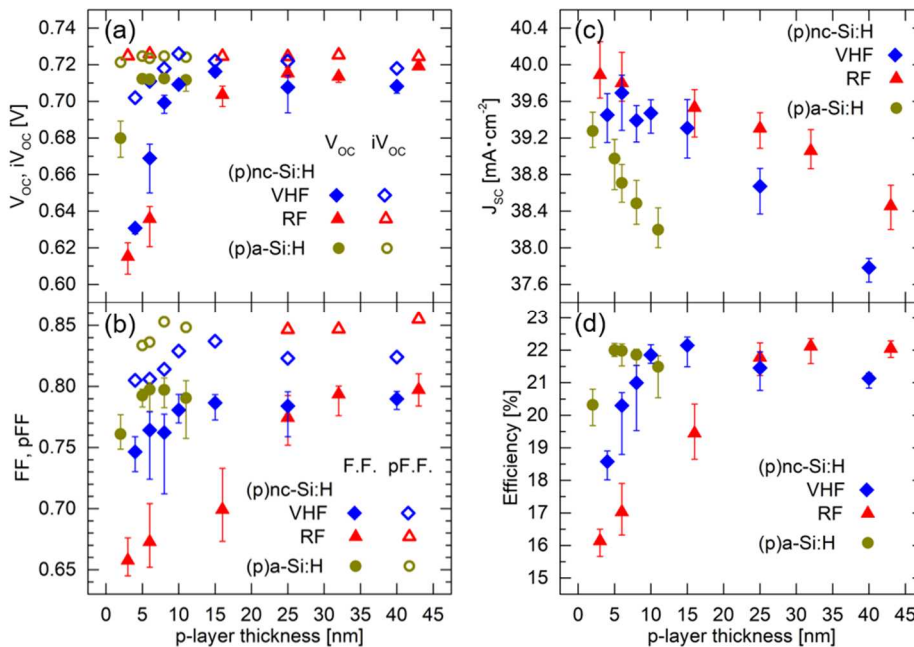


図 III-2-(二)-E-1. 各標準条件で製膜した p 層を用いたヘテロ接合結晶系セルの (a) V_{oc} 及び iV_{oc} 、(b) FF 及び pFF、(c) J_{sc} 、(d) 変換効率の膜厚依存性。

表Ⅲ-2-(ニ)-E-1. 各標準条件で製膜した p 層を用いたヘテロ接合結晶系セルの V_{oc} 、FF、 J_{sc} 、変換効率。括弧内の数字は第三者による高精度評価結果を示している。

cell	p-layer	Nominal thickness (nm)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
Cell-Ref.	a-Si:H	~5	38.9	0.722	0.801	22.5
Cell-A	nc-Si:H	~25	39.4	0.729	0.804	23.1
Cell-B	nc-Si:H	~19	39.7	0.722	0.801	23.0
Cell-C	nc-Si:H	~25	39.4 (39.48)	0.730 (0.733)	0.812 (0.814)	23.3 (23.5)

(ii) 非シリコン系高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの研究開発

前節は速やかな実用化・事業化を意識し、現行プロセスをほぼそのまま使用出来るシリコン系材料に着目した。本節では、抜本的なコンタクト層による寄生吸収ロスの低減を図るため、シリコン系材料にとらわれず、より高い透明性を有する金属酸化物系のキャリア選択性コンタクト材料を探索するとともに、表面パッシベーション性との両立を図り、一層の光吸収損失の低減を目指した研究を実施した。

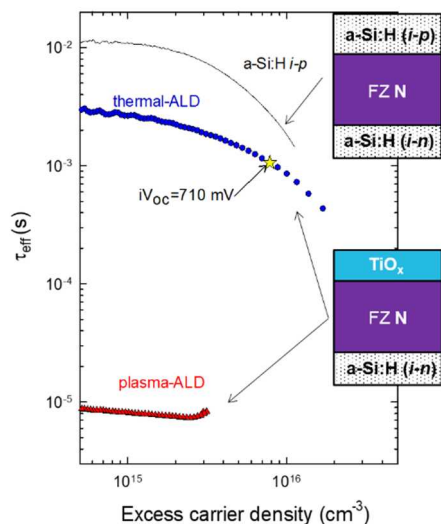
結晶 Si 太陽電池の高効率化に向けた新しい取り組みとして、近年、結晶 Si に対して良好なパッシベーションとキャリア選択性の機能を併せ持つ金属酸化物が見出され、安価かつ光学的に透明なキャリア選択性パッシベーションコンタクト材料として注目を集めている。金属酸化物の材料選択や物性制御に基づいたキャリア選択性パッシベーションコンタクト技術が確立すると、従来の pn 接合に代わる低コストなセル製造プロセスの開発が期待できる。しかし、パッシベーションとキャリア選択性の機能を併せ持つ材料の開発は難易度が高く、高度な界面制御技術とキャリア輸送メカニズムの解明が不可欠である。

これまで我々は、代表的な電子選択性コンタクト材料とみなされてきた酸化チタン (TiO_x) が、成長条件等の制御によって正孔選択性コンタクトとしても動作し得ることを世界で初めて見出している。 TiO_x は、その高い透明性から、従来型の a-Si:H 系材料に比べて大幅に吸収損失を抑制出来る可能性がある。本事業では、原子層堆積装置 (ALD) を用いた極薄 TiO_x 層の製膜を行い、そのキャリア選択性とパッシベーション性能について調査した。また、ALD- TiO_x をパッシベーションコンタクトとして太陽電池デバイスに適用し、従来の a-Si:H を用いたヘテロ接合結晶系太陽電池の性能と比較を行った。

TiO_x の表面パッシベーション性能を評価するために、 $TiO_x/(n)c-Si/a-Si:H$ の非対称パッシベーション構造を有するサンプルを作製し、QSSPC を用いてライフタイム評価を行った。 TiO_x の製膜には、上記と同様、サーマル ALD とプラズマ ALD を使用した。比較のためのリファレンスとして作製した対称パッシベーション構造を有するサンプル (a-Si:H / (n)c-Si/a-Si:H) の評価も行った。図Ⅲ-2-(ニ)-E-2 にこれらのサンプルのライフタイムのキャリア注入量依存性を示す。a-Si:H / (n)c-Si/a-Si:H のサンプルが最も高いライフタイムを示すことから、 $TiO_x/(n)c-Si/a-Si:H$ の結果は $TiO_x/(n)c-Si$ 界面のパッシベーション性能を反映している。図Ⅲ-2-(ニ)-E-2 より、 TiO_x のパッシベーション性能は、ALD 条件に強く依存していることがわかる。サーマル ALD TiO_x は $\Delta n=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア注入で 1 ms 以上のライフタイムを示すとともに、1-sun 照射下における iV_{oc} は 710 mV が得られ、本事業の最終目標の $iV_{oc}>700 \text{ mV}$ を達成した。一方、プラズマ ALD TiO_x ではライフタイム値が 10 μs 以下と低いパッシベーション性能を示す。このように、同一装置、同一原料を用いた TiO_x でも製膜プロセスによりパッシベーション性能が大きく異なることが明らかとなった。反跳粒子検出法 (ERDA) による水素組成分析により、サーマル ALD TiO_x には原料 (H_2O) を起源とする水素原子が TiO_x 中に約 1 at.% 含まれていることが明らかになっており、水素が Si ダングリングボンドを終端する効果をもたらすものと考えられる。さらに、サーマル ALD で製膜した TiO_x と Si の界面には、負の固定電荷が存在することが示唆されており、固定電荷による電界効果パッシベーションの効果が発現していることも考えられる。

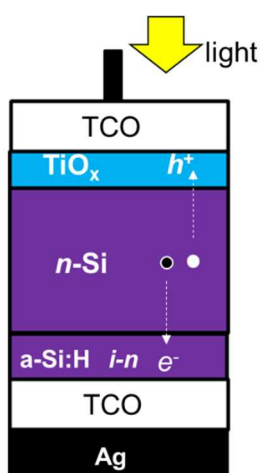
上記のように、サーマル ALD で作製した TiO_x は正孔選択性を有するとともに、比較的優れたパッシベーション性能を有することから、結晶シリコンの正孔選択性パッシベーションコンタクトとして機能することが期待される。そこで、図Ⅲ-2-(ニ)-E-3 に示すような太陽電池デバイスを試作した。フラットな n 型結晶シリコンの表面にサーマル ALD を用いて TiO_x を製膜し、その後、ITO、銀 (Ag)

のグリッド電極を製膜し、これを太陽電池の正極とした。負極にはヘテロ接合結晶系太陽電池で一般的に用いられる構造を用いた。疑似太陽光を正極側から照射し、太陽電池の性能評価を行った結果を表Ⅲ-2-(ニ)-E-2に示す。ここでは、標準的な a-Si:H p-i 層を正孔選択性パッシベーションコンタクトに用いた太陽電池の I-V パラメータを基準として規格化した値を示している。表Ⅲ-2-(ニ)-E-2 から、a-Si:H p-i 層を TiO_x に置き換えることで、J_{sc} を 8% 改善できていることがわかる。なお、ここでは示されていないがテクスチャ Si を用いた太陽電池では J_{sc} を 4% 以上改善できることを確認し、フラット型、テクスチャ型のいずれの太陽電池においても本事業の目標である J_{sc}: 3% 以上の改善を達成した。この J_{sc} のゲインは、TiO_x のバンドギャップが約 3.4 eV と a-Si:H のそれ (約 1.7 eV) に比べて大きく、可視域における寄生吸収ロスがほとんどないことに起因している。一方、V_{oc} と FF に関しては、リファレンスのセルとほぼ遜色のない値が得られており、a-Si:H を用いた平坦ヘテロ接合結晶系太陽電池と同等のパッシベーション性能と正孔選択性を実デバイスで実証することに成功した。



図Ⅲ-2-(ニ)-E-2. 結晶 Si 基板の片面をプラズマ ALD TiO_x (赤) またはサーマル ALD TiO_x (青) でパッシベーションしたサンプルの少数キャリアライフタイムの注入キャリア濃度依存性。

なお、結晶 Si の反対の面は a-Si:H i-n 層でパッシベーションした。比較のため、結晶 Si の両面を a-Si:H i-n 層でパッシベーションした試料の評価結果についても示している。



図Ⅲ-2-(ニ)-E-3. TiO_x を正孔選択性パッシベーションコンタクトに用いた太陽電池試料の概略図。TiO_x は ALD を用いて平坦な結晶 Si に直接形成した。

表Ⅲ-2-(ニ)-E-2. 図Ⅲ-2-(ニ)-E-3 に示す太陽電池試料（平坦型結晶 Si）の太陽電池パラメータ。リファレンスとして用いたヘテロ接合結晶系太陽電池の性能で規格化した値を示している。

Hole contact	Si surface	thickness (nm)	J_{sc}	V_{oc}	FF	η
a-Si:H i-p (Ref.)	Planar	~10	1.0	1.0	1.0	1.0
TiO _x	Planar	~5	1.08	0.98	1.0	1.05

（２）目的に照らした達成状況

本事業における最終目標は以下の通りである。

- ①本研究開発により得られたシリコン系ナノ結晶材料をヘテロ接合結晶系太陽電池に適用し、標準的な a-Si:H のみで構成されるベンチマークセル（発電効率>22%）に比べ、 V_{oc} や FF を維持しつつ、 J_{sc} の 2%以上の向上を達成する。これにより、連携先の目標達成に貢献する。
- ②金属酸化物系パッシベーションコンタクトとして用いたヘテロ接合結晶系太陽電池において、a-Si:H のみでヘテロ接合を形成するヘテロ接合結晶系太陽電池に比べ、 J_{sc} を 3%以上改善する。さらに、ライフタイム評価による開放電圧 (iV_{oc}) で 700 mV 以上を達成する。以上により、ヘテロ接合結晶系太陽電池の性能を超え得るポテンシャルを実証する。

今回の研究開発を通して、得られた成果は下記の通りである。

- ・ (p)a-Si:H を (p)nc-Si:H に置き換えることで、 V_{oc} 、FF を維持したまま、 J_{sc} を最大 2.1%向上することに成功した。本事業の目標である J_{sc} 2%以上の向上を達成した。
- ・ nc-Si:H(p) の薄膜化に伴う性能低下のメカニズムを調査した結果、結晶相の表面被覆性がパッシベーションコンタクト性能の向上に重要であるとの指針を得た。
- ・ (p)a-Si:H を (p)nc-Si:H に置き換えることで、 J_{sc} のみならず V_{oc} 、FF も増加し、変換効率を絶対値で 0.3-0.6%改善できることを実証し、目標を上回る成果を得た。
- ・ TiO_x でパッシベーションした結晶 Si で、ライフタイムの評価による iV_{oc} =710 mV を得た。本事業の目標である iV_{oc} >700 mV を達成した。
- ・ TiO_x を正孔選択性パッシベーションコンタクト（フロントエミッタ）に用いた太陽電池を開発し、一般的な a-Si:H を用いたヘテロ接合結晶系太陽電池に比してフラット基板では J_{sc} を 8%、テクスチャ基板では J_{sc} を 4%改善することに成功した。いずれも本事業の目標である J_{sc} 3%以上の改善を達成した。
- ・ TiO_x を正孔選択性パッシベーションコンタクト（フロントエミッタ）に用いた太陽電池で、フラット基板ではリファレンスとなるヘテロ接合結晶系太陽電池と遜色のない V_{oc} 、FF を実証し、本事業の目標を上回る成果を得た。

2. 実用化・事業化見通し

(i) シリコン系高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの研究開発

開発した (p)nc-Si:H は現在のヘテロ接合結晶系太陽電池で一般的に使用されている (p)a-Si:H と同じ製膜手法で作製でき、変換効率を改善できる技術であることから、事業化の障壁は低いものと考えられる。しかし、本研究で明らかにしたように、(p)nc-Si:H の必要膜厚が (p)a-Si:H より 3-5 倍ほど厚く、また製膜速度が低い点が事業化における今後の技術的な課題と言える。本研究では、従来の RF 放電から VHF 放電にすることで (p)nc-Si:H の薄膜化と製膜速度の高速化を同時に実現できる知見も得ていることから、今後、太陽電池セルメーカーで VHF 放電を用いたヘテロ接合結晶系太陽電池の製造につながる事が期待される。

(ii) 非シリコン系高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの研究開発

(i)のシリコン系パッシベーションコンタクトの研究開発では速やかな実用化・事業化を意識し、現行プロセスをほぼそのまま使用出来るシリコン系材料に着目した。他方、非シリコン系材料の研究開発では、より抜本的な寄生吸収損失の低減を図るため、シリコン系材料にとらわれず、より高い透明性を有する金属酸化物系のキャリア選択性コンタクト材料を探索するとともに、表面パッシベーション性との両立を図り、一層の光吸収損失の低減および発電特性向上を目指したものである。本研究では、光学的に透明な TiO_x を材料制御することで正孔選択性パッシベーションコンタクトの機能を発現させ、その結果、大幅な J_{sc} の改善が得られるとともに、平坦型太陽電池では従来のヘテロ接合結晶系太陽電池と遜色のない性能が得られた。今後は、更なる高性能化・耐久性実証を行うことで、ヘテロ接合結晶系太陽電池を置き換える新型太陽電池の実用化に繋がることが期待される。

3. 波及効果

(i) シリコン系高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの研究開発

開発した(p)nc-Si:Hは(p)a-Si:Hよりもドーピング効率や移動度が高いことに起因して導電率が数桁高いため、各種透明導電膜や異種の太陽電池材料とのコンタクト抵抗の低減が期待される。例えば、低温環境下で使用する太陽電池への応用や、ペロブスカイト/Siのタンデム太陽電池の開発に必要となるトンネル接合などへの応用が期待される。

(ii) 非シリコン系高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの研究開発

これまで TiO_x はシリコンのみならず様々な太陽電池材料に対して電子を取り出す機能があることが知られてきたが、今回開発した TiO_x はシリコンから正孔を取り出す新しい機能を有する。これはこれまでの半導体理論を覆す新しい発見であると言え、この技術をさらに進歩させることで太陽電池のみならず半導体、水素製造用光電極など幅広い分野に応用できると考えている。

4. 今後の展開

(i) シリコン系高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの研究開発

本研究では、ヘテロ接合結晶系太陽電池の高効率化を図る手段として(p)a-Si:Hを(p)nc-Si:Hに置き換えることが有効であることを示したが、更なる効率改善には V_{oc} 、FFを犠牲にすることなく更に(p)nc-Si:Hを薄膜化してより高い J_{sc} を得ることが有効と考えられる。また、n型の材料についても、(n)a-Si:Hに勝る(n)nc-Si:H材料の開発を行うことで、より高性能な両面受光型ヘテロ接合結晶系太陽電池の実現につながるものと考えられる。

(ii) 非シリコン系高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの研究開発

ヘテロ接合結晶系太陽電池で使用する a-Si:H や上記のサブテーマで開発した nc-Si:H の製膜にはモノシラン (SiH_4) に代表される特殊高圧ガスを使用することから設備投資や維持費が大きい問題があった。今回、 TiO_x がシリコンから正孔を取り出すという新しい機能を見出したことにより、これと従来の電子を取り出す機能を持つ TiO_x を組み合わせることで、a-Si:H を使用しない高効率太陽電池への展開が期待される。このような新型太陽電池を開発することで、性能を犠牲にすることなく結晶シリコン太陽電池の製造コストを削減する研究開発を推進する。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	—	—	—	0	2(1)	2(1)
論文	—	—	—	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	—	—	—	1	3(2)	4(2)
新聞・雑誌等への掲載	—	—	—	0	0	0
その他	—	—	—	0	0	0

(2020年08月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(国研) 産 総研	特願 2019-130576	国内	2019/7/12	出願	半導体装置および太陽電池並びに半導体装置の製造方法	松井卓矢、齋均
2	(国研) 産 総研	PCT/JP2020/025060	PCT	2020/6/25	出願	半導体装置および太陽電池並びに半導体装置の製造方法	松井卓矢、齋均

【論文】

なし

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	海汐寛史, 陳 珮伶, 松井卓矢, 齋均, 松原浩司	産総研	VHF-PECVD を用いて成膜した ヘテロ接合太陽電池用 p 型ナ ノ結晶シリコンの評価	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019 年 3 月
2	松井卓矢、海汐寛史 齋均	産総研	Challenges for silicon heterojunction solar cells: Toward thinner device and new contact development (招待講演)	2nd International Workshop on SHJ Solar Cells (Chengdu, China)	2019 年 11 月
3	松井卓矢、 Martin Bivour (Fraunhofer-ISE)、 Martin Hermle (Fraunhofer-ISE)、 齋均	産 総 研 、 Fraunhofer -ISE	TiO _x thin layer as an efficient passivating hole selective contact	2019 MRS meeting and exhibit, Boston	2019 年 12 月
4	海汐寛史, 齋均, 松井卓矢	産総研	Siヘテロ接合太陽電池への応 用に向けたp型ナノ結晶Si薄膜 の特性評価	第67回応用物理学会春 季学術講演会	2020 年 3 月

【新聞・雑誌等への掲載】

なし

【その他】

なし

(ホ) 共通基盤技術

【A 太陽電池性能高度評価技術の開発】

(産業技術総合研究所、電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、東京理科大学、立命館大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
<p>新型太陽電池性能評価技術の開発（産業技術総合研究所）</p>	<p>・新たに開発される新型太陽電池の性能評価再現性±0.5% (1σ) 以内を達成する。 ・WPVS 根幹ラボ以外の間で国際比較校正実施。国際的不整合解決。</p>	<p>・各種新型太陽電池の高精度性能評価技術を開発した。新型結晶シリコンペアセル及び CIGS で再現性±0.5%達成。 ・ペロブスカイト太陽電池の定常状態における高精度発電性能評価手法を開発し、評価測定にて検証。 ・性能評価技術の国際整合性検証として、NREL, ESTI, FhG-ISE 等と国際比較測定を実施。PV モジュール（結晶 Si 系、化合物薄膜系）STC 測定、温度係数測定、両面受光モジュール測定、高容量セル STC 測定等。 ・性能評価技術開発の一環として、NEDO 開発品等の高精度性能評価測定を実施（年間約 100 サンプル（含内部測定等））。開発事業者にフィードバックし、太陽電池開発、高効率化、低コスト化に貢献した。Eff. Tables への掲載等により、最新情報提供と研究開発の活性化に貢献した。日本からの世界最高効率 16 件掲載。 ・フェムト・ピコアンメータを用いた積分球光源法により各種ディテクの動作領域における特性評価を完了するとともに、それらを搭載した校正用の分光放射計でも全波長で非直線応答が無いことを最終的に確認し、結晶系の一次基準太陽電池の最高校正能力を 0.72%から 0.60%に向上することができた。 ・WPVS 根幹ラボ並びにアジアの主要校正ラボとの比較校正を完了し、統計的指標である En 数で整合度を定量的に評価した。結晶シリコン系では、全ての機関で満足な一致度にあることを確認した。新型太陽電池用疑似セルでは一部ラボでの不整合の原因を解析し、勧告を行ってその解決を図った。</p>	<p>○</p>	

<p>屋外高精度評価技術の開発（産業技術総合研究所）</p>	<p>薄膜系を含む市販太陽電池モジュールの屋外測定再現性±1.0%（1σ）以内を実証する。</p>	<p>・屋外高精度評価技術の開発屋外 I-V 特性測定に関して、PVMS による日射計測や高精度モジュール温度測定、従来より高精度かつ温度係数の情報不十分な新温度補正式の技術開発により、高精度な屋外性能評価が様々な照度・温度条件下で実現可能であることを実証し、測定再現性±1%の最終目標を達成した。各種結晶シリコンモジュール（従来型）に加えてCIGS 薄膜及び HIT モジュールで再現性を検証し、更に 1%以内の僅かな性能変化検出の可能性を明らかにした。開発成果の O&M 等への実用化に重要な新 STC 補正技術を開発した。更に業界ガイドライン採用や IEC 規格に提案等、開発技術実用化を推進した。</p>	<p>○</p>
<p>太陽電池温度の高精度測定技術開発（宮崎大学）</p>	<p>・開放端電圧と測定温度を整合させる。 ・太陽電池モジュールの実温度測定精度±1℃以内を達成する。</p>	<p>・ PV モジュールの発電性能を決めるのはモジュール内部のセルの性能であるため、セル温度を高精度に測定することが必要となる。セル温度を実測できる特別なモジュールを AIST との連携により作製し、モジュール内セル温度計測を実施した。 ・ EVA やバックシートの熱抵抗を考慮した熱流束計算により、簡便に得ることのできるバックシート温度からモジュール内部のセル温度を精度±0.5℃程度の高精度で導出することに成功した（最終目標達成）。さらに、季節や天候によらず高精度に測定できることを確認した。 ・屋外では常に有風であり、モジュールやシステム面内に温度分布が常時生じている。代表温度（モジュールやシステム内の平均温度）を計測するための温度計測位置を実測値をもとに検証・定義した。モジュールやシステムの中央位置における温度は屋外環境において常に平均温度に近い値となることが定量的に明らかとなった。 ・屋外における PV モジュールおよびシステムの高精度温度測定技術として、モジュールやシステムの中央位置における温度を計測し、さらに、その位置のバックシート温度を計測することにより内部のセル温度を高精度に計測することが可能となった。PV 評価には温度を正確に把握する必要があり、簡便に太陽電池温度を高精度測定できる本成果はその実用化・事業化に資するものとなる。</p>	<p>○</p>

<p>日射変動解析技術の開発（岐阜大学）</p>	<p>観測や気象モデル解析の結果を踏まえ、屋外性能評価実施者が屋外高速 I-V 計測実施の判断が可能な手法を確立する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・複数の PVMS と上空カメラ、気象観測機器を設置し、日射強度やその変化、変化の原因となる雲の変化を定量化。 ・日射時間変動と場所ムラの定量的解析、日射強度変動中の日射むら低減（フィルタ）法検討と最適化し、入手しやすい気象情報をもとに高速 I-V 計測の精度を保証しうる気象条件を提示。 ・日射強度の時間変動で制限（フィルタリング）することにより空間ムラの小さいイベントを検出する方法を開発。 ・観測値または数値モデルから日射急変時のスペクトルを取得し、スペクトルミスマッチを定量化。 	<p>○</p>
<p>スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発（立命館大学）</p>	<p>屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の 3 分の 1 に高精度化。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶 Si 系 PV では PVMS による照度補正で同時にスペクトルミスマッチもほぼ補正され Isc 測定誤差を大幅に低減可能なことを統計的に示した。 ・APE から求めたスペクトルミスマッチ係数 (MM) を用いた MM 補正を行い、PVMS と SR が大きく異なる薄膜 PV (CdTe) の Isc 測定誤差を 3 分の 1 に高精度化できることを示した。 ・PVMS と SR の近い結晶 Si 系でも極端にブルーリッチなスペクトルに対してはスペクトルミスマッチが 3% 程度存在する事を示した。 ・SR の異なる二つの PV (PVMS と、LowE カバーガラスによって PVMS の長波長感度を下げた PVMS_LowE) の Isc を用いて APE を求める手法を提案し、その有効性を示した。この知見を応用して、薄膜等新型太陽電池の屋外測定において、APE センサー (PVMS_Low-E) で測定した APE による MM 補正の高精度化が可能であることを示した。 	<p>○</p>

<p>PV 日射計測によるシステム性能測定手法開発 (東京理科大学)</p>	<p>小規模な PV アレイまたはシステムにおけるオンサイト屋外高精度測定を実施し、アレイ面内照度ムラ、アレイ面内温度分布把握、スペクトル補正等を行い、必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法および測定精度を検証することで、市販タイプ結晶 Si 太陽電池モジュールを用いた太陽電池アレイの屋外測定精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) を達成する。</p>	<p>・太陽電池モジュールの屋外高精度測定を共通基盤技術として普及実用化するために必要不可欠な技術の開発として、太陽電池が直並列に接続されたシステムに対し、屋外において太陽電池アレイ面内に照度ムラ、温度ムラがある場合の発電性能を高精度に測定するための環境条件および電流-電圧(I-V)特性の測定条件を明らかにするとともに、システムのアレイ構成・ストリング構成を考慮して高精度に発電性能を測定・評価する手法として、日射測定機器に PV モジュール日射センサ(PVMS)を用いた発電性能測定手法を開発し、そのシステムへの適用可能性を実証した。</p> <p>・1ダイオードモデルと銘板値から算出した STC およびダーク I-V カーブにより、照度方向を線形補間によって、温度方向を AIST 提案手法によって補正する手法を開発し、各種屋外測定データを用いて精度評価を行った。</p> <p>・開発した銘板値を基準とした屋外測定条件における参照基準 I-V カーブの作成と発電性能測定・評価において、$\pm 3.0\%$以内(中間目標にて達成)の誤差で、$\pm 1.0\%$(1σ)以内の再現性を得たことにより、最終目標を達成した。</p> <p>・本技術を用いることで、屋外における性能評価を高精度に行うことが可能となった。</p>	<p>○</p>
--	---	---	----------

<p>屋外実性能高能率測定技術の開発 (電気安全環境研究所)</p>	<p>オンサイトで複数台の測定再現性精度±2% (1σ) 以内を実証する装置仕様、手順を明確にし、ガイドラインを産業技術総合研究所と共同で策定する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・日射センサとしてPVMS (結晶Si太陽電池) を隣接させた結晶Si系太陽電池モジュールの高速I-V測定 (測定時間: 200ms) において、同一測定環境下でのPmaxの測定再現性精度±2% (1σ) 以内が実現することを、電気安全環境研究所電力技術試験所 (横浜) の試験モジュールおよびPV曝露試験所 (岡山)、メガソーラー (千葉) で稼動中の実モジュールで確認した。 ・結晶Si系に続き、薄膜CIGS系でも同様に測定再現性精度±2% (1σ) 以内が実現することを確認した。 ・「照度: 200W/m² 以上」および「測定前後の照度変動: 0.5%以下」を適用条件とすれば、バラツキは±2% (1σ) 以内で、AISTのSTC補正が有効であることを確認した。 ・照度適用条件を「300W/m² 以上」にすると、従来の「700W/m² 以上」と比較して、測定可能時間が倍増し、高能率化が図れることを確認した。 ・電気安全環境研究所のI-V測定法に、AISTのSTC補正技術、岐阜大学の日射変動解析技術、宮崎大学の高精度温度測定技術、東京理科大学のシステム性能測定技術など本プロジェクトで得られた開発成果を反映させたガイドライン相当の手順書「PVMSを用いた屋外環境下における高能率I-V特性測定方法」を作成した。 	<p>○</p>
--	--	--	----------

* 1 達成度

◎: 数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○: 数値目標クリア、△: 数値目標未達

【B 太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発】

(国立研究開発法人産業技術総合研究所、デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社、東レ株式会社、石川県工業試験場、国立大学法人岐阜大学、国立大学法人東京農工大学、国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学、学校法人東京理科大学、一般財団法人電力中央研究所、国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学（再委託先））

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度 * 1	備考
① モジュール劣化メカニズムの解明（産業技術総合研究所）	<ul style="list-style-type: none"> ・長期屋外曝露されたモジュールの各種劣化要因と発電量低下の関係を定量的に評価する。 ・高温高湿試験、紫外線照射試験、温度サイクル試験、結露凍結試験等の組合せ試験を施したモジュールの発電量と試験条件の関係を定量的に評価する。 ・屋外でのPID試験での劣化要因を体系的に整理し、PIDの劣化現象を定量的に評価する。 ・モジュール寿命30年（出力低下率20%以内）を実証する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・各種長期屋外曝露モジュールを分析し、酢酸量、封止材／セル界面での自由体積サイズ、発電量を定量的に評価した。 ・紫外線照射試験を施したモジュールの着色と酢酸量、自由体積サイズ、発電量を定量的に評価した。 ・PID現象とNaの関係を評価するとともに、各種太陽電池でのPID現象を詳細に解析した。光照射時のPIDの振舞いを詳細に調査し、波長依存性を明確化するとともに、部分影の影響を見出した。これまでに見出したPID現象を定性的ながら総合的に説明できるモデルを構築し、これまで個別のモデルで考えられていたp型とn型の結晶シリコン太陽電池のPIDメカニズムを統一的に説明可能とした。p型セルにおける反射防止膜を種々変更したセルを用いてより詳細に検証し、上記モデルを強化した。また、これらの知見をもとに、反射防止膜にかかる電界を遮蔽するセル構造を考案し、PIDをほぼ完全に抑止できることを実証した。 ・セル電極の酢酸耐性が信頼性向上に重要なこと、インターコネクタがセル表面での酢酸滞留の原因となること、Naに限らずLiやBに起因するセル表面汚染もPIDを誘発すること、セルの反射防止膜に高電界がかかりにくい構造にすることがPID抑止に本質的であることなど、モジュールの劣化メカニズムの探究に留まらず、セルを含めた改善がモジュールの信頼性向上に結び付くとの指針を得ることで、セルモジュールを一体として研究を推進することの重要性を明確化した。これらの指針の妥当性をモジュールメーカーと議論する体制を構築し、意見交換を開始した。科学的根拠に基づく試験法の開発と寿命予測、装置・プロセスの変更が部材の変更よりもメーカーにとって受け入れ易いこと、製造工程のクリーン化の可否、電流-電圧測定よりも高感度なセンサによる酢酸検知を用いたモジュール開発等について議論した。 ・スーパーストレート構造薄膜太陽電池におけるPIDによる透明導電膜剥離もNa蓄積に起因することを見出した。また、薄膜Si太陽電池におけるPID試験時の光照射効果は、結晶Si 	◎	

		太陽電池の場合と異なり、紫外光成分を含まなくともPIDを抑制することを見出した。	
② 各種加速試験法の開発 (産業技術総合研究所)	各種環境に特有な劣化現象に応じた加速試験法の開発し、太陽電池モジュールの性能30年を予測できるとともに、屋外曝露に対して100倍以上の加速係数を実現する。	<ul style="list-style-type: none"> セルを酢酸蒸気に曝露することにより、モジュール化せずとも寿命予測可能な方法を新たに開発し、交流インピーダンス法等で詳細に解析した。その結果、セルと加速試験/屋外曝露モジュールでの劣化挙動は同等で、なおかつセルの酢酸蒸気曝露試験は従来実施されていたモジュールの高温高湿試験に比べ70倍以上、屋外曝露に対して4500倍以上の加速となることを明らかにした。この手法により、セル電極の酢酸耐性を評価可能なことを明確化した。 n型フロントエミッタセルで生じる第一段階のPIDに関しては、電圧によらず屋内試験が屋外曝露に対して約600倍の加速係数を有することを明らかにした。また、屋内外の別ならびに電圧によらず、初期劣化時の飽和値が一定であることを見出した。屋外でのPIDは天候の影響を受け、劣化の影響を評価するには雨天時の測定が重要である一方、晴天時は性能回復が生じ、実際の劣化は加速試験からの予測よりも遅くなることを明らかにした。さらに、これまで屋内試験でのみ観測されていたNa侵入に起因すると考えられる第二段階の劣化モードを屋外試験でも見出した。 p型フロントエミッタ太陽電池のみならず、ヘテロ接合太陽電池においても、湿熱負荷がPIDを加速する傾向を見出した。いずれの場合も湿熱負荷による封止材の体積抵抗低下に起因する。 	◎
③ 国際標準化とワークショップの創設 (産業技術総合研究所)	計4回のワークショップを開催する。日本電機工業会の委員会から国際標準化に向けた提案を推進する。IEA PVPSタスク13の情報を収集し、結果をフィードバックする。また、成果物作成に貢献する。	<ul style="list-style-type: none"> 本NEDO事業を行う他機関と連携し、PVモジュール信頼性国際ワークショップ(SAYURI-PV)を2016年以降、計4回開催した。 セルの酢酸蒸気曝露試験についてはSEMI PV79-0817として標準化が成立した。 SAYURI-PV等の国際連携活動の成果として、計5件のテクニカルレポートと国際規格を提案した(内3件は発行済)。 	○

<p>① キャリア挙動から観るPIDメカニズム（奈良先端科学技術大学院大学）</p>	<p>キャリア挙動がPIDメカニズムに及ぼす影響を明確化</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ p型結晶 Si 太陽電池モジュール、n型結晶 Si 太陽電池モジュールのPIDメカニズムにおいて、太陽電池表面での表面再結合増加、それに伴う実効的キャリア寿命値低下が発生することを明らかにした。本現象を検知するためにマイクロ波光導電率減衰 (μ-PCD) 法を検討し、p型、n型結晶 Si 太陽電池モジュールのPID現象検知を検証した。n型結晶 Si 太陽電池モジュールで、PID加速試験を200時間実施したモジュールに対しても出力特性変化と同様な実効的キャリア寿命値の変化が検知された。 ・ p型結晶 Si 太陽電池に対して、波長 370 nm（半値幅 10 nm）の紫外光（0.83SUN 相当）をPID加速試験中に照射し、PID遅延現象を再現した。PID加速試験した試料に対して μ-PCD 測定した結果、セル特性劣化と良く相関した実効的キャリア寿命値の低下が検知された。また、キャリア減衰曲線には、紫外光照射の有無による特異的な変化が見られなかった。 ・ 紫外光照射有りのPID加速試験において、紫外光の波長を変えた場合の実験を行った。一方、屈折率を1.95~2.2まで変えたSiN_x膜の光導電率を、照射光波長を変化させて測定したところ、屈折率を変えたSiN_x膜のいずれにおいても、バンドギャップ以上の光を照射すると導電率が増加した。これらをもとに、PID現象における紫外光照射による遅延効果のモデルを提案した。 ・ PERCの両面ガラス封止の場合、裏面パッシベーション能力がPID試験により劣化し、裏面側照射特性を大きく低下させるとともに、表面側照射特性も若干の劣化が発生することを確認した。 	<p>○</p>
--	----------------------------------	--	----------

<p>② 屋外計測技術の確立（奈良先端科学技術大学院大学）</p>	<p>屋外計測技術として実用化するための基盤構築</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外計測化に向け、p型結晶Si太陽電池モジュール温度がμ-PCD法による実効的キャリア寿命値計測にどの程度影響を与えるか検討した結果、ほとんど影響を与えないことが判明した。屋外での照度の影響を検討するため、p型結晶Si太陽電池12個によるミニモジュールを用いて80000 lxの状態を実効的キャリア寿命値を計測した結果、電氣的に最端に位置する太陽電池を計測する際は、短絡状態において隣接セルの遮光状態が計測結果に大きく影響を与えることが判明した。また、照度が5000 lxの際でも同様な結果が得られた。この現象は低照度でも発生することが判明し、屋外計測化に向けた基礎的知見が得られた。 ・産業技術総合研究所（鳥栖）屋外サイトにおいてPID現象により特性劣化が発生しているIBC型太陽電池モジュールに対して、μ-PCD測定を実施した。モジュールの電位が高くなるに従ってモジュール特性が低下する傾向と類似した実効的キャリア寿命値の低下が計測された。 ・各種太陽電池の実効的キャリア寿命値の試料温度依存性を測定し、温度上昇による寿命値の増加傾向が太陽電池の種類により変わることが判明した。 	○	
<p>紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析と屋外曝露劣化との相関性検証（デュポン・スペシャルティ・プロダクト）</p>	<p>（達成目標） 加速係数が70倍以上の試験法の開発</p>	<p>封止材の紫外線耐性の違いが発電性能に与える影響を確認し、屋外曝露をより忠実に再現する紫外線照射と湿熱試験を組合せる試験法を提案した。</p>	○	
<p>① 曝露環境の検討（東レ）</p>	<p>（達成目標） 劣化要因となった環境ストレスの定量化</p>	<p>ストレス量を屋外曝露環境下から加速試験下に換算するシミュレーション式を立式し、裏面材が受ける環境ストレス（光照射、湿熱）の定量化手法を確立した。</p>	○	

② 屋外曝露モジュールの分析 (東レ)	(達成目標) 環境ストレスにより劣化した裏面材パラメータの特定	<ul style="list-style-type: none"> ・初期状態および曝露環境がトレーサブルな5.5年曝露モジュールの裏面材を分析し、分子量分布がストレス量の追跡指標として特に適することを見出した。 ・屋外曝露後の分子量分布は光照射試験後の結果と近いことから、屋外曝露で裏面材が受ける主たるストレスは光照射であることが示唆された。 	○	
③ 複合加速試験の開発 (東レ)	(達成目標) 25年の耐久性を判断できる加速試験の開発 (加速係数100倍以上)	<ul style="list-style-type: none"> ・裏面材に対する加速試験について、キセノン光を用いた光照射試験により屋外曝露での劣化状態を再現でき、加速係数は199倍であることを確認した。 ・モジュールに対する加速試験について、メタルハライドランプを用いた高強度光照射とHAST試験により、加速係数100倍以上の加速試験を構築できる見込みを得た。 	◎	
④ 国際標準化への取り組み (東レ)	(達成目標) 得られた知見、成果を基礎とした国際標準化会議等での意見・提案。	本研究開発結果をもとに、IEC/TC82/WG2 会合にて国際規格 IEC61730 等に関し協議を実施。光照射試験条件や採用すべきアルベド値について意見し、規格の適正化に貢献した。	◎	
屋外でのPID実証試験 (石川県工業試験場)	高システム電圧で稼働する太陽電池のI-V特性をまとめ、劣化とPID発生との関係性を導出する。	湿熱と電圧の複合負荷によりPIDの進行が早期化することを見出した。さらに、遮光と電圧の複合負荷によりPID発生が早期化することを見出した。	○	
太陽電池の解析 (石川県工業試験場)	従来の太陽電池と比較してPIDに対する耐性を2倍以上にするための条件を導出する。	有限要素法による直流電磁場解析を実施し、 1) セル表面に透明導電膜を形成するPID対策、 2) 液体ガラスを太陽電池に形成するPID対策について、論理解析により対策の妥当性を明らかにした。	○	
① PIDのメカニズムの解明 (岐阜大学)	多様な構造の太陽電池モジュールに微視的な評価手法を応用し、PID抑止技術の開発にフィードバックする。	<ul style="list-style-type: none"> ・PID加速試験により、セル表面において、電極上に主にNaの析出を確認した。PID加速試験時間が長くなるに従い、Naの析出量が増加した。また析出したNaの多くは窒化膜上表面近傍 (~20 nm) 付近に留まっていることを示した。また、テクスチャー凸部により多くのNaの析出とともに、セル表面の窒化膜の導電性増加を確認した。 ・C-V測定を用いて、キャリア密度分布のPID試験時間、PID回復試験時間依存性を評価した。 	○	

<p>②PID 発生箇所の特 定方法に 関する研 究 開 発 (岐 阜 大 学)</p>	<p>中間評価後は③に統合す る。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ EL、LBIC、I-V 特性から、PID 発生箇所を解析し、新品のセルに疑似的発生箇所を作製し、それらの特性を再現できることを実証した。 ・ 1 セルモジュールに逆バイアスをかけることで、PID 発生箇所のシャント抵抗成分に選択的に電流を流し、PID 発生箇所を汎用のサーモグラフィで容易に特定できることを示した。 ・ 1 セルモジュールに逆バイアスをかけて EL 像を撮影することで、PID 発生箇所を局所的に特定できることを示した。 	○	
<p>③PID の回 復 技 術 と 抑 止 技 術 の 開 発 (岐 阜 大 学)</p>	<p>・ 液体ガラスおよびナトリウム・ゲッターを用いた PID 抑止対策による信頼性向上技術として、産業技術総合研究所が提案する PID 加速試験法において、初期効率からの劣化率を 10%以内に抑える。 ・ 太陽電池モジュールにおける PID の回復時間は 1 時間以内とする。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高出力 LED を用いることで、同温のヒーター加熱に比べ約 6 倍 PID 回復が加速されることを実験的に示した。 ・ 逆バイアスパルス波もしくはのこぎり波電圧印加で、シャント抵抗をほぼ初期値まで回復できることを示した。 ・ 液体ガラスにより作製したガラス膜をカバーガラスに製膜し、PID 発生遅延効果を確認した。 ・ PID 試験、PID 回復試験を繰り返し行い、発電効率を 10%以内に収める条件を検討した。 	○	
<p>① 錫 薄 膜 センサの 計 測 性 能 の 向 上 と 高 機 能 化 (東 京 農 工 大 学)</p>	<p>酢酸発生経路および酢酸濃度分布の時間経過変化を明らかにするため、開発した酢酸センサ基板を直径 5 mm 程度に小型化し、太陽電池モジュール内に 20 個あまり配置し、4000 時間に及ぶ高温高湿試験 (85℃、85%RH) を実施して水分浸入を誘導</p>	<p>センサ面内の錫膜厚均一化のため、蒸着時にガラス基板の固定プレートを回転させる手法を導入した。その結果、膜厚 172 nm に対して標準偏差 2 nm と均一性の良好な膜が得られた。蒸着時の初期反射率バラツキ条件の把握と改善を行い、初期反射率とバラツキをそれぞれ 74.54±1.06%から 83.95±0.38%へ向上させた。また、錫膜厚と相対反射率の検量線を作成し、膜厚 160 nm から 50 nm の範囲においては理論値とよく一致する結果を得た。</p>	○	
<p>② 紫 外 線 照 射 お よ び 高 温 高 湿 環 境 試 験 の 実 施 に よ る 酢 酸 動 態 調 査 (東 京 農 工 大 学)</p>	<p>し、1000ppm の酢酸濃度のモジュール内等分布線が得られる性能を達成する。また、酢酸量を指標として寿命 30 年を予測できる加速試験法の性能指数として屋外曝露に対して加速係数 100 倍以上を達成する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 錫薄膜センサの膜厚 70 nm、160 nm の 2 種類を 1 つのモジュール内で点対称に 20 個配置することにより、高温高湿試験中の酢酸動態を様々な試験時間で計測することが可能となった。実際に紫外光照射と高温高湿試験の複合試験を行い、高温高湿試験のみの場合に比べて劣化が加速される傾向が見られた。また、紫外光照射時に発生する酢酸の分布とその動態が高温高湿試験の場合と異なることが確認された。 ・ 酢酸発生後の経路が残留・反応・流出に分けられることを明確化した。 	○	

<p>③ PV モジュール内の酢酸動態予測のための2次元拡散方程式によるシミュレーション手法の確立（東京農工大学）</p>		<p>汎用物理シミュレーションソフト COMSOL を用いた太陽電池モジュール内の3次元水分拡散・酢酸生成・流出シミュレーションを実施し、バックシートおよび端部からの高温高湿試験中の酢酸の流出挙動を計算機上で再現した。得られたパラメータをもとに、乾燥状態での紫外光照射試験と30%RH条件での紫外光照射試験時の水分動態・酢酸動態を計算機上で再現した。</p>	<p>○</p>
<p>④ 加速係数100以上を達成できる試験方法の提案（東京農工大学）</p>		<p>30%RH条件および乾燥状態での紫外光照射試験と高温高湿試験の複合試験の比較による加速係数の変化を検討した。1500時間まで紫外光照射試験を実施した結果、両者でセンサの反応に明確な違いがあり、30%RH条件では500時間程度の加速効果が得られることを確認した。また、高温高湿試験のみ、30%RH条件および乾燥状態での紫外光照射試験と高温高湿試験の複合試験のいずれにおいても、錫薄膜センサにより、出力低下を2300時間程度早期に予測できることが明らかとなった。</p>	<p>○</p>
<p>n型結晶シリコン太陽電池に以下に抑える条件を明らかにする。電圧誘起劣化機構の明確化（北陸先端科学技術大学院大学）</p>	<p>PIDによるモジュール変換効率の劣化率を30年で20%以下に抑える条件を明らかにする。</p>	<p>リアエミッタ型、フロントエミッタ型、Siヘテロ接合型、裏面電極型の四種の結晶Siセル構造において、PIDの挙動とその機構を明らかにした。また、屋外環境での劣化発現状況を想定した疑似太陽光照射下でのPID試験を実施し、PIDへの光照射の影響を明確化した。以上の知見をもとに、目標の劣化率を達成するための条件を明らかにした。</p>	<p>◎</p>
<p>① 各種太陽電池の発電量評価技術の開発（電力中央研究所、産業技術総合研究所と共同実施）</p>	<p>5つの日射気候区における各種太陽電池の経年劣化を考慮した生涯発電量（25年）を算出する。</p>	<p>6種12型式の結晶シリコン太陽電池の発電性能の経時変化を、実使用条件における屋外測定、及び、標準試験条件における屋内測定に基づいて、年劣化率として算出した。その結果、従来型の結晶シリコン太陽電池の年劣化率は、0.0～0.5%/年と低いのに対し、高効率結晶シリコン太陽電池の年劣化率は、0.1～1.7%/年とやや大きな年劣化率を示す傾向を明らかにした。</p> <p>日本気象協会が計測している、5日射気候区（札幌、鳥栖、つくば、岐阜、沖永良部）の気象データを用いて、日本の代表的な気象条件における、各種結晶シリコン太陽電池の経年劣化を考慮した生涯発電量（30年）を算出した。</p>	<p>◎</p>

② メガソーラーの発電性能の経年劣化を1%程度の精度で算出可能な発電量診断手法の開発 (電力中央研究所)	メガソーラーの発電性能の経年劣化を1%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。	7つのメガソーラーの合計14のパワーコンディショニングシステム(PCS)毎の交流(AC)出力、日射強度、気温、モジュール温度等の複数年の実測データを収集し、それらを解析することにより、メガソーラーの発電性能の年劣化率を誤差1%程度の精度で評価する技術を開発した。	○	
③ IEC/TC82/WG2における発電量定格(IEC61853)の確立 (電力中央研究所)	IEC61853シリーズを国際規格(IS)として成立させる。	IEC61853-3および-4は、2018年8月に成立し、IEC61853-3は無次元の発電量の算出方法が、IEC61853-4は世界の各気象条件のリファレンスとなる代表的な気象データが定義された。日本の代表的な気象データは、“Subtropical coastal”と称される世界の6気候区のうち1気候区を代表するデータとして、IEC61853-4に採用され、csvファイルとして収録されている。	◎	

*1 達成度

◎:数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○:数値目標クリア、△:数値目標未達

【C 太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発】

(産業技術総合研究所、電力中央研究所、東京理科大学、日本気象協会、佐賀大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度 * 1	備考
各種太陽電池の経年劣化調査と発電量推定技術の開発（産業技術総合研究所）	ヘテロ接合系等の新型結晶シリコン系太陽電池アレイならびに薄膜系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、±5%の精度で発電量を推定する技術を開発する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 22 型式の結晶シリコン系・薄膜系太陽電池に対して、最長 9 年間の屋外での発電量データと室内測定データを取得した。室内測定データは、屋外サイトで曝露中の太陽電池モジュールを定期的に取り外し、標準条件での評価により取得した。モジュールの種類毎の劣化傾向を把握することにより、多くの種類の太陽電池において、発電量評価の上で考慮すべき初期劣化は飽和傾向を示し、初期劣化の程度や飽和に要する時間等の諸特性を明確化できた（電力中央研究所と共同）。 ・ 各種太陽電池の推定発電量と実発電量を比較し、ヘテロ接合系や薄膜シリコン系でも±5%以内の精度との最終目標を十分に上回る精度で発電量推定が可能なことを実証した（電力中央研究所と共同）。 ・ 結晶シリコン太陽電池の経年劣化率を、異なる手法においても 0.5%以内の差異で高精度に評価できることを、屋外データと室内データを用いて検証した。劣化の主要因は、ヘテロ接合系では開放電圧の減少、バックコンタクト系では高電位のモジュールにおける電圧誘起劣化であることを見出した。また、PERC では曝露初期に光誘起劣化に起因する大きな出力低下が観測された。これらの新型結晶シリコン太陽電池では初期劣化が比較的大きいものの、曝露開始から 5 年程度以内に飽和傾向にあり、今後急激な劣化が生じない限り、劣化が小さいものの初期効率も低い Al BSF 型結晶シリコン太陽電池の変換効率と逆転することはないことが示唆された（電力中央研究所と共同）。 ・ 薄膜系太陽電池の 5 年間の屋外曝露にともなう劣化挙動、季節変動の要因、プレコンディショニング時や暗所保管時における過渡的出力変化について明確化した（電力中央研究所と共同）。 ・ 各種有機太陽電池の屋外発電性能を評価するとともに、有機薄膜太陽電池において、光照射にともなう出力上昇と、暗所保管による出力低減を観測した。有機薄膜太陽電池の二次劣化内の季節変動は夏季のアニールによる性能回復に起因することを見出した。 	○	

<p>発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価 (東京理科大学)</p>	<p>北杜サイトの発電特性分析から得られた劣化率等の知見を発電量の評価支援を行うツールにおいて利用可能とする。本研究において得られた信頼性・劣化に関する知見を発電電力量の算出方法に取り込むことにより、発電量の評価支援を行うツールを用いた北杜メガソーラーの設置後10年間の発電電力量の推定精度として±10%以内(平均)を実現する。</p>	<p>・屋外曝露モジュール・実運用システムでの劣化現象調査として、山梨県北杜市にて運用されている北杜メガソーラーの発電データを継続的に取得・分析することで、運転開始から10年以上経過したPVシステムにおける様々な発電特性の変化、不具合、劣化の高精度検出を実証するとともに、得られた知見を活かし、発電量の評価支援を行うツールを作成した。 ・開発した発電量の評価支援を行うツールを用いて北杜メガソーラーの設置後10年間の発電電力量を推定し、推定精度として誤差-0.45%(多結晶シリコン10kWシステム)を得たことにより、最終目標を達成した。</p>	<p>○</p>
<p>①5地点における日射スペクトル等の観測(日本気象協会)</p>	<p>観測は2020年2月まで継続する。観測データは⑤で述べるデータベース用のデータとして整備する。観測データの欠測率は10%以下を目標とする。</p>	<p>全国5地点において日射スペクトル等の観測を行った。観測データのモニタリング、日常点検、観測機器の校正等を行うなどデータの品質管理を行うことで、欠測率5%以下の観測データを整備することができた。</p>	<p>○</p>
<p>②日射量データベース整備の迅速化(日本気象協会)</p>	<p>中間目標で達成した成果について、ユーザーへのヒアリング等を実施し、本事業終了後の日射量データベースの更新頻度、公開方法等について決定する。</p>	<p>有識者等に意見を伺うとともに、過去の日射量の経年変動傾向を解析し、日射量データベースの統計期間を2010年～2018年に決定した。また、迅速化の取り組みの一環として、前年の日射量の傾向を日本気象協会のホームページで発表した。</p>	<p>○</p>
<p>③日射量データベースの高密度化(日本気象協会)</p>	<p>中間目標で達成した成果について、地上における日射観測データを用いて検証を行い、日射量推定技術の改良を行う。改良を加えた日射量推定技術を用いて、1kmメッシュ、1年分の日射量データベースとして整備する。</p>	<p>衛星データ(ひまわり8号データ)を利用した日射量推定手法を開発し、2016年～2018年の3年間分の1kmメッシュの日射量データを整備した。</p>	<p>○</p>

④ 日射量データベースの高精度化および日射量データベースの更新 (日本気象協会)	中間目標で達成した成果について、地上における日射観測データを用いて検証を行い、日射量推定モデルの改良を行う。改良を加えた日射量推定モデル等により、気象庁から公開される2018年(平成30年)までの最新データを用いた日射量データベースを構築する。	日照一日射モデル(日照時間から日射量を推定するモデル)の改良を行い、METPV-20データ(代表年時別データ)として整備した。③の衛星推定日射量による高密度な面推定データを統合することで、高精度で高密度な(1 km メッシュの解像度の)MONSOLA-20データ(月平均日積算日射量データ)を整備した。	○
⑤ 日射スペクトルデータベースの構築と全国整備 (日本気象協会)	2018年までの観測データを収録した日射スペクトルデータベースの構築する。また、実測データを基に日射スペクトル推定モデルの改良を行い、気象庁の日射観測地点における2018年までの日射スペクトルデータを整備する。	2018年までの観測データ(各年のデータ、代表年データ)をデータベースとして整備した。整備したデータを用いて、太陽電池の種類ごとにスペクトルミスマッチが発電量評価に与える影響を定量的に検討した。さらに、上記5地点の観測データを学習データとして日射スペクトル推定モデルを開発した。開発した推定モデルを用いて、気象庁が日射量を観測している全国47地点に対して、日射スペクトルの代表年データを整備した。	○
① 屋外曝露メガソーラー測定システムの開発 (佐賀大学)	(2018年度達成目標)最適な測定時間間隔を明らかにし、高速測定システムを完成させる。測定時間間隔は20ms以下とする。	<ul style="list-style-type: none"> ・10 kW システムのメガソーラーにおいてアレイ毎に発電量(電流、電圧)、温度、日射量、風速、風向の高速測定システムを構築し、2016年3月から本格的なデータ取得を開始し、2年10か月にわたって蓄積した。 ・測定間隔は10 ms であり、最終目標である測定間隔20 ms 以内を上回る成果を得た。 ・高速測定システムの測定データを解析し、晴天日では最適な測定時間間隔は20 ms であることを明らかにした。 ・開発項目③の解析ソフトウェアで高速測定データを用いる中で、最適な測定時間間隔を明らかにした。 	○

② 発電量、日射量データの補間アルゴリズムソフトウェアの開発（佐賀大学）	(2018年度達成目標) 補間誤差10%以内を達成し、補間ソフトウェアを完成させる。	<ul style="list-style-type: none"> ・日射量測定値を用いた改良補間アルゴリズムで、晴天日では、補間誤差9.06%となり、誤差10%以内を達成した。 ・天気パターンに応じて補間方法を切り替える補間ソフトウェアを開発した。 ・一日のグラフ全体を補間する実用に近いプログラムを開発した。 	○	
③ 発電量、日射量データの解析ソフトウェアの開発（佐賀大学）	(2018年度達成目標) 発電量、日射量データの解析ソフトウェアを作成し、試験データ・推定データ間の誤差10%以内を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> ・メガソーラー発電所の大規模測定データへのアクセス、可視化、解析ソフトウェアを自力開発した。 ・太陽電池セルの温度を高精度に推定する手法を見出した。 ・晴天日に対し発電量を推定する方法を開発した。この誤差が0.194%となったため、目標値である誤差を大幅に上回る成果を得た。 ・ストリングの積算電力値が、測定間隔の長さによってどの程度の誤差を含むかを、速測定データを用いて解析した。 ・ストリングの動的モデルを考え、高速測定データを用いてパラメータを推定することによりストリングの故障を検出するソフトウェアを試作した。 ・高速測定データから試験データを作成し、試験データ・推定データ間の誤差が1%以内となり、誤差10%以内を達成した。 	○	

* 1 達成度

◎:数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○:数値目標クリア、△:数値目標未達

【D ZEB 適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術開発】

(株式会社カネカ)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
①ZEB 適用を想定した長期信頼性試験の開発	40 年間以上の運転期間にわたる総発電量を推定する評価方法の開発 長期信頼性評価に要する期間は 100 日以内とし、太陽光パネルと	導入者（施主及び施工主）の建築物向けの太陽光発電設備の事業採算性重視の観点から、40 年以上の運転年数を想定した配線接続部の寿命加速評価法を開発した。配線接続ユニットを用いた加速評価方法により、30 年以上の耐久性を評価することができた。耐用年数 30 年以上の設計要件を明らかにした。	○	
②建材寿命を考慮した長期耐久性、長期発電性能評価技術の開発	しての継続利用年数を推定する評価技術の開発	建材寿命を考慮した長期発電性能評価技術として、封止構造の長期耐久性（耐デラミ、外観維持）の観点で、紫外線照射試験と PID 試験のシーケンス試験を行い、電気絶縁性が低下するまでのデラミネーション発生を確認した。紫外線照射による出力低下を試算することが可能となり、40 年にわたる総発電量を試算可能となった。	○	
③低コスト高信頼性太陽電池モジュールの耐久性評価	7 円/kWh を達成するための性能要件と設計要件の明確化 ・40 年の運転期間を想定した出力保証レベルの明確化	新規加速負荷試験（ATC 試験）において、ガラス封止構造は、通常のフィルム封止構造（耐用年数 20 年設計）の 3 倍の耐久性を有することを確認、耐用年数 40 年により、高信頼性技術の適用により発電コストとして、7 円/kWh の低減が見込めた。出力保証レベルとしては、現状年率低下に加えて-10%を見込んだ。	○	
④標準化活動への反映	発電コスト 7 円/kWh を達成するために必要な性能要件と設計要件を、BIPV 標準化委員会へ提案する。	BIPV 国際標準化委員会にて、建築サイズの大面積モジュールを対象にリテストガイドラインに関する提案を行った。「代表サンプル試験」によって実試験体を代用できる試験体仕様と試験方法について提案を行った。	○	

* 1 達成度

◎:数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○:数値目標クリア、△:数値目標未達

【E レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発】
 (日清紡メカトロニクス株式会社、奈良先端科学技術大学院大学)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
日清紡メカトロニクス株式会社 ①発電劣化メカニズムの解明	①経年発電劣化メカニズムの解明 ②PID 発生メカニズムの解明 ③再現性良好な PID 試験条件の決定	①発電劣化は、銀フィンガー電極の「細線薄肉化」により集電抵抗増加に繋がり、発電性能が低下する現象と考察。モジュール内部に「漏れ電流」が流れるとガラス内部の Na が活性化し、フィンガー電極に引き寄せられ、セル上電極が徐々に腐食する。Na イオンの移動に伴いアルカリ性雰囲気になると、EVA 封止材との接着界面は容易に剥離する。②p型は、Na イオンのセル上堆積により、半導体の機能が失われる現象。受光面側プラス電荷の N 型は、Na イオンによるセル表面の分極により、電子の動きが抑えられ、発電性能が低下する現象。③PID 試験において、モジュール内に流れる「漏れ電流」が均一に流れるようにモジュールを水平置きとする試験条件を確立。	◎	
日清紡メカトロニクス株式会社 ②設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発	環境因子に応じた劣化加速係数の算出	ガラスからセルへの Na イオン移動の量と速度が実フィールドでの発電劣化率と相関する。電圧を加えた状態で、温度と湿度を加える試験：PID 試験法は、実フィールド環境を再現する加速試験法とみなせる。試験体に貼るアルミ箔電極への圧力均一化のため、パネルは水平設置とし、再現性良好な試験法を開発した。本試験方法で「漏れ電流」は、電圧は、オーム法則、温度依存性は、アレニウス則にプロットできた。	◎	
日清紡メカトロニクス株式会社 ③30年発電性能の寿命予測技術の確立	①レーザー技術による太陽電池モジュールの寿命を予測する技術を提案 ②30年寿命ラボ加速試験条件で、発電劣化率5%未満を達成	封止材の劣化度指標：ラマン分光/蛍光強度比値と発電劣化率（結晶系/約300パネル）の関係を検討した。その結果蛍光強度比100を超えてから、発電劣化率と相関することが分かった。発電プラントにて、蛍光強度比値と I-V 計測器で測定した Pmax (at 1kW/m ²) との関係から、「寿命予測直線」が得られる。グラフの Y 軸切片は、パネルの初期性能を示す。現プラントでの蛍光強度比増加量/年を求め、その値の20倍、30倍を代入することによって、切片で20、30年後の Pmax を推定できる。この値を除すことにより、25、30年寿命予測できる技術を開発した。	◎	

<p>日清紡メカトロニクス株式会社</p> <p>④次世代高効率モジュールの劣化予防技術の開発</p>	<p>次世代高効率セルを用いたモジュールの25年相当加速試験での発電劣化率5%未満を達成</p>	<p>豊田工大コンソから提供された高効率 p 型セルを用いて、発電劣化予防技術の COC フィルムをガラス/EVA/COC/EVA/セル/EVA/BS の構成で挿入し、54 直モジュールを試作した。本モジュールを用いて、85℃×85%×1000C, 1000H の PID 試験を実施した。発電劣化率は、-0.5%であり、COC 樹脂フィルムをモジュール適用で、高効率セルの発電劣化を予防できる技術を開発した。</p>	<p>◎</p>
<p>奈良先端科学技術大学院大学</p> <p>⑤標準化を目指した寿命予測試験法の検討と劣化メカニズムのモデル化</p>	<p>P 型、N 型、PERC 型 Si 太陽電池におけるモジュール劣化メカニズムモデルを構築・発電素子の寿命評価技術を確立</p>	<p>各種太陽電池モジュールの PID 試験後の劣化箇所・劣化度の評価を EL、TAS、μ-PCD 法等で実施した。PID 試験後、劣化メカニズムから推測された EL 発光強度低下部でのキャリア寿命値減少を TAS 法、μ-PCD 法にて検知し、これら評価から劣化メカニズムのモデル構築を行った。得られた結果から、μ-PCD 法が PID 現象を発現したセルの検知技術として効果的であることが示された。</p>	<p>○</p>
<p>奈良先端科学技術大学院大学</p> <p>⑥寿命予測技術の標準化に向けた規格提案</p>	<p>信頼性・寿命予測技術の開発し、評価試験法の特徴をテーマ全体で明らかにする。また、寿命 30 年間予測する加速試験における標準化案を信頼性・寿命評価技術の開発を行う他の採択者と議論し、規格第一素案を提示する。</p>	<p>産業技術総合研究所鳥栖での屋外曝露モジュールのμ-PCD 法による「その場測定」を実施。本手法のメリット・デメリットの抽出により、現在主に用いられている太陽電池モジュールに適用可能であることが判明。他手法との比較も行い、PID 現象による劣化を感度よく検出できることが明らかとなった。また、種々ある劣化モードのうち、封止材や電極による特性劣化ではない、短期間で劣化挙動を示す“PID 現象による劣化モード”を検知する手法としてμ-PCD 法の適用条件を検討し、適用できるセル構造、モジュール構造、および評価条件や手順が示された。</p>	<p>○</p>

* 1 達成度

◎:数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○:数値目標クリア、△:数値目標未達

A 太陽電池性能高度評価技術の開発（産業技術総合研究所、電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、東京理科大学、立命館大学）

1. 成果詳細

I) 新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発（産総研）

I-1) 新型太陽電池高精度性能評価技術（産総研）

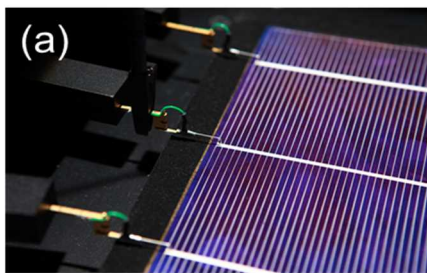
①各種新型太陽電池性能評価技術の開発

本研究開発課題では、測定技術が明確化されておらず、標準化もされていない各種新型太陽電池（新型結晶シリコン、新型薄膜、多接合太陽電池等）の高精度性能評価技術の開発を実施した。開発した評価技術は、各種新開発太陽電池の性能評価測定に適用し、その有用性・実用性を検証するとともに、各国研究試験機関との国際比較測定を実施し、その国際整合性を検証した。また、共通基盤技術として開発した新型太陽電池性能評価技術を基に、試験所等の民間へも広く普及・実施可能な新型太陽電池開発手順を開発・明確化した。

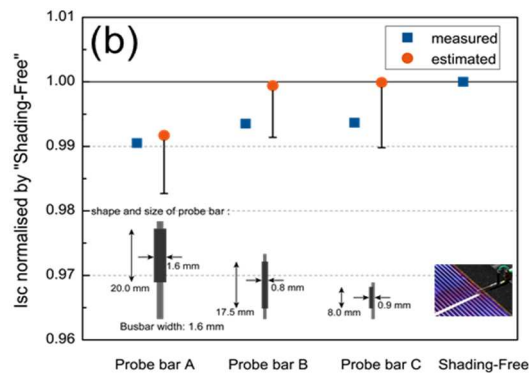
①-1 結晶シリコン太陽電池

近年開発される高効率結晶シリコン太陽電池（以下、c-Si 太陽電池）では、電極構造として多数バスバーや特殊なバスバー形状が採用されてきている。また、ヘテロ接合構造や裏面電極構造等の特殊な性能評価技術が必要となる新構造の開発も進められている。新型 c-Si 太陽電池の開発や生産では、モジュール化前のベアセルでの高精度性能評価技術が必要不可欠である。

このような新型高効率 c-Si ベアセルの高精度性能評価を実施するための測定装置の改良と新測定評価法の開発と実験検証を実施した。多数バスバー構造への対応として、プローブバーを使用する測定装置改良により6本バスバーベアセルの高精度測定まで可能とした。また、プローブバーを使用した測定でのプローブバー影のサンプル照度への影響について、実験とシミュレーション計算を実施し、結果を比較検討した。実験では、各種形状のプローブバーを使用してベアセル短絡電流 (I_{sc}) を測定し、影なしプローブ測定時の I_{sc} 測定値と比較した。一方、シミュレーションとして、プローブバー形状とソーラシミュレータ光角度分布からプローブバー影のサンプル照度への影響をモデル計算した。図III-2-(ホ)-A-I-1-1(a)ベアセル影なし測定の様子（写真）と(b)形状の異なる3種のプローブバーに対する I_{sc} 測定とシミュレーション計算結果を示す。プローブバー設置位置による不確かさ（計算結果にエラーバーとして表示）の範囲で、実験結果とモデル計算結果との良い一致が得られた。プローブバーの幾何学配置を踏まえて、影の影響を計算することで、サブ%精度での照度補正を行うことが可能であることを確認した。



プローバー影なし測定



III-2-(ホ)-A-I-1-1 (a) プローブを使用したベアセル影なし測定の測定配置図（写真）、(b) 各種プローブバー影による I_{sc} への影響の実験(measured)と計算結果(estimated)の比較。影なし測定時の I_{sc} を 1.0（リファレンス）として図示

①-2 ペロブスカイト太陽電池

近年その変換効率が急激に向上しているペロブスカイト太陽電池では、遅い電気応答に起因するとされる掃引速度に依存する顕著なヒステリシス特性を示すなど I-V 特性測定の困難さが指摘されており、高精度にその性能を評価するため技術開発が喫緊の課題となっている。そのため、ペロブスカイト太陽電池の発電性能評価では、定常状態における性能を高精度に評価・比較することが重要と認識されるようになってきている。本プロジェクトでは、定常状態での高精度性能評価測定として、a)「掃引

時間を変えた I-V 特性を測定し、その V_{pm} に電圧を固定し安定な P_{max} を評価する手法」 (V_{pm} 固定測定) と b) 「最大電力点追従法 (MPPT)」 の 2 つの手法を開発し、実験測定により、適用性、妥当性を検証した。

a) $V_{P_{max}}$ 固定測定

ペロブスカイト太陽電池は掃引時間等を変えることで見かけ上様々な I-V 特性を示す。図 III-2-(ホ)-A-I-1-2 のように電圧増加方向 (順方向) 掃引で最大出力 P_{max} を示す場合、電圧減少方向 (逆方向) 掃引で最大出力を示す場合もある。掃引時間を長くして両方向の I-V が一致すれば、その結果を「真」の I-V 特性と定義することができるが、例えば数十分の掃引時間でも一致しない場合には、この方法は現実的ではない。そこで、以前に一部の DSC 測定で提案された印加電圧を $V_{P_{max}}$ に固定して出力電流を計測する方法を、本研究ではペロブスカイト太陽電池の測定に応用した。ペロブスカイト太陽電池ではヒステリシス効果がより複雑であることを考慮し、短絡状態と開放状態の 2 方向から印加電圧を $V_{P_{max}}$ に固定する測定が必要として、次の測定手順を提案した。

A. 広い範囲の掃引時間で I-V 特性を測定 (両方向) し、ヒステリシスの概要を把握

B. 掃引方向の差が顕著な場合は電圧を固定して安定な P_{max} を検証

検証結果に一例を図 III-2-(ホ)-A-I-1-2 (a) (b) に示す。上記 A、B を含む手順を用いることで、ヒステリシスが顕著なペロブスカイト太陽電池においても、その効果を $\pm 1\%$ 以内に抑えて P_{max} を評価できることを検証した。また、民間の試験機関に同手順での依頼測定を実施し、本手順がペロブスカイト太陽電池性能に広く適用可能であることを確認した。なお、特性の経時変化 (劣化) が顕著なサンプルでは、I-V 特性測定や印加電圧固定測定の前後でその特性が変化してしまう場合があるため、経時変化の有無も合わせて測定結果を考察する必要がある。

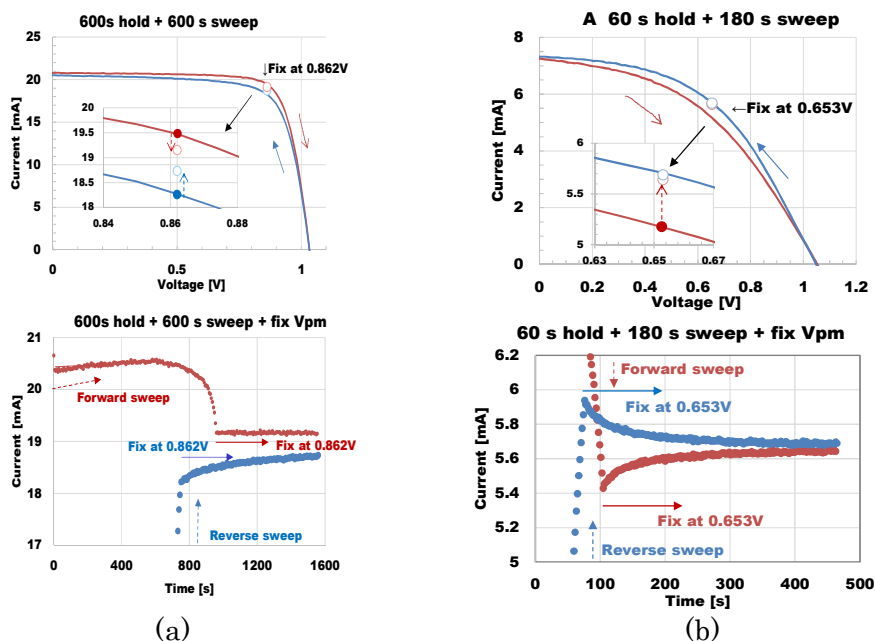


図 III-2-(ホ)-A-I-1-2 (a) (b) 異なる構造のペロブスカイト太陽電池の I-V 特性及び P_{max} を本文記載の手順 A、B で測定した結果の一例。

b) 最大電力点追従制御 (MPPT) 法を用いた性能評価測定

経時変化 (劣化) が顕著なデバイスでは、上記の $V_{P_{max}}$ 固定法を使用した性能評価が難しい場合がある。そこで、サンプルの安定性を評価・担保するための測定手法として最大電力点追従制御 (MPPT) 法によるペロブスカイト太陽電池の性能評価測定手順を検討・開発した。MPPT 測定系は市販計測器を組み合わせ合わせて構築した (制御プログラムは自家開発)。図 III-2-(ホ)-A-I-1-3 (a) に定常照射条件下での MPPT 測定結果 (上図: パワー, 下図: 電流 ($I_{P_{max}}$) と電圧 ($V_{P_{max}}$)) の一例を示す。MPPT 開始直後は出力パワーの変化 (試料の光応答や温度変化によると思われる) が見られるが、数十秒〜5 分程度後には安定している。途中何か所か見られる跳びは、I-V 測定を実施するために MPPT 制御を中断したことによる。MPPT 制御を繰り返してもほぼ同じ出力パワー値を再現している。ペロブスカイト太陽電池の電気応答特性に応じて、MPPT 制御パラメータを適切に設定することで、定常状態での性能 (P_{max}) を再現性よく評価できることを確認した。MPPT 測定により P_{max} の安定性を確認した上で I-V 測定を実施することで高

精度での評価が可能である。また、MPPT 測定時の P_{max} 時間変動からデバイスの不安定性や履歴性も把握でき、得られた I-V 特性の妥当性を判定する材料にもなる。

本プロジェクトでの検証結果を踏まえて、産総研ではペロブスカイト太陽電池の性能評価手順として、MPPT 測定により 5~10 分間定常測定を実施し、それに続けて I-V 測定を実施する測定手順を採用し、測定結果として図 III-2-(ホ)-A-I-1-3(b) に示すような I-V 特性（順・逆両方向）と MPPT 測定での P_{max} 時間変化を併記する形式で報告することを開始した。

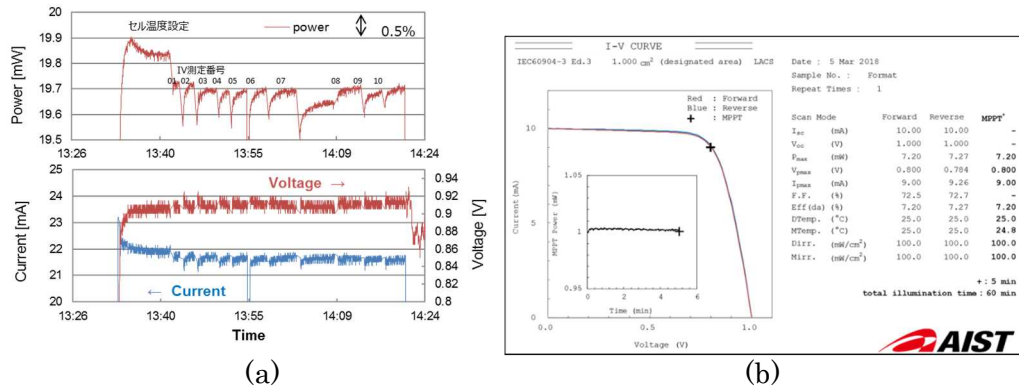


図 III-2-(ホ)-A-I-1-3 (a)MPPT 制御でのペロブスカイト太陽電池の P_{max} 出力の時間変化（上図）とそのときの電流・電圧値（下図）（一例）。(b)ペロブスカイト太陽電池性能評価結果報告書様式（一例）

① - 3 CIGS 系化合物太陽電池

最新の高効率 CIGS 太陽電池で、従来から知られている数時間~数十時間程度以上にわたる光照射効果に加えて、1 秒以内~数十秒程度の中に 1%~数%のヒステリシスの効果が存在することを明らかにした。ペロブスカイト太陽電池に比べてヒステリシス効果は小さいが、高効率化が進むデバイスの性能評価では高精度評価が求められる。そこで、このようなヒステリシスを示す CIGS 太陽電池について、ペロブスカイト太陽電池の性能評価として開発した高精度測定 V_{Pmax} 固定法手順 (A, B) を用いた P_{max} の高精度評価を実施した。図 III-2-(ホ)-A-I-1-4(b)(c) に CIGS 太陽電池の I-V 測定結果を示す。 P_{max} に 0.2%程度のヒステリシスが見られる。この太陽電池について手順 B の V_{Pmax} ホールド測定を実施した（図 III-2-(ホ)-A-I-1-4(a)）。

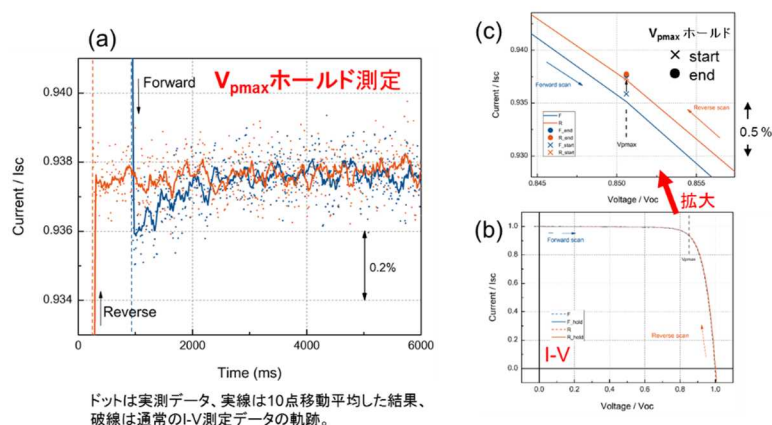
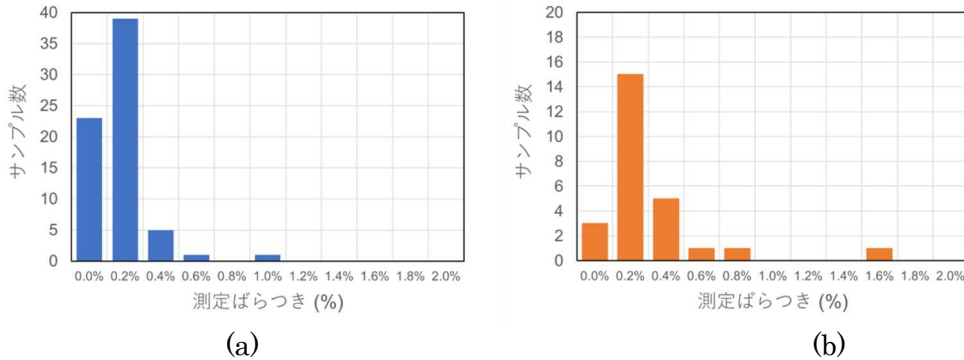


図 III-2-(ホ)-A-I-1-4 (a) V_{Pmax} で電圧ホールドしたときの電流値時間変化（青：短絡側より、赤：開放側より）。(b) CIGS 太陽電池の I-V 特性測定。青が順方向掃引、赤が逆方向掃引。(c) (b) の P_{max} 近傍を拡大。シンボル x, o は、(a) の V_{Pmax} ホールド測定での開始時と終了時の電流値をそれぞれ示す。

バイアス電圧を開放側（逆方向）から V_{Pmax} に変化させた場合、電流はほぼ一定のままで時間変化を示さない。一方、短絡側（順方向）から変化させた場合、電圧ホールド開始から徐々に電流値が上昇し、数秒掛けて逆方向での電流値へと漸近していく。この結果から逆方向掃引の I-V 特性での P_{max} 値がより安定な P_{max} であると判定できる。今回、開発したこの高精度測定手順が CIGS 太陽電池の性能評価でも有効であり、0.5%以内の再現性で P_{max} の判定が可能なる手法であることを検証できた。

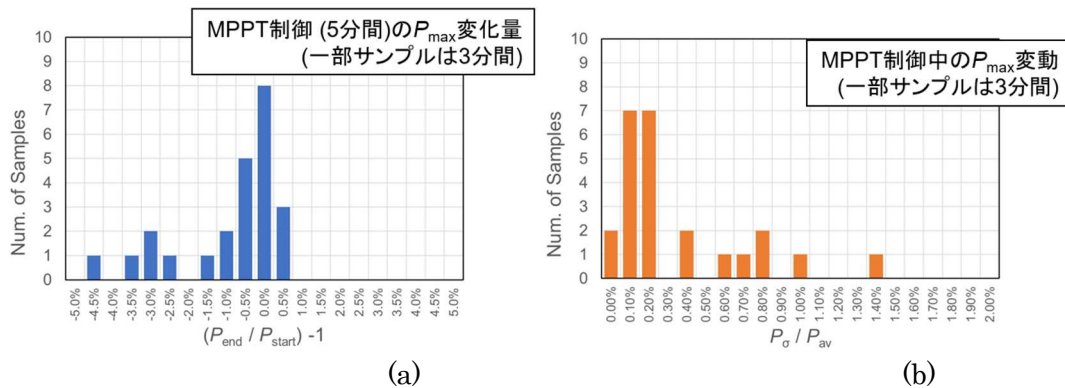
① ー 4 高精度性能評価測定の測定再現性

各種新型太陽電池の高精度性能評価測定の実施結果を解析し、本プロジェクトにおける高精度性能評価測定での測定再現性を評価した。図III-2-(ホ)-A-I-1-5 に(a)新型結晶シリコン太陽電池（ベアセル）、(b)CIGS系太陽電池のPmax測定再現性（繰り返し測定ばらつきも含む）の解析結果を示す。どちらも測定ばらつきは概ね0.4%以下である。ばらつきが1%を超えるサンプル（結晶シリコンで1サンプル、CIGSで1サンプル）では光照射効果による特性変化等、サンプル特性変化に起因するものである。また、(a)におけるばらつき0.6%の結果については、電位差補正（FF補正）を適用することで測定精度が向上（< 0.5%）することを確認した。プローブバーを使用したc-Si太陽電池ベアセルの測定も含め、最終目標とする測定再現性<±0.5%を達成している。



図III-2-(ホ)-A-I-1-5 新型太陽電池の測定再現性（繰り返し測定のばらつきも含む） (a)結晶シリコン系太陽電池（ベアセル）、(b)CIGS系太陽電池

ペロブスカイト太陽電池については、MPPT測定の実施結果（正式報告分24サンプル）について、MPPT中のPmax出力変化から測定再現性を評価した。図III-2-(ホ)-A-I-1-6にMPPT制御5分間（一部は3分間）での初期値からの変化量(a)、その間の変動量(b)を示す。変動量はそれぞれ±1.0%以内、0.5%以下となっている。一部大きな変化量を示すサンプルがあるが、ここで評価する変化量・変動量にはサンプル特性の変化（劣化等）も含まれるため、大きな変動量はサンプルの特性変化によるものと考えられる。直接には性能評価に起因する測定再現性のみの議論はできないが、5分間の変化量が小さいサンプル（安定したサンプル）では変動量も小さいことから、MPPT法によるペロブスカイト太陽電池の測定再現性も、目標とする測定再現性±0.5%以下を達成しているものと見なせる。



図III-2-(ホ)-A-I-1-6 ペロブスカイト太陽電池のMPPT測定結果（正式報告分のみ、セル、モジュール含む）（集計期間：2018 Jan.～2019 Oct.）。(a)MPPT制御5分間（一部3分間）におけるPmax変化量、(b)MPPT制御5分間（一部3分間）におけるPmaxの変動量

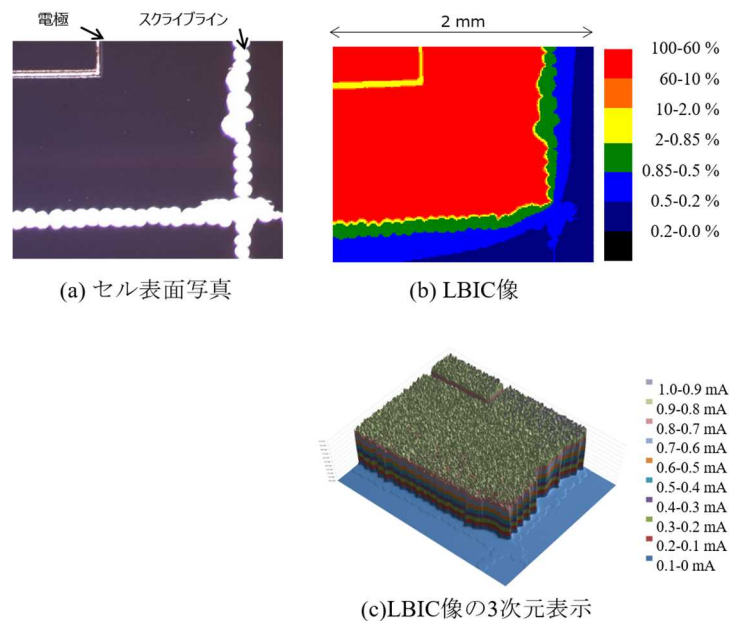
① ー 5 性能評価技術の高精度化に向けて実施したその他の技術開発

① ー 5 ー 1 両面受光型太陽電池の裏面受光の影響の補正技術

両面受光型太陽電池セルを測定する際に問題となる試料ジグ反射光の裏面入射による影響を補正する補正方法について検討した。本研究では両面受光型セルの分光感度測定におけるジグ反射の影響とその補正方法について検討した。また、スペクトルミスマッチへの寄与についても見積もった。

① - 5 - 2 レーザー光誘起光電流測定法 (LBIC) を使用した有効発電面積の評価

太陽電池の有効発電面積を評価するため、レーザー光誘起光電流 (LBIC) 測定系を構築し、薄膜 CIGS 太陽電池や単接合・多接合太陽電池の発電実効面積評価に適用した。図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-7 にスクライブにより素子分離された薄膜 CIGS 太陽電池の LBIC 像を示す (スクライブ線周辺を拡大表示)。検出電流値のコントラストとして発電領域を明瞭に確認することができ、素子分離診断による発電有効面積の確認が可能である。また、Ⅲ-V系多接合太陽電池 (3 接合構造) の各サブセルの発電領域観測にも適用した。被評価サブセルを電流制限セルとするように補助バイアス光照射した条件下で LBIC 測定を実施し、各サブセル発電領域を明確に区別して観測できることを確認した。面積測定の際に本手法を併用することで、光照射領域や発電面積を高精度で測定評価することが可能となった。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-7 CIGS 太陽電池スクライブ線近傍の (a)セル表面写真 (光学)、(b)LBIC 像、(c)LBIC 像の 3 次元表示 (2 mm × 1.6 mm)

① - 5 - 3 基準セルの角度特性と照度調整における基準セル反射補正量の評価

ソーラシミュレータ照度を、基準セル校正値を使用して高精度に調整する場合、基準セル表面反射光のシミュレータ光学系内反射による再入射の影響を考慮する必要がある。本研究ではこの反射量補正の高精度算出方法として、出力光の視野角が小さいソーラシミュレータを使用して、広い角度範囲で反射の影響のない条件での基準セルの角度特性を測定し、その結果と通常のソーラシミュレータ下で測定した角度特性を比較することで、反射による電流増加量 (反射補正量) を評価する手法を開発した。

① - 6 新開発太陽電池の高精度性能評価測定

本プロジェクトで開発した各種新型太陽電池の性能評価技術を、NEDO 開発品等の各種新型太陽電池の高精度性能評価測定に適用し、開発評価技術の有用性・実用性を検証した。表Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-1 にプロジェクト期間に実施した各種新型太陽電池の年度別測定実施数をまとめる。ここでは、単接合、多接合構造の区分けはせず、材料系のみで分類している。また、図示したものを図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-8 に示す。NEDO 開発品等として各年約 50 サンプルの高精度性能評価測定を実施した。測定したサンプルの種別は図に示すように結晶シリコン系~40%、CIS 系~10%、Ⅲ-V系~20%、有機薄膜系~30%の割合となった。太陽電池開発の主流である結晶シリコン系太陽電池の測定の割合が高くなっている。また、本プロジェクト開始時期前後より有機薄膜系太陽電池研究の中心がペロブスカイト太陽電池にシフトしたことを反映し、当プロジェクトでもペロブスカイト太陽電池の測定数、割合とも大きく増加している。

NEDO 開発品等の性能評価測定に加え、プロジェクト共同研究機関の太陽電池測定、各種新型太陽電池性能評価技術開発のための内部測定、国際比較測定等も含めて、各年約 100 サンプルの高精度性能評

価測定を実施した。得られた測定結果を新型太陽電池デバイス研究開発にフィードバックすることで、デバイス開発の進展に貢献してきた。また、当所での性能評価結果をリファレンスとすることで、各開発機関のデバイス性能評価技術の発展にも貢献した。また、世界最高効率となる測定結果は、Progress in Photovoltaics 誌 Efficiency Tables に掲載の推薦を行い、最新情報提供と研究開発の活性化にも貢献した。本プロジェクト実施期間中に、NEDO 開発品から計 16 件（民間 5 社計 12 件、国研 2 機関計 4 件）が世界最高効率として掲載された。

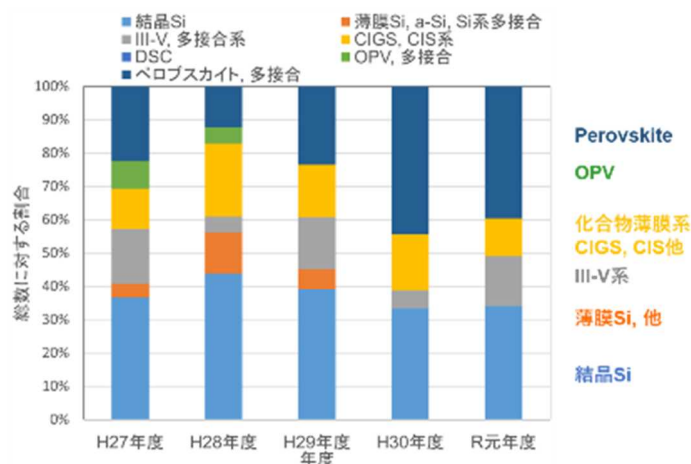


図 III-2-(ホ)-A-I-1-8 新型太陽電池の高精度測定 (割合ベース)

表 III-2-(ホ)-A-I-1-1 新型太陽電池の高精度測定 (年度別測定数)

	H27 FY	H28 FY	H29 FY	H30 FY	H31/R1 FY	計
結晶シリコン系	20	23	23	18	18	102
III-V結晶系	8	2	8	3	8	29
CIS系, CdTe系	6	9	8	9	6	38
OPV系, DSC系	4	2	0	0	0	6
ペロブスカイト系	11	5	12	24	21	73
年合計	49	41	51	54	53	248

①—7 太陽電池性能評価に関する国際比較測定

開発した性能評価技術の国際整合性の検証として、性能評価技術の研究開発の主要機関である NREL (米国)、ESTI (JRC-欧州連合)、FhG-ISE (ドイツ)を含む国内外研究試験機関と国際比較測定実施した。実施した主な国際比較測定を下に記す (括弧内の年は産総研での測定実施年)。

- ・太陽電池モジュール STC 性能評価 (c-Si, CIS, CdTe) (ESTI-JRC, FhG-ISE, NREL, AIST), (2017) .
- ・太陽電池モジュール温度係数 (V_{oc} , I_{sc} , P_{max}) (c-Si, CIS, CdTe) (ESTI, AIST, ISE, NREL) (2018-19) .
- ・多接合セル STC/集光測定 (FhG-ISE) (2018).
- ・両面受光型太陽電池モジュール (c-Si) 出力測定 (ESTI-JRC, FhG-ISE, NREL, AIST を含む 22 機関 (12 カ国)) (2019) .
- ・高効率結晶シリコンセル STC 測定 (ESTI-JRC, AIST, 各国試験機関, 民間企業他 (6 カ国 10 機関)) (2019) .

①—8 新型太陽電池評価手順の開発

開発した高精度測定手順を基に、広く普及・実施可能な汎用性のある測定手順を提案し、民間試験機関への依頼測定を通して、その手順がペロブスカイト太陽電池を含む新型太陽電池の性能評価に広く適用可能であることを検証した。

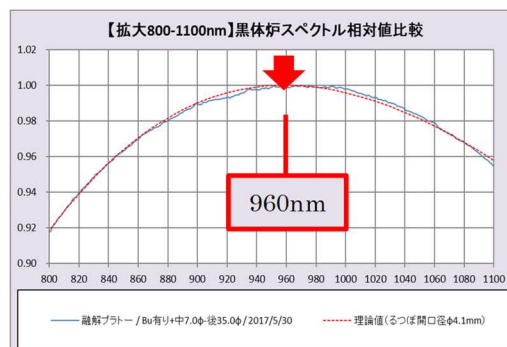
②一次基準太陽電池校正技術の高度化

② - 1 超高温定点黒体炉利用技術

基準太陽電池の一次校正に用いる分光放射照度の上位標準を従来の分光放射照度標準電球から超高温定点黒体炉の輻射へと更新し、不確かさに占める大きな要因の一つであった相対分光放射照度標準の紫外・赤外波長の再現性を抜本的に改善した。まず、輻射を分光放射照度標準として利用するためには、分光放射計によって測定するための温度プラトー（以下、プラトー）の発生時間をできるだけ長時間化し、その発生も複数回あった方が良い。そこで、幾つかの運転パターンを試行して、その輻射を基準光源として利用するための最適運転パターンを確立した。その後、プラトーの発生時間と輻射の再現性を繰り返し測定して、確立した運転パターンにおけるプラトー発生時間と放射照度の安定性の十分な再現性（プラトー時間3分～3分40秒、放射照度±1%程度）を確認できた。次いで、分光放射計と超高温定点黒体炉の間の擾乱光を排除するための着脱式バッフル光学系の装着効果の確認を行った。以上の環境整備のもと、分光放射計で超高温定点黒体炉の輻射を測定し、プランクの式から計算される黒体輻射の理論値の比較を行った。その結果、理論値のピーク波長と計測値のピーク波長に差があることが判った。ここで、融解プラトー時と凝固プラトー時の分光放射照度を比較すると、相対的にピーク波長よりも長い（赤外波長）において差が2%程度あり、絶対値は、凝固プラトー時の方が、融解プラトー時よりも5.5%程度低い。これらのことから、超高温定点黒体炉からの輻射には、坩堝からの直接輻射だけでなく、プラトー時の温度を安定化するために坩堝全面に設置されている放射シールドからの副次的な輻射が含まれていることが想定された。

そこで、二色式熱画像システムを超高温定点黒体炉で校正し、坩堝中心と放射シールドの温度分布を測定した。その結果から、推測した通り放射シールド自体も2000℃以上の温度に達し、副次的な輻射が発生していることが確認できた。

以上を受け、坩堝からの輻射のみを測定するために炉内に挿入するバッフル光学系を設計製作し、実装してスペクトルの確認を行った。結果は図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-9に示す通り、黒体輻射の理論値とほぼ一致するスペクトルを得ることができ、超高温定点黒体炉の輻射を利用する技術が確立できた。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-9 黒体輻射の理論カーブと超高温定点黒体炉に挿入バッフル光学系を実装して測定したスペクトルの一致度

③ - 2 絶対放射照度測定技術

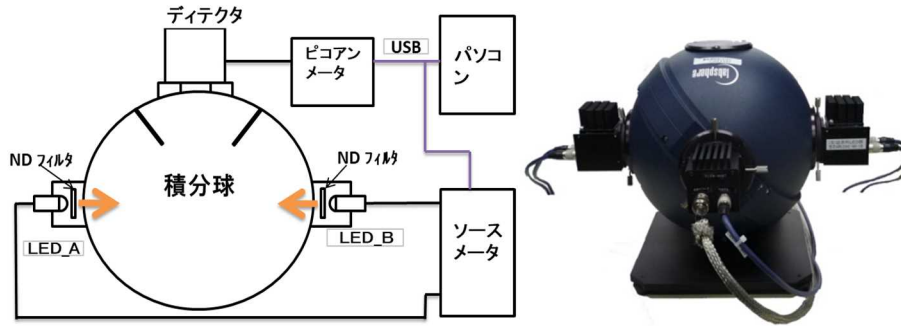
国際競争力を確保するためには、基準太陽電池の校正の不確かさは1%以内であることが必須である。そのためには、ソーラシミュレータの放射照度を校正の不確かさが小さい方法で測定する必要があり、高平行度ソーラシミュレータとWRRファクタの検証されている絶対放射計を組み合わせ、最高校正能力（不確かさ）0.72%を達成している。従来の絶対放射計は自然太陽光用として製造されていることから、内部の光学系の精緻さに欠け、ソーラシミュレータのようなコリメーションされた人工光の測定に用いるには嚴重なアライメントが必要、測定の再現性に欠けるといった問題があった。そこで、世界気象機構（WMO）の主宰による第VII回国際直達日射比較（IPC VII）に参加し、IPC V（2005年）、IPC VI（2010年）にも参加してWRRファクタ（WRRスケールに対する一致度を示す）の安定性を把握しているEppley社AHF絶対放射計と、ソーラシミュレータの放射照度を高精度に校正するために開発した構造精緻型WRR絶対放射計（IRS-02）の2台のWRRファクタを検証し、それぞれの性能の妥当性と技術的課題の抽出を行った。表Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-2にIPCから報告されたWRRファクタを示す。IPC VIIで構造精緻型WRR絶対放射計にWRRファクタが付与されることで、高平行度ソーラシミュレータの放射照度の測定再現性が0.3%以上改善できた。計測のばらつきの低減とキャリブレーションの精度向上が今後の課題である。

表Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-2 WRR ファクタ

	AHF 33396	IRS-02 1504
WRR ファクタ	0.99773254	0.99011899
σ	0.0016723104	0.0037095026

②-3 積分球光源法による分光放射計用各種ディテクタの応答非直線性評価

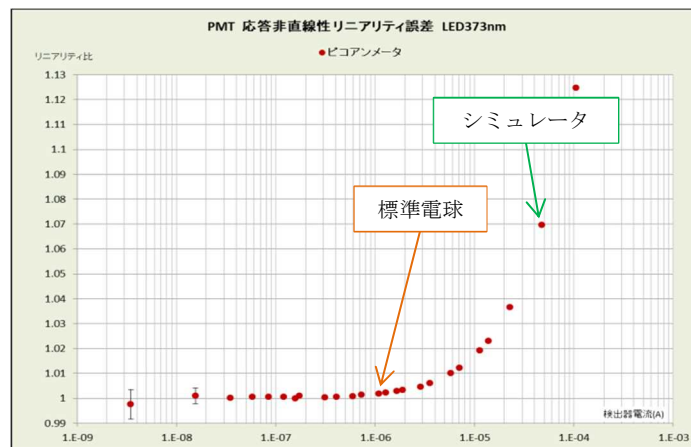
基準太陽電池校正の支配的な不確かさ要因はスペクトルミスマッチ補正係数 (MMF) の不確かさであり, 分光放射照度の不確かさと分光放射計の応答非直線性が大きく影響する。そこで, 分光放射計に搭載する各種ディテクタの応答非直線性を積分球光源法で評価した (図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-10)。



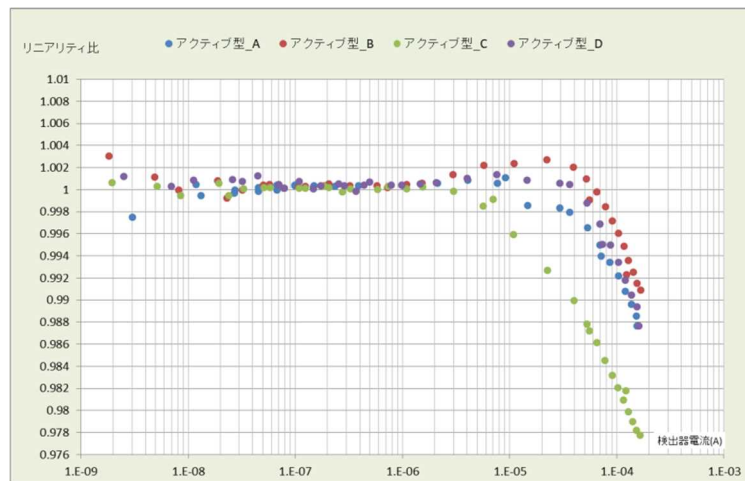
図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-10 積分球光源法を用いた各種ディテクタの測定のブロック図と外観写真

積分球光源法は積分球に LED_A, LED_B の二つ LED 発光を入射し, その光量を制御してディテクタの出力を計測する方法である。リニアリティ比 $r^{(n)}$ とは 重畳法 (重ね合わせ法) を応用した評価指標で, LED_A と LED_B のそれぞれ光出力を等しく設定すると, 両方が ON の場合の光出力は一方が ON の場合の 2 倍になる。LED 電流とディテクタ電流 I の関係比から光強度に対する応答非直線性を求める。この方法を拡張し, 各種ディテクタの受光ピーク波長と発光ピーク波長が近い LED を評価用光源として選定し, 積分球光源法を用いてリニアリティ比の測定を行い, 必要に応じて非直線応答の解消法を開発した。一例として光電子増幅管 (PMT) のリニアリティ比の測定結果を図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-11 のグラフに示す。

電流 10na~1uA の範囲でリニアリティ比は, ほぼ 1 であるが, 電流 1uA 以上ではリニアリティ比は上昇し, 高平行ソーラシミュレータ計測時は, 1.07 (+7%) にまで達する。一方, 電流 10nA 以下で電流が小さくなるにつれて, 標準偏差が増加していく。この応答非直線性は, 250nm~390nm の間に感度を有する太陽電池の過小評価に繋がる。原因は, 光電子増倍管で使用している抵抗型デバイダ回路に由来する。この抵抗型デバイダ回路をアクティブ型に変更することにより, リニアリティを改善できる。そのため, A, B, C, D 4 本の光電子増倍管 (アクティブ型デバイダ回路) のリニアリティ比の測定を行った。図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-12 に試作したアクティブ型 4 本のリニアリティ比の測定結果を示す。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-11 PMT のリニアリティ比 $r^{(n)}$ (LED 中心波長 373nm)



図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-12 PMT アクティブ型 A, B, C, D のリニアリティ比 $r^{(n)}$ (LED 中心波長 373nm)

リニアリティ比測定の結果，1uA～50uA の範囲内で個体差が大きく，D がリニアリティ比 1 に近い結果となった。PMT アクティブ型デバイダ回路は性能の個体差が大きいこと，最適なデバイス は D であることが把握できた。D の選択により，250nm～390nm のリニアリティ比を 1.03 (+3%) まで抑制でき，実機でも応答非直線性の解消を確認した。以上の不確かさの低減を行い評価した結果，分光放射計の駆動領域におけるディテクタの応答非直線性（リニアリティ比）が把握され，それらの適合性が確認された。

② - 4 国際比較校正による国際的一致度の確認と国際整合化の推進

基準太陽電池校正技術高度化で開発した成果に基づいた最高校正能力の妥当性を検証する目的で，NREL, PTB との比較校正を実施した。図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-13 に結果を示す。参加者の校正値と AIST による参照値との差をポイントで示し，そのポイントから上下に伸ばした縦棒は，拡張不確かさの上限と下限を示している。次に，主要生産国である中国と台湾で ISO/IEC 17025 認定を取得している校正機関との比較を一斉配布方式で実施した。一例として福建省計量科学研究所との比較結果を図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-1-14 に示す。結果の評価は，ISO/IEC 17043:2010 に記載された統計手法のうち，次式で示す En 数により行った。校正の能力は， En 数の絶対値 ($|En|$) が 1 を超えない場合に「満足」と判定される。

$$En = \frac{X_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}$$

ここに， X_{lab} ：参加者による校正値

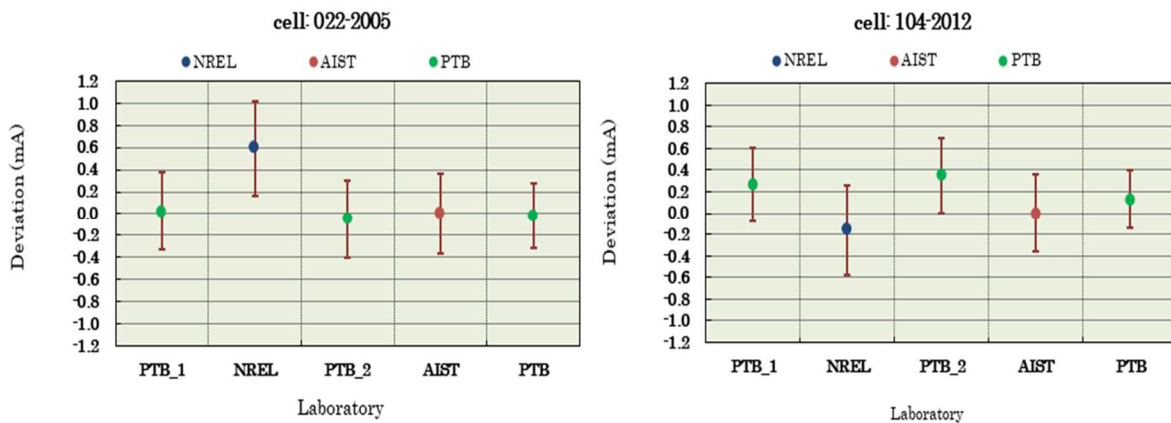
X_{ref} ：AIST による参照値

U_{lab} ：参加者の校正値の拡張不確かさ（信頼の水準約 95%）

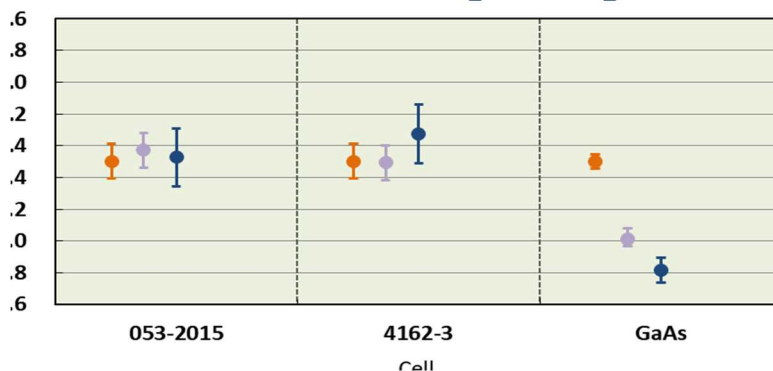
U_{ref} ：AIST による参照値の拡張不確かさ（信頼の水準約 95%）

WPVS 根幹ラボ間では $|En| \leq 1$ (≤ 0.5) となり，極めて満足な一致度を示した。

これに対し，アジアの校正機関では，結晶シリコン系の基準太陽電池では $|En| \leq 1$ となり満足なレベルにあるが，疑似セルや GaAs といった短波長域に感度を持つ基準太陽電池では，台湾中央大学を除き $|En| > 1$ となり，不満足なレベルにある。この結果は参加者にフィードバックされ，原因解明と是正措置が行われている。このような取り組みを継続的に行うことで，国際整合化を推進することは，非常に重要である。



図III-2-(ホ)-A-I-13 WPVS根幹ラボ間での比較校正 (上図 器物022-2005, 下図 器物104-2012)



図III-2-(ホ)-A-I-14 福建省計量科学院 (中国) との比較結果

I-2) 屋外性能高度評価技術の開発 (屋外高精度評価技術の開発) (産総研)

PV モジュール日射センサ (PVMS: PV Module Irradiance Sensor) と高速 I-V 測定等の技術を用いて開発した高精度屋外評価の精度を、複数メーカーの結晶シリコン太陽電池モジュールを用いて検証し、様々なモジュール型式、季節においても再現性良く高精度な性能評価が可能であることが確認できた。

①屋外性能評価技術の高精度化

0.2 秒程度の高速 I-V 特性測定、PVMS による日射計測、高精度モジュール温度測定等の技術を用いることにより、屋外で PV モジュールが実際に稼働する幅広い日射強度・温度範囲で高精度な屋外性能評価が基本的に可能であることを 2016 年の研究開発で明らかにした。更にその成果を基に、晴天日だけでなく晴時々曇、曇時々晴等、日本の天候で頻繁に現れる各種気象条件において、太陽電池モジュールの高精度測定を実施し、測定精度を検証した。2016 年 3 月～8 月の約 6 ヶ月間に亘る約 200 万以上の I-V 測定データから、照度が $1.0 \pm 0.01 \text{ kW/m}^2$ 、モジュール温度が $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲にある約 1,000 の I-V 特性における最大出力 P_{max} の標準偏差は 0.39%、屋内高精度測定との平均差は 0.31%と、非常に良い再現性と精度が得られた。 P_{max} 以外のパラメータ (短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、曲線因子 FF) についても同等以上の再現性が得られ、本研究の測定手法、すなわち 0.2 秒程度の高速 I-V 測定、PVMS による日射計測、高精度モジュール温度測定により、1%以内の屋外性能測定再現性が基本的に実現可能であることが検証できた。太陽電池モジュールの種類や季節に関わらず高精度な屋外測定が可能であることを示すとともに、残る小さな誤差には PVMS と MUT の照度差に加えて、モジュールの構造 (カバーガラスやセルの表面処理、線形性、分光感度、熱的特性等) が関係していると思われる。

④ 新温度補正式と新 STC 補正技術の開発

太陽電池の稼働時には動作温度が 60°C を超えることもあり、STC とは 40°C 程度の差がある。従って屋外測定結果から STC における性能を推定するには、電流電圧特性 (I-V 特性) の温度補正技術が非常に重要である。現行の国際規格 IEC60891 の Procedure1 や Procedure2 等、従来の温度補正式は温度係数 β 、 κ 等の情報が事前に必要であり、情報が無いと補正を行うことができなかった。一方で決定には多くの事前測定が必要であり、かつパラメータがモジュール型式や温度照度範囲によって実際は変化するため、実際の屋外測定結果から STC における特性を導出するには実用的ではなかった。これらの間

題を解決するために、本研究では太陽電池の I-V 特性の理論式に整合して、多くの太陽電池モジュールに共通して使用できる温度補正式（式Ⅲ-2-(ホ)-A-I-2-1）を開発した。

$$V_2 = V_1 + (T_2 - T_1) \times \frac{1}{T_1} \left(V_1 - \frac{N_c n E_g}{q} \right). \quad (\text{式Ⅲ-2-(ホ)-A-I-2-1})$$

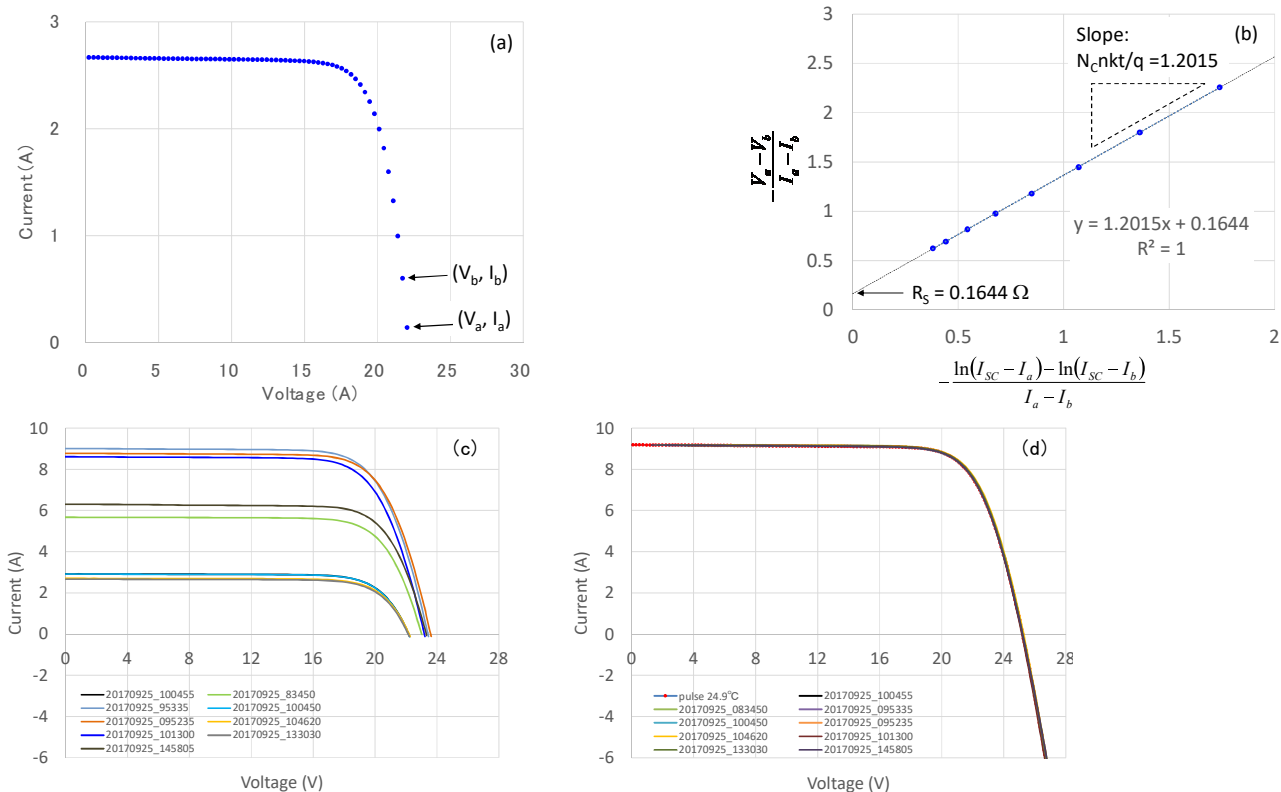
これらの本研究で開発した温度補正式の従来の温度係数補正式に対する特長は、温度係数の出力電圧依存を考慮して定式化していることであり、これによって様々な結晶シリコンモジュール型式と電圧範囲における正確な温度補正が可能となる。ここで V_1 、 V_2 は補正前後の電圧、 T_1 、 T_2 は補正前後のモジュール絶対温度、 N_c はモジュール中のセル直列数である。 nE_g/q は変数だが、 $nE_g/q = 1.232 \text{ V}$ で多くの結晶シリコン太陽電池モジュールに適用できることが確認できる。全く同じ数式を多くの型式の結晶シリコンモジュールに適用できるので、モジュール特性に関する事前の情報が少ない屋外測定では特に有用である。この数式を屋外測定 I-V 特性に適用して、全データを 25°C の特性に換算した結果、照度と 25°C における P_{\max} の関係を、約 $300 \text{ W/m}^2 \sim 1000 \text{ W/m}^2$ と広い照度範囲で、ほぼ 1 対 1 で再現性良く導出することができた。これに加えて共同研究機関の宮崎大学において、風や熱伝導による測定誤差を低減してモジュール内のセル実温度を正確簡便に計測する手法が開発された。

上記の新温度補正式に加えて更に新照度補正技術を開発して総合することにより、屋外 I-V 特性測定に有効に適用できる STC 補正技術を開発した。STC 補正は、屋外の様々な照度・温度における I-V 特性から STC (AM1.5G , 1 kW/m^2 , 25°C) での特性を推定する技術であり、従来も多くの I-V テスタにその機能が搭載されている。I-V 特性の照度温度補正法は従来から各種提案されており、IEC や JIS にも記載されているが、前項でも述べたように適用範囲や精度が不十分な場合もあり、屋外 I-V 特性の補正に使用することは実用的ではなかった。一例として、結晶シリコン太陽電池の照度特性は直列抵抗 R_s に大きく影響されるが、現行規格の手順 1, 2 等に記載された従来の R_s 導出法では、事前に多数の I-V 特性測定が必要であり、屋外測定に使用するのは適していなかった。本研究では、太陽電池の I-V 特性の理論式に整合した新しい R_s 導出法を考案し、それに基づいて 1 本の屋外実測 I-V 特性だけを基に簡便かつ高精度に STC における特性を推定できる、新しい STC 補正法を開発した。現在 IEC での国際標準化に提案しており、採用に向けて審議が行われている。以下に概要を示す。

I-V 特性が 1 ダイオードモデルで記述でき、シャント抵抗が無視できる場合、式Ⅲ-2-(ホ)-A-I-2-2 が成立する。ただし N_c はモジュールのセル直列数、 q は電子の電荷、 k はボルツマン定数、 T はモジュール温度、 E_g は発電層のバンドギャップである。

$$\frac{V_a - V_b}{I_a - I_b} = -\frac{N_c n k T}{q} \times \frac{\ln(I_{sc} - I_a) - \ln(I_{sc} - I_b)}{I_a - I_b} + R_s \quad (\text{式Ⅲ-2-(ホ)-A-I-2-2})$$

図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-2-1 (a) に示す I-V 特性上の 2 点 (V_a , I_a) (V_b , I_b) を様々に選び、 $-\{\ln(I_{sc} - I_a) - \ln(I_{sc} - I_b)\} / (I_a - I_b)$ と $-(V_a - V_b) / (I_a - I_b)$ をプロットすると、その切片から直列抵抗 R_s を (b) のように求めることができる。導出した R_s を用いて現行の IEC と同様に照度補正を行い、前項の温度補正式Ⅲ-2-(ホ)-A-I-2-1 で温度補正を行うことによって、I-V 特性を、STC を含めた任意の照度温度に補正することができる。屋外の様々な照度・温度の下で測定した太陽電池モジュールの I-V 特性の一例を図 I-2-1 (c) に、上記の STC 補正を行って推定した STC における I-V 特性と、別途屋内で測定した STC における I-V 特性を (d) に示す。STC 補正後の I-V 特性は I_{sc} , V_{oc} , P_{\max} , FF 共に $\pm 0.5\%$ 程度と非常に良く一致し、上記の手順で高精度な STC 補正を可能とすることができた。この補正によって屋外高精度測定技術の実用性をより高めることができた。



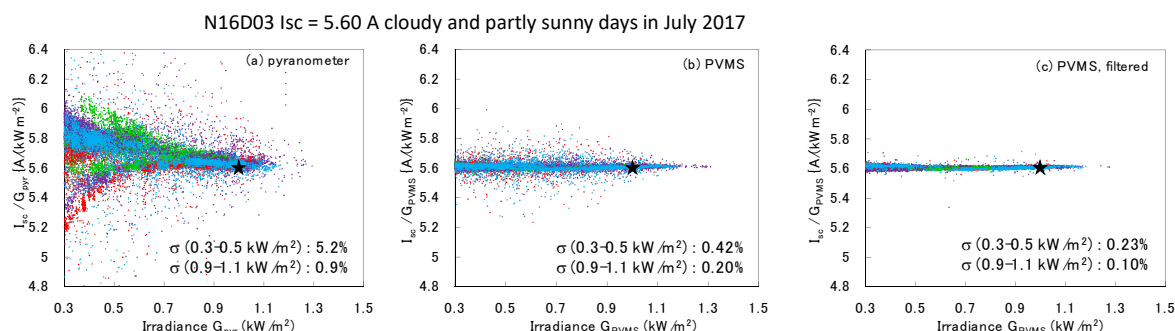
図III-2-(ホ)-A-I-2-1 (a)太陽電池 I-V 特性の一例。(b) 式III-2-(ホ)-A-I-2-2 を用いた R_s 導出。(c)屋外 I-V 特性の一例。(d) (c)の I-V 特性を STC に補正した結果。

⑤ 開発成果の総合と再現性評価

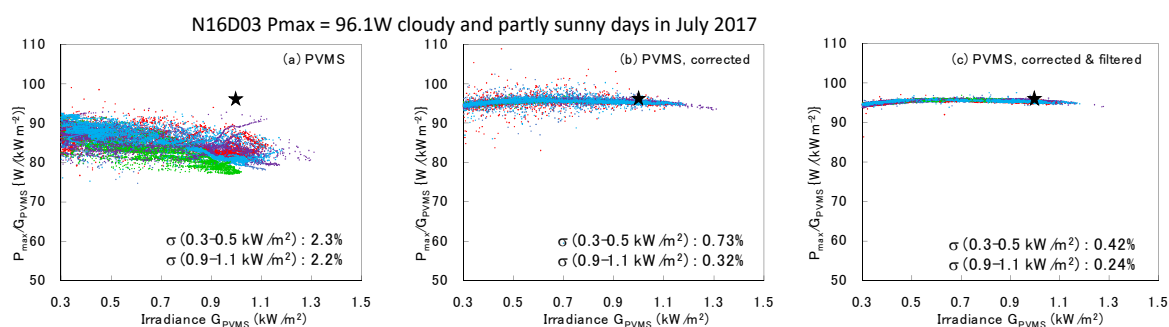
上記の成果を総合して、本研究による太陽電池屋外性能評価全体の再現性を、日本を含めた温帯の気象に典型的な曇り、及び晴れ時々曇りの日のように、日射変動が激しい天候下における測定データを用いて検討した。従来技術の日射計 (pyranometer) は太陽電池に比べて応答速度、角度特性、スペクトル特性の差が大きいため、日射変動が顕著な日や低照度時には、図III-2-(ホ)-A-I-2-2 に示すように I_{sc}/G の値が標準偏差 (図中 STD と標記) で STC における I_{sc} の 5% 程度、外れ値を含めると $\pm 10\%$ 程度と非常に大きな誤差が生じていた。ここで G は計測した照度 (kW/m^2) である。本研究の成果を用いて I-V 特性計測時に PVMS で日射計測することによって、(b) のように標準偏差が 0.2%~0.4% 程度へと大幅に改善できた。ただし (b) でもデータに他と大きく異なる外れ値が散見される。このような外れ値が発生する主な原因は、雲の影が MUT や PVMS 付近を過ぎる際に発生する日射の空間むらであると推定される。オンサイト測定では計測回数を抑えるために外れ値の数を低減することが望ましいので、外れ値データが出やすい計測条件を事前に除外するためのフィルタ技術を検討した。(b) のデータのうち、5 秒間の日射変動が 0.3% 以内のデータを抽出すると、(c) に示すように外れ値がほぼ無くなり、標準偏差を 0.1%~0.2% にまで低減して高い再現性を得ることができた。(c) に示した再現性向上は、共同研究機関の岐阜大学と共に開発した内容の産総研実施分である。測定時の日射の時間変動をある数値以内に制限することによって、測定時の空間むらが大きなデータを削除することができ、結果として測定誤差が低減されたことによるものと考えられる。

上述の図III-2-(ホ)-A-I-2-2 は I_{sc} の再現性改善に関する成果であったが、更に性能評価で最も重要な P_{max} についても、図III-2-(ホ)-A-I-2-3 に示すように顕著な再現性の改善を確認することができた。ここでは PVMS で照度を計測した場合だけを示す。 P_{max} は照度と温度の両方に大きく影響されるので、PVMS で照度を計測しても P_{max}/G の再現性は図III-2-(ホ)-A-I-2-3(a) に示すように 2% 程度と比較的ばらつきが大きい。 (b) に示すように式III-2-(ホ)-A-I-2-1 の温度補正によって更に大幅に改善し、標準偏差 0.32%~0.72% と、目標とする 1% 以内の再現性を得ることができた。更に上記の日射変動に関するフィルタ条件 (5 秒間の日射変動が 0.3% 以内のデータを抽出) を適用することによって外れ値をあらかじめ除外することができ、(c) に示すように 0.24%~0.41% と、0.3~1.1 kW/m^2 の広い照度範囲で $\pm 1\%$ (1σ) 以内の再現性を安定して得られることができ、開発目標を達成することができた。更に I_{sc} と P_{max} の絶対値も図中★印で示す屋内高精度測定の結果と $\pm 1\%$ 以内の良好な一致を本研究の屋外

測定で得ることができた。図には示さないが、 V_{oc} と FF についても同様の高精度を達成できることを確認した。



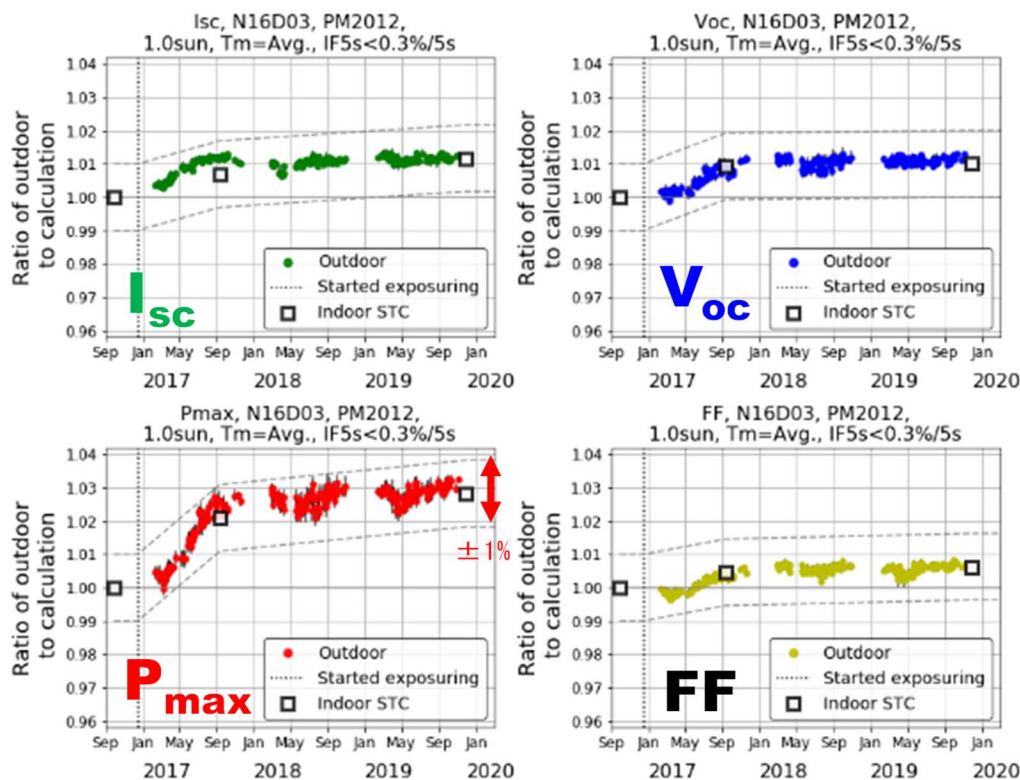
図III-2-(ホ)-A-I-2-2(a) 図III-2-(ホ)-A-II-10に対応する I_{sc}/G 。 I_{sc} は短絡電流(A)， G_{pyr} ， G_{PVMS} は日射計及びPVMSによる照度(kW/m^2)。 (b)同じく G を本研究におけるPVMSで計測した結果。 (c) (b)のうち5秒間の日射変動が0.3%超のデータを削除した結果。 図中★印はSTCにおける屋内測定結果。 温度補正済。



図III-2-(ホ)-A-I-2-3 (a) 図III-2-(ホ)-A-I-2-2の測定日に対応する P_{max}/G 。 P_{max} は最大出力(W)， G は照度(kW/m^2)。 (b)は(a)に式III-2-(ホ)-A-I-1-1の温度補正を施した結果。 (c)は(b)のうち5秒間の日射変動が0.3%超のデータを削除した結果。 図中★印はSTCにおける屋内測定結果。

⑥ 性能評価の長期再現性と薄膜モジュール等への適用性

更に長期の再現性を検討するために、約3年間の長期屋外測定結果を実施した。図III-2-(ホ)-A-I-2-2、-3とは別の結晶シリコンモジュールを用いて行い、屋内測定結果との比較を行った結果を図III-2-(ホ)-A-I-2-4に示す。図の縦軸は各パラメータの屋内測定値との比であり、屋内測定値は初期の屋内測定結果を基に線形補間法を用いて計算した。更に一回/年程度架台からモジュールを外して屋内再測定を行った。結果として I_{sc} 、 V_{oc} 、 P_{max} 、 FF 共にモジュール特性そのものの経年変化はあったが、屋外測定結果は屋内測定値から±1%の範囲(図中破線)に入っており、長期再現性を確認することができた。図には示さないが、同様に市販のCIGS薄膜太陽電池及びシリコンヘテロ接合太陽電池モジュールについても約一年間の屋外測定結果の再現性と屋内測定値との一致が±1%以内であることを検証することができた。CIGS太陽電池モジュールでは、屋外計測開始直後に FF と P_{max} が光照射効果によって8%程度上昇した後に緩やかに低下傾向がみられたが、架台の制限で通常とは異なる横長設置としたため2019年初頭の積雪時にホットスポットが発生した可能性があり、モジュール本来の経年変化とは異なると思われるが、それを含めて屋内測定値と一致した。シリコンヘテロ接合太陽電池については容量成分が大きく、容量効果によるI-V特性測定誤差が生じることが知られているので、2018年5月～9月にI-V特性測定時間を変更する実験を行った。結果として測定時間を0.5sとすることにより安定して高い再現性で測定できることが明らかになった。測定時間が0.2sに比べて日射変動の影響がやや大きくなるが、先にのべた日射変動フィルタを施すことにより、同程度の再現性を得ることができた。



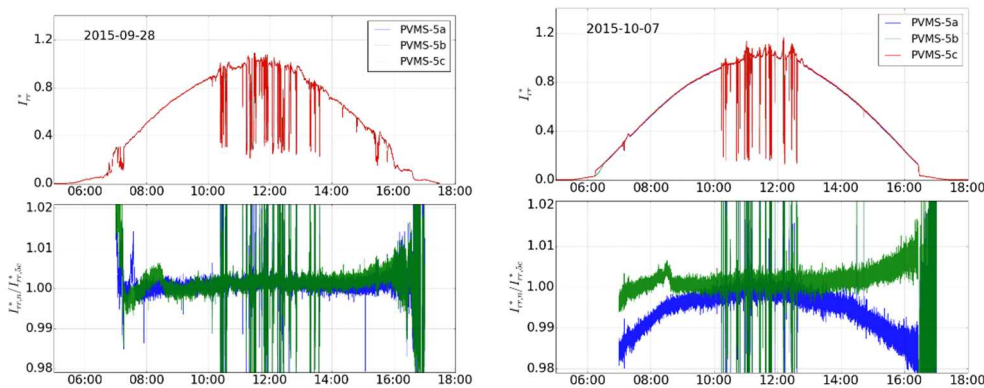
図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-2-4 長期（約3年間）の市販結晶シリコン太陽電池モジュール屋外性能測定結果。縦軸は I_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF 屋外計測値の測定開始前屋内測定値との比率。□印は屋内測定結果。

PVMS で日射計測して結晶シリコン太陽電池の I-V 特性を計測する場合、スペクトルミスマッチに起因する誤差は 0.5%程度以内と見積もられる。CIGS 太陽電池の発電部の材料は結晶シリコン太陽電池とは異なるが、文光感度波長域が 300~1200nm 程度と結晶シリコンと同じであるため、結晶シリコン太陽電池と同一の PVMS と屋外計測手順を用いることができた。CdTe, 色素増感, ペロブスカイト等の結晶シリコンと分光感度波長域が大きく異なる太陽電池の屋外測定では、スペクトルミスマッチ補正が必要となる。屋外高精度測定におけるスペクトルミスマッチ補正については共同研究機関の立命館大学が別途開発を行った。更に O&M への展開に重要な、モジュールを複数直列接続したシステムの評価への展開技術については共同研究機関の東京理科大学が開発を行った。

⑦ 屋外高精度性能評価用 PV 日射センサ構造

本研究では PVMS の角度特性を MUT とできるだけ同等とするために、PVMS として中心の受光太陽電池セルの周りにダミーセルを配置した構造を採用した。実用的には様々な形状サイズの PVMS を使用する可能性があり、PVMS の構造が角度特性等に及ぼす影響を検証することが重要である。その基本的な検討として、PVMS の受光セル周囲にマスクを施し、受光部の周りの余剰面積が出力電流値にどのような影響を与えるのか屋内でソーラシミュレータを光源に用いた実験を行って検討した。その結果入射角 0 度（垂直入射）では余剰開口部の大きさにほぼ比例して、余剰取得電流が増加している一方、入射角 45 度では、余剰開口部がわずかに増えるだけで、余剰取得電流が大幅に増加していることが明らかになった。この状況は MUT と PVMS の双方に起こるので、PVMS の受光太陽電池セルの周りに余剰面積が無いと、斜め入射の光に対して照度測定誤差が発生すると思われる。実際の日射測定精度への影響を明らかにするために、PVMS の受光セルの周りにマスク設置した場合としない場合の屋外での一日の計測値を比較検討した結果を図Ⅲ-2-(ホ)-A-I-2-5 に示す。マスクを設置しない場合には午前 8 時~午後 4 時の間で PVMS 間の比率は 1 ± 0.003 程度で一定であるのに対し、マスクを設置した場合には同じ時間帯で 1 ± 0.01 前後の差が見られた。結果として高精度な屋外測定のためには PVMS の受光太陽電池セルの周りに MUT と同等の余剰面積、つまりセルの無い余白部分が必要であることが確認できた。余白部分が PVMS と MUT で異なると今回の条件では 1%~2%程度の日射計測誤差を引き起こすと思われる。計測時刻を入射角の比較的小さな正午前後とすれば誤差を低減できるが、入射角の大きい冬季や曇天時での計測では、余白が無いと誤差が更に増大する恐れがある。

サイズ、形状の異なる複数の PVMS を用いて、屋外追尾装置を使った測定を行った結果、快晴日では計測セルの周りにフルサイズのダミーセルを配置した A 型と比較して、半分幅のダミーセルを配置した B 型（図中赤線）、ダミーセル無で余白のみの C 型（図中青線、緑線、紫線）共に、その差はほぼ終日 $\pm 1\%$ 以内であった。日射変動の激しい曇天日の結果では、快晴日に比べてばらつきが大きく、 $\pm 1.5\% \sim 2\%$ 程度であった。ばらつきは照度の大小や照度変動の大小に相関が見られ、照度の大小との相関は、低照度で散乱日射が比較的大きいことによる角度特性の差、照度変動との相関は上に述べた日射の場所むらがそれぞれ関係すると思われる。快晴日と同じく A, B, C で系統的な差はみられなかった。以上の結果は、本研究で用いたものを含め様々な構造の PVMS が屋外高精度測定に使用し得ることを示している。



図III-2-(ホ)-A-I-2-5 (左) 3台の PVMS (いずれもマスク設置なし) による日射計測とその比。(右) マスク有、無の PVMS による日射計測とその比。

II) 太陽電池温度の高精度測定技術開発 (宮崎大)

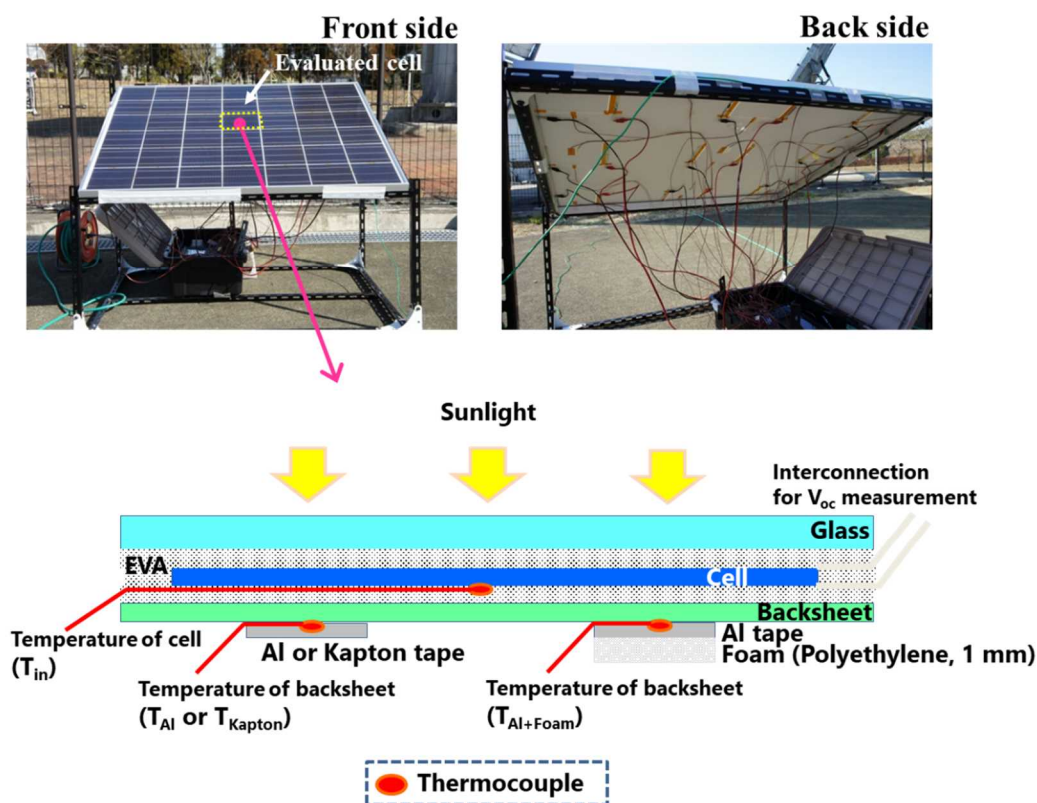
屋外における太陽電池の実性能を高精度に評価するためには、高精度に太陽電池温度を計測する必要がある。太陽電池モジュールの発電性能を決めるのはモジュール内部のセルの性能であるため、セル温度を高精度に測定することが必要となる。封止材やバックシートの熱抵抗を考慮した熱流束計算により、簡便に得ることのできるバックシート温度からモジュール内部のセル温度を精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の高精度で導出することに成功した。さらに、本手法は季節や天候によらず高精度にセル温度を導出できることを確認した。屋外では常に有風であり、モジュールやシステム面内に温度分布が常時生じている。代表温度 (モジュールやシステム内の平均温度) を計測するための温度計測位置について、実測値をもとに検証した。その結果、モジュールやシステムの中央位置における温度は屋外環境において常に平均温度に最も近い値となることが定量的に明らかとなった。モジュールやシステムの中央位置におけるバックシート温度を計測することにより太陽電池温度を簡便かつ高精度に導出することが可能となり、屋外における太陽電池モジュールおよびシステムの高精度温度測定技術が開発された。

(1) 太陽電池モジュール温度の高精度測定

太陽電池モジュールの変換効率は温度に強く影響を受ける (約 $-0.4\%/^\circ\text{C}$)。そのため、太陽電池モジュール出力の高精度評価のためには、温度を高精度で測定することが必須となる。太陽電池モジュールの温度特性を主に決定するのは太陽電池セルの温度特性であるため、モジュールバックシートの温度ではなく、モジュール内部のセル温度を高精度に計測する必要がある。室内計測ではモジュールを恒温室に入れて温度特性を評価するため、モジュールバックシートとセル温度はほぼ等しいが、非常に高コストな評価となる。これまでに用いられている太陽電池モジュールの温度測定手法としては下記が挙げられる。

- 開放電圧 V_{oc} から温度を予測する手法 (IEC 60904-5:1993) : V_{oc} の温度特性が明らかであれば、 V_{oc} を計測することにより太陽電池セルの温度を導出することができる。しかし、あらかじめ屋内測定で各日射量、温度での V_{oc} の値付けが必要であり、長時間を要し高コストであり汎用性が低い。システムへの応用を考慮した場合、動作時には V_{oc} は計測できず、また、長期屋外評価の場合 V_{oc} が劣化すると正確な温度が導出できない。
- バックシートに温度センサを設置して温度計測する手法 (IEC 60891:2009) : 最も一般的に用いられている手法であるが、モジュール構造内の太陽電池セルに対して、モジュール外部の温度を計測しているため、どうしても温度を低く計測してしまう。

本研究開発では、モジュール内部のセル温度を高精度に計測するため、モジュール構造内のセルに温度センサが直接接触するように内挿し、屋外評価においてセル温度を直接計測した。また、簡便に得ることのできるバックシート温度を利用したモジュール内セル温度の高精度予測について検討し、内挿温度センサにより実測されたセル温度と比較した。図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-1 に作製したモジュールの模式図を示す。バックシート上の熱電対は、アルミテープもしくはカプトン（ポリイミド）テープで接着した。また、風の影響を緩和するために、熱電対をアルミテープで貼り付けた上をさらに発泡樹脂（ポリエチレンフォーム、厚さ：1 mm、発泡倍率：33 倍）でカバーした手法の検討も実施した。計測はモジュール中央のセルにおいて毎秒実施した。



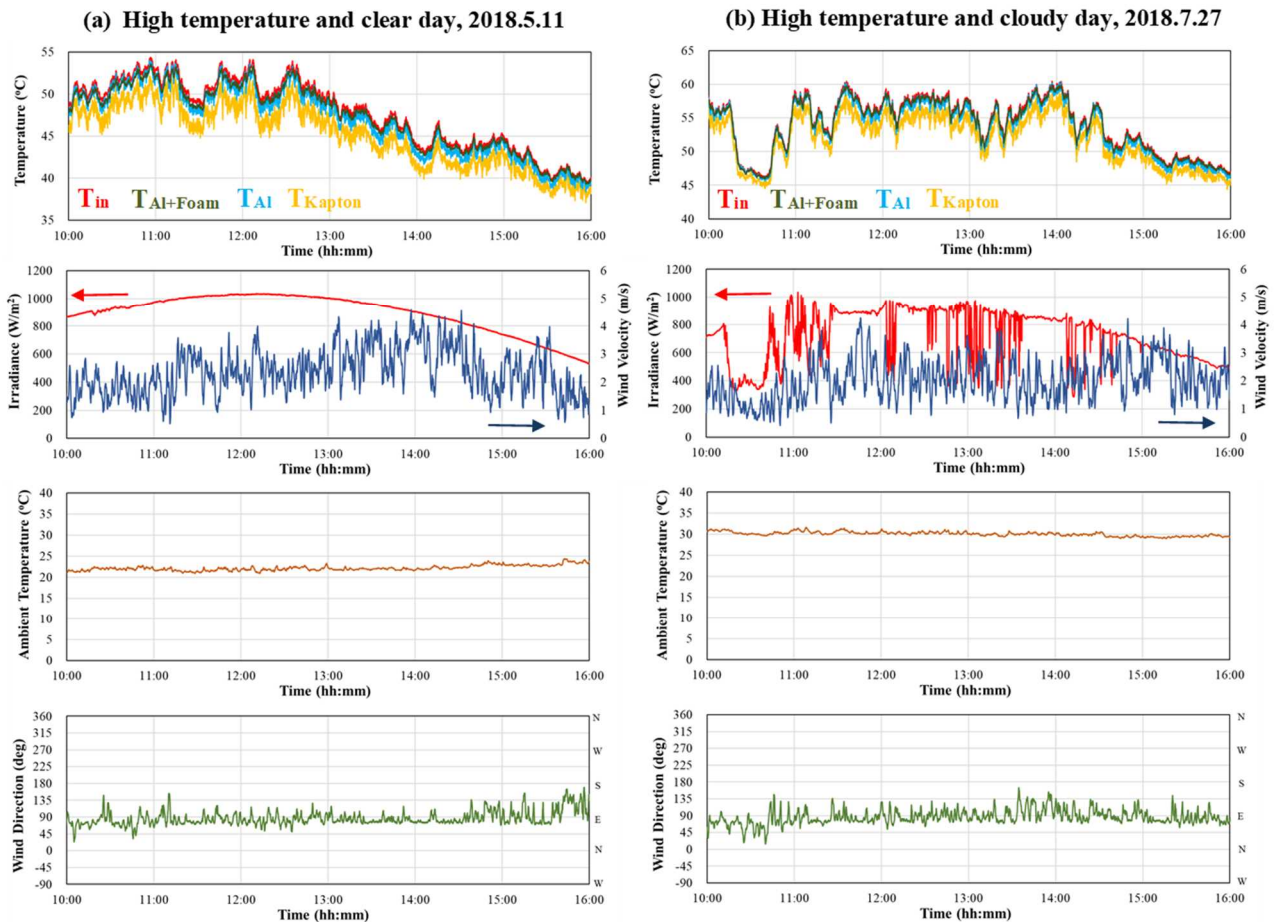
図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-1 作製した太陽電池モジュールの模式図

図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-2 に気温の高い日において各温度センサで計測された温度、日射強度、風速、気温、風向を示す。(a)には快晴日、(b)には曇天日における計測結果を示す。ここで T_{in} はモジュール内部セル温度、 T_{Al} は熱電対をアルミテープで接着したバックシート温度、 T_{Kapton} は熱電対をカプトンテープで接着したバックシート温度、 $T_{Al+Foam}$ は熱電対をアルミテープで接着しその上に発泡樹脂を張りつけたバックシート温度である。計測温度は、いずれの日も T_{in} が最も高く、 $T_{Al+Foam}$ 、 T_{Al} 、と続き、最も低い温度は T_{Kapton} であった。熱源となるセル温度 T_{in} が最も高く、熱放射率の高いカプトンで貼り付けたバックシート温度 T_{Kapton} が最も低い。このように、高熱放射率のカプトンテープで熱電対を接着したバックシート温度は、実際のセル温度よりも数度低く計測されてしまうことがわかる。アルミテープで熱電対を接着した場合、アルミは熱放射率が低いため、カプトンテープの場合と比べ計測温度が高くなる。さらに風よけのための発泡樹脂を貼ると、その保温効果のため温度が高くなる。

図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-3 に気温の低い日において各温度センサで計測された温度、日射強度、風速、気温、風向を示す。(a)には快晴日、(b)には曇天日における計測結果を示す。図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-2 の結果と同様に、計測温度は、いずれの日も T_{in} が最も高く、 $T_{Al+Foam}$ 、 T_{Al} 、と続き、最も低い温度は T_{Kapton} であった。

図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-4 に短時間における各温度センサで計測された温度および風速を示す。風速が速くなると、温度が低下することがわかる。また、 $T_{Al+Foam}$ は T_{in} と非常に似た挙動を示すことがわかる。一方、 T_{Al} と T_{Kapton} には小さな温度変動が見られる。モジュール構造においてセルは内部にあるため、実環境下において風速の小さな変化の影響を受けにくい。バックシート温度は風が

直接当たるため、風速の小さな変化の影響を強くうけるため、セル以上に温度変化が激しくなる。発泡樹脂を貼ることにより風の影響が緩和され、誤差を小さくすることができた。

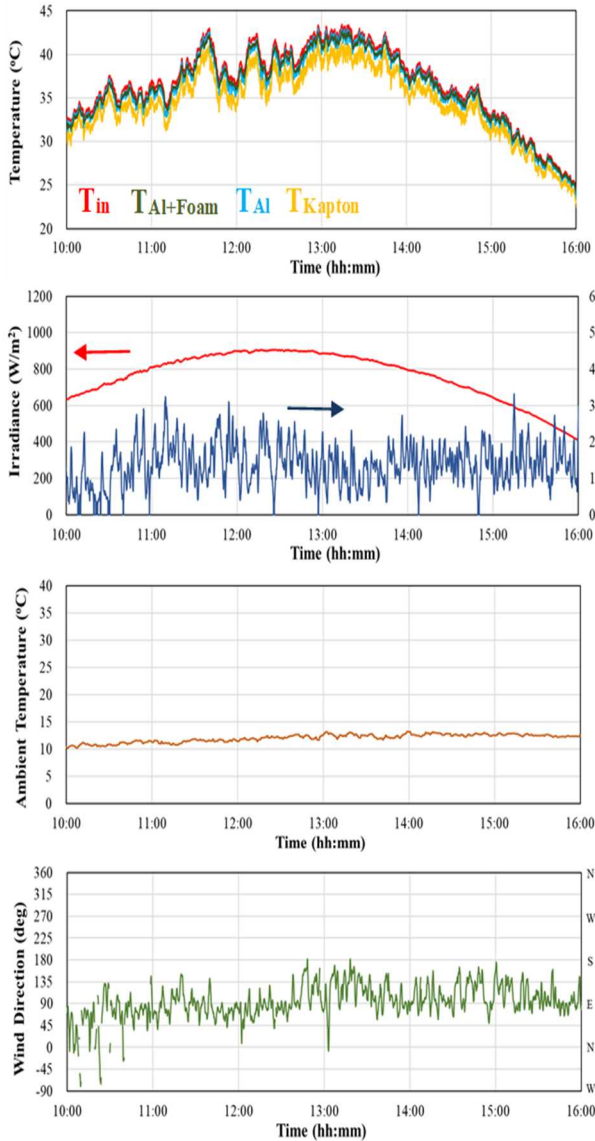


図III-2-(ホ)-A-II-2 気温の高い日において各温度センサで計測された温度、日射強度、風速、気温、風向 (a)快晴日、(b)曇天日における計測結果

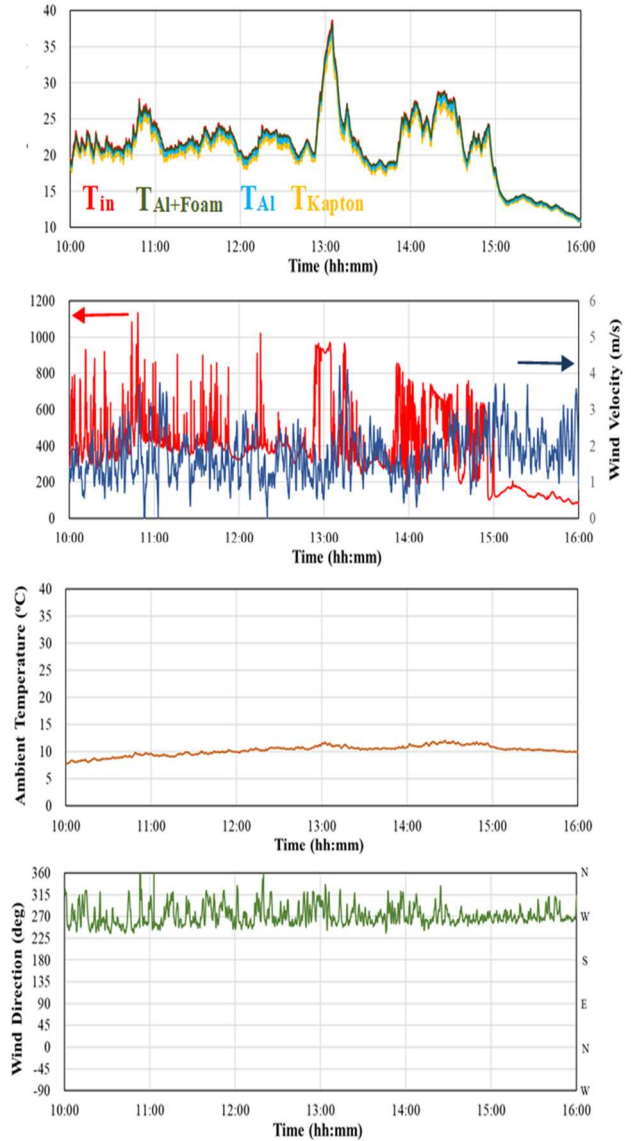
本モジュールでは、セル温度およびバックシート温度を同時に計測することができる。セルに直接接触する熱電対により、動作時の正確なセル温度を計測することができる。しかしながら、このような特注モジュールの作製にはコストがかかり、汎用性が低い。そこで、簡便に得られるアルミテープおよびカプトンテープで熱電対温度センサを貼り付けた裏面温度 (T_{Al} , T_{Kapton} および $T_{Al+Foam}$) から、セル温度 T_{in} を正確に予測する手法を考案した。センサとセルの間にある層は EVA とバックシートであり、これらの層の厚さと熱伝導率がわかれば、熱流束式を解くことにより、 T_{Al} や T_{Kapton} 用いて T_{in} を導出することができる。図III-2-(ホ)-A-II-5 に太陽電池モジュール内における熱流束の模式図を示す。セル温度 $T4$ は、バックシートの温度 $T6$ 、日射強度 Irr 、EVA およびバックシートの厚さ $L4$ および $L5$ 、EVA およびバックシートの熱伝導度 $\lambda4$ および $\lambda5$ を用いることにより、式III-2-(ホ)-A-II-1 で計算することができる。係数 a は、モジュールの種類および熱電対を貼り付けるテープにより変化する特有の保温係数である。

$$T4 = T6 + a \left(\frac{L4}{\lambda4} + \frac{L5}{\lambda5} \right) \times irr \quad (\text{式III-2-(ホ)-A-II-1})$$

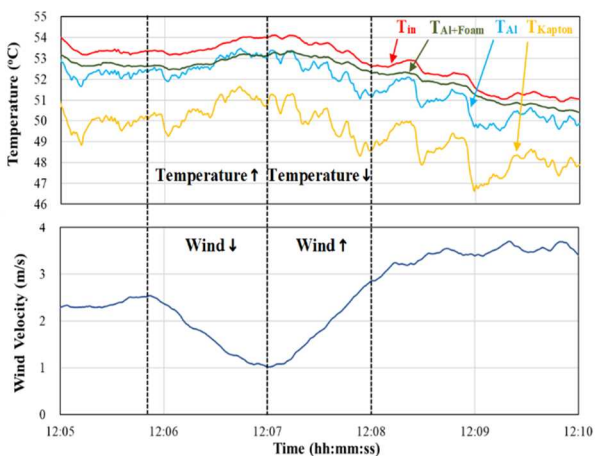
(a) Low temperature and clear day, 2019.1.29



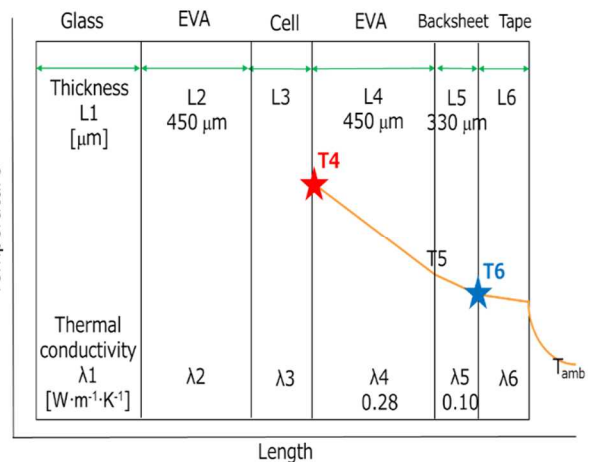
(b) Low temperature and cloudy day, 2018.12.13



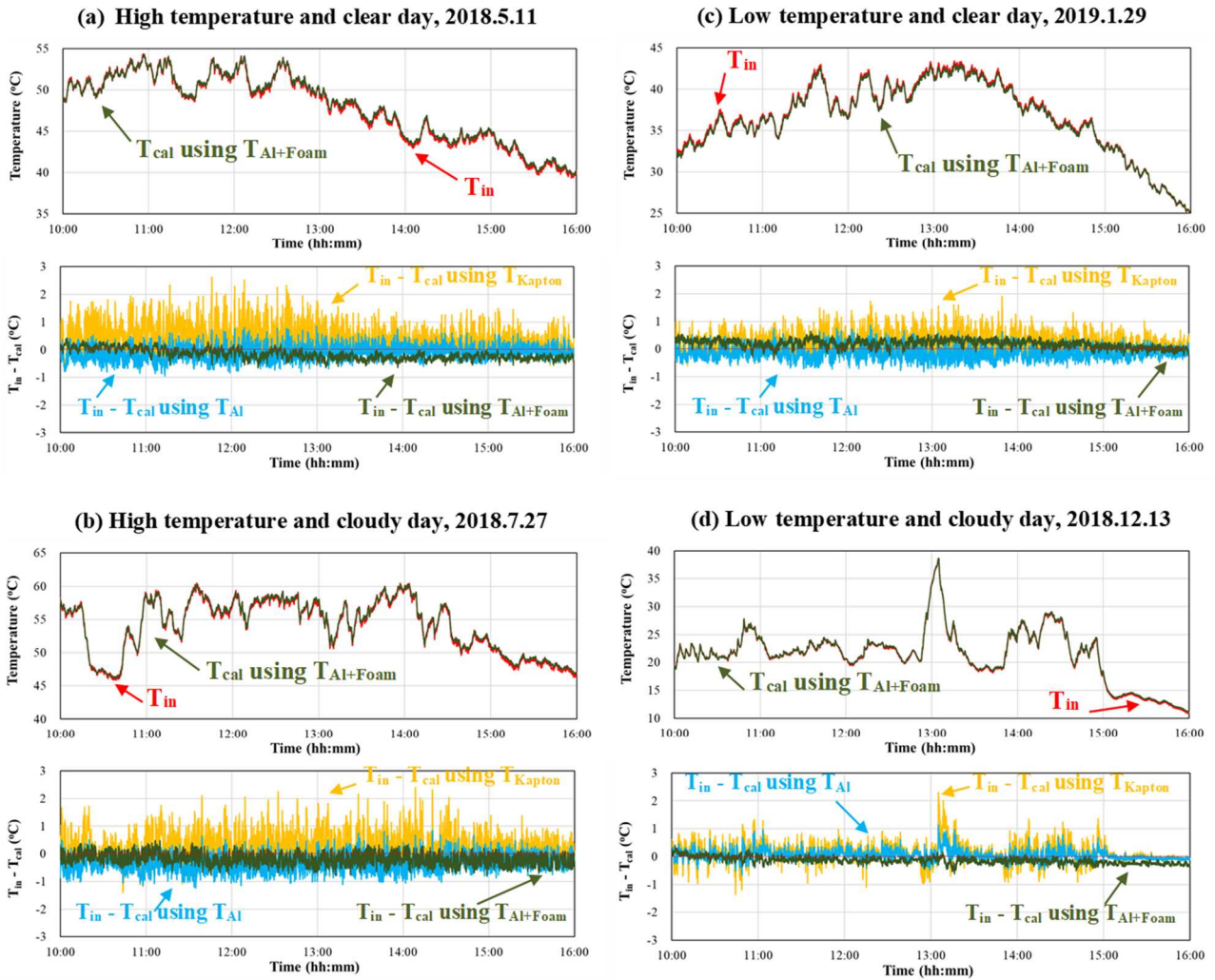
図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-3 気温の低い日において各温度センサで計測された温度、日射強度、風速、気温、風向 (a)快晴日、(b)曇天日における計測結果



図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-4 短時間における各温度センサで計測された温度および風速



図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-5 太陽電池モジュール内における熱流束の模式図



図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-6 高気温および低気温日の快晴日および曇天日それぞれにおいて算出したセル温度 T_{cal} と実測した T_{in}

図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-6 に高気温および低気温日の快晴日および曇天日それぞれにおいて、式Ⅲ-2-(ホ)-A-II-1 により算出したセル温度 T_{cal} と実測した T_{in} を示す。また、 T_{in} と T_{cal} の差 ($T_{in} - T_{cal}$) も示している。実測セル温度と計算により求めたセル温度の差をみると、バックシート温度に T_{Al} を用いて算出した場合、 $\pm 1^\circ\text{C}$ 程度の誤差で T_{in} を算出できた。さらに、バックシート温度に $T_{Al+Foam}$ を用いて算出した場合、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 程度の誤差で T_{in} を算出できた。モジュール構造においてセルは内部にあるため、実環境下において風速の小さな変化の影響を受けにくい。発泡樹脂を貼ることにより風の影響が緩和され、誤差を小さくすることができた。バックシート温度と EVA およびバックシートの物性値のみを用いた計算により導出したセル温度は実測値と精度よく一致し、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 程度の精度を達成した。以上のように簡便に得られるバックシート温度からモジュール構造内のセル温度を精度よく予測することに成功した。

(2) 高精度太陽電池温度測定のための温度計測位置の検証

太陽電池モジュールの変換効率は温度に強く影響を受ける (約 $-0.4\%/^\circ\text{C}$) ため、太陽電池モジュール出力の高精度評価のためには、温度を高精度で測定することが必須となる。実環境下においては常に有風状態であり太陽電池アレイ内に温度分布が生じる。そのため、モジュールやシステムのどの位置において計測するかを検討する必要がある。そこで、屋外において実動作している太陽電池アレイ内の温度分布を評価するために、宮崎大学に設置されている多結晶シリコン太陽電池アレイ面内の温度分布を計測・解析し、全体の平均温度に最も近い値を計測できる位置について定量的に検証した。

屋外において実動作している太陽電池アレイ内の温度分布を評価するために、宮崎大学に設置され

ている多結晶シリコン太陽電池アレイ面内の温度分布を計測した。図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-7 に計測に使用した太陽電池アレイの写真を示す。図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-8 に示す各箇所 (21 箇所) の太陽電池モジュールの中央裏面に熱電対を貼り付け、温度を実測した。計測は 2017 年 7 月 1 日から 2018 年 6 月 30 日の 8 時から 16 時に毎秒行った。図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-9 にアレイ内における温度分布とアレイ内温度の平均値からのずれを示す。ここでは、2017 年 8 月 28 日の風速風向や気温の条件がほぼ等しく、日射量が異なる条件におけるデータを示す。日射が 1012 W/m^2 と高い時は、風上と風下の温度差が大きく (12.4°C)、日射が 302 W/m^2 と低い時は、風上と風下の温度差が小さい (4.9°C) ことがわかる。また、平均温度からのずれにおいても、日射が高い時は平均からずれる範囲が広く、一方、日射が低い時は広範囲においてずれの小さい領域が存在することがわかる。太陽電池アレイの温度を計測し代表温度を求めたい場合、アレイ中央付近が適していること、さらに、日射が低い時に温度計測したほうが、より平均温度に近い値が得られることがわかった。

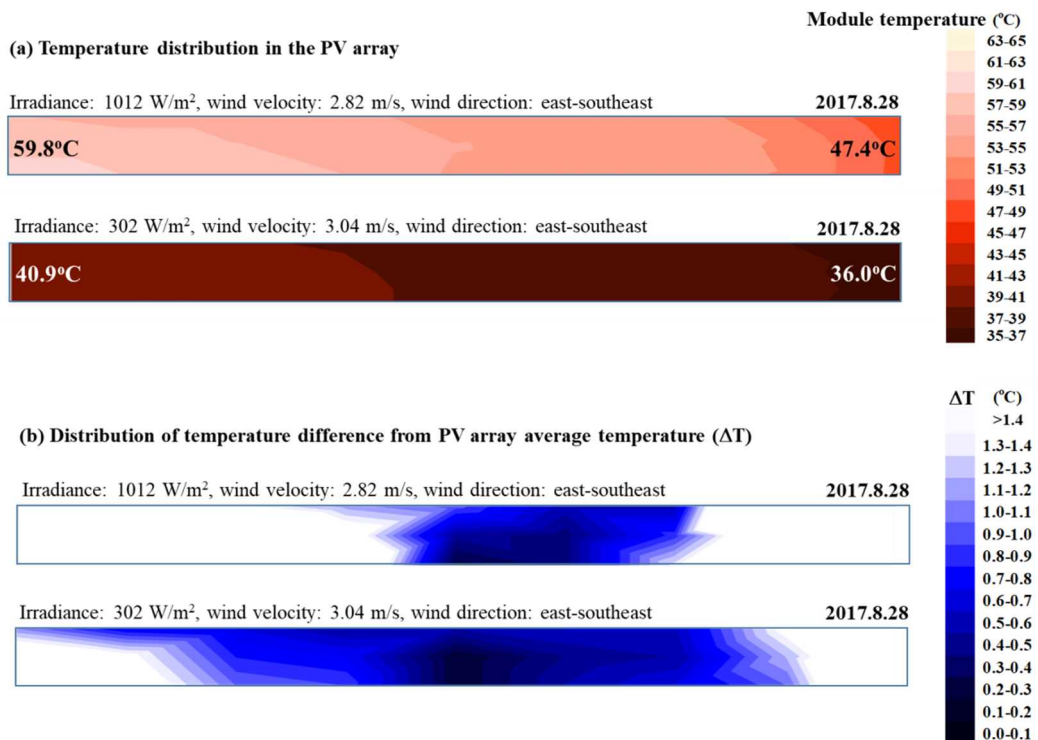


図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-7 温度分布計測に使用した太陽電池アレイの写真
(モジュールサイズ: $1550 \text{ mm} \times 775 \text{ mm}$ 、アレイ: 縦 3 段 (2325 mm) \times 横 2 8 列 (43400 mm))

● 温度センサ (TC)



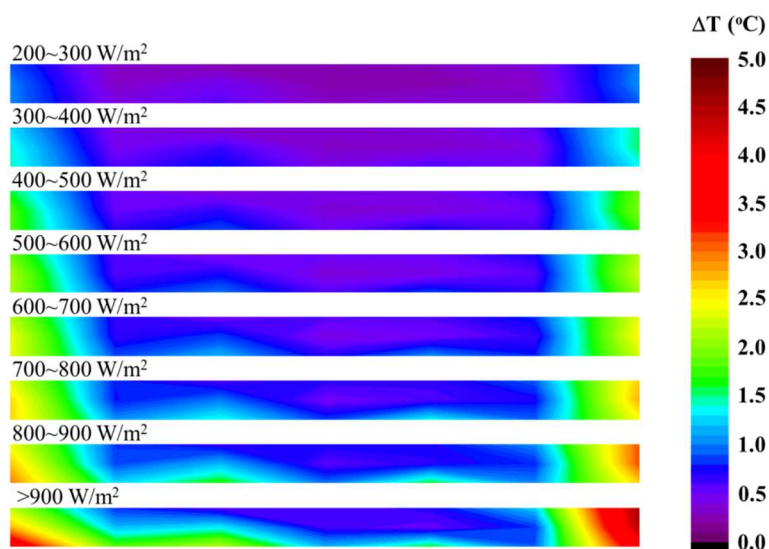
図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-8 アレイの温度計測モジュール位置



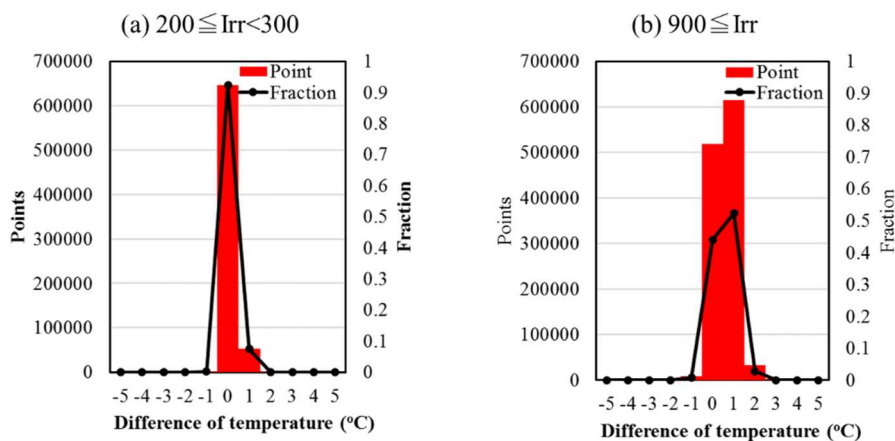
図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-9 アレイ内における温度分布とアレイ内温度の平均値からのずれ

図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-10 に、各日射強度範囲における各位置での計測温度の平均温度からのずれ分布を示す。ここでは、全計測期間（一年間）における計測結果をすべて用いている。この図からもわかるように、日射強度が低い時に温度計測したほうが、より平均温度に近い値が得られ（平均値からのずれが小さい）、広範囲においてずれの小さい領域が存在することがわかる。

図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-11 に日射強度 200 W/m^2 以上 300 W/m^2 未満および 900 W/m^2 以上における、アレイ中央モジュール温度の平均値からの差を示す。本図は、一年間のデータを統計的にまとめたものである。日射強度が低い時には、全計測データのうち、91.81%がアレイ平均温度からの差が $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内に収まっている。高日射強度時には 43.87% となり、平均温度からの差が大きくなることがわかる。これらの結果より、アレイ中央温度を計測すると、よりアレイ平均温度に近い温度を計測できること、また、低日射強度時に計測すると、ほとんどの計測温度においてアレイ平均温度からの差が $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内に収まることが定量的に明らかとなった。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-10 各日射強度範囲における各位置での計測温度の平均温度からのずれ分布



図Ⅲ-2-(ホ)-A-II-11 日射強度 200 W/m^2 以上 300 W/m^2 未満および 900 W/m^2 以上におけるアレイ中央モジュール温度の平均値からの差

屋外における太陽電池モジュールやシステムの高精度評価のために、太陽電池温度の高精度測定技術開発を実施し、最終目標を実温度測定精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内として研究開発を行った。

太陽電池モジュールの発電性能を決めるのはモジュール内部のセルの性能であるため、セル温度を高精度に測定することが必要となる。EVA やバックシートの熱抵抗を考慮した熱流束計算により、簡便に得ることのできるバックシート温度からモジュール内部のセル温度を精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 程度の高精度で導出することに成功した。さらに、季節や天候によらず高精度に測定できることを確認した。

屋外では常に有風であり、モジュールやシステム面内に温度分布が常時生じている。代表温度（モ

ジュールやシステム内の平均温度)を計測するための温度計測位置について、実測値をもとに検証・定義した。その結果、モジュールやシステムの中央位置における温度は屋外環境において常に平均温度に最も近い値となることが定量的に明らかとなった。

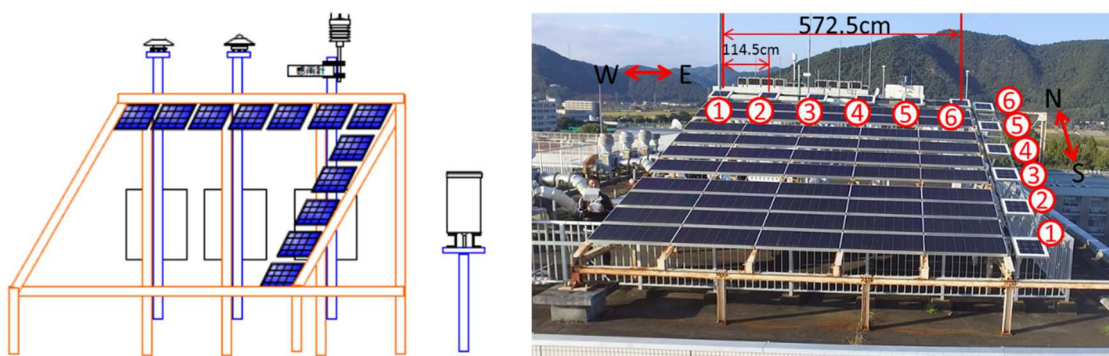
屋外における太陽電池モジュールおよびシステムの高精度温度測定技術として、モジュールやシステムの中央位置における温度を計測し、さらに、その位置のバックシート温度を計測することにより内部のセル温度を高精度に算出することが可能となった。

Ⅲ) 日射変動解析技術の開発 (岐阜大)

屋外太陽電池性能評価を実施するうえで評価精度低下の主要要因の一つである、ミリ秒オーダーの計測時間内の日射強度時間変化と日射強度空間不均一性について、現地観測を中心にこれらの特性と相互関係を定量的に解析し、さらにその結果を用いて日射強度の時間変化や空間不均一性が規定値外となる場合を検出・除去するフィルタ法の開発を行った。また、日射強度急変時のスペクトルミスマッチを観測および数値モデルにより解析し、屋外性能評価への影響を検討した。

① 屋外観測システム

本開発研究では、複数のPVモジュール日射センサー(以下PVMS)による日射強度計測器や、上空カメラ、複数の気象観測機器から構成されている機器を用いた。図Ⅲ-2-(ホ)-A-Ⅲ-1に計測機器の概要図と全景を示す。設置場所は岐阜大学工学部屋上(東経136°44'28.4"、北緯35°27'40.6")である。PVMSは125mm四方のc-Si太陽光発電セルを8つのダミーセルで囲んだモジュールである。c-Siセルを用いることにより、ミリ秒オーダーの高速日射強度変動を検出できる。本センサは図Ⅲ-2-(ホ)-A-Ⅲ-1に示す通り、太陽光発電システムの架台の上端(東西方向)および右端(南北報告)にそれぞれ6枚配置されている。また日射強度のサンプリング速度は100Hzである。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-Ⅲ-1 導入した観測機器の概要(左図)およびその全景(右図)



図Ⅲ-2-(ホ)-A-Ⅲ-2 シャドーブレード付き上空カメラの外観(左図)とこのカメラによって捉えられた雲および日射の様子(2016年3月6日10時)

本観測システムの上空カメラの外観と撮影された雲の様子の一例を図Ⅲ-2-(ホ)-A-Ⅲ-2に示す。この図のとおり、カメラの前面にはシャドーブレードを設置した。観測撮影画像中を盾に横切る黒い帯が

シャドーブレードであり、このシャドーブレードは太陽の移動を追尾し、太陽本体を遮蔽する。これにより直達日射の映り込みを抑制し、太陽ごく近傍の雲の様子も鮮明に観察することができる。撮影は 4 frame/分と連続的に行い、雲の様子を動的に観測した。これらの機器によって、急激な日射変動とそれに係る気象変化、特に雲の様子を定量的に捉えることが可能となった。またその他の気象観測機器により大気状態も連続して把握することができた。

② 日射強度の時間変動と空間不均一性の特性の検討

PVMS による観測システムを用いて、日射強度の時間変動と空間不均一性の特性、およびこれらの相互関係について検討を行った。日射強度の時間変動は単一の PVMS による計測結果から解析・評価できる。一方日射強度空間不均一性の解析・評価には離れた 2 点に設置された PVMS を必要とし、それらによって観測された日射強度の差から解析した。定量的な解析を行うために、まず日射変動の日射強度の時間変動 (Temporal Instability、TI) および空間不均一性 (Maximum Non-Uniformity、Max.NU) を定義した。

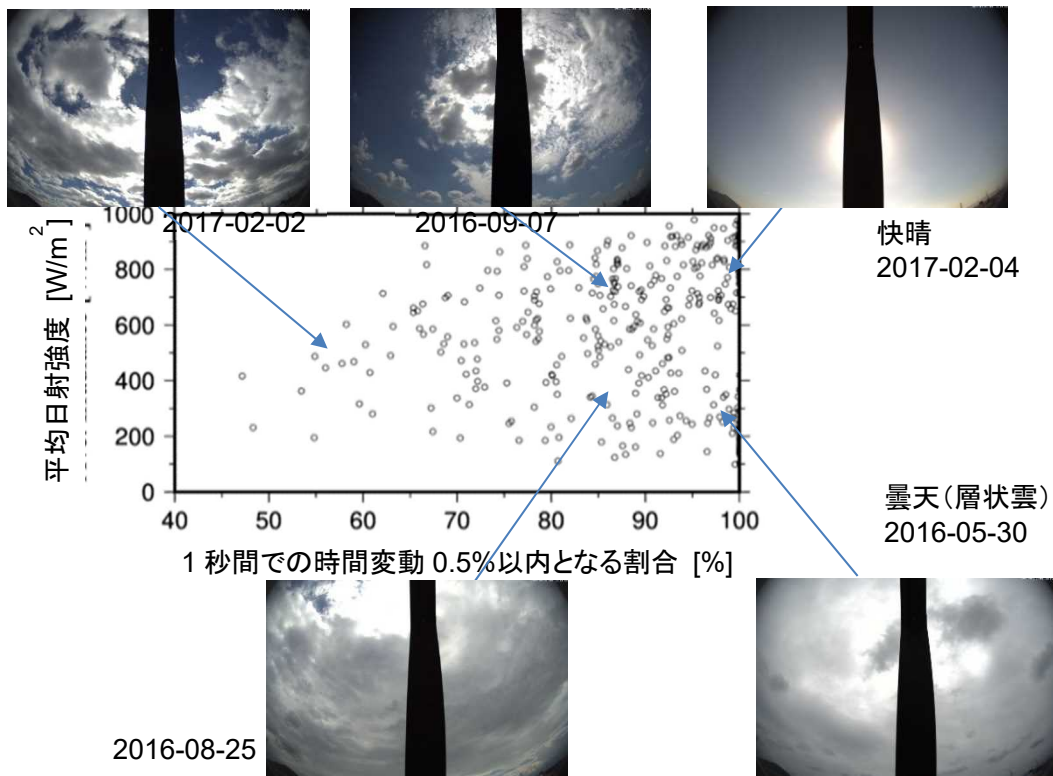
$$TI = \frac{Irr_{max}^1 - Irr_{min}^1}{Irr_{max}^1 + Irr_{min}^1}$$

$$Max.NU = \max \left[\frac{Irr^L - Irr^S}{Irr^L + Irr^S} \right]_{ts}^{te}$$

ここで Irr^i は i 番の PVMS で計測された日射強度、 Irr_{max} 、 Irr_{min} は計測期間中の最大および最小の日射強度、 L 、 S は 2 台の PVMS での計測において、日射強度の大きな、あるいは小さな PVMS の番号、 ts 、 te は計測時間の区間である。これらの定義式からも、日射強度の時間変動は単体の PVMS のみで評価できるが、空間不均一性は複数の PVMS が必要であることがわかる。観測・解析の結果、日射強度の空間分布は雲の分布に起因し、また雲の移動に伴い日射強度の空間分布が移動して、その結果、各地点 (PVMS) での日射強度の時間変化が生じていることが分かった。さらに、日射強度の時間変化と空間分布は雲の移動によって関連付けられることが分かった。

③ 日射強度変動特性による大気状態の分類

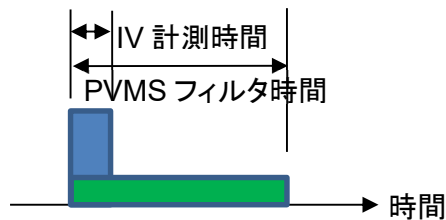
屋外太陽電池性能評価の実施者が、天候の状態から評価実施の可否を簡便に判断できる基準を検討するために、大気の状態、特に雲の様子と日射変動との関係を解析し、日射変動特性から大気状態の分類を行った。図 III-2-(ホ)-A-III-3 には日射強度変動特性と平均日射強度の関係を示す。図中には代表的な上空カメラの映像も加えている。この図は 1 日ごとに 9:00~15:00 で日射強度 300 W/m² 以上の場合を対象とし、図中の横軸は、1 日のうち 1.0 秒間の日射強度変動が 0.5 %以下となる割合を示しており、割合が大きいほど日射変動が安定しており、値が小さいほど変動が大きいことを示している。また縦軸は 1 日の平均日射強度である。快晴日には日射強度変動は安定で平均日射強度も大きいために、図中の右上にプロットされる (例えば図中の 2017-02-04)。快晴日に比べて雲が増えると横軸の時間変動の割合が低下した平均日射強度も低下するため、快晴日の位置から左下の位置にプロットされる (例えば図中の 2016-09-07)。さらに雲が増えると日射変動はさらに不安定となり、値は低下し、平均日射強度も低下する (例えば図中の 2017-02-02)。ところがさらに雲が増加し上空の多くの部分を覆うようになると平均日射強度は低下するものの、日射変動は安定化し図中横軸の値は大きくなる (例えば図中の 2016-08-25)。さらに上空全面を層状の雲で覆った状態では平均日射強度は非常に小さくなるが、日射強度変動は安定し、横軸の値は快晴時と同様の値になる (例えば図中の 2016-05-30)。図 III-2-(ホ)-A-III-3 では分布の特徴が分かりやすい 1 秒間の日射強度変動を対象に解析したが、本開発研究で想定している I-V 計測時間 0.2 秒でも、同様の傾向が確認できた。これらの結果から、日射強度変動と大気の状態を表 III-2-(ホ)-A-III-1 のとおり、3つのグループに分類した。この中で Group1 は日射強度がほとんど変動しないのに対し、Group3 はその変動が大きいグループである。この表から、大気の状態、特に雲の分布とその動きから大まかな日射強度変動を把握することができる。



図III-2-(ホ)-A-III-3 日射強度変動特性（横軸）と平均日射強度（縦軸）との関係（図中の上空カメラの画像は代表的な雲状態を示す。）

表III-2-(ホ)-A-III-1 日射変動特性に基づく大気状態の分類

グループ	基準（図III-2-(ホ)-A-III-3に基づく）	大気の状態
Group1	0.2秒間で日射変動0.5%以内となる割合が100% （日射が変動しない）	・快晴、または計測中雲が太陽前面を通過しない場合。 ・雲の厚さや色にムラが少ない曇天
Group2	0.2秒間で時間変動0.5%以内となる割合が95%以上	・通常（Group1, 3以外）
Group3	0.2秒間で時間変動0.5%以内となる割合が95%未満	・まだらな雲が速く動いている場合

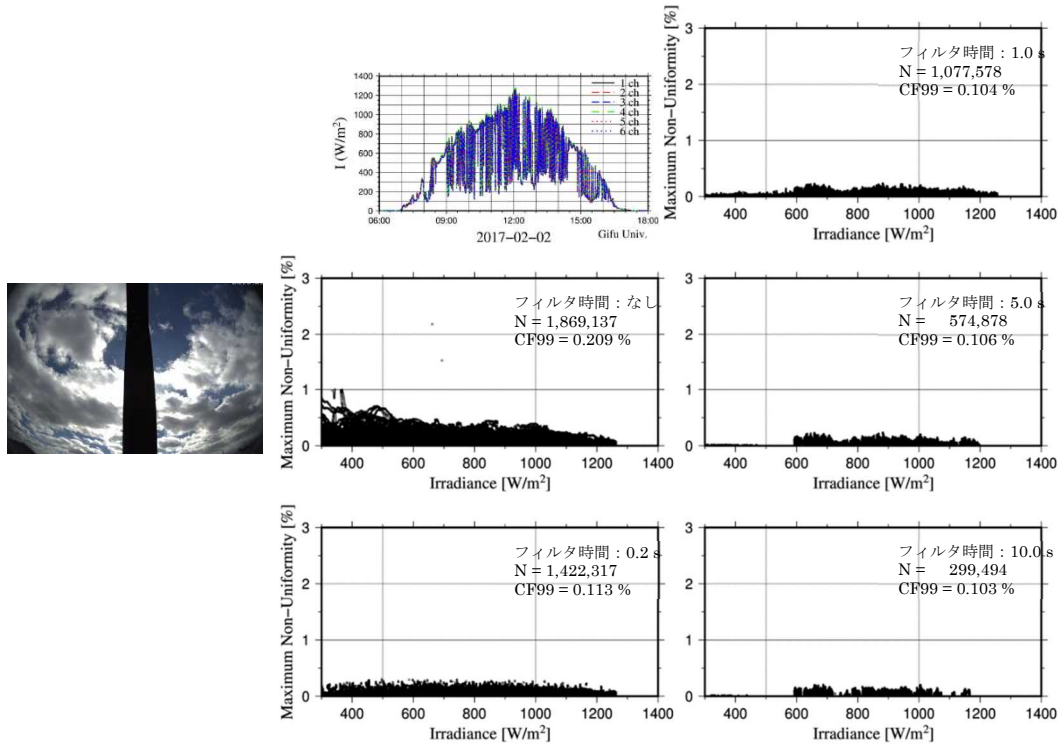


図III-2-(ホ)-A-III-4 屋外性能評価で想定するI-V計測とPVMS計測の時系列

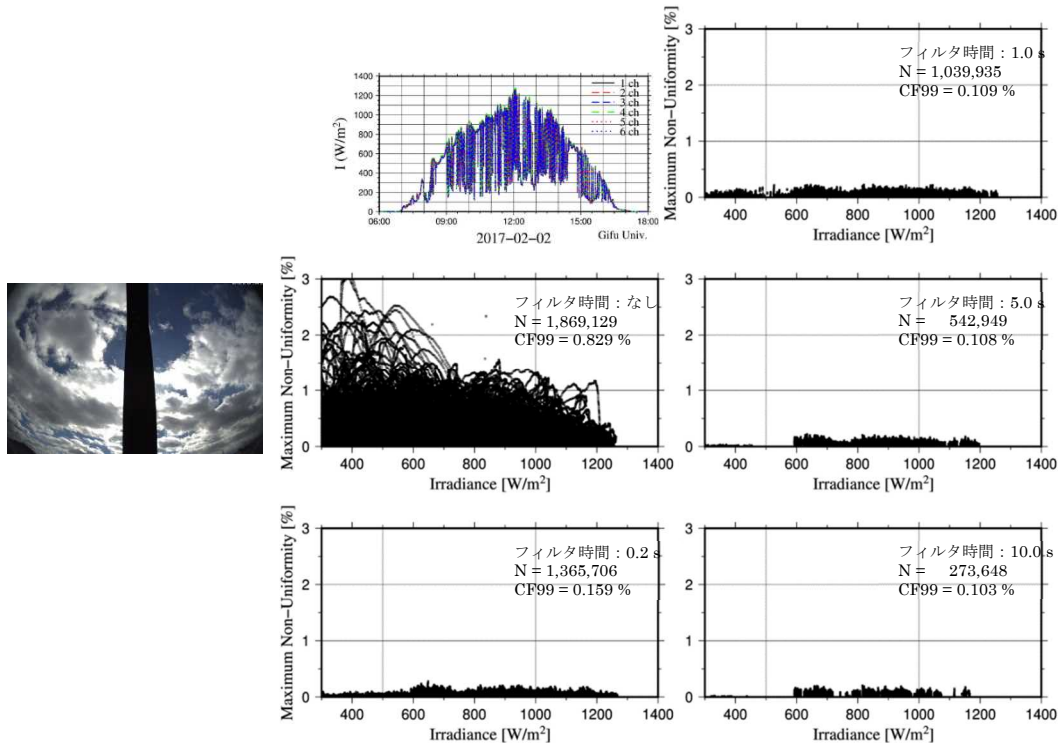
④ 日射強度時間変動・空間不均一性規定値外の検出・除去手法（フィルタ法）の検討

ここでは屋外太陽電池性能評価において、日射強度の時間変動や空間不均一性が規定値外となる場合を検出・除去し、計測時間中に日射強度が安定していることを保証する手法、フィルタ法を検討する。これはI-V計測による性能評価時にPVMSによる日射計測を同時に実施し、I-V計測期間中の日射安定を保証するものである。ここで日射強度空間不均一性の計測には複数のPVMSが必要であるが、これまでに得られている日射強度の空間不均一性と時間変動の関係から、単一のPVMSのみで日射強度の時間変動をモニタリングするのみで空間不均一性の評価も行える手法とする。PVMSによる日射強度時

間変動のモニタリングは検査対象の太陽電池の I-V 計測と同時に行うものとする。この計測手法の時系列イメージを図III-2-(ホ)-A-III-4に示す。ここで想定する I-V 計測時間は 0.2 秒とし、また PVMS による日射強度のモニタリングは図中の PVMS フィルタ時間行うこととする。そしてこのフィルタ時間を変化させてフィルタ法の特性を検討した。



(a) PVMS 間隔 2.290 m でのフィルタ効果



(b) PVMS 間隔 8.096 m でのフィルタ効果

図III-2-(ホ)-A-III-5 PVMS によるフィルタ効果 (2017/02/02、日射変動の大きい曇天日)

フィルタ法による効果の例を図III-2-(ホ)-A-III-5(a)及び(b)に示す。ここでは表III-2-(ホ)-A-1に示す日射変動の特に大きいGroup3に属する天候の日(2017/02/02)において、PVMS間隔を2.290 mおよび

び 8.096 m とし、フィルタ時間、すなわち PVMS の計測時間を 0.2 秒から 10.0 秒まで変化させ、この時間内での日射強度変動 0.3%以上のケースを除去することとした。図中の変数 N の値はデータ数を、また変数 CF99 は空間不均一性 (Max. NU) の累積 99 %となる Max. NU の値である。これらの図から、フィルタを用いない場合 (図中の「フィルタ時間：なし」) に比べてフィルタを適用した場合には空間不均一性 (Max. NU) の大きなケースが除去されていることが分かる。またフィルタ時間は I-V 計測時間と同じ 0.2 秒でも効果が大きく、さらにフィルタ時間を延長するとその効果がより大きくなることもわかる。そして PVMS 間隔 8.096 m 以下であれば、I-V 計測時間 0.2 s と同じ時間のフィルタ時間を適用することにより、空間不均一性が大きいケースを除去でき、空間不均一性を 0.5 %以下に制限することが可能であることが分かった。

⑤ 日射変動時における日射スペクトル変動特性解析

太陽光発電屋外性能評価での評価精度には評価中の日射強度変化のほか、日射スペクトルの変化も重要となる。ここでは本開発研究結果のうち、観測値を用いて日射急変時の日射スペクトル変化を示す。用いた観測データは日本気象協会が NEDO 受託事業として観測・データベース化している日射スペクトルである。結果の一例として、分光日射計による日射スペクトル強度の観測結果を PVMS による観測結果と合わせて、図 III-2-(ホ)-A-III-6(a)-(d) に示す。対象の日 (2016 年 5 月 27 日) は正午ごろに大きな日射変動があり、雲エッジ効果により太陽乗数を上回る日射強度も観測されている。図 III-2-(ホ)-A-III-6(b) では PVMS による日射強度観測結果 (黒線) と分光日射計による観測結果 (赤線) とを比較している。分光日射計の計測間隔は 5 分と PVMS に比べて粗いが、1 回の計測に要する時間が最大 5 秒であるため、日射強度計測値は PVMS の観測値を再現している。図 III-2-(ホ)-A-III-6(b) 中の分光日射強度の観測時の色と、同図 (c) の日射スペクトル分布および同図 (d) の規格化スペクトル分布の色とが観測時が対応している。この図から、日射強度急減時 (黒線のスペクトルから深緑、黄緑への変化時) には同図 (c) のように日射スペクトル強度が減少するだけでなく、同図 (d) のようにスペクトル形状がわずかに短波長側に移動していることが分かる。同様の傾向は他の日射強度急減時にもみられた。

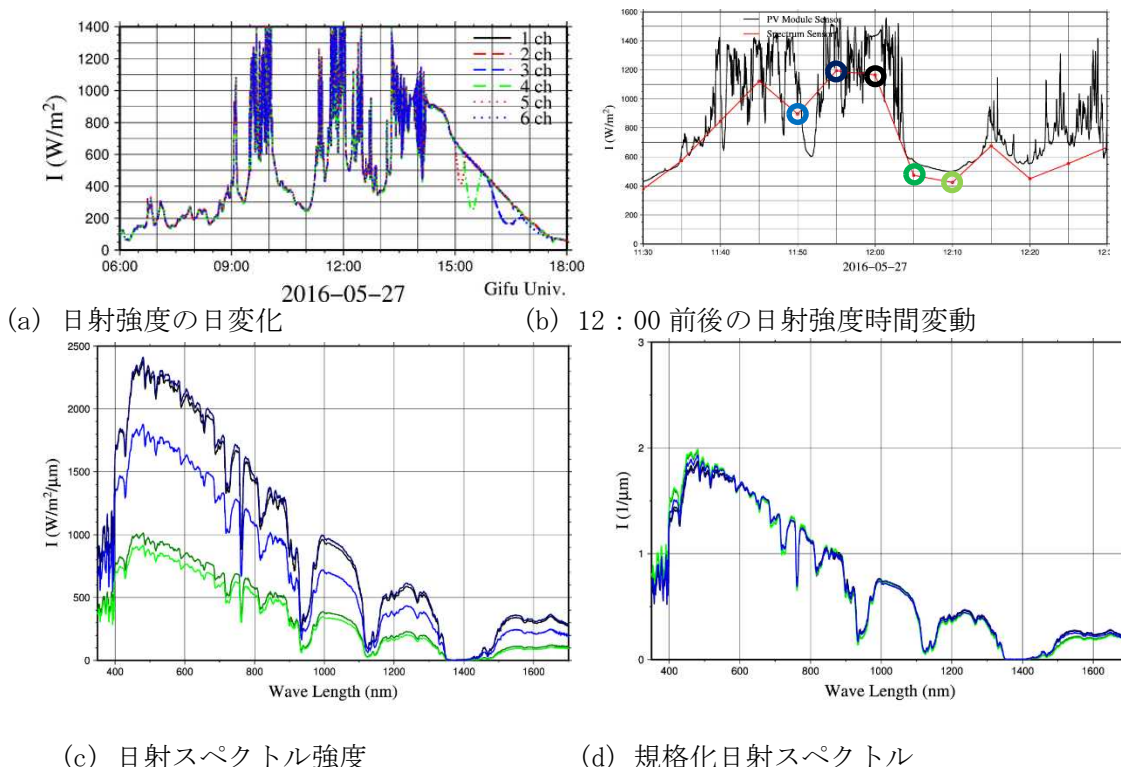
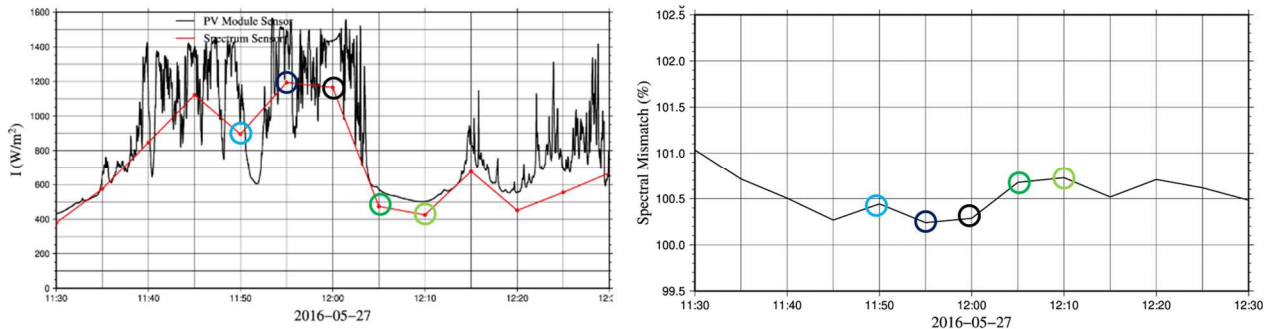


図 III-2-(ホ)-A-III-6 分光日射計によって観測された日射スペクトル (2016 年 5 月 27 日、図 (b)、(c)、(d) の各色は観測時刻同時刻に対応)

次に図 III-2-(ホ)-A-III-6 に示される日射強度急減時におけるスペクトルミスマッチの変化を、観測スペクトル強度を用いて行った。その結果を図 III-2-(ホ)-A-III-7 に示す。この図から、日射強度急減時にはスペクトルミスマッチの値が上昇していることが分かる。これは日射強度急減に伴い図 III-2-(ホ)-A-III-6 に示す通り日射スペクトルが短波長側に移動し、その際、PVMS の感度特性と AIST から提

供されたデバイスの感度特性との違いにより生じたものである。ただし、この日射強度急減時におけるスペクトルミスマッチの変化量は0.5%以下とわずかであった。さらに、異なる大気状態でのスペクトルミスマッチを推定した。その結果、図III-2-(ホ)-A-III-7 以外の大気状態でも太陽光発電屋外性能評価を実施する日射強度 300 W/m² 以上の条件下ではスペクトルミスマッチの値はほぼ 100.0%から 101.0%の間に収まっており、変化量もほぼ 1%以下であった。これより結晶シリコン太陽電池の PVMS を用いて結晶シリコン太陽電池の性能評価を行う場合には、日射スペクトルの変動が屋外太陽電池性能評価に及ぼす影響は限定的であると思われる。



図III-2-(ホ)-A-III-7 観測された日射強度 (左図。黒線：PVMS、赤線：分光日射計) とスペクトルミスマッチ (右図) (2016年5月27日。各色は観測時刻同時刻を示す)

IV) スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発 (立命館)

本研究では、太陽光スペクトル指標である Average Photon Energy (APE)の継続的な測定とこれを用いたスペクトルミスマッチ補正技術の開発によって、屋外太陽電池性能評価におけるスペクトルミスマッチに起因する I_{sc} 測定誤差を低減し、屋外測定技術の高精度化に貢献することを目的とした。各種太陽電池モジュール (単結晶 Si (sc-Si)、多結晶 Si (mc-Si)、バックコンタクト型 (BC)、HIT、CIS、CdTe) を、滋賀県草津市 (北緯 34° 58'、東経 135° 57') にある立命館大学びわこ・くさつキャンパス内に設置した。これらの太陽電池モジュール全ての電流-電圧 (I-V) カーブを1分に1回、200ms 程度の高速で測定した。熱電対による太陽電池モジュール裏面温度測定、熱電式の日射計による日射強度測定、さらに、分光放射計による太陽光スペクトルの測定も I-V カーブ測定と同期させて行った。

まず、APE を用いたスペクトルミスマッチ補正の一日データにおける解析を行った。ここで APE は分光放射計によって測定した太陽光スペクトルデータから算出した。 I_{sc} の STC への補正に、モジュール裏面温度の熱電対測定結果による温度補正、PVMS を用いた照度補正、さらに PVMS と被測定モジュールの分光感度および AM1.5G 基準スペクトルと屋外測定スペクトルを用いてスペクトルミスマッチ係数 (MM) を求めてスペクトルミスマッチ補正 (MM 補正) を行った。ここでは、単結晶 Si 太陽電池モジュールを PVMS として使用した。PVMS と被測定モジュール (多結晶 Si、バックコンタクト型、HIT、CIS、CdTe) の分光感度は AIST によって高精度に測定された値を用いた。APE とスペクトル形状に一貫性がある (即ち、同じ APE 値であればスペクトル形状がほぼ一致する) ことを確認し、APE という数値によってスペクトル形状を代表させることで、各種モジュールの PVMS に対する MM の APE 依存性を明らかにした。結晶 Si 系太陽電池である多結晶 Si、バックコンタクト型、HIT の MM の APE 依存性は APE=1.85~1.96eV の範囲で 0.995~1.005 程度と小さかったが、分光感度の若干異なる CIS では 0.995~1.020 程度、大きく異なる CdTe では 0.985~1.065 程度と比較的大きいことが明らかになった。この MM の APE 依存性を用いて、続いて、三種類の補正方法 (①: 温度補正と照度補正 (熱電式日射計)、② 温度補正と照度補正 (PVMS)、③ 温度補正と照度補正 (PVMS) と MM 補正) の比較を行った。図III-2-(ホ)-A-IV-1 に晴天日および曇天日における多結晶 Si と CdTe の I_{sc} 補正の一日の変化を示す。天気、太陽電池種にかかわらず、①の熱電式の日射計による照度補正方法では補正後と STC 値の誤差率 (%) が大きく、②の PVMS を用いることで大きく精度が向上した。多結晶 Si については PVMS と分光感度が近く MM の APE 依存性が小さいために、③の MM 補正を加えても補正精度の確かな向上は見られなかった。続いて、CdTe は晴天日では APE が 1.88eV に近かったため MM 補正の効果が小さく、③の MM 補正による補正精度の大きな向上は見られなかったが、曇天日においては APE が 1.95V 付近であり MM 補正の効果が見られ、大きな補正精度の向上が見られた。このように、PVMS と分光感度が大きく異なる太陽電池では MM 補正が重要であることが明確になった。

上記より、PVMS (結晶系 Si) と大きく分光感度が異なるワイドギャップの光吸収層を用いた太陽電

池の場合には、MM 補正が必要であることが明らかになった。そこで、広く普及している結晶 Si 太陽電池よりも、ワイドギャップである CdTe 太陽電池の I_{sc} 補正の高精度化を行った。単結晶 Si 太陽電池からなる PVMS を用いて照度補正を行い、分光放射計で測定した APE を用いて MM 補正を行った。使用する APE の範囲を広範囲 (1.75~2.15eV) から一部制限し、1.75eV~2.00eV (制限前データ数の 96.3%が含まれる) とすることで、図 III-2-(ホ)-A-IV-2 に示すように、 I_{sc} 測定誤差を 3 分の 1 以下に低減させることに成功し、最終目標を達成した。

今回の検討で、MM 補正を用いることで、PVMS と大きく分光感度の異なるワイドギャップの太陽電池、すなわち今回の例では CdTe、今後考えられるのが高効率化されたワイドギャップの CIS やペロブスカイト、においても高精度に I_{sc} 補正可能であることが示唆された。

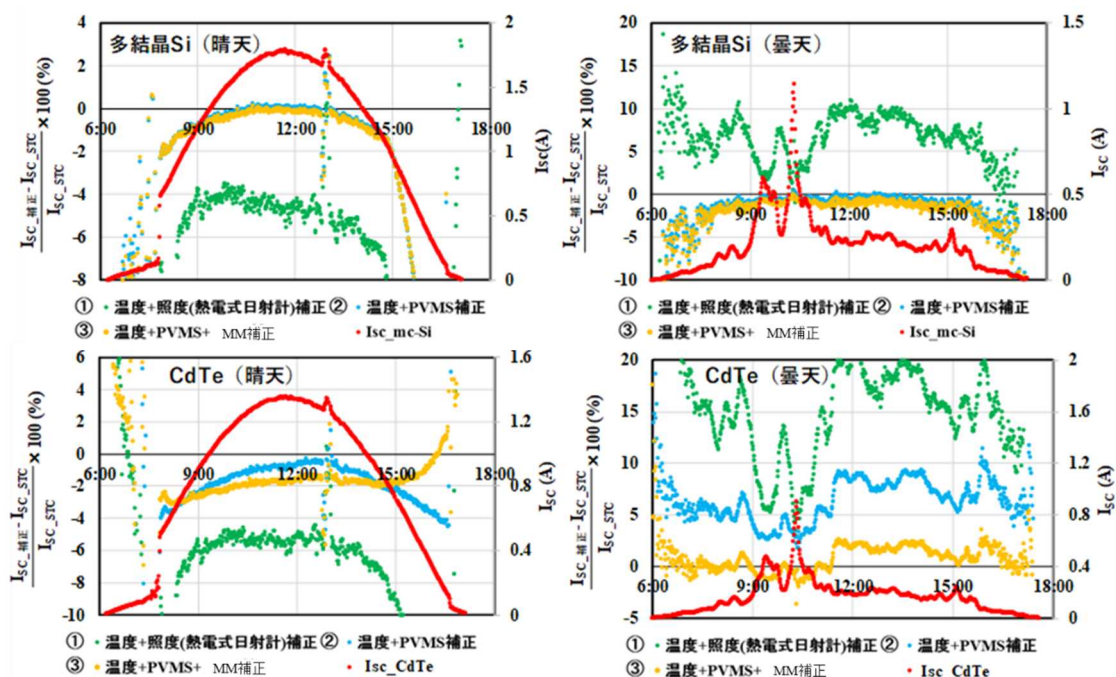


図 III-2-(ホ)-A-IV-1 晴天日・曇天日における多結晶 Si と CdTe の I_{sc} 補正の一日の推移

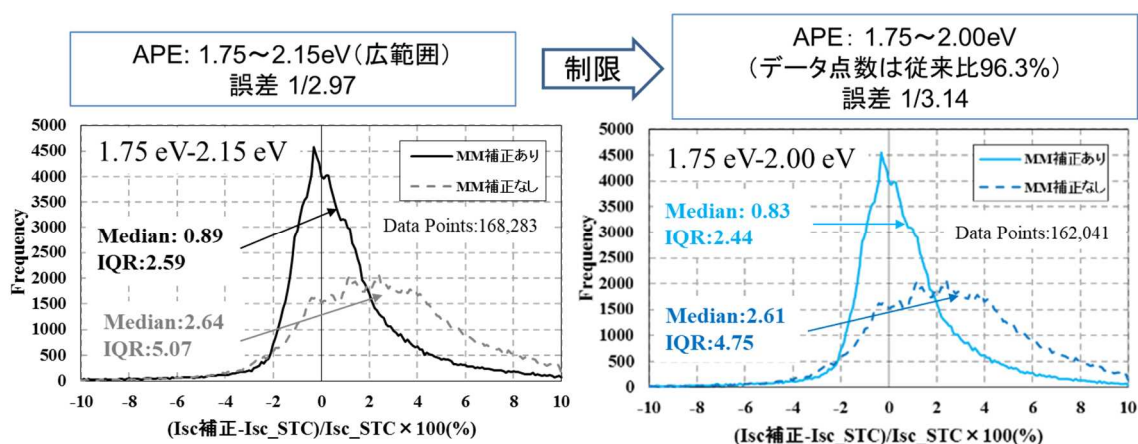


図 III-2-(ホ)-A-IV-2 ワイドギャップ太陽電池(CdTe)の MM 補正を用いた I_{sc} 補正の誤差ヒストグラム

V) PV 日射計測によるシステム性能測定手法開発 (理科大)

本開発では、太陽電池モジュールの屋外高精度測定を共通基盤技術として普及実用化するために必要不可欠な技術の開発として、太陽電池が直並列に接続されたシステムに対し、屋外において太陽電池アレイ面内に照度ムラ、温度ムラがある場合の発電性能を高精度に測定するための環境条件および電流-電圧 (I-V) 特性の測定条件を明らかにするとともに、システムのアレイ構成・ストリング構成を考慮して高精度に発電性能を測定する手法として、日射測定機器に PV モジュール日射センサ (PVMS) を

用いた発電性能測定手法を開発し、そのシステムへの適用可能性を実証した。

PVMS を用いた高速・高頻度な日射計測と高精度屋内太陽電池モジュール発電性能測定結果を用いた開発手法の評価、および太陽電池モジュール・ストリングの屋外における I-V 特性の高速挿引による連続測定データを用いた開発手法の評価については産業技術総合研究所(AIST)と連携し、その成果を活用した。また、太陽電池アレイ面温度の測定には宮崎大学が開発した太陽電池モジュール温度の測定方法を、スペクトル補正の考え方については立命館の検討結果を、照度ムラ評価においては岐阜大学の成果をそれぞれ活用し、太陽電池モジュールの屋外における I-V 特性の連続測定データを用いた開発手法の評価については電気安全環境研究所(JET)との連携により、その成果を活用した。

(1) システム屋外性能高精度評価のための測定手法の開発

屋外における太陽電池モジュールやストリング、アレイの電流-電圧(I-V)特性の測定と発電性能の高精度評価に向け、PV モジュール日射センサ(PVMS)を照度センサとして用いる手法について、AIST と連携して屋外システムにおける測定手法の検討を行った。太陽電池モジュール温度は、代表モジュール中央部付近のセルの中央部裏面に熱電対を貼付ける方法で測定した。I-V 特性の計測には、いくつかの異なる測定方式・型番の I-V 特性測定装置を用い、測定装置間の差や測定方式の違いが測定結果に与える影響を確認した。結果、当初からの目的である高速測定に対しては、挿引時間の設定が可能な電子負荷式が優れることが確認できた。また、データサンプリングの方法としては、短絡電流から最大出力動作点までの間の測定点が多い方が、ストリングの測定時にモジュール間の性能差や不具合を見つけやすいことが確認できた。コンデンサ負荷式を含むいくつかの測定装置では、この区間の測定点数が疎であるため、高精度な評価には測定点のサンプリング間隔などの調整が有効である。また、端子部から計測部までのケーブルの直列抵抗や計測部に存在する直列抵抗により、短絡電流まで挿引できない場合があることや、計測結果に違いが出ることも確認できた。加えて、I-V 特性測定の前で日射(PVMS からの出力)を計測することで挿引中の日射変動が確認できるため、より高精度な測定が可能となることを提案し、本提案手法は一部の計測機器に実装された。

(2) PV モジュール日射センサを用いた PV システム測定データ解析手法の開発

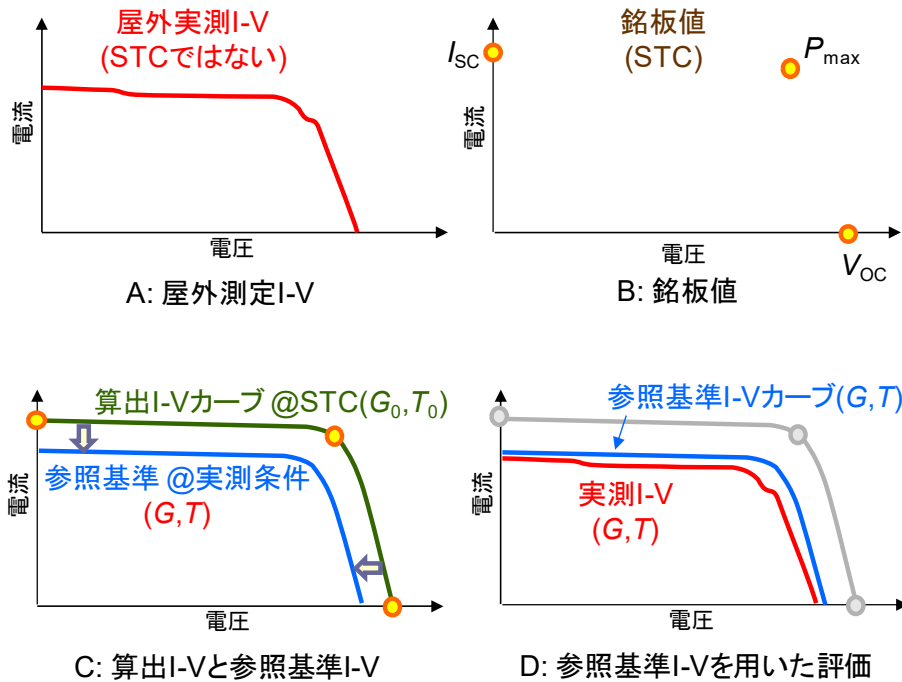
PV システムの I-V 特性の解析手法の開発として、屋外における I-V 特性測定時に、PVMS を用いて測定した日射条件とモジュール裏面にて測定したモジュール温度を入力データとして、太陽電池アレイの構成要素となる各モジュールの同条件下での参照基準用 I-V 特性を高精度に算出する手法の開発を行った。開発は結晶シリコン系の太陽電池を対象とし、測定対象となる太陽電池モジュールのデータシート(銘板)に記載されている特性値(開放電圧, 短絡電流, 最大出力, 最大出力動作電圧, 最大出力動作電流)を用いて、太陽電池の 1 ダイオードモデルにおける未知の 5 パラメータを算出する手法とする事で、多くの太陽電池に適用可能な手法とした。式 III-2-(ホ)-A-V-1 に 1 ダイオードモデルの基本式を示す。

$$I_{out} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left\{ \frac{(V_{out} + R_s I_{out})}{n V_{th}} \right\} - 1 \right\} - \frac{V_{out} + R_s I_{out}}{R_{sh}} \quad \text{式 III-2-(ホ)-A-V-1}$$

ここで、出力電流： I_{out} ，出力電圧： V_{out} ，熱電圧： V_{th} ，光電流： I_{ph} ，逆方向飽和電流： I_0 ，直列抵抗： R_s ，並列抵抗： R_{sh} ，ダイオード係数： n である。未知の 5 パラメータとなる光電流、逆方向飽和電流、直列抵抗、並列抵抗、ダイオード係数については、理論式を変形し、パラメータを順番に変化させ、前後での解の差が収束するまで繰り返し計算する手法を開発した。参照基準用 I-V 特性の算出精度検証として、産業技術総合研究所において標準試験条件における出力を測定したモジュールを用い、このモジュールの屋外における実測 I-V 特性を真値として、屋外測定と同じ照度・温度条件下において算出した参照基準用 I-V 特性と比較することで、算出精度を評価した結果、異なる 4 つの照度・温度条件下において、中間目標である 3%以下の誤差で最大出力が算出できる事が確認できた。

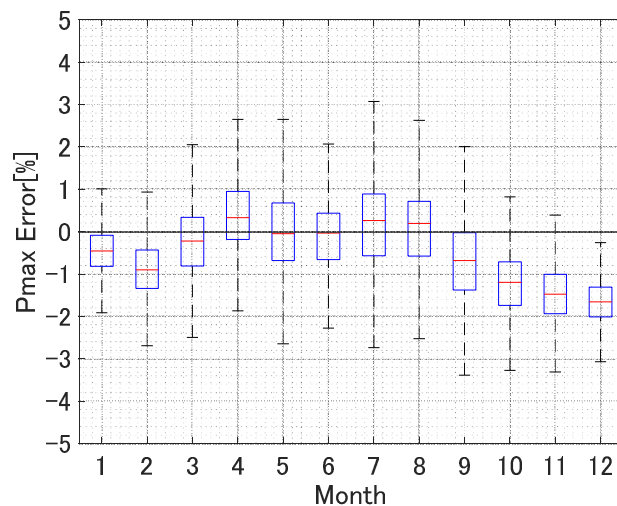
次に、実際の PV モジュール、ストリングにこの測定手法を適用し、屋外設置状態で自然太陽光を用いて測定可能な高精度な性能評価技術の開発を行った。屋外測定では、日射強度や日射変動に対してあらかじめ定めた測定条件下において、実際に太陽電池ストリングの I-V カーブを高速挿引により測定し、これを参照基準 I-V カーブと比較することにより、定量的に発電性能を評価する。これらの流れを図 III-2-(ホ)-A-V-1 に示す。通常、屋外測定において得られる測定条件は STC であることは極めて稀であり、日射、太陽電池モジュール温度ともに様々である(図 III-2-(ホ)-A-V-1 A)。一方、太陽電池

モジュールの銘板値としては、短絡電流(I_{sc})、開放電圧(V_{oc})、最大出力動作点における電力(P_{max})、電流(I_{pmax})、電圧(V_{pmax})が得られる(図Ⅲ-2-(ホ)-A-V-1 B)。開発手法では、これら I-V 平面上の3点の情報を用いて、1 ダイオードモデルを用いて I-V カーブを算出し、これを実測条件に換算し、参照基準 I-V カーブとする(図Ⅲ-2-(ホ)-A-V-1 C)。最後に、算出した参照基準 I-V カーブと実測 I-V カーブを比較することで、銘板値性能に対する発電性能を得る(図Ⅲ-2-(ホ)-A-V-1 D)。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-V-1 開発した発電性能測定手法の流れ

太陽電池モジュールの屋外における I-V 特性の連続測定データ、太陽電池モジュール・ストリングの屋外における I-V 特性の高速挿引による連続測定データを用いて、日射強度 $300\text{W}/\text{m}^2$ 以上のデータに対して、I-V 測定前後の日射強度の変化が 0.5% 以下を条件として評価を行った。図Ⅲ-2-(ホ)-A-V-2 には、AIST が佐賀県鳥栖市 AIST 九州センターにおいて計測したモジュールを 10 枚直列にした屋外ストリングデータを用いた評価結果として、各月の最大出力の算出精度を示す。図Ⅲ-2-(ホ)-A-V-2 に示す通り、 $\pm 1.0\%$ (1σ)以内の再現性を得たことにより、最終目標を達成した。



図Ⅴ-2 PV ストリングにおける測定・評価結果

VI) 屋外実性能高能率測定技術の開発 (JET)

- (1) 薄膜系モジュールを含む市販太陽電池モジュールのオンサイトでの屋外高精度評価技術の確立
JET 電力技術試験所屋上に結晶シリコン系試験モジュールを PVMS (結晶系シリコンモジュール) に隣

接して設置し、1か月間、収集した I-V 高速測定（測定時間：200ms）データから、照度、温度の異なる 4 条件における I-V 測定値の再現性精度を調べた。短絡電流（Isc）、開放電圧（Voc）、最大電力（Pmax）とも、測定再現性精度が±2%（1σ）以内であることを確認した（図Ⅲ-2-(ホ)-A-VI-1 参照）。

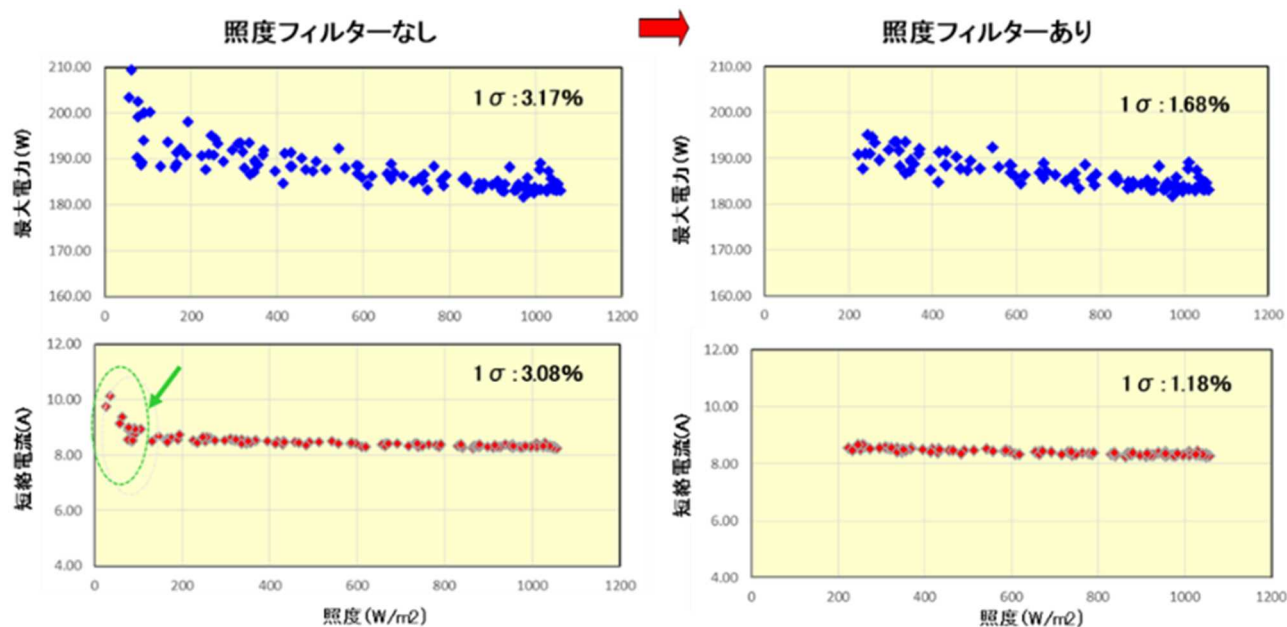
試験モジュールでの検証に続き、JET 曝露試験所およびメガソーラーで実稼働中の結晶シリコン系モジュールを対象に高速 I-V 測定（測定時間：200ms）を行い、「測定再現性精度が±2%（1σ）以内」を確認した。更に薄膜 CIGS 系モジュールにおいても、結晶シリコン系太陽電池モジュールと同様に「測定再現性精度が±2%（1σ）以内」を確認した。



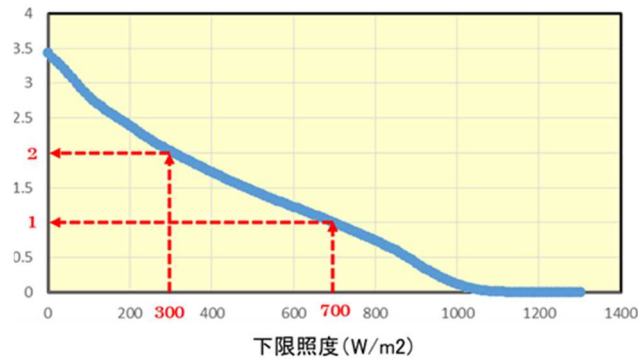
図Ⅲ-2-(ホ)-A-VI-1 (左) JET 電力技術試験所屋上に設置した結晶シリコン系モジュールと PVMS (右) 短絡電流・開放電圧・最大電力の測定再現性精度 (JET 屋上結晶シリコン系モジュール)

(2) 屋外高精度評価技術高能率化のための基本技術開発と検証

太陽電池モジュールの1年間の I-V 測定データを用いて、AIST が開発した新規 STC 補正法の適用条件を調査し、「照度：200W/m²以上」および「測定前後の照度変動：0.5%以下」を条件とすればバラツキは±2%（1σ）以内に収まることを確認した（図Ⅲ-2-(ホ)-A-VI-2 参照）。また1年間の日射照度の測定データを用いて、「測定の高エネルギー化」に関する定量的な検証を行い、照度適用条件を「300W/m²以上」にすると、従来の屋外測定条件である「700W/m²以上」と比較して測定可能時間が倍増することを確認した（図Ⅲ-2-(ホ)-A-VI-2 参照）。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-VI-2 (左) STC 補正後の最大電量・短絡電流の照度依存性 (右) 照度フィルタの効果



図Ⅲ-2-(ホ)-A-VI-3 測定可能時間の照度適用条件依存性 (下限照度 700W/m² に対する相対値)

(3) 屋外高精度評価技術手法のガイドライン作成

本プロジェクト全体の開発成果を反映させて、将来ガイドラインを発行する際のベースとなり得る手順書「PVMS を用いた屋外環境下における高能率 I-V 特性測定方法」を作成した (図Ⅲ-2-(ホ)-A-VI-4 参照)。将来の想定ユーザーである O&M 業者へのヒアリングを実施し、好意的なコメントを得ることができた。

<p>手順書「PVMSを用いた屋外環境下における高能率I-V特性測定方法」</p> <p style="font-size: small;">2015～2019年度 成果報告書 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発共通基盤技術の開発(太陽光発電システムの信頼性評価技術等)(付録)</p>	<p>《測定手順(抜粋)》</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 日射計測用の「PVMS」および温度計測用の「温度センサー」を取り付ける。 ② I-V 特性測定器を取扱説明書に従って測定対象モジュールに接続する。 ③ 日射照度が「300W/m² 以上」であることを確認する。 なお、300W/m² 未満の場合は、天候の回復(日射量の増加)を待って再測定を行う。 ④ 日射照度変動が「±0.5%以下」であることを確認する。 なお、±0.5%を超える場合は、天候の回復(雲の動きの安定)を待って再測定を行う。 ⑤ 「100 ms 以上200 ms 以下」の測定時間でI-V 特性を計測する。 ⑥ I-V 特性測定前後の日射照度と、測定時の太陽電池モジュール裏面温度を記録する。
---	---

図Ⅲ-2-(ホ)-A-VI-4 手順書「PVMS を用いた屋外環境下における高能率 I-V 特性測定方法」の測定手順抜粋

2. 実用化・事業化見通し

- ・開発成果の IEC, JIS 規格等への標準化を推進して、太陽電池評価の国際整合性と公正な競争の基盤を強化する (IEC 規格 6 件の審議に参加し議論が進んでいる)。
- ・開発成果が業界団体や IEC, JIS 規格等に標準化される形で実用化する。太陽電池性能の温度照度依存性の新補正式に関する開発技術が IEC60891 で標準化にむけ審議中
- ・現在本研究で開発した屋外測定技術を反映した I-V テスタ、PV モジュール日射センサが一部実用化されている。更に開発した太陽電池モジュール屋外高精度測定技術、温度測定技術等が設置時試験やオンサイト性能測定に、計測値の精度を保証する標準的手法使用されることにより、モジュール測定的大幅な低コスト化が見込まれる。
- ・PVTEC の「屋外環境下における I-V 特性測定方法ガイドライン」に開発技術が盛り込まれており、今後の普及が見込まれる。
- ・JET の O&M 認証の屋外 I-V 特性測定法に開発技術が採用される予定である。
- ・太陽光発電システムの O&M において、システム評価時における高精度温度測定が評価精度を向上するためには重要となる。本研究開発成果は、屋外において実稼働するシステム評価の実用化・事業化に即応するものである。
- ・JET 「太陽光発電システムの定期点検及び不具合調査委に関するガイドラインについての報告書」を改訂する際に屋外 I-V 特性測定法に関する技術として追加を検討する予定である。(注: JET は 2015

年10月、第三者委員会「太陽光発電システム監視・点検技術に関する調査検討会」を設置し、「太陽光発電システムの定期点検及び不具合調査に関するガイドラインについての報告書」を纏め、太陽エネルギー学会より2016年7月1日に発行しました。同日、本ガイドラインを「JET 太陽光発電システムの定期点検及び不具合調査に関するガイドライン」に制定し、これを基に2016年8月1日よりJETPVO&M 認証事業を開始しております。）

3. 波及効果

- ・本プロジェクトによって大幅に改善された新型太陽電池評価技術、一次基準太陽電池校正技術開発の成果がメーカー、試験所等に普及することより、太陽電池デバイス開発・高効率化・低コスト化が促進される。国際整合性が確保されることと併せて、太陽光発電の社会的信頼性と価値が改善される。
- ・本プロジェクト開発した技術によって、実際のモジュール、ストリング、アレイが銘板値に対してどのくらいの発電性能を維持しているかを屋外測定において評価可能とすることで、測定時間の短縮など効率的な維持管理が可能になることが期待できる。改正FIT法により発電事業者に求められる維持管理において、本手法を用いることにより、太陽電池モジュールを取り外して屋内測定が可能な施設まで運搬し屋内測定装置を用いて出力を測定することなく、屋外において実環境下で出力を測定し、出力が低下したモジュールの保証適用の判断を行うことが可能となれば、取り外し、運搬、屋内測定などの維持管理のためのコストの低減が期待できる。
- ・本研究開発成果である高精度太陽電池温度測定技術は、各種太陽電モジュール評価において応用可能である。
- ・開発したスペクトルミスマッチ補正技術と PVMS による照度補正を組み合わせることによって、ワイドギャップな CdTe や今後の活躍が期待されるペロブスカイトやワイドギャップ化された CIS 系薄膜太陽電池の I_{sc} を精度良く補正可能となる。これらの技術は、上記の太陽電池の高精度屋外実証評価に活用される。
- ・屋外測定による性能評価は、発電所のリパワリングや中古市場の拡大など、今後もニーズが拡大することが想定される。低コストで高精度な測定が可能な本技術の活用が期待される。

4. 今後の展開

- ・新たに開発される新型太陽電池に対応した測定技術開発と共に、世界的な動きとして基本的な測定精度（不確かさ）の改善が進む。
- ・開発した手法を用いて北杜メガソーラーにおける I-V 特性の測定結果と参照基準用 I-V 特性を比較した結果、太陽電池セルの種類、電極構造の違い、モジュールの構造の違いなどにより、短絡電流の推定値と実測値の差が大きい場合があった。これは屋外における直達・散乱日射比の違いや入射角の影響を受けている事が原因として考えられるため、引き続き高精度化に向けたモデルの開発を継続する。
- ・今後の研究によって開発技術の応用により、モジュールを複数直列した PV ストリングや稼働中の高精度システム計測の実現が期待される。
- ・本研究の成果を応用して、PVMS を用いたシステムの瞬時性能の高精度高速測定の実現等、現状技術に比べて大幅な O&M の低コスト化・高精度化、および不具合検出の迅速化・高精度化が実現可能となる。その際にシステムサイズでの日射スペクトル変動補正技術、温度計測補正技術等がより重要となる。
- ・太陽電池の温度計測手法において、IEC 等の標準化への展開が考えられる。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)				2(1)	1	3(1)
論文 査読有	2	6	5	10	7	30
研究発表・講演 (うち国際会議)	17(6)	32(12)	46(24)	37(11)	25(7)	157(60)
新聞・雑誌等への掲載	2	1	1			4
その他(受賞)			2	2		4

(2020年8月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	産総研	特願 2018-163081	国内	2018.8	出願済	特性推定装置およびコンピュータに実行させるためのプログラム	菱川善博, 吉田正裕
2	産総研	PCT/JP2019/008145	PCT	2019.3	出願済	光電変換素子の電流-電圧特性の推定方法、その推定方法をコンピュータを実行させるプログラム、そのプログラムを記録した記録媒体および特性推定装置	菱川善博, 吉田正裕
3	産総研	産総研ノウハウ 2020NOH-1246		2020.1		小領域温度制御の高度化	猪狩真一, 武田俊輔

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Martina. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop	産総研	Solar cell efficiency tables (version 46)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 23 (2015) 805-812	有	2015/6/16
2	Martina. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop	産総研	Solar cell efficiency tables (version 47)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 24 (2015) 3-11	有	2015/11/24
3	Y. Hishikawa, H. Shimura, T. Ueda, A. Sasaki, and Y. Ishii	産総研	Precise Performance Characterization of Perovskite Solar Cells	Current Applied Science 16 (2016) 896-904	有	doi: 10.1016/j.cap. 2016.05.002
4	Martina. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop	産総研	Solar cell efficiency tables (version 48)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 24 (2016) 905-913	有	2016/6/17
5	Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, and H. Ohshima	産総研	Precise Outdoor PV Module Performance Characterization Under Unstable Irradiance	IEEE J. Photovol. 6 (2016) 1221-1227	有	2016/6/10
6	Martina. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, and Ewan D. Dunlop	産総研	Solar cell efficiency tables (version 49)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25 (2017) 3-13	有	2017/2/17

7	Martina. Green, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl - Ebinger, and Anita W.Y. Ho - Baillie	産総 研	Solar cell efficiency tables (version 50)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25 (2017) 668-676	有	2017/6/21
8	Yoshihiro Hishikawa, Takuya Doi, Michiya Higa, Hironori Ohshima, Takakazu Takenouchi, and Kengo Yamagoe	産総 研	Effects of synchronous irradiance monitoring and correction of I-V curves on the outdoor performance measurements of PV Modules	Jpn. J. Appl. Phys. 56-8S2 (2017) 08MD07	有	2017/7/27
9	E. Salis, D. Pavanello, M. FiELD, U. Krälingb, F. Neuberger, K. Kiefe, C. Osterwal, S. Rummel, D. Levi, Y. Hishikawa, K. Yamagoe, H. Ohshima, M. Yoshita, H. Müllejansa	産総 研	Improvements in world- wide intercomparison of PV module calibration	Solar Energy 155 (2017) 1451-1461	有	2017/9/14
10	Martina. Green, Yoshihiro Hishikawa, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl - Ebinger, and Anita W.Y. Ho - Baillie	産総 研	Solar cell efficiency tables (version 51)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 26 (2018) 3-12	有	2017/12/14
11	Yoshihiro Hishikawa, Takuya Doi, Michiya Higa, Kengo Yamagoe, Hironori Ohshima, Takakazu Takenouchi, and Masahiro Yoshita	産総 研	Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I-V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules	IEEE J. Photovol. 8 (2018) 48-53	有	2017/11/28
12	Y. Hishikawa, M. Yoshita, H. Ohshima, K. Yamagoe, H. Shimura, A. Sasaki, and T Ueda	産総 研	Temperature dependence of the short circuit current and spectral responsivity of various kinds of crystalline silicon photovoltaic device	Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) 08RG17	有	2018/7/20
13	Martina. Green, Yoshihiro Hishikawa, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl - Ebinger, and Anita W.Y. Ho - Baillie	産総 研	Solar cell efficiency tables (version 52)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 26 (2018) 427-436	有	2018/6/19
14	Martina. Green, Yoshihiro Hishikawa, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl - Ebinger, Masahiro Yoshita, and Anita W.Y. Ho - Baillie	産総 研	Solar cell efficiency tables (version 53)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 27 (2019) 3-12	有	2018/12/25
15	Yoshihiro Hishikawa, Takakazu Takenouchi, Michiya Higa, Kengo Yamagoe, Hironori Ohshima, and Masahiro Yoshita	産総 研	Translation of Solar Cell Performance for Irradiance and Temperature from a Single I-V Curve Without Advance Information of Translation Parameters	IEEE J. Photovol. 9 (2019) 1195-1201	有	2019/8/13

16	Martina. Green, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, and Anita W. Y. Ho-Baillie	産総研	Solar cell efficiency tables (version 54)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 27 (2019) 565-575	有	2019/6/20
17	Martina. Green, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl-Ebinger, Masahiro Yoshita, and Anita W. Y. Ho-Baillie	産総研	Solar cell efficiency tables (version 55)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 28 (2020) 3-15	有	2019/12/20

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Satoshi Nakamura, Kensuke Nishioka	宮崎大	Reduction of temperature in silicon photovoltaic module using thermal radiation coating	MATEC Web of Conferences, 65, 04001	有	2016/07/06
2	小園 茂平, 西岡 賢祐	宮崎大	フラット型追尾式太陽光発電システムの平均空力特性と特有の効果	日本機械学会論文集, Volume82, Number839, 16-00023	有	2016/07/25
3	Kensuke Nishioka, Kazuyuki Miyamura, Yasuyuki Ota, Minoru Akitomi, Yasuo Chiba, and Atsushi Masuda	宮崎大	Accurate measurement and estimation of solar cell temperature in photovoltaic module operating in real environmental conditions	Japanese Journal of Applied Physics, Volume57, Number8S3, 08RG08-1 - 08RG08-5	有	2018/07/13
4	Nawwar Ahmad, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota	宮崎大	Influence of Wind Speed and Direction on Cooling Effect for Concentrator Photovoltaic Module Investigated Using Wind Tunnel	Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, Volume11, Issue4, 407-410	有	2018/11/01

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	M. Tsuji, Md. M. Rahman, Y. Hishikawa, K. Nishioka, T. Minemoto.	立命館大、 産総研、 宮崎大	Uniqueness verification of solar spectrum obtained from three sites in Japan based on similar index of average photon energy.	Solar Energy 173 (2018) 89-96. (Elsevier).	有	2018年7月
2	J. Chantana, Y. Horio, Y. Kawano, Y. Hishikawa, T. Minemoto.	立命館大、 産総研	Spectral mismatch correction factor for precise outdoor performance evaluation and description of performance degradation of different-type photovoltaic modules.	Solar Energy 181 (2019) 169-177. (Elsevier).	有	2019年1月
3	Y. Imai, J. Chantana, Y. Kawano, Y. Hishikawa, T. Minemoto	立命館大、 産総研	Description of performance degradation of photovoltaic modules using spectral mismatch correction factor under different irradiance levels.	Renewable Energy 141 (2019) 444-450. (Elsevier).	有	2019年4月
4	J. Chantana, Y. Imai, Y. Kawano,	立命館大、 産総研、 宮崎大	Impact of average photon energy on spectral gain and loss of various-type PV technologies at	Renewable Energy 145 (2020) 1317-	有	2019年6月

	Y. Hishikawa, K. Nishioka, T. Minemoto		different locations.	1324. (Elsevier).		
5	K. Nakayama, M. Tsuji, J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura, T. Minemoto	立命館大	Description of short circuit current of outdoor photovoltaic modules by multiple regression analysis.	Renewable Energy 147 (2020) 895-902. (Elsevier).	有	2019年9月
6	M. Tsuji, J. Chantana, K. Nakayama, Y. Kawano, Y. Hishikawa, T. Minemoto	立命館大、 産総研	Utilization of spectral mismatch correction factor for estimation of precise outdoor performance under different average photon energies.	Renewable Energy 157 (2020) 173-181. (Elsevier).	有	2020年5月

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Zhang, J., K. Watanabe, J. Yoshino, T. Kobayashi, Y. Hishikawa, T. Doi	岐阜大学, 産総研	Filtering method of detecting solar irradiance conditions for photovoltaic module performance characterization under unstable and nonuniform irradiance	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, 08RG10, 8p.	有	2018年
2	Zhang, J., K. Watanabe, J. Yoshino, T. Kobayashi, Y. Hishikawa, T. Doi	岐阜大学, 産総研	Physical process and statistical properties of solar irradiance enhancement observed under clouds	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, 08RG11, 7p.	有	2018年
3	Zhang, J., K. Watanabe, J. Yoshino, T. Kobayashi, Y. Hishikawa, T. Doi	岐阜大学, 産総研	Short-period fluctuation and spatial distribution of solar irradiance under clouds	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, 08RG12, 7p.	有	2018年

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Y. Hishikawa, K. Yamagoe, H. Ohshima et al	産総研	New Technology for Precise Outdoor PV Module Performance Measurements	42nd IEEE PVSC, New Orleans (2015)	2015/6/14
2	Y. Hishikawa, A. Sasaki, H. Shimura, T. Ueda, and Y. Ishii,	産総研	Accurate performance measurement procedure for Perovskite solar cells	PVSEC-25, Busan (2015)	2015/11/15
3	S. Igari, K. Okubo	産総研	Development and positioning of absolute cavity radiometer for controlling uncertainty of indoor calibration of reference PV devices	IPC-X II Symposium, Davos (2015)	2015/9/28
4	Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, K. Masuda and H. Wakabayashi	産総研	Precise Outdoor PV Performance Measurements at Various Irradiance Levels	43rd IEEE PVSC, Portland (2016)	2016/6/5

5	Y. Hishikawa, H. Ohshima, M. Higa, K. Yamagoe, and T. Doi	産総研	Precise Determination of the STC I-V Curves by Wide-Range Linear Extrapolation of Outdoor I-V Curves on Partly Sunny Days	32nd EUPVSEC (2016)	2016/6/20
6	Y. Hishikawa, H. Ohshima, M. Higa, K. Yamagoe and T. Doi,	産総研	Effects of Synchronous Irradiance Monitoring and Correction of I-V Curves on the Outdoor Performance Measurements of PV Modules	PVSEC-26, Singapore (2016)	2016/10/26
7	Y. Hishikawa	産総研	Precise characterization of novel PV cells and modules	PVSEC-26, Singapore (2016)	2016/10/26
8	T. Doi, Y. Hishikawa, M. Higa, H. Ohshima and K. Yamagoe	産総研	PV Module Irradiance Sensor for Outdoor Precise Irradiance Measurement - Structure and Response Property to the Module Under Test -	PVSEC-26, Singapore (2016)	2016/10/27
9	G. Siefer, and Y. Hishikawa	産総研	Solar Cell and Module Characterization	Tutorial in the 44th IEEE PVSC, Washington DC	2017/6/25
10	Y. Hishikawa, M. Yoshita, H. Shimura, A. Sasaki and T. Ueda	産総研	Precise I-V Curve Measurement Procedure for Perovskite Solar Cells: Application to Various Types of Devices	the 44th IEEE PVSC (2017)	2017/6/26
11	Y. Hishikawa, H. Ohshima, M. Higa, K. Yamagoe, T. Takenouchi, and T. Doi	産総研	Extended linear interpolation/extrapolation procedure for accurate and versatile translation of the I-V curves of PV cells and modules	the 44th IEEE PVSC (2017)	2017/6/27
12	Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, T. Takenouchi, H. Ohshima, and K. Yamagoe	産総研	Reproducible outdoor I-V curve measurement by the use of PV module irradiance sensors and comparison with indoor results	33rd EUPVSEC 2017	2017/9/25
13	Yoshihiro Hishikawa, Masahiro Yoshita, Hironori Ohshima, Kengo Yamagoe, Haruya Shimura, Ayumi Sasaki, Takashi Ueda	産総研	Temperature dependence of the short circuit current and spectral response of various kinds of crystalline silicon PV devices	PVSEC-27, Otsu	2017/11/13
14	Yoshihiro Hishikawa, Takuya Doi, Michiya Higa, Takakazu Takenouchi, Hironori Ohshima, Kengo Yamagoe	産総研	Factors for improving the precision of outdoor photovoltaic performance measurement	PVSEC-27, Otsu	2017/11/13
15	Takuya Doi, Yoshihiro Hishikawa, Michiya Higa, Takakazu Takenouchi, Hironori Ohshima, Kengo Yamagoe	産総研	PV module irradiance sensor for precise outdoor measurement- structure, response similarity and angular dependence comparison with the module under test -	PVSEC-27, Otsu	2017/11/13
16	Masahiro Yoshita, Ayumi Sasaki, Takashi	産総研	Fast temporal responses of spectral responsivities in	PVSEC-27, Otsu	2017/11/13

	Ueda, Haruya Shimura, and Yoshihiro Hishikawa		emerging perovskite solar cells		
17	Masahiro Yoshita, Ayumi Sasaki, Takashi Ueda, Haruya Shimura, and Yoshihiro Hishikawa	産総研	Validation of measurement protocols applicable to performance characterization of various emerging solar cells	PVSEC-27, Otsu	2017/11/13
18	Haruya Shimura, Masahiro Yoshita, Yoshihiro Hishikawa	産総研	Shading effect in performance evaluations of crystalline silicon bare cells	PVSEC-27, Otsu	2017/11/13
19	Gerald Siefer, Yoshihiro Hishikawa	産総研	Measurement Method of the PV Array Performance by using PVMS and Outdoor Measured I-V Curve	WCPEC-7 World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/6/10
20	Masahiro Yoshita	産総研	EVALuation method for perovskite solar cELls at "AIST"	International workshop on Evaluation method for perovskite solar cells, Tsukuba (2019)	2019/1/30
21	Y. Hishikawa	産総研	Novel Devices Measurements and Outdoor Measurement Procedures	PV Module Forum 2019, Cologne	2019/2/12
22	Y. Hishikawa, M. Yoshita, T. Takenouchi, M. Higa, M. SeapNand K. Okajima	産総研	Performance Monitoring of PV Modules and Arrays for Reliability Evaluation	PVSEC-29, 2019, Xi' an	2019/11/4
23	Yoshihiro Hishikawa and Masahiro Yoshita, Performance Measurement of Perovskite Solar CELls at AIST	産総研	Standardization of the protocols for emerging PV technologies	Parallel session, 36th EUPVSEC 2019, Marseille	2019/9/12
24	Yoshihiro Hishikawa	産総研	Performance Measurement of state-of-the-art Perovskite PV Devices	2020 International workshop on standardization of measurement protocols for perovskite solar cells, Tsukuba	2020/1/23
25	菱川善博	産総研	太陽電池の高精度性能評価技術～ペロブスカイト太陽電池評価の特徴	日本学術振興会第175委員会 有機系太陽電池分科会 第2回研究会	2015/7/17
26	菱川善博	産総研	太陽電池性能評価技術の現状	第11回有機太陽電池シンポジウム 京都大学宇治キャンパス	2015/7/17
27	菱川善博, 土井卓也, 比嘉道也, 山越憲吾, 大島博典, 増田幸治, 若林始	産総研 JET	太陽電池屋外高精度評価技術～幅広い日射強度・温度範囲における高精度測定の検討～	2015年度日本太陽エネルギー学会/風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26
28	菱川善博, 志村陽哉, 上田孝, 佐々木あゆ美, 石井勇希	産総研	ペロブスカイト太陽電池の高精度性能評価技術	2015年度日本太陽エネルギー学会/風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26
29	菱川善博, 比嘉道也	産総研	薄膜太陽電池の光照射効果を含めた性能評価技術	2015年度日本太陽エネルギー学会/風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26

30	土井卓也, 菱川善博, 比嘉道也, 大島博典, 山越憲吾	産総研	PV モジュール日射センサ構造の最適化～ダミーセルサイズの影響評価に関する予備試験結果	2015 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26
31	猪狩真一, 高瀬滝男, 小久保順一, 渡邊良一, 周泓	産総研	分光放射照度測定高精度化等による一次基準太陽電池セル校正技術の高度化	2016 年電気学会全国大会	2016/3/18
32	薛雁群, 猪狩真一	産総研	高分解能太陽光スペクトルの生成	日本学術振興会 産学協力研究委員会 第 175 委員会 第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
33	猪狩真一, 高瀬滝男, 小久保順一, 渡邊良一, 周泓	産総研	トレーサビリティ技術開発と基準太陽電池校正技術の高度化	日本学術振興会 産学協力研究委員会 第 175 委員会 第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
34	猪狩真一, 高瀬滝男, 渡邊良一, 小久保順一, 周泓	産総研	基準太陽電池校正技術の高度化	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016 (ポスター講演)	2016/6/15
35	土井卓也, 菱川善博, 比嘉道也, 大島博典, 山越憲吾	産総研	太陽電池屋外高精度測定用 PV 日射計測	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016 (ポスター講演)	2016/6/15
36	菱川善博, 比嘉道也, 土井卓也, 大島博典, 山越憲吾	産総研	屋外高精度性能評価技術	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016 (ポスター講演)	2016/6/15
37	菱川善博, 石井勇希, 上田孝, 佐々木あゆ美, 志村陽哉	産総研	ペロブスカイト太陽電池測定技術	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016 (ポスター講演)	2016/6/15
38	薛雁群, 猪狩真一	産総研	高分解能太陽光スペクトルの生成	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016 (ポスター講演)	2016/6/15
39	菱川善博, 比嘉道也, 山越憲吾, 土井卓也, 大島博典, 武内貴和, 増田幸治, 若林始	産総研 JET	太陽電池屋外高精度評価技術によるモジュール I-V 特性の高精度測定	2016 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
40	菱川善博, 増田淳, 土井卓也, 植田譲	産総研 東京理科大学	太陽電池屋外高精度評価技術の PV システム高精度計測, 診断への応用	2016 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
41	志村陽哉, 石井勇希, 吉田正裕, 菱川善博	産総研	両面受光型太陽電池の片面および両面照射時における実測電流値の線形性	2016 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
42	土井卓也, 菱川善博, 比嘉道也, 武内貴和, 大島博典, 山越憲吾	産総研	PV モジュール日射センサによる日射計測において法線ベクトルのブレが日射計測に及ぼす影響	2016 年度日本太陽エネルギー学会／日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
43	吉田正裕	産総研	新型太陽電池高精度性能評価技術	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017 (トピックス講演)	2017/6/13
44	菱川善博, 土井卓也, 比嘉道也, 武内貴和, 大島博典, 山越憲吾	産総研	太陽電池屋外高精度評価技術	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017 (ポスター講演)	2017/6/13
45	土井卓也, 菱川善博, 比嘉道也, 武内貴和, 大島博典, 山越憲吾	産総研	太陽電池屋外高精度測定用 PV 日射計測	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017 (ポスター講演)	2017/6/13

46	猪狩真一, 高瀬滝男, 小久保順一, 渡邊良一, 周泓	産総研	一次基準太陽電池校正の高度化	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2017 (ポスター講 演)	2017/6/13
47	高瀬滝男, 猪狩真一, 渡邊良一, 小久保順一	産総研	超高温定点点黒体炉の測光標準 利用技術	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2017 (ポスター講 演)	2017/6/13
48	渡邊良一, 猪狩真一, 小久保順一, 周泓	産総研	6分岐ファイバ型絶対放射計の 応答非直線性評価	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2017 (ポスター講 演)	2017/6/13
49	上田孝, 吉田正裕, 菱川善博	産総研	LBICによる受光面積境界評価	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2017 (ポスター講 演)	2017/6/13
50	志村陽哉, 石井勇希, 吉田正裕, 菱川善博	産総研	両面受光太陽電池の両面照射時 における実測電流値の線形性	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2017 (ポスター講 演)	2017/6/13
51	佐々木あゆ美, 上田孝, 志村陽哉, 石井勇希, 吉田正裕, 菱川善博	産総研	ペロブスカイト太陽電池の高精 度性能測定手法の開発と検証	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2017 (ポスター講 演)	2017/6/13
52	吉田正裕, 佐々木あゆ美, 上田孝, 志村陽哉, 石井勇希, 菱川善博	産総研	新型太陽電池高精度性能評価技 術	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2017 (ポスター講 演)	2017/6/13
53	菱川善博, 土井卓也, 比嘉道也, 武内貴和, 大島博典, 山越憲吾	産総研	屋外における太陽電池性能高精 度測定の要素技術	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2017 (ポスター講 演)	2017/6/13
54	土井卓也, 菱川善博, 比嘉道也, 武内貴和, 大島博典, 山越憲吾	産総研	屋外実測データによる PV モ ジュール日射センサの入射角特 性評価～各種型式の相互比較お よび各種市販モジュールとの比 較～	2017 年度日本太陽エネル ギー学会/風力エネル ギー学会合同研究発表会	2017/11/26
55	菱川善博, 武内貴和, 比嘉道也, 大島博典, 土井卓也, 植田譲	産総研 東京理科 大	太陽電池温度特性新補正式と性 能評価への応用	2018 年度電気学会全国大 会 7-025	2018/3/14
56	菱川善博, 吉田正裕, 大島博典, 山越憲吾	産総研	結晶シリコン太陽電池の電圧依 存性を考慮した新温度補正式と その応用	第 65 回応用物理学会春季 学術講演会 (早稲田大 学) 17p-D101-11	2018/3/17
57	菱川善博, 大島博典, 山越憲吾, 武内貴和, 比嘉道也, 吉田正裕	産総研	太陽電池特性の新しい温度補正 式と高精度化	日本学術振興会 産学協力 研究委員会 第 175 委員会 第 15 回 「次世代の太陽 光発電システム」シンポ ジウム	2018/7/12
58	吉田正裕, 佐々木あゆ美, 上田孝, 志村陽哉, 杉本和則, 菱川善博	産総研	両面受光型結晶 Si 太陽電池セル の高精度分光感度測定	日本学術振興会 産学協力 研究委員会 第 175 委員会 第 15 回 「次世代の太陽 光発電システム」シンポ ジウム	2018/7/12
59	菱川善博, 武内貴和, 比嘉道也, 大島博典, 山越憲吾, 吉田正裕	産総研	結晶シリコン太陽電池の新温度 補正式と I-V 特性の STC 補正へ の応用	2018 年第 79 回応用物理 学会秋季講演会 (名古屋 国際会議場) 21p-133-1	2018/9/21
60	猪狩真一, 小久保順一, 周泓	産総研	複数光源切替え型照射光源によ る分光放射計の直線性評価	2018 年度日本太陽エネル ギー学会/風力エネル ギー学会合同研究発表会	2018/11/9
61	菱川善博, 比嘉道也, 武内貴和, 吉田正裕	産総研	太陽電池屋外 I-V 特性の新しい STC 補正法	2018 年度日本太陽エネル ギー学会/風力エネル ギー学会合同研究発表会	2018/11/9

62	猪狩真一, 高瀬滝男, 小久保順一, 渡邊良一, 周泓	産総研	基準太陽電池校正技術の高度化	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
63	高瀬滝男, 猪狩真一, 渡邊良一, 小久保順一	産総研	測光標準としての超高温定点黒 体炉利用技術	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
64	渡邊良一, 猪狩真一	産総研	積分球光源法の高度化による分 光放射計用各種ディテクタの非 直線応答性評価	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
65	小久保順一, 猪狩真一	産総研	複数光源切り替えによる分光放 射計の非直線応答性の評価	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
66	菱川善博	産総研	I-V 特性から R_s , n , I_0 パラ メータの新しい抽出法と STC 補 正高精度化への応用	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
67	菱川善博	産総研	太陽電池屋外高精度測定技術の ストリング I-V 測定への応用	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
68	大島博典, 菱川善博, 山越憲吾, 吉田正裕	産総研	結晶シリコン太陽電池 I-V 特性 の新温度補正式	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
69	志村陽哉, 菱川善博, 吉田正裕	産総研	c-Si セル性能評価においてプ ローブ影が I_{sc} に与える影響お よびその見積方法	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
70	上田孝, 佐々木あゆ美, 菱川善博, 吉田正裕	産総研	高精度太陽電池セル測定のため の基準セルの反射の影響の評価	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (ポスター 講演)	2018/11/14
71	吉田正裕, 佐々木あゆ美, 上田孝, 志村陽哉, 杉本和則, 山越憲吾, 大島博典, 菱川善博	産総研	ペロブスカイト太陽電池性能評 価技術の開発	太陽光発電研究成果報告 会 2018 (ポスター講 演)	2018/11/14
72	吉田正裕	産総研	新型太陽電池性能評価技術の開 発	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (トピック講 演)	2018/11/14
73	菱川善博	産総研	屋外高精度性能評価技術~新 STC 補正法の開発~	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2018 (トピック講 演)	2018/11/14
74	薛雁群, 猪狩真一	産総研	太陽光発電性能評価における太 陽光スペクトルのシミュレー ション事例	ハイパースペクトル・マ ルチスペクトルデータの 計測と産業応用研究会	2018/12/10
75	菱川善博, 武内貴和, 比嘉道也, 大島博典, 山越憲吾, 吉田正裕	産総研	太陽電池変換効率の照度依存性 と性能評価への応用	2019 年度電気学会全国大 会 札幌	2019. 3. 12
76	菱川善博, 吉田正裕	産総研	I-V 特性の温度・照度依存性に 直列抵抗が及ぼす影響	日本学術振興会 産学協力 研究委員会 第 175 委員会 第 16 回「次世代の太陽 光発電システム」シンポ ジウム	2019. 7. 4
77	菱川 善博, 武内 貴和, 比嘉 道也, 吉田 正裕, Manit Seapan, 岡島 敬一 (筑波大学)	産総研	直並列接続された太陽電池モ ジュール I-V 特性の高精度評価	直並列接続された太陽電 池モジュール I-V 特性の 高精度評価	2019/10/17

78	吉田正裕, 志村陽哉, 上田孝, 山越憲吾, 杉本和則, 佐々木あゆ美, 菱川善博	産総研	新型太陽電池セルモジュールの 性能評価技術	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (トピック 口頭講演)	2019/12/18
79	菱川善博, 吉田正裕	産総研	I-V 特性の温度・照度依存性に 直列抵抗が及ぼす影響	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (トピック 口頭講演)	2019/12/18
80	志村陽哉, 上田孝, 杉本和則, 吉田正裕	産総研	MPPT によるペロブスカイト太陽 電池の性能評価	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (ポスター 講演)	2019/12/18
81	猪狩真一, 高瀬滝男, 小久保順一, 渡邊良一, 周泓	産総研	基準太陽電池校正の CMC と今後 の技術課題	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (ポスター 講演)	2019/12/18
82	高瀬滝男, 猪狩真一, 渡邊良一, 小久保順一	産総研	測光標準としての超高温定点黒 体炉利用技術	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (ポスター 講演)	2019/12/18
83	渡邊良一, 猪狩真一, 周泓, 武田俊輔	産総研	ディテクタの応答非直線性とピ コアンメータの非直線領域	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (ポスター 講演)	2019/12/18
84	武田俊輔, 猪狩真一	産総研	絶対放射計測の歴史的推移と精 度向上の為の技術課題	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (ポスター 講演)	2019/12/18
85	吉田正裕, 志村陽哉, 上田孝, 山越憲吾, 杉本和則, 佐々木あゆ美, 菱川善博	産総研	新型太陽電池セルモジュールの 性能評価技術	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (ポスター 講演)	2019/12/18
86	菱川善博, 吉田正裕	産総研	I-V 特性の温度・照度依存性に 直列抵抗が及ぼす影響	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (ポスター 講演)	2019/12/18
87	菱川善博, 比嘉道也, 武内貴和	産総研	PVMS を照度センサに用いた屋外 高精度性能評価技術	AIST 太陽光発電研究成果 報告会 2019 (ポスター 講演)	2019/12/18

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Nawwar Ahmad, Yasuyuki Ota and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Thermal heat reduction in Photovoltaic solar concentrator using thin film filter:	3rd International Conference on Nano and Materials Engineering	2015/04/02
2	Satoshi Nakamura, Kei Nomura and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Reduction of Photovoltaic Temperature using Thermal Radiation Coating	3rd International Conference on Nano and Materials Engineering	2015/04/02
3	坂本一将, 坊屋敷憂香, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	放熱塗装によるヒートシンクへの冷 却効果	第7回半導体材料・デバイ スフォーラム	2015/11/14
4	武智龍斗, 今井健太, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	太陽電池モジュールの高精度温度測 定方法の検討	2015年度日本太陽エネルギ ー学会・日本風力エネルギ ー学会合同研究発表会	2015/11/26
5	坊屋敷憂香, 坂本一将, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	集光型太陽電池モジュール筐体への 放熱塗装の有風時における冷却効果	2015年度日本太陽エネルギ ー学会・日本風力エネルギ ー学会合同研究発表会	2015/11/26

6	Satoshi Nakamura, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Reduction of Temperature in Silicon Photovoltaic Module Using Thermal Radiation Coating	5th International Conference on advanced Materials and Engineering Materials	2016/04/16
7	Satoshi Nakamura, Kazumasa Sakamoto and Kensuke Nishioka	UnI-Versity of Miyazaki	Reduction of Temperature in Concentrator Photovoltaic Module Using Coating with High Thermal Emissivity and Conductivity	5th InterNatioNal Conference oNadvanced Materials and Engineering Materials	2016/04/16
8	Nawwar Ahmad, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota	UnI-Versity of Miyazaki	Influence of wind speed and direction on cooling effect for concentrator photovoltaic module investigated using wind tunnel	The 2016 International Conference on advanced ELectronic Science and Technology	2016/08/20
9	森岡佐知子, 坂本一将, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	屋外太陽電池モジュール温度計測の応答性を向上させる温度センサの検討	2016年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表n 会	2016/11/24
10	奥本知記, 坂本一将, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	有風時における太陽電池モジュール面内温度分布の計測および検討	2016年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
11	Sakutaro Miyajima, Kensuke Nishioka, Yoshihiro Hishikawa	University of Miyazaki	Non-contact Voltage Measurement of Solar Cell with ELectrostatic Voltmeter	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06/25
12	奥本知記, 西岡賢祐	宮崎大学	屋外有風条件下における太陽電池モジュール温度分布の検討	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07/20
13	宮島朔太郎, 西岡賢祐, 菱川善博	宮崎大学	静電電位計を用いた太陽電池モジュール内セルの非接触高精度電圧計測	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/07/20
14	Kensuke Nishioka, Kazuyuki Miyamura, Yasuyuki Ota, Minoru Akitomi, Yasuo Chiba, Atsushi Masuda	University of Miyazaki	ACCURATE MEASUREMENT AND ESTIMATION OF SOLAR CELL TEMPERATURE IN PHOTOVOLTAIC MODULE OPERATING IN REAL ENVIRONMENTAL CONDITIONS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12
15	Kazuki Okumoto, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	TEMPERATURE DISTRIBUTION IN PHOTOVOLTAIC MODULE OPERATING IN REAL ENVIRONMENTAL CONDITIONS	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12
16	Sakutaro Miyajima, Yasuyuki Ota, Yoshihiro Hishikawa, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	ACCURATE VOLTAGE MEASUREMENT OF SOLAR CELLS IN MODULE STRUCTURE USING A NON-CONTACTING ELECTROSTATIC VOLTMETER	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12
17	Sakutaro Miyajima, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Non-contact voltage measurement of solar cell in module structure using electrostatic voltmeter	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017/11/18

18	Kazuki Okumoto, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Characteristics of photovoltaic module's temperature distribution during outdoor operation	Korea-Japan Top University League Workshop on Photovoltaics 2017	2017/11/18
19	K. Okumoto, K. Miyamura & K. Nishioka	University of Miyazaki	Optimum Condition for Accurate Measurement of Photovoltaic Array Temperature	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2018/09/24
20	Rie Shibata, Kazuki Okumoto, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Heat Transfer Simulation for Car-Roof Photovoltaic Modules	7th Korea - Japan Joint Seminar on PV	2018/11/15
21	奥本知記, 西岡賢祐	宮崎大学	屋外における高精度太陽電池温度計測法の確立	第3回フロンティア太陽電池セミナー	2018/12/13
22	宮島朔太郎, 西岡賢祐	宮崎大学	静電電位計を用いた太陽電池モジュールの非接触電圧測定法	第3回フロンティア太陽電池セミナー	2018/12/13
23	Kazuki Okumoto, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Establishment of Highly Accurate PV Temperature Measurement Method in Real Environmental Conditions	International Symposium on Solar Energy Materials	2019/01/25
24	Sakutaro Miyajima, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Non-Contact Voltage Calculation Method of Photovoltaic Module Using Electrostatic Electrometer	International Symposium on Solar Energy Materials	2019/01/25
25	Sakutaro Miyajima, Akira Nagaoka, and Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Accurate voltage measurement of a photovoltaic module by a non-contact electrostatic voltmeter	2019 5th International Conference on Environment and Renewable Energy	2019/02/25
26	前田進行, 西岡賢祐	宮崎大学	屋外有風条件下における太陽電池モジュール温度分布の検討	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07/04
27	柴田梨瑛, 西岡賢祐	宮崎大学	車載太陽電池の走行時における温度解析シミュレーション	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/07/04
28	Michiyuki Maeda, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Examination of photovoltaic module temperature distribution under outdoor conditions	8th MALAYSIA-JAPAN JOINT WORKSHOP ON PHOTOVOLTAIC SYSTEMS	2019/09/26
29	Ryo Shimizu, Kensuke Nishioka	University of Miyazaki	Accurate Voltage Measurement of PV Module and Cell by Non-contacting Electrostatic Voltmeter	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/04
30	清水凌, 西岡賢祐	宮崎大学	表面電位計を用いた太陽電池モジュール内セルの非接触測定および電流電圧特性	第4回フロンティア太陽電池セミナー	2019/11/25
31	前田進行, 西岡賢祐	宮崎大学	Pspiceシミュレーションによる太陽電池アレイ温度分布を考慮した出力解析	第4回フロンティア太陽電池セミナー	2019/11/25

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	H. Mano, A. Kamei, D. Hironiwa, T. Minemoto	立命館大	Impact of average photon energy on short circuit current of Si photovoltaic modules from calculation.	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (Busan, Korea).	2015年11月

2	堀尾雄平, 眞野裕之, 峯元高志.	立命館大	屋外における太陽電池セルの短絡電流値を用いた太陽光スペクトル指標の算出.	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(アオーレ長岡, 新潟).	2016年5月
3	眞野裕之, 堀尾雄平, 今井佑里恵, 峯元高志.	立命館大	太陽電池の量子効率を用いた太陽光スペクトル指標算出法の検証.	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(アオーレ長岡, 新潟).	2016年5月
4	Y. Horio, H. Mano, Md. R. Mijanur, Y. Hishikawa, T. Minemoto.	立命館大、 産総研	Impact estimation of average photon energy of solar spectrum on short circuit current of Si based photovoltaic modules.	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (Singapore).	2016年10月
5	H. Mano, Y. Horio, Md. R. Mijanur, Y. Hishikawa, T. Minemoto.	立命館大、 産総研	Correlation of short circuit current ratio of various photovoltaic modules and average photon energy of solar spectrum.	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (Singapore).	2016年10月
6	堀尾雄平, 今井佑里恵, 達雅基, MD. Mijanur Rahman, 菱川善博, 峯元高志.	立命館大、 産総研	スペクトル指標を用いた薄膜太陽電池の短絡電流値補正の高精度化.	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(名古屋大学, 愛知).	2017年7月
7	今井佑里恵, 堀尾雄平, 達雅基, MD. Mijanur Rahman, 菱川善博, 峯元高志.	立命館大、 産総研	短絡電流値補正による屋外設置太陽電池の発電性能の経時変化解析.	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(名古屋大学, 愛知).	2017年7月
8	Y. Horio, Y. Imai, M. Tsuji, Md. M. Rahman, Y. Hishikawa, T. Minemoto.	立命館大、 産総研	Precise short circuit current correction of a Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ photovoltaic module using spectral index.	International workshop on high efficiency CIGS solar cells (Otsu, Japan).	2017年11月
9	Y. Horio, Y. Imai, M. Tsuji, Md. M. Rahman, Y. Hishikawa, T. Minemoto.	立命館大、 産総研	Precise short circuit current correction of thin-film photovoltaic module using spectral index.	International workshop on high efficiency CIGS solar cells (Otsu, Japan).	2017年11月
10	Y. Imai, Y. Horio, M. Tsuji, MD. M. Rahman, Y. Hishikawa, T. Minemoto.	立命館大、 産総研	Analysis of temporal change in outdoor photovoltaic performance using the corrected short circuit current.	International workshop on high efficiency CIGS solar cells (Otsu, Japan).	2017年11月
11	達雅基, 今井友里恵, 中山浩市, 河野悠, 菱川善博, 峯元高志.	立命館大、 産総研	太陽電池モジュールのスペクトルミスマッチ補正に対する照度の影響.	第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(ホテルさっぽろ芸文館, 北海道).	2018年7月
12	達雅基, 中山浩市, 竹口皓太, 河野悠, 菱川善博, 峯元高志.	立命館大、 産総研	極端なブルーリッチ時における太陽電池モジュールのスペクトルミスマッチ補正の有用性検討.	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(宮崎市民プラザ, 宮崎).	2019年7月
13	中山浩市, 達雅基, 竹口皓太, 河野悠, 菱川善博, 峯元高志.	立命館大、 産総研	重回帰分析を用いた各種太陽電池モジュールの短絡電流予測.	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(宮崎市民プラザ, 宮崎).	2019年7月
14	M. Tsuji, K. Nakayama, K. Takeguchi, J. ChantaNa, Y. Kawano, Y. Hishikawa,	立命館大、 産総研	Suitable range of average photon energy in spectral mismatch correction for thin photovoltaic modules.	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (Xi'an, ChiNa).	2019年11月

T. Minemoto				
-------------	--	--	--	--

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Zhang, J., T. Kobayashi	岐阜大学	Characteristics of Solar Irradiance Fluctuation and Corresponding Weather Condition	PVSEC-26	2016年10月
2	張 浚芳, 小林智尚, 吉野 純	岐阜大学	PV モジュールセンサーによる日射変動の高速測定と大気状態との関係	太陽／風力エネルギー研究発表会 2016,	2016年11月
3	張浚芳, 渡邊光太, 小林智尚, 吉野 純	岐阜大学	太陽光パネル屋外性能評価に関わる日射強度急変時の解析	電気学会全国大会講演研究発表会	2017年3月
4	渡邊 光太, 張 浚芳, 吉野 純, 小林智尚, 菱川善博, 土井卓也	岐阜大学, 産総研	日射の短周期時空間変動と大気・雲の状態との関係	太陽／風力エネルギー研究発表会 2017	2017年10月
5	張 浚芳 渡邊 光太 吉野 純 小林智尚 菱川善博 土井卓也	岐阜大学, 産総研	屋外太陽光モジュール性能評価のための日射変動低減フィルタ法の提案	太陽／風力エネルギー研究発表会 2017	2017年10月
6	Zhang, J., K. WataNabe, J. Yoshino, T. Kobayashi, Y. Hishikawa, T. Doi	岐阜大学, 産総研	Solar irradiance enhancement due to cloud edge effect	PVSEC-27	2017年11月
7	Zhang, J., K. WataNabe, J. Yoshino, T. Kobayashi, Y. Hishikawa, T. Doi	岐阜大学, 産総研	Short time and space variations of solar irradiance under clouds	PVSEC-27	2017年11月
8	Zhang, J., K. WataNabe, J. Yoshino, T. Kobayashi, Y. Hishikawa, T. Doi	岐阜大学, 産総研	Filtering method of detecting solar irradiance conditions for PV module performance characterization under unstable irradiance	PVSEC-27	2017年11月
9	小林智尚 加藤暉都 吉野友希 吉野 純 菱川善博	岐阜大学, 産総研	屋外太陽光モジュール性能評価のための日射変動制御フィルタ法の検討	太陽／風力エネルギー講演論文集 2018, 4p.	2018年11月

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	北川 晃宏 植田 讓	東京理科大学	銘板値を用いた1ダイオードモデルとI-Vカーブ屋外測定によるPV発電性能の測定手法	2016年 電気学会全国大会	2016年3月16日
2	浅井 大輝 植田 讓	東京理科大学 産業技術総合研究	PV 日射センサ及びI-Vカーブ高速測定によるアレイ発電性能の	2017年 電気学会全国大会	2017年3月15日

	菱川 善博	所	高度測定		
3	小畑 圭弘 植田 謙 菱川 善博	東京理科大学 産業技術総合研究 所	日射強度と温度及び I-V カーブ 測定による PV モジュール性能の 測定手法の検討	2017 年 電気学会全国大会	2017 年 3 月 15 日
4	Daiki Asai, Yuzuru Ueda, Yoshihiro Hishikawa	東京理科大学 産業技術総合研究 所	MEASUREMENT METHOD OF THE PV ARRAY PERFORMANCE BY USING PVMS AND OUTDOOR MEASURED I-V CURVE	The 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017 年 11 月 12 日～ 17 日
5	拵 博人, 植田 謙, 菱川 善博	東京理科大学 産業技術総合研究 所	銘板値と 1 ダイオードモデルに よる屋外での PV 発電性能評価	2018 年 電気学会全国大会	2018 年 03 月 14 日～ 16 日
6	川崎 加称子, 拵 博人, 植田 謙, 菱川 善博	東京理科大学 産業技術総合研究 所	銘板値のみを使用した参照基準 I-V カーブ作成と線形内挿法に よる太陽電池モジュールの発電 性能評価	第 15 回「次世代の太陽光発 電システム」シンポジウム	2018 年 07 月 12 日
7	拵 博人, 植田 謙, 菱川 善博	東京理科大学 産業技術総合研究 所	銘板値と 1 ダイオードモデルに よる屋外での PV モジュール発電 性能評価	第 15 回「次世代の太陽光発 電システム」シンポジウム	2018 年 07 月 12 日
8	Kanako Kawasaki, Yuzuru Ueda, Yoshihiro Hishikawa	東京理科大学 産業技術総合研究 所	Evaluation of power generation performance using only the nameplate value using linear interpolation method	7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications	2018 年 10 月 15 日
9	拵 博人, 植田 謙, 菱川 善博	東京理科大学 産業技術総合研究 所	セル間の性能ばらつきを考慮し た屋外条件下での太陽電池モ ジュール発電性能評価手法	2018 年度 日本太陽エネル ギー学会/日本風力エネル ギー協会合同研究発表会	2018 年 11 月 8 日
10	Kanako Kawasaki, Yuzuru Ueda, Yoshihiro Hishikawa	東京理科大学 産業技術総合研究 所	Outdoor Power Generation Performance Evaluation using One Diode Model Parameters at STC and Dark I-V Curves	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018 年 11 月 16 日
11	Hiroto Koshirae, Yuzuru Ueda, Yoshihiro Hishikawa	東京理科大学 産業技術総合研究 所	Determination of one diode model parameters considering cell-to-module loss	The 7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018 年 11 月 16 日
12	Hiroto Koshirae, Kanako Kawasaki, Yuzuru Ueda, Yoshihiro Hishikawa	東京理科大学 産業技術総合研究 所	Modeling of Cell Performance Variation in One Diode Model for Reference I-V Curve Calculation	The 29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019 年 11 月 6 日

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	増田幸治	JET	Investigation into Spatial Distribution of Irradiance for Performance Measurement of Photovoltaic Modules at Photovoltaic Systems	PVSEC-26 Singapore	2016/10/27
2	増田幸治	JET	太陽電池アレイ中の太陽電池 モジュール屋外出力測定方法の検討	日本太陽エネルギー学会/ 日本風力エネルギー学会合 同研究発表会	2016/11/25
3	増田幸治	JET	高精度屋外測定技術を用いたアレイ 中の太陽電池モジュール性能分布	日本太陽エネルギー学会/ 日本風力エネルギー学会合	2017/10/27

				同研究発表会	
4	Kohji MASUDA, Tadashi OBAYASHI, Yoshihiro HISHIKAWA	JET, 産総研	Procedures for precise and highly efficient outdoor performance- measurement of photovoltaic modules	PVSEC-27、Otsu	2017/11/12

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産総研	太陽電池屋外測定の高精度化	PVTEC ニュース 72 巻	2016/3
2	産総研	太陽電池の屋外における迅速・低コストな測定を実現 する技術	JPEA 会報誌 「光発電」 No. 39 (2016) 160-165	2016/3
3	産総研	太陽電池性能測定のコツ	応用物理学会誌 第 85 巻 第 10 号 p. 901 (2016)	2016/10
4	産総研	0.2 秒単位で日射測定、産総研が新型センサを開発・ 製品化	日経テクノロジーオ ンライン	2017/6

【その他】

番号	所属	受賞内容	年度	
1	産総研	PVSEC Award, 27th InterNational Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (Otsu, Nov. 12-17, 2017)	2017	
2	立命館大	Student Paper Award, 27th InterNational Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (Otsu, Nov. 12-17, 2017)	2017	
3	東京理科大	2018 年電気学会全国大会優秀論文発表賞	2018	
4	宮崎大	5th InterNational Conference on Environment and Renewable Energy (ICERE 2019) Best PresentatioNaward	2018	

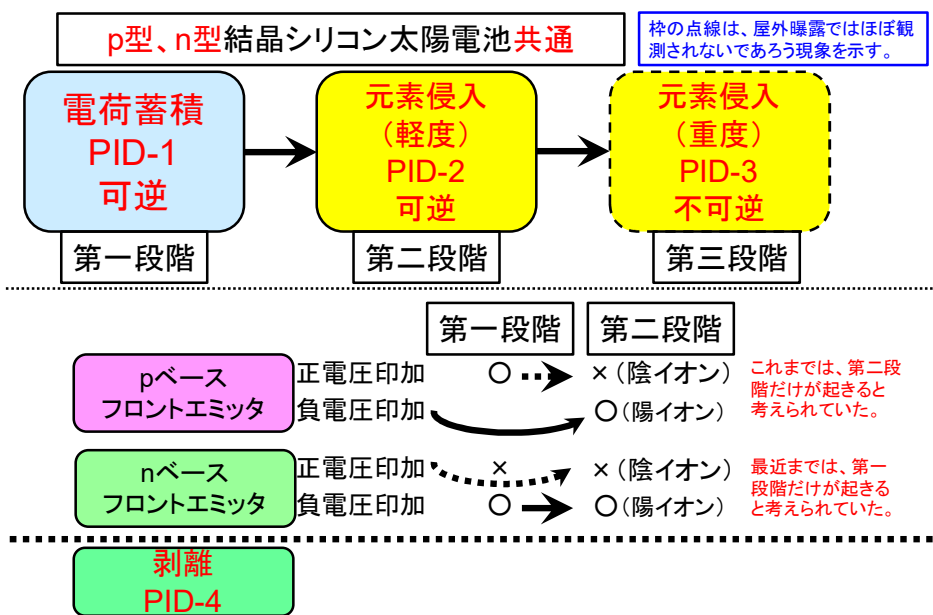
B 太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発（国立研究開発法人産業技術総合研究所、デュボン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社、東レ株式会社、石川県工業試験場、国立大学法人岐阜大学、国立大学法人東京農工大学、国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学、学校法人東京理科大学、一般財団法人電力中央研究所、国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学（再委託先））

1. 成果詳細

【国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学（再委託先）】

①モジュール劣化メカニズムの解明

電圧誘起劣化（PID）現象とNaの関係を評価するとともに、各種太陽電池でのPID現象を詳細に解析した。光照射時のPIDの振舞いを調査し、波長依存性を明確化した。これまでに見出したPID現象を定性的ながら総合的に説明できるモデルを構築し、個別のモデルで考えられていたp型とn型の結晶Si太陽電池のPIDメカニズムを統一的に説明可能とした。図III-2-(ホ)-B-1に示すように、結晶Si太陽電池のPIDは電荷蓄積によるPID-1、軽度の元素移動に起因し可逆なPID-2、重度の元素移動に起因し不可逆なPID-3の順に段階的に進行することを見出した。また、剥離をとまなうPID-4の存在も明らかにし、剥離の原因もNaであることを見出した。さらに、反射防止膜がPIDに及ぼす影響は大きいとの結果も得た。これまで、PID-1はn型結晶Si太陽電池のみで生じると考えられてきたが、p型結晶Si太陽電池においてもSiNx/SiO2 2層構造の反射防止膜を用いることによりPID-1が発生することを世界で初めて見出し、上記PID発生モデルの妥当性を実験的に裏付けた。これらの知見をもとに、反射防止膜にかかる電界を遮蔽するセル構造を考案し、PIDをほぼ完全に抑止できることを実証した。



図III-2-(ホ)-B-1 結晶Si太陽電池におけるPID現象の進行過程の模式図

結晶Si太陽電池においては、光照射がPIDの発現を遅延させる効果を見出した。この原因は、遅延効果のある紫外光の波長が反射防止膜に使用されているSiNx膜のバンドギャップと対応することから、紫外光照射によりSiNx膜中のキャリア濃度が増加し、導電率が向上することにより、反射防止膜に印加される電界強度が弱まり、Na侵入が抑止されるためではないかと考えられる。このことを確認するために、奈良先端科学技術大学院大学に再委託して以下の実験を行った。p型結晶Si太陽電池に利用されるSiNx膜をプラズマ援用化学気相成長法によりガラス基板上および反射防止膜以外を作製した太陽電池上に堆積し、紫外光照射による導電率の変化およびPID加速試験を実施した。SiNx膜の光導電率を測定したところ、バンドギャップより高いエネルギーの光を照射したところ、明確な導電率の向上が観測された。また、屈折率1.95のSiNx膜を形成したp型結晶Si太陽電池のPID試験の結果、波長370nmの紫外光照射によりわずかではあるが遅延効果が確認された。波長370nmのエネルギーは3.35eVであり、屈折率1.95のSiNx膜のバンドギャップより若干小さいが、波長370nmの光を照射した場合でも、わずかな導電率増加を確認している。SiNxが非晶質であるため、バンドテイルを介した光励起が発生し、バンドギャップ以下の光でも導電率が若干向上するものと思われる。以上の結果から、

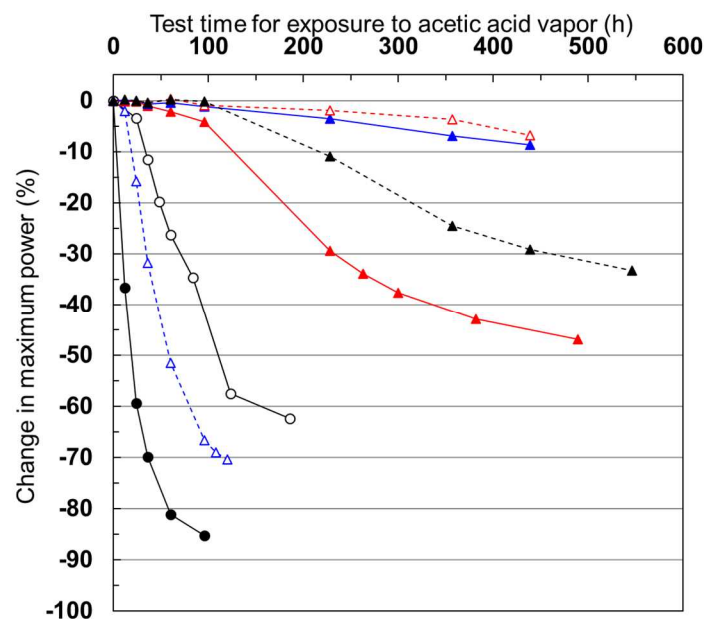
1) 紫外光照射により SiN_x膜に印加される電界が緩和、2) 光生成した電子は太陽電池表面に拡散し再結合およびNa イオンと中和、3) 光生成した正孔は太陽電池吸収層に拡散し再結合、4) SiN_x膜中の Na の移動が抑制といったメカニズムにより、PID 現象の遅延効果が発生するものと考えられる。

②各種加速試験法の開発

セルを酢酸蒸気に曝露することにより、モジュール化せずとも寿命予測可能な方法を新たに開発し、交流インピーダンス法等で詳細に解析した。その結果、セルと加速試験/屋外曝露モジュールでの劣化挙動は同等で、なおかつセルの酢酸蒸気曝露試験は従来実施されていたモジュールの高温高湿試験に比べ 70 倍以上、屋外曝露に対して 4500 倍以上の加速となることを明らかにした。さらに、図Ⅲ-2-(ホ)-B-2 に示すように、酢酸耐性の異なる 7 種類の Ag 電極を有するセルに対してこの試験を実施したところ、性能低下の振舞いが明瞭に異なることが明らかになった。この結果をもとに、セル電極の酢酸耐性を評価可能な方法として本手法を国際標準化した（詳細は③参照）。

紫外光照射、湿熱負荷、電圧印加の 3 つの負荷が、太陽電池モジュールの劣化に特に重要な役割を果たしていることを見出した。特にこれらの負荷の組み合わせが重要であり、紫外光照射は湿熱負荷による劣化を促進するものの、電圧印加による劣化を抑制するなど、負荷の組合せにより劣化挙動が異なることを見出した。屋外曝露で発現する劣化の再現には、加速試験において、どのような負荷をどのように組み合わせるかが極めて重要であることが示唆された。

n 型フロントエミッタセルで生じる第一段階の PID に関しては、電圧によらず屋内試験が屋外曝露に対して約 900 倍の加速係数を有することを明らかにした。また、屋内外の別ならびに電圧によらず、初期劣化時の飽和値が一定であることを見出した。屋外での PID は天候の影響を受け、晴天時は性能回復が生じ、実際の劣化は加速試験からの予測よりも遅くなることを明らかにした。さらに、これまで屋内試験でのみ観測されていた Na 侵入に起因すると考えられる第二段階の劣化モードを屋外試験でも見出した。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-2 酢酸耐性の異なる 7 種類の Ag 電極を有する結晶 Si 太陽電池セルの出力変化の酢酸蒸気曝露試験時間依存性

③国際標準化とワークショップの創設

本 NEDO 事業のグループ内他機関と連携し、PV モジュール信頼性国際ワークショップ (SAYURI-PV) を 2016 年以降、計 4 回開催した。SAYURI-PV 等の国際連携活動の成果として、計 5 件のテクニカルレポートと国際規格を提案した (内 3 件は発行済)。また、セルの酢酸蒸気曝露試験については SEMI PV79-0817 として標準化が成立した。

【デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社】

①紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析

「紫外線を含む複合加速試験による封止材の劣化の定性的・定量的な指標を見出し、各種加速試験

による劣化指標と酢酸発生量との関係性を見出す。さらに、屋外曝露での劣化現象と比較する」という目標に対し、赤外分光法による高分子構造の解析結果より紫外線照射により酢酸が発生していることを確認し、さらに湿熱試験を行うことで高分子の分解、および酢酸発生が起きていることも確認した。また、エチレン-酢酸ビニル共重合樹脂（EVA）封止材の紫外線透過率の違いが紫外線照射による発生酢酸量に影響を与えることを、紫外線照射と湿熱試験の組合せ試験により見出した。この成果は、下記③の加速試験法開発において、屋外曝露で生じる実際の劣化メカニズムを忠実に再現する実用的な試験法の確立に貢献するものである。

②屋外曝露モジュールの劣化調査と複合劣化現象との相関性の検証

「様々な設置環境の屋外曝露モジュールの発電量低下の原因調査、および封止材の劣化分析を行う①の結果と比較を行い、屋外曝露における劣化因子を調査し、紫外線を含む加速試験方法の方向性を明らかにする」という目標に対し、約 10 年間屋外で曝露されていた 2 つのモジュールを入手し破壊分析を行った結果、酢酸残存量が多い EVA 封止材は高い紫外線透過率を有していた、という結果をもとに、①で見出した現象との相関を検証するため、太陽電池モジュールの劣化現象に与える影響とその度合いを調査し、加速試験方法の具体的な方向性を確定した。この成果は、③の加速試験法開発において、屋外曝露で生じる実際の劣化メカニズムを忠実に再現する実用的な試験法の確立に貢献するものである。

③試験法開発

「本 NEDO 事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴を明らかにする。70 倍以上の加速係数を有する試験法の開発に貢献する」という目標に対し、①、②の結果をもとに紫外線透過率の異なる EVA 封止材を用いたミニモジュールサンプルを作製し、紫外線照射試験を実施することで、EVA 封止材の紫外線耐性の違いによる酢酸生成と出力への影響を確認した。また、紫外線照射と湿熱試験の組合せにより、屋外曝露をより忠実に再現する試験法であることを確認するとともに、酢酸発生量の観点において加速係数が 70 倍以上となる試験法であることを明確化し、太陽電池メーカーや試験機関での実用化を可能とした。

【東レ株式会社】

①曝露環境の検討

①-1 モジュール裏面が受ける紫外線照射量の検証

モジュール裏面が受ける紫外線照射量は、「モジュール表面の紫外線照射量」×「床材の紫外線反射率（紫外線アルベド）」により推定する方法が一般的であったが、この方法の妥当性は未だ検証されていなかった。これを検証すべく、滋賀県大津市(34° 59' N 135° 54' E)に於いて、設置角 25°、真南向きの野立て架台にモジュールを設置し、モジュール表面と裏面の紫外線照射量を定量評価した。その結果、「モジュール裏面の紫外線照射量/モジュール表面の紫外線照射量」は「床材の紫外線アルベド」の約 1/3 程度になることを確認した。

①-2 裏面材の湿熱劣化に関するパラメータの特定

湿熱試験に関し、雰囲気温度や相対湿度をストレス指標として劣化を議論する例は多くあったが、屋外曝露環境下においてモジュール温度は雰囲気温度に対し高温となることから、温度や湿度としてどのパラメータを用いるべきか十分に議論が尽くされていなかった。そこで、雰囲気温度、サンプル温度、相対湿度、水蒸気圧を変えた湿熱試験を透明 PET フィルムに対して行い、破断伸度保持率を評価することで、どのパラメータが湿熱劣化と直接関わるか検証した。その結果、サンプル温度と雰囲気中の水蒸気圧が同じであれば、雰囲気温度や相対湿度が異なっても同じ劣化挙動となることから、サンプル温度と水蒸気圧をストレス指標とすることが有用であると示唆された。

①-3 裏面材の劣化に関するシミュレーション式の立式

上記①-2 にて用いた透明 PET フィルムの引張破断伸度を物理量とし、劣化シミュレーションを行った。劣化シミュレーションは Terada らの方法^{III-1}を参考し、上記結果を基に、温度としてサンプル温度を、湿度として水蒸気圧を用い、反応速度 k を式 III-2-(ホ)-B-1 のように仮定した。また、引張破断伸度の劣化速度は試験時間に対してあまり変化が見られないことから、反応速度次数は 0 次であると仮定した。

$$k = A \times \exp\left(-\frac{E_h}{\kappa T}\right) \times (P_{H_2O})^n + D \times \exp\left(-\frac{E_i}{\kappa T}\right) \times (P_{H_2O})^m \times (Irr)^\alpha \quad \text{式 III-2-(ホ)-B-1}$$

ここで、 A : 係数、 E_h : 湿熱劣化の活性化エネルギー (eV)、 κ : ボルツマン定数 (eV/K)、 T : サンプルの絶対温度 (K)、 P_{H_2O} : 水蒸気圧 (hPa)、 n : 次数、 D : 係数、 E_i : 光劣化の活性化エネルギー、 m : 次数、 Irr : 紫外線照度 (300-400 nm) (W/m^2)、 α : 次数である。

温度、湿度、照度を変えた加速試験を行い、各加速試験における引張破断伸度半減期から、式 III-2-

(ホ)-B-1における各係数、次数を求めた。その結果、引張破断伸度 y は式Ⅲ-2-(ホ)-B-2のように求められた。

$$y = y_0 - \left[4.1 \times 10^3 \times \exp\left(-\frac{0.59}{\kappa T}\right) \times (P_{H_2O})^{1.12} + 1.4 \times 10^5 \times \exp\left(-\frac{0.46}{\kappa T}\right) \times (P_{H_2O})^{0.07} \times (Irr)^{0.75} \right] \times t$$

式Ⅲ-2-(ホ)-B-2

ここで、 y ：引張破断伸度(%)、 y_0 ：引張破断伸度初期値(%)、 t ：時間(h)である。

式Ⅲ-2-(ホ)-B-2において、湿熱劣化のファクタは光劣化のファクタと比べて非常に小さいことから、主たる劣化ファクタは光照射であることが示唆される。また、このシミュレーション結果と屋外曝露下での引張破断伸度の測定結果を比較したところ、両者は比較的一致しており、本方法にてシミュレーションできることを確認した。すなわち、本式を用いることにより、昼夜等の変動がある屋外曝露下で受けるストレス量を、条件が安定した加速試験下でのストレス量に換算できるといえる。

②屋外曝露モジュールの分析、裏面材に対する加速試験の開発

これまで各機関等により屋外曝露モジュールの分析が行われてきたが、初期状態や設置環境がトレサブルな状態での分析事例は少ない。そこで、床材としてアスファルト（紫外線アルベド 6%）を用いた上記①-1 に示す設置環境において、透明 PET フィルムを最外層に有するモジュールを 5.5 年間曝露し、破壊分析を行った。初期状態や HAST 試験（120℃、100%RH）、光照射試験（キセノン光照射、紫外線照度 60 W/m²、雰囲気温度 38℃、相対湿度 50%RH）後の結果と比較したところ、湿熱と光照射とでは、分子量分布の劣化挙動が異なることを確認し、ストレス量の追跡指標として分子量分布が特に適することを見出した。また、屋外曝露 5.5 年後のモジュールからサンプリングした透明 PET フィルムの分子量分布は光照射試験後の結果と近いことから、屋外曝露で裏面材が受ける主たるストレスは光照射であることが示唆された。すなわち、屋外曝露下での裏面材の劣化は上記光照射試験にて代替できるといえる。さらに、①-3 に示すシミュレーション式を用いて、屋外曝露下、及び光照射試験時の半減期を求めると、それぞれ 56160 時間、282 時間となった。このことから、光照射試験による加速係数は 56160/282=199 倍と目標の 100 倍以上であることを確認した。

③モジュールに対する複合加速試験の開発

従来、モジュールに対する加速試験は、湿熱（85℃、85%RH）試験を数千時間にわたって行うことが一般的であり、試験時間が長い点や、実際の屋外曝露環境との乖離がある点が課題であった。そこで、モジュールに対して事前に光照射試験を行い、その後湿熱試験を行う複合試験を実施し、劣化挙動を評価した。その結果、湿熱試験と複合試験とではそれぞれ劣化メカニズムが異なる可能性を見出した。すなわち、太陽光にさらされる屋外曝露での劣化を再現するためには、湿熱試験だけでなく、光照射試験を併用することでより確度の高い加速試験を構築できる可能性が示唆された。また、より高加速度の試験方法を確立すべく、メタルハライドランプによる高強度光照射試験と、HAST 試験（121℃、100%RH）を組み合わせた複合試験を実施した。その結果、合計試験時間 600 時間程度で屋外曝露下でのモジュール劣化を再現できることを見出し、加速係数が 100 倍以上となる加速試験を構築できる見込みを得た。

③ 国際標準化への取り組み

国際電気標準会議 (IEC) メンバーとして TC82/WG2 会合へ出席した。国際規格 IEC61730 等について協議を行い、曝露環境下における裏面材への紫外線照射量測定結果や光照射試験中のサンプル温度測定結果をもとに、光照射試験条件や採用すべきアルベド値について意見し、規格の適正化に貢献した。なお、国際規格に関する協議は電話会議ならびに国際規格会議にて実施した。国際規格会議への出席実績は、2015 年度：11 月（南アフリカ）、2016 年度：5 月（台湾）、10 月（米国）、2017 年度：5 月（日本）、10 月（欧州）である。

【石川県工業試験場】

システムの高電圧化にともない太陽電池モジュール内に封止されている太陽電池セルとフレーム間に高電圧が印加され出力低下を起こす電圧誘起劣化 (PID) のメカニズムの解明、およびその対策案を見出すことを目的とし、屋外での PID 実証試験を実施するとともに、モジュール内部の電界分布解析から PID 耐性を持つ構造の条件探索に取り組んだ。

① 屋外での PID 実証試験

長期曝露した既設の太陽電池をリユースする設備システムの更新では、電圧降下ロスの抑制や送電

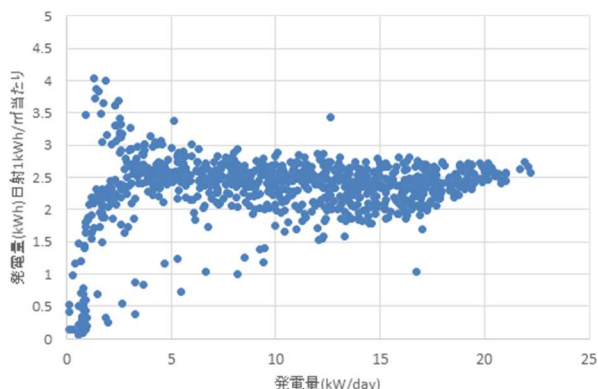
ロスの低減および追加コストの低減のためにシステムを高電圧化することが想定される。そこで、NEDO の 1997 年度新エネルギー発電フィールドテスト事業によって石川県工業試験場の実験棟屋根に 1998 年に設置した 200 kW 太陽光発電システム（長期運用中）の一部を使い、既設の集電回路を 400 V から 1000 V に高電圧化して運用し、発電特性の経過測定から PID 発生の有無について実証試験を実施した。2016 年 2 月に測定を開始して 4 年間のデータ蓄積の結果、図Ⅲ-2-(ホ)-B-3 に示すように、既設太陽電池モジュールの PID の発生は確認されなかった。既設の太陽電池モジュールの場合、常用の 2.5 倍となる 1000 V のシステム電圧において PID 耐性が示された。

また、主流となりつつあるシステム電圧 1500 V での PID メカニズムを解明するため、新たに太陽電池モジュールを試作して PID 実証試験を実施した。屋内 PID 加速試験の結果から、図Ⅲ-2-(ホ)-B-4 に示すように、太陽電池モジュールの PID は湿熱環境により劣化が早期化することを見出した。また、湿熱負荷に曝される時間が長い太陽電池ほど、その後の PID 加速試験において早期に劣化することが判明した。次に、システム電圧 1500 V 相当の屋外 PID 発生環境の構築を行うとともに、4 セル太陽電池モジュール PID の実証試験を実施した。その結果、モジュールの受光面を一部遮光した実証試験の結果、遮光部で PID 現象が顕著に現れることを見出した。

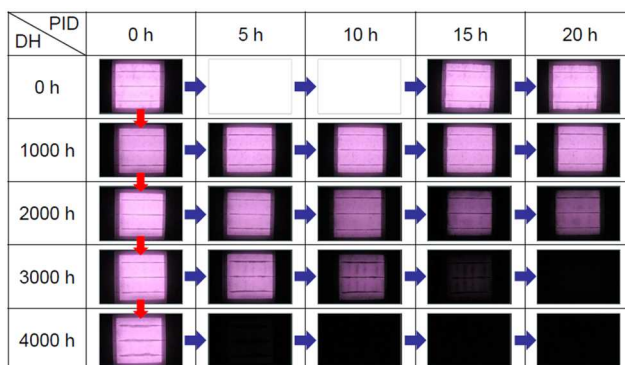
② 太陽電池の解析

PID により生じる太陽電池セルの微小領域での電界や電流分布の変化を実験的に再現することは困難である。そこで、電界、電流の分布や経路を特定する手段として有限要素解析法による直流電磁場解析 (ANSYS Maxwell) を用いてモジュール内部の電界および電流の分布を可視化した。以下に示す 2 つの PID 対策に対して解析を実施し、図Ⅲ-2-(ホ)-B-5 に結果を示すように、これらの対策案の妥当性を明確化した。

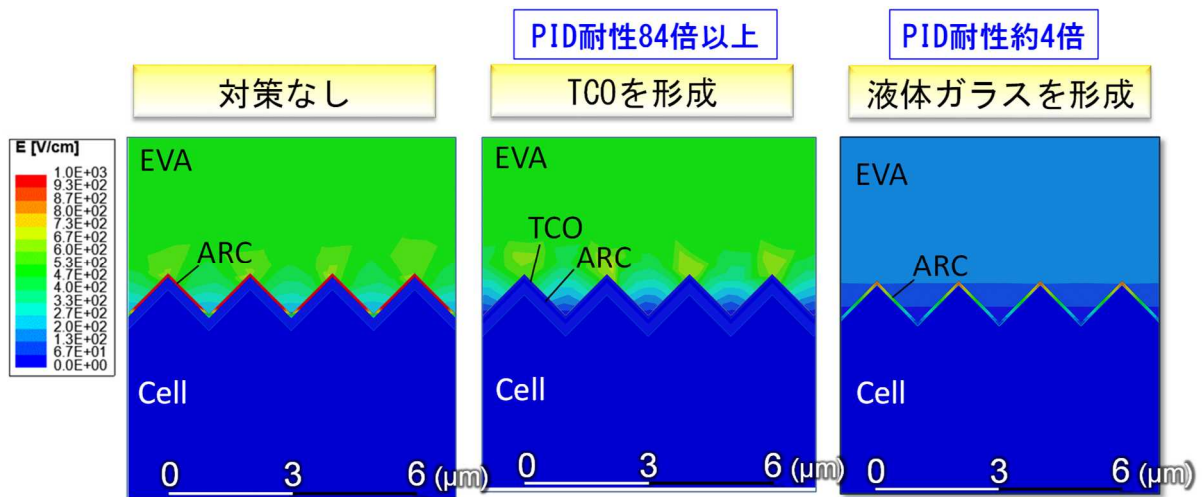
- 1) セル表面に透明導電膜 (TCO) を形成する PID 対策案 (PID 耐性 84 倍以上) において、反射防止膜 (ARC) に電界がかからなくなることを解析から見出した。
- 2) 液体ガラスを用いてガラス層を太陽電池に形成する PID 対策案 (PID 耐性約 4 倍) において、ガラス層の電界が強くなることで、他のモジュール部材において電界が弱まることを解析から見出した。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-3 PID 屋外実証試験の結果 (システム発電量)



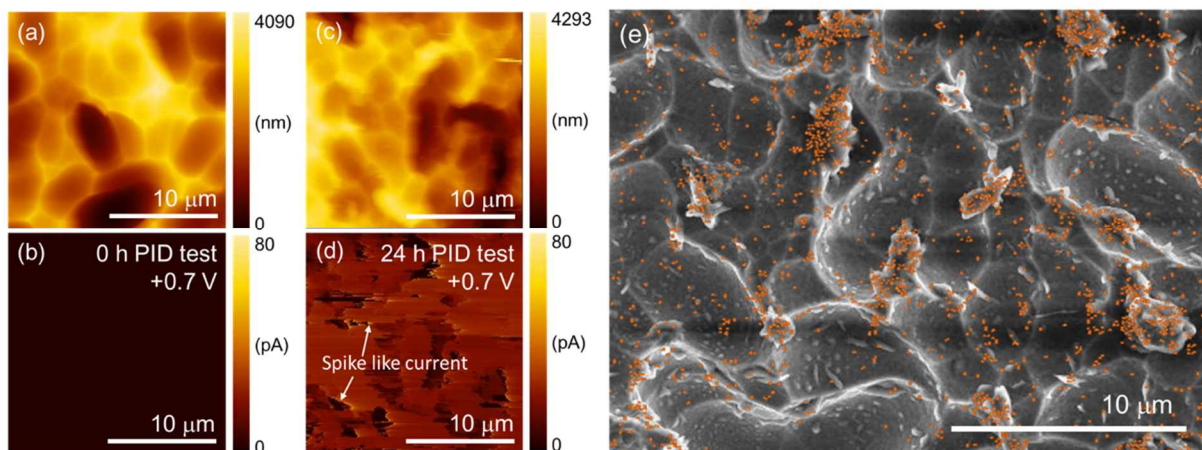
図Ⅲ-2-(ホ)-B-4 PID 屋内加速試験 (高温高湿試験後に PID 試験) の結果



図III-2-(ホ)-B-5 直流電磁場解析を用いた太陽電池セル断面の電流密度分布解析結果

【国立大学法人岐阜大学】

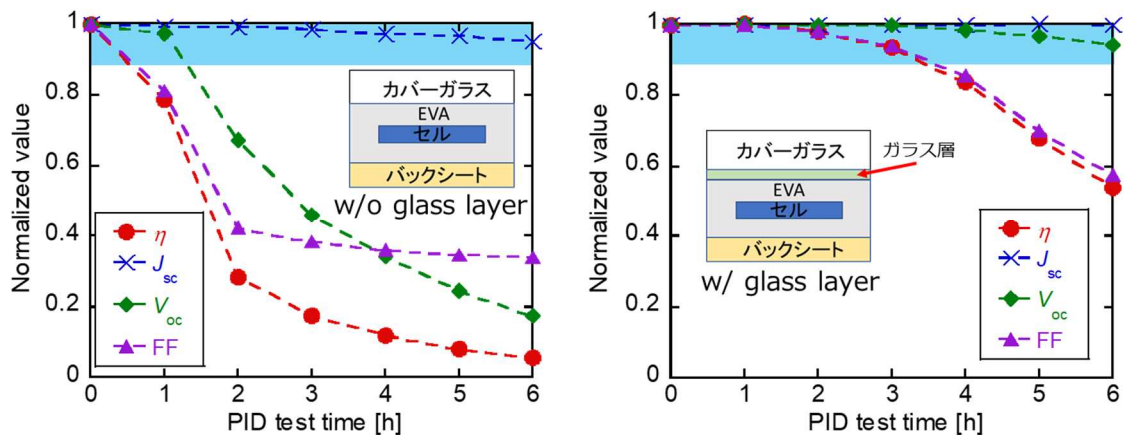
これまでに、PID の発生メカニズムのモデルとして、カバーガラス等に含まれる Na などの金属イオンが、電界によりセル表面もしくは内部に移動し発生すると提案されていた。しかしながら、とりわけセル表面近傍における物性評価は不十分であった。本プロジェクトでは、これまであまり行われてこなかった微視的手法を用いて PID を評価、解析することにより、発生メカニズムの解明を進めた。PID の評価手法としては、局所的な組成分布評価が可能なエネルギー分散型 X 線分光法、X 線光電子分光法や、形状および電流分布評価が可能な、導電性原子間力顕微鏡を用いた。試料は現在広く普及している単結晶、多結晶 p 型 Si セルの太陽電池モジュールを用いた。PID 試験前後において、モジュールからセルを取り出し、セル表面における組成分析を行った。図III-2-(ホ)-B-6 は PID 試験前後のセル上 SiN_x 膜表面における (a)、(c) 表面形状像および (b)、(d) 電流像、(e) PID 試験後の表面 SEM 画像および Na マッピング画像の合成画像である。多結晶 p 型 Si セルにおいては、テクスチャー凸部において多くの Na が析出し、電流分布の評価から Na が多く析出した箇所において、電流が多く流れることを確認した。これは、テクスチャー凸部において Na がセル表面の窒化シリコン膜中に侵入し、導電性が高くなったためと考えられる。



図III-2-(ホ)-B-6 PID 試験前後のセル上 SiN_x 膜表面における (a)、(c) 表面形状像および (b)、(d) 電流像、(e) PID 試験後の表面 SEM 画像および Na マッピング画像の合成画像

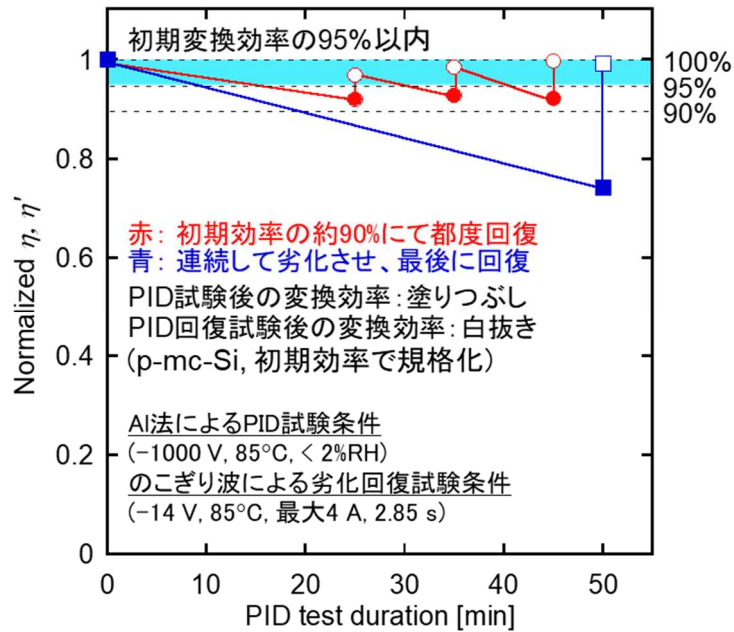
既存の PID 抑止技術として、Si 組成比が大きい SiN_x 膜を反射防止膜に用いる、もしくは高抵抗な封止材を用いるなどの方法が知られている。これらの技術に共通する効果として、 SiN_x 膜に印加される電界強度の低下が挙げられる。しかしながら、これらの技術は、発電効率への影響やモジュール製造コストの増大などの問題点があることから、新たな PID 抑止技術の開発が必要である。我々のグループでは、既存の太陽電池モジュールの構造を大きく変えることなく、簡便に高抵抗なガラス層を形成可能

な液体ガラスに注目した。ガラス層はカバーガラスの表面もしくは裏面（カバーガラス-EVA 間）に塗布、乾燥し形成した。ガラス層を形成したカバーガラスを用いて太陽電池モジュールを作製し、PID 試験（-1000 V、85°C、< 2%RH、6 h）を行い、発電特性の変化を評価した。図III-2-(ホ)-B-7は、ガラス層をカバーガラスと EVA との間に形成した太陽電池モジュール（右）と形成していない太陽電池モジュール（左）の PID 試験時における発電特性の経時変化である。PID 試験には A1 法を用い、その時の条件は、-1000 V、85°C、<2%RH である。横軸は PID 試験時間、縦軸は発電特性である。なお、発電特性の値は、初期値をもとに規格化した。どちらのモジュールにおいても、PID 試験が長くなるに従い、主に V_{oc} と FF が顕著に低下した。また、それにともない発電効率も低下した。しかしながら、ガラス層無しの場合には、PID 試験 1 時間にて、発電効率が初期値の 80%に低下しているのに対し、ガラス層をモジュール内に形成した場合は、PID 試験開始 4 時間後においても、発電効率は初期値の 80%以上を維持した。これらの結果から、ガラス層をカバーガラスと EVA の間に形成することにより、PID の発生を 4 倍程度遅延させることができると考えられる。



図III-2-(ホ)-B-7 ガラス層をカバーガラスと EVA との間に形成した太陽電池モジュール（右）と形成していない太陽電池モジュール（左）の PID 試験時における発電特性の経時変化

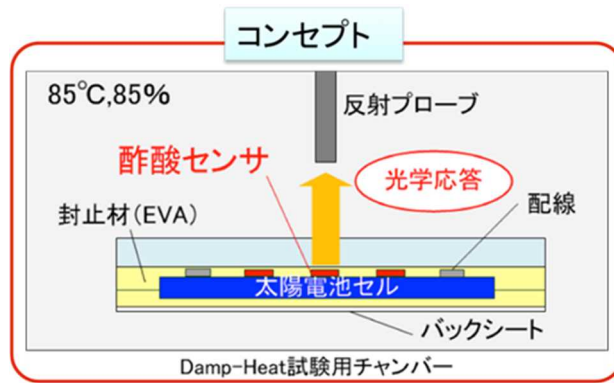
PID が発生した単セル太陽電池モジュールもしくはそれらを複数直列接続した太陽電池モジュールの電極に対して逆バイアスパルス電圧を印加したところ、発電特性が短期間で回復することを確認した。この技術をもとに、発電効率の劣化率を初期値の 10%以内に抑える手法を提案した。図III-2-(ホ)-B-8は、発電効率が PID 試験により初期値の 90%程度に低下した場合に、本プロジェクトで開発した PID 回復技術を用いて回復させたときの発電効率である。また、比較として、発電効率が PID 試験により初期値の 70%程度に低下した場合の回復結果も示した。横軸は、PID 試験時間である。これらの結果から、定期的に PID 回復試験を行うことにより、より長期間発電効率を初期値の 90%以上にとどめることが可能であることがわかる。現状、本回復手法を用いるためには、太陽電池モジュールを取り外す必要がある。また、どの太陽電池モジュールにおいて PID が発生しているのか事前に見つける必要がある。これらを回避するには、逆バイアスパルスを定期的に印加する機構を予めシステム中に付け加えるなどの手法が考えられる。さらには、本プロジェクトで開発したガラス層形成による PID 抑止技術を用いることにより、PID の発生が遅延および PID 発生後の回復回数の低減が期待できる。



図III-2-(ホ)-B-8 複数回PID回復試験を行った場合の発電効率の推移

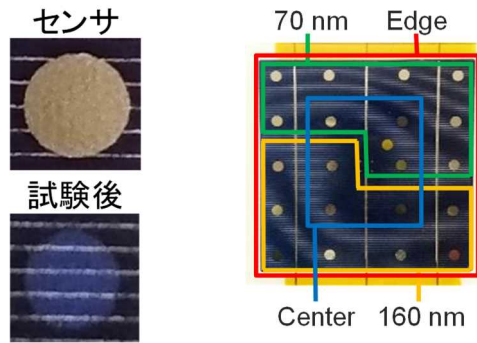
【国立大学法人東京農工大学】

本研究では、太陽電池モジュール内部の酢酸発生経路および酢酸濃度分布の経時変化を明らかにするための酢酸センサを開発し、それを用いた各種試験を行った。太陽電池モジュール内部の酢酸の発生・滞留を実時間モニタリングするため、図III-2-(ホ)-B-9に示すように、太陽電池モジュールの外部から光学的に非破壊かつ非接触で内部の酢酸発生状況を計測できる新規な酢酸検出センサの開発を目的とした。



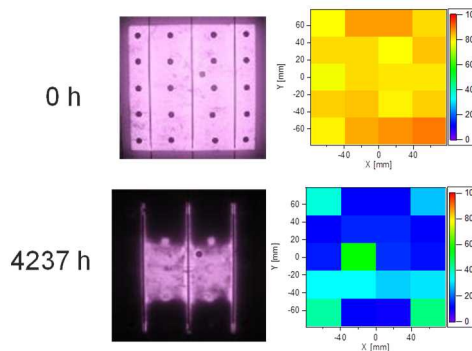
図III-2-(ホ)-B-9 光学式非破壊センサによる酢酸検出

2015～2017年度は、①蛍光色素 pH センサ基板、②錫薄膜酢酸センサ基板、③金ナノコンポジット-局在表面プラズモン共鳴 (localized surface plasmon resonance LSPR) 酢酸検出センサ基板の3種の酢酸センサを開発し、性能を比較した。①は定量性が良いが耐久性が悪かった。特に色素を用いているため蛍光退色の問題があり、後述する紫外線 (UV) 照射+高温高湿 (DH) 複合試験に耐えないことが問題であった。②の錫薄膜センサは薄膜自体が強固で耐環境性・信頼性が高く、長時間の測定に耐えることが利点である。また膜厚を薄くすることにより高感度化が期待できる。図2に錫薄膜センサと試験モジュールを示す。③は感度が当初の想定に達しなかった。したがって、2018年度以降に実施したUV+DH複合試験には②の錫薄膜センサを採用した。錫薄膜センサの外観とモジュール内の配置を図III-2-(ホ)-B-10に示す。

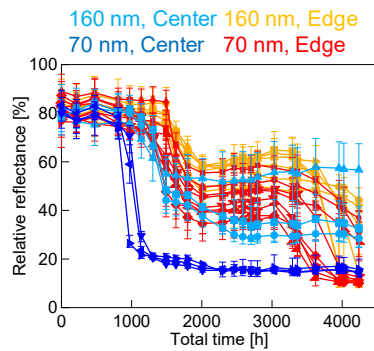


図III-2-(ホ)-B-10 試験前後の錫薄膜センサの外観と試験モジュール内のセンサの配置

UV 照射と DH 試験を組み合わせた UV+DH 複合試験を実施した。UV 試験時間は 1500 時間とした。DH 試験時間を 3000 時間としたときの EL 像および反射率マッピング像を図III-2-(ホ)-B-11 に示す。錫薄膜センサを用いて長期 UV+DH 試験中の酢酸動態を成功裏に検出することができた。センサ応答の経時変化を図III-2-(ホ)-B-12 に示す。



図III-2-(ホ)-B-11 UV+DH 複合試験前後の EL 像 (左) とセンサ応答 (右)



図III-2-(ホ)-B-12 センサ応答の経時変化

錫薄膜の膜厚均一化にも取り組んだ。センサ性能劣化要因として成膜速度が遅い場合、錫が結晶化して光を乱反射（白濁化）し応答性が悪化することがわかった。この問題は、成膜速度を向上させることで解決した。

センサ応答と太陽電池モジュールの発電特性との比較および EL 像解析との比較から、センサの酢酸反応量 $70 \mu\text{g}$ に相当するときに電極が劣化することがわかった。これは、EVA 中の酢酸濃度に換算すると $2500 \mu\text{g/g}$ となる。UV 照射試験時において、500、1000、1500 時間のいずれにおいても、モジュール中心部で酢酸が発生していることがわかった。このこと自体は破壊試験により予測されていたものの、EL 像解析からはとらえられない現象であり、この現象をはじめて非破壊的に測定することができた。UV 照射試験時間が長い場合、この後に DH 試験を長時間行っても、EL 像に暗部が生じない、すなわち電極劣化しない場所がモジュール中央部に残存すること、およびその残存面積が UV 照射時間を増やすほど大きくなることがわかった。このことの原因として、UV 照射により EVA の密着性が低下していることと、UV 試験時の湿度が影響していることの 2 つが考えられた。これらの解析結果から、各試験中のモジュール内酢酸濃度分布を模式的に描いたものが図III-2-(ホ)-B-13 である。また、図III-2-

(ホ)-B-14 に 30%RH UV+DH 試験中における反射率のマッピングを示す。これらの結果から、最終目標の1番目「酢酸発生経路および酢酸濃度分布の時間経過変化を明らかにするため、開発した酢酸センサ基板を直径 5 mm 程度に小型化し、太陽電池モジュール内に 20 個あまり配置し、4000 時間に及ぶ高温高湿試験 (85°C、85%) を実施して水分浸入を誘導し、1000ppm の酢酸濃度のモジュール内等分布線が得られる性能を達成すること。」を達成した。

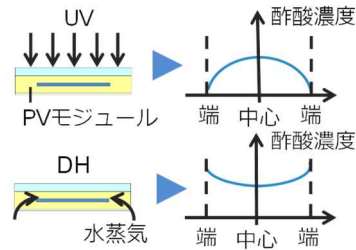


図 III-2-(ホ)-B-13 モジュール内酢酸分布の模式図

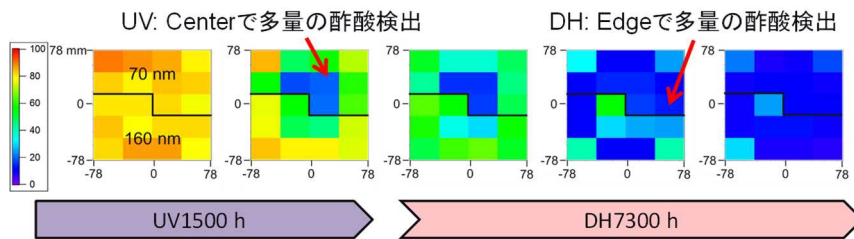


図 III-2-(ホ)-B-14 30%RH UV+DH 試験中における反射率のマッピング

UV+DH 複合試験中の酢酸挙動を理解するために、有限要素法解析を行った。解析には COMSOL MULTIPHYSICS 5.1 を、計算には東京工業大学のスーパーコンピュータ TSUBAME 3.0 を利用した。4500 時間経過後の酢酸濃度分布を図 III-2-(ホ)-B-15 に示す。ピークの酢酸生成量は 1800 $\mu\text{g/g}$ 程度であり、先行研究と一致する結果が得られた。以上の結果から、錫薄膜センサと数値シミュレーションとの比較によって、酢酸の発生・拡散・流出経路を明確化した。

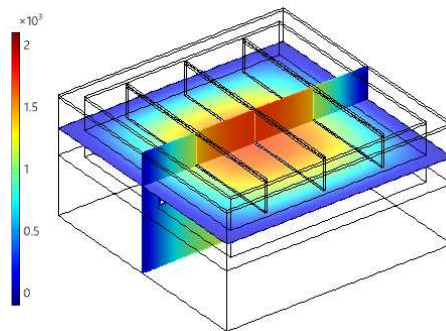
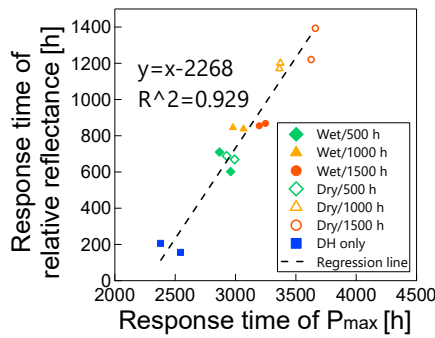


図 III-2-(ホ)-B-15 4500 時間経過後の酢酸濃度分布 ($\mu\text{g/g}$)

本研究で得られた試験結果を解析した。発電性能として 30 年間で 90% 以内の劣化 (劣化率 10% 未満) を寿命と仮定した場合、加速係数 100 倍を達成するには 30 年/100=2628 時間程度で応答が得られることが望ましい。 P_{max} が初期値の 90% に低下する時間は、試験条件により 2400~3600 時間であった。一方、規格化相対反射率が初期値の 90% に低下する時間は 200~1400 時間であった。 P_{max} が初期値の 90% に低下する時間を横軸に、規格化相対反射率が初期値の 90% に低下する時間を縦軸にとりプロットした図を図 III-2-(ホ)-B-16 に示す。両者は非常に高い相関を持ち、錫薄膜センサの応答によって P_{max} が初期値の 90% に低下する時間を 2268 時間早期に予測できることがわかった。以上の結果から、最終目標である「酢酸量を指標として寿命 30 年を予測できる加速試験法の性能指数として屋外曝露に対して加速係数 100 倍以上」を達成したといえる。



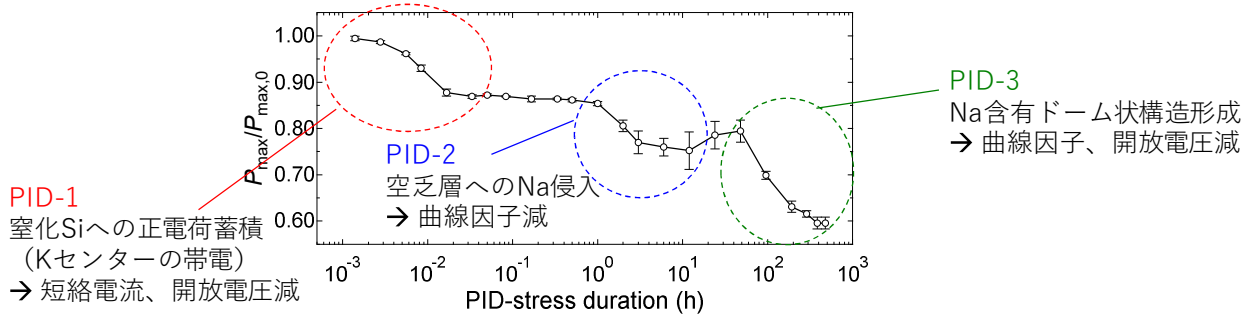
図III-2-(ホ)-B-16 P_{max} および規格化相対反射率が初期値の90%に低下する時間の関係

【国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学】

リアエミッタ型、フロントエミッタ型、ヘテロ接合型、バックコンタクト型の n 型結晶 Si 太陽電池モジュールの PID について、その挙動と機構を明確にし、屋外環境 30 年で 20%以内の劣化率を達成するための抑止策を検討した。また、モジュール化せずに PID 試験が行える試験法の開発も行った。

リアエミッタ型モジュールでは、主に開放電圧 (V_{oc}) が低下する PID が発現することを見出した。疑似太陽光照射が PID に与える効果は明確ではなかった。特別な対策を行わなくとも、通常の部材を用いたモジュールで、20%以内の劣化率となる見通しを得た。

フロントエミッタ型モジュールでは、図III-2-(ホ)-B-17 に示すように、窒化 Si 膜への電荷蓄積により V_{oc} と短絡電流密度 (J_{sc}) が低減する劣化 (PID-1)、空乏層への Na 侵入により曲線因子 (FF) が低下する劣化 (PID-2)、 V_{oc} と FF のさらなる低下に特徴付けられる劣化 (PID-3) の三段階の劣化を示すことを明らかにした。PID-1 では、窒化 Si 膜の蓄積電荷量に上限があることを見出し、正の固定電荷の起源が、窒化 Si 中の K センターであることを裏付ける結果を得た。PID-2 での FF の低下は、p 型モジュールで見られるシャントパス形成ではなく、空乏層での再結合電流の増大に起因することを見出した。PID-3 は、Na を主成分としたドーム状構造の形成により、窒化 Si 膜と p-n 接合に不可逆の損傷が起きることが原因であることを見出した。光照射による PID の遅延効果は明瞭ではなかった。劣化率 20%以内を達成するためには、カバーガラスの凹凸低減によるセルへの Na 到達量低減に加え、窒化 Si 膜-p⁺エミッタ間でのキャリア移動を可能にし、窒化 Si に電荷が蓄積しない工夫が必要であることを明らかにした。



図III-2-(ホ)-B-17 n 型フロントエミッタ型モジュールの初期値で規格化した最大電力の PID 試験時間依存性

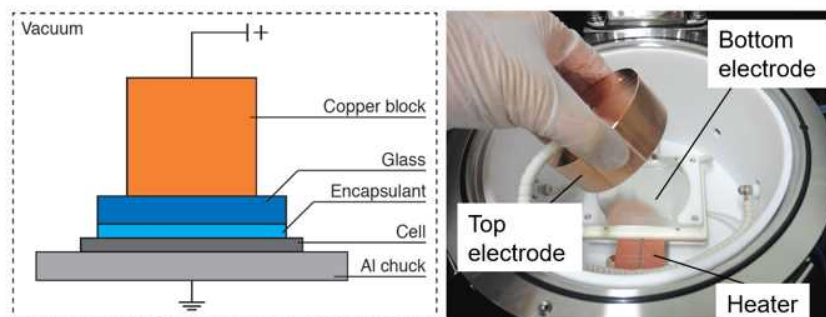
ヘテロ接合型モジュールでは、 J_{sc} 低減に特徴づけられる PID が発現することを見出した。この J_{sc} の低下は、透明導電膜中の In_2O_3 が還元されて金属 In となり、光透過性が減少するためであることを実験的に明らかにした。この劣化は、太陽光照射による遅延効果があることを確認した。PID 試験を継続すると、 V_{oc} の低下が新たに発現した。Na が Si セルに到達し、非晶質 Si のパッシベーション性能が損なわれたためと考えられる。この V_{oc} の低下は、エミッタを光入射側とは反対側に配置した場合にのみ起こることを確認した。光入射側にエミッタを配置した場合には、代わりに FF の低下が発現したが、劣化率としては低減した。ヘテロ接合型モジュールの PID は、他種モジュールと比べて進行が遅いため、屋外環境 30 年で 20%以内の劣化率達成には、特別な対策は不要であると考えられる。また、封止材にアイオノマーを使用することで、劣化を完全に抑止できることも見出した。

バックコンタクト型モジュールでは、負バイアス下で J_{sc} 、 V_{oc} の低下が起きることを見出した。この PID は、光照射により遅延することを確認した。20%以内の劣化率の達成には、モジュール部材への工

夫が必要であると考えられる。

Ⅲ-18 に示すように、セルもしくは部材を、ラミネートせずに PID 試験を行える装置を構築した。汎用 p 型セルおよび n 型フロントエミッタ型セルにおいて、モジュールでの PID を再現できることを確認した。劣化後のセルおよび部材を容易に取り出し可能なため、その後の材料分析に活用できる。

本研究で明らかにしたこれらの知見は、n 型結晶 Si 太陽電池モジュールの屋外での PID を予見する上で、重要な結果であると考えられる。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-18 PID 試験装置の概念図 (左) とチャンバー内部の様子 (右)

【学校法人東京理科大学】

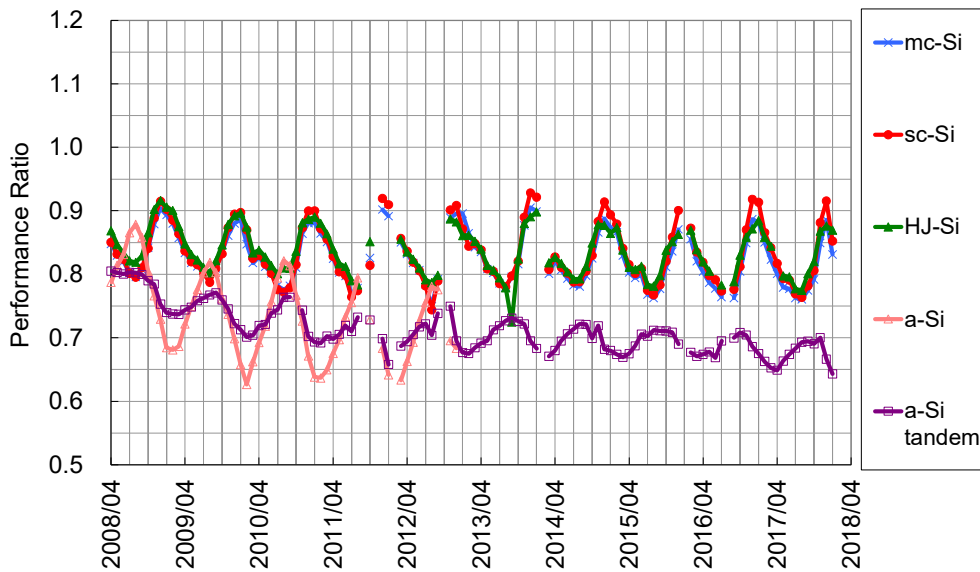
①北杜メガソーラーの発電データの取得および分析の実施

山梨県北杜市にて 2008 年より運用を行っている北杜メガソーラーにおいて、北杜市の協力を得て発電データ等の取得を行い、第 1 期設置システム (モジュールおよびシステム) について発電特性の分析を実施できる環境を整備した。システムの計測では、全 25 種類、59 システムの毎分のパワーコンディショナ (PCS) 入出力電流・電圧・電力と代表モジュールにおけるモジュール裏面温度を計測した。各システムの定格容量は約 10 kW である。また、一部の種類を除き、太陽電池モジュールについても、モジュール評価スペースにおいて電流-電圧カーブとモジュール裏面温度を 5 分周期で計測した。加えて、気象データについても水平面全天日射、直達日射、傾斜面日射、分光放射照度分布、風向、風速、気温を毎分計測した。

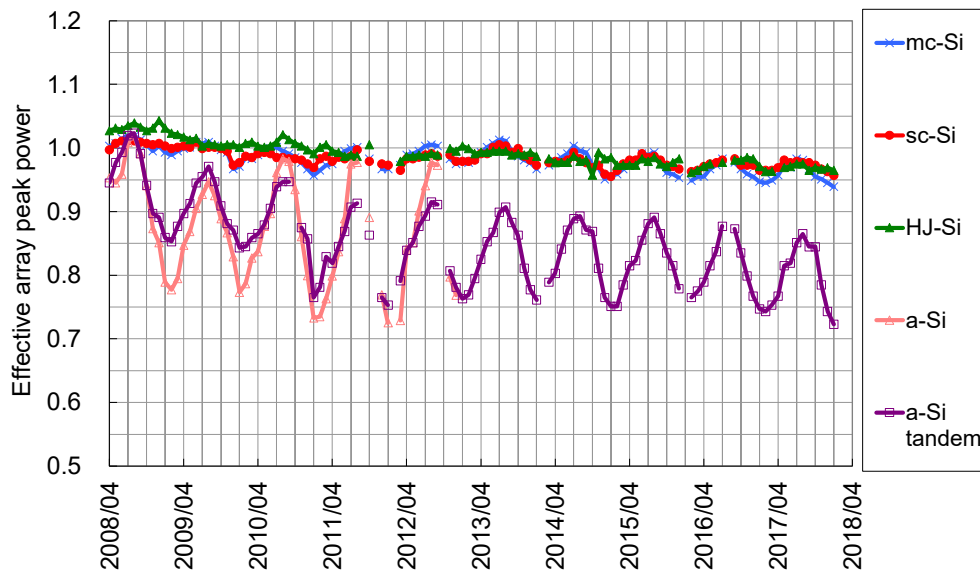
取得したデータを用いて発電特性を分析した結果として、2008 年からの分析結果とあわせて太陽電池の種類毎に代表的なシステムのシステム出力係数を算出した結果を図Ⅲ-2-(ホ)-B-19 に示す。また、劣化状況の分析結果として、SV 法 (Level 5) におけるアレイ実効最大出力係数の算出結果を図Ⅲ-2-(ホ)-B-20 に示す。アレイ実効最大出力係数は、屋内での標準試験条件下での測定に対して、温度や日陰、入射角などの屋外条件下で生じる発電特性に影響する様々な要因を定量的に分離し、その影響を除外・補正した後に得られる値であり、システムの実環境下での発電性能を示す。アレイ実効最大出力係数が 1.0 であれば銘板値どおりの発電性能を示していることを意味する。結果より、システム設置から 3 年が経過した 2011 年以降の分析において、結晶 Si 系のモジュールを用いたシステムにおいては明確な劣化傾向は見られず、安定した発電性能を維持していることを確認した。8 年目時点での結晶 Si 系 47 システムにおける平均的な年劣化率の算出結果として、 $-0.4\%/年$ (8 年間で約 3.2%の劣化) を得た。

②モジュール屋内測定と屋外データによる劣化率の評価解析

北杜メガソーラーで運用している各種太陽電池モジュールの中から多結晶 Si、単結晶 Si、SHJ、バックコンタクト型 Si 等を選び、モジュール評価スペースにて常時電流-電圧測定を行っていたモジュール、および一部の種類においては 10 kW のシステム内で運用されていたモジュールと、新品または 1 年未満の屋外曝露後に約 7 年間暗所保管されていたモジュールの標準試験条件下における発電性能を屋内にて測定した。結果より、結晶 Si 系 5 種の平均値として初期測定からの出力低下が約 7 年間で 2.2% であり、2.2 年目～7 年目の期間の劣化は測定誤差の範囲内と非常に小さかった。劣化量は、同一種の銘板値を基準としたシステム劣化率の算出結果 (19 システム抽出、7 年間の劣化量に換算して平均 2.2%) と極めてよく一致しており、モジュール屋内測定結果に対する屋外測定データを用いた年劣化率の算出精度として定めた $\pm 10\%$ 以内 (平均) との中間目標を大幅に上回る結果を得た。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-19 システム出力係数の算出結果



図Ⅲ-2-(ホ)-B-20 アレイ実効最大出力係数の算出結果。

③発電量の評価支援を行うツールの開発

発電特性の解析と劣化率の評価から得られた知見を活かし、発電量の評価支援を行うツールのプロトタイプを開発した。主な実装機能は以下のとおりである。

- 1) METPV-11 に基づく推定発電電力量算出機能
- 2) 気象庁の日射量データと気温データに基づく推定発電電力量算出機能
- 3) 気象庁の日照時間データと気温データに基づく推定発電電力量算出機能
- 4) NEDO-FT フォーマットで出力された傾斜面日射量データ、気温データに基づく推定発電電力量算出機能、および推定発電電力量と実績発電電力量のグラフ表示機能
- 5) NEDO-FT フォーマットで出力された水平面全天日射量データ、気温データに基づく推定発電電力量算出機能、および推定発電電力量と実績発電電力量のグラフ表示機能
- 6) 年劣化率、アレイ定格補正係数、パワーコンディショナ（PCS）待機電力の直接入力機能
- 7) PCS の変換効率の直接入力機能
- 8) PCS 定格容量よりアレイ定格容量が大きい（いわゆる過積載）システムの推定発電電力量算出に対応

【一般財団法人電力中央研究所】

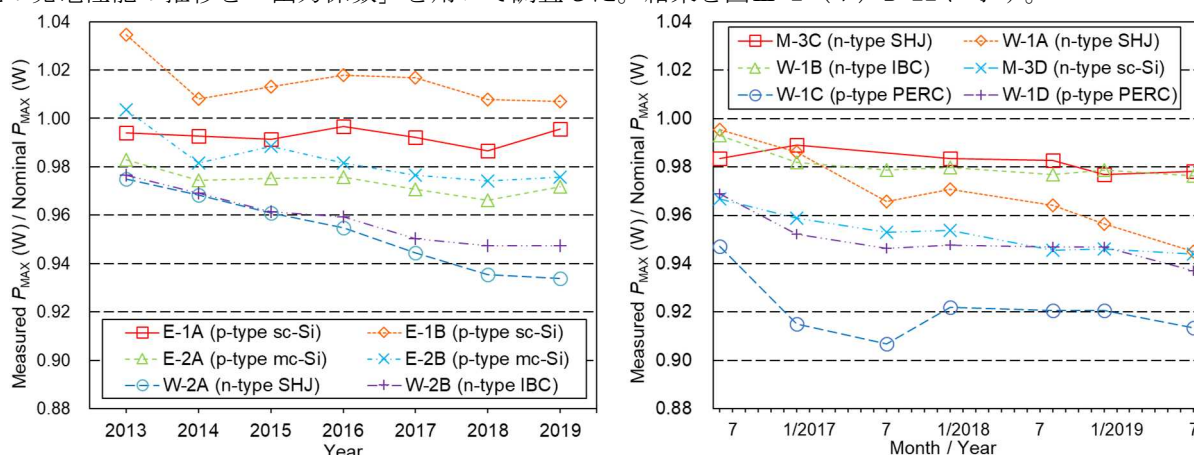
① 各種太陽電池の発電量評価技術の開発（産業技術総合研究所と共同実施）

結晶 Si 太陽電池の発電性能の年劣化率を調査するため、佐賀県鳥栖市に所在する産業技術総合研究所九州センターに導入された、6 種類 12 型式の結晶 Si 太陽電池の発電性能を、発電電力等の屋外測定データと標準試験条件における最大出力等の屋内測定データを用いて評価した。表Ⅲ-2-(ホ)-B-1 には対象とした太陽電池の詳細を示す。

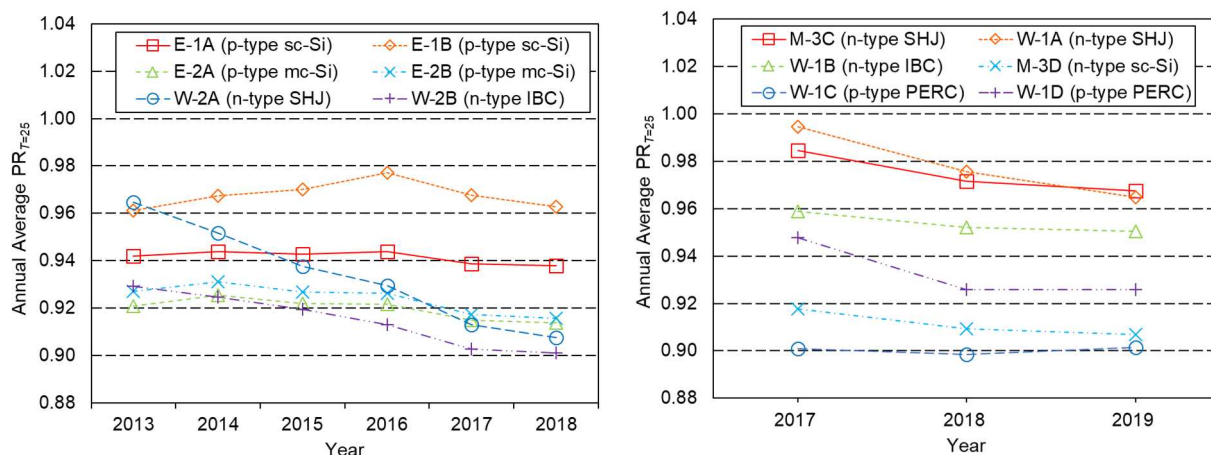
表Ⅲ-2-(ホ)-B-1 6 種類 12 型式の結晶シリコン太陽電池の導入区域、種類、定格出力、アレイ構成、導入年月

Section	Kinds	Nominal P_{MAX} (kW)	Array Configuration	Installation Mon/Year
E-1A	p-type Al-BSF sc-Si	5.04	7S × 1P × 4A	09/2010
E-1B	p-type Al-BSF sc-Si	4.90	5S × 1P × 4A	12/2012
E-2A	p-type Al-BSF mc-Si	5.00	6S × 1P × 4A	09/2010
E-2B	p-type Al-BSF mc-Si	5.00	5S × 1P × 4A	12/2012
W-2A	n-type SHJ sc-Si	4.80	5S × 1P × 4A	12/2012
W-2B	n-type IBC sc-Si	4.68	6S × 1P × 4A	12/2012
M-3C	n-type SHJ sc-Si	1.55	5S × 1P × 1A	06/2016
M-3D	n-type sc-Si	1.89	7S × 1P × 1A	06/2016
W-1A	n-type SHJ sc-Si	1.25	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1B	n-type IBC sc-Si	1.05	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1C	p-type PERC sc-Si	1.48	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1D	p-type PERC sc-Si	1.45	5S × 1P × 1A	06/2016

標準試験条件における屋内測定データの解析を行い、結晶 Si 太陽電池の発電性能の推移を「室内測定出力」を用いて調査した。結果を図Ⅲ-2-(ホ)-B-21 に示す。また、屋外測定データの解析も行い、結晶 Si 太陽電池の発電性能の推移を「出力係数」を用いて調査した。結果を図Ⅲ-2-(ホ)-B-22 に示す。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-21 (左) 2012 年 12 月、(右) 2016 年 6 月に導入した結晶 Si 太陽電池の室内測定出力の推移



図Ⅲ-2-(ホ)-B-22 (左) 2012年12月、(右)2016年6月に導入した結晶Si太陽電池の出力係数の推移

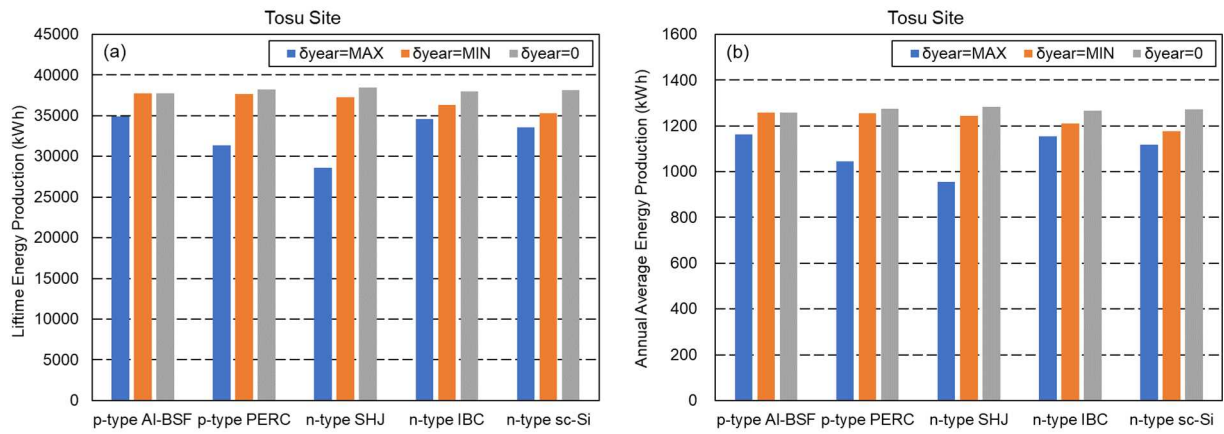
各種結晶Si太陽電池の屋外測定及び標準試験条件におけるソーラシミュレータを用いた屋内測定に基づいて算出した年劣化率(%/年)を、種類毎にまとめた値を表Ⅲ-2-(ホ)-B-2に示す。

表Ⅲ-2-(ホ)-B-2 各種結晶Si太陽電池の年劣化率(%/年)の最小値と最大値

Kinds	Degradation rates
	(%/year)
p-type Al-BSF	0.0-0.5
p-type PERC	0.1-1.2
n-type SHJ	0.2-1.7
n-type IBC	0.3-0.6
n-type sc-Si	0.5-0.8

2016年6月に導入した6型式の結晶Si太陽電池は、測定期間が3年間と短いため、初期における過渡期の年劣化率を算出している可能性がある。より高い精度の年劣化率を算出するには、長期間の屋内・屋外測定を続ける必要がある。また、3型式(W-2A, M-3C, W-1A)のn-type SHJ太陽電池の中でM-3Cが示す最大の年劣化率(1.7%/年)は、調査した結晶Si太陽電池にて、唯一の商用化前のプロトタイプモジュールの年劣化率であることに注意する必要がある。4型式(-1A, E-1B, E-2A, E-2B)のp-type Al-BSF太陽電池は、初期における光誘起劣化を含めても最大の年劣化率は0.5%/年であり、調査した太陽電池の中で年劣化率の最も小さい結晶Si太陽電池であることが示された。

日本気象協会は、佐賀県鳥栖市に加えて、北海道札幌市、茨城県つくば市、岐阜県岐阜市、鹿児島県大島郡知名町(沖永良部島)の5日射気候区に対応する5ヶ所において、2007年から(つくばサイトは2011年に測定開始)様々な気象データを計測している。表Ⅲ-2-(ホ)-B-2に示す年劣化率を用いて、日本の5日射気候区における、5種類(p-type Al-BSF, p-type PERC, n-type SHJ, n-type IBC, n-type sc-Si)の結晶Si太陽電池により構築される、太陽光発電システム1kWあたりの30年間の経年劣化を考慮した生涯発電量(kWh)を算出した。さらに、理解を簡単にするため、生涯発電量を30で除し1年当たりの年平均発電量を算出した。佐賀県鳥栖市における結果を図Ⅲ-2-(ホ)-B-23に示す。 δ は年劣化率を示し、 $\delta_{\text{year}}=\text{MAX}$ 、 $\delta_{\text{year}}=\text{MIN}$ は、それぞれ、年劣化率の最大値、最小値に対応する。 $\delta_{\text{year}}=0$ は、経年劣化を考慮しない場合の結晶Si太陽電池の発電性能を示す。



図III-2-(ホ)-B-23 各種結晶 Si 太陽電池の (左) 30 年間の生涯発電量、(右) 1 年当たりの年平均発電量

②メガソーラーの発電量診断手法の開発

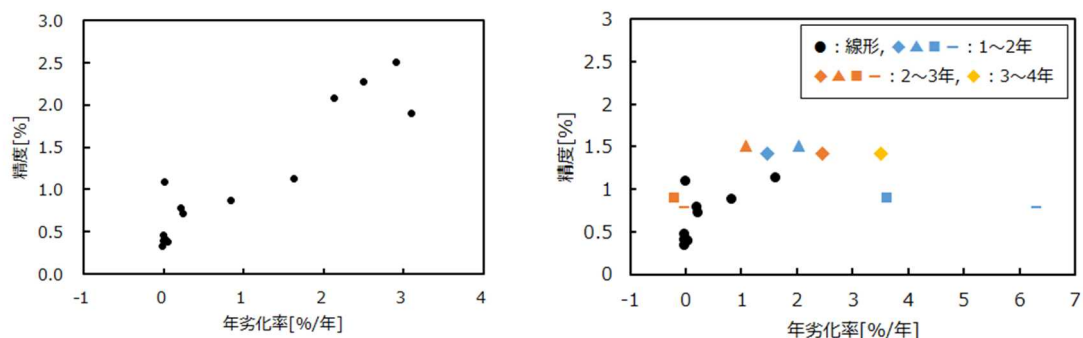
設置後数年程度実稼働しており現在も運用中の合計 7 サイトのメガソーラーの 14 のパワーコンディショニングシステム単位の発電データの解析を行った。解析対象の詳細を表 III-2-(ホ)-B-3 に示す。

独自技術を用いて明らかにした日射強度の時間およびエリア変動特性等に基づき、日射観測などが不備なサイトも含めて計測項目に応じた年劣化率の算出を行った。その結果、2%程度の精度でメガソーラーの発電性能の年劣化率が算出可能であることを明らかにした。さらに、メガソーラーの発電性能の年劣化率が高いほど、発電性能の推定精度が低くなる傾向を示した。詳細に調査すると、年劣化率の大きいメガソーラーの発電性能は、温度補正を行ったにもかかわらず残存する季節依存性を示した。この季節依存性を再補正することにより、図 III-2-(ホ)-B-24 に示すように、調査したすべてのメガソーラーの発電性能の年劣化率を、1%程度の精度で算出できることを確認した。

表 III-2-(ホ)-B-3 7 サイトのメガソーラーの計測期間と計測項目

サイト	データ計測期間 ¹	日射	気温	パネル温度	PCS_DC	PCS_AC ²	連系点 ²
A	2011/6~2016/4	○	○	○	○	○	○
B	2012/1~2016/4	○	○	○	○	○	○
C	2012/6~2016/3	○	○	○	○	○	×
D	2015/2~2016/5	○	○	○	○	○	×
E	2011/1~2016/3	○	○	×	×	○	○
F	2013/11~2016/10	○	×	○	×	○	×
G	2012/4~2016/10	○	×	○	○	○	○

1: 一時期欠測有を含む。 2: 有効電力。(○: 計測データ有、×: 計測データ無)



図III-2-(ホ)-B-24 メガソーラーの発電性能の (左) 年劣化率と推定精度の関係、(右) 再補正後の年劣化率と推定精度の関係

③IEC/TC82/WG2 における発電量定格 (IEC61853) の確立

日本気象協会が公開している日射スペクトルデータベース ver. 2.0 から、鳥栖サイトで計測した 1 年間の気象データを抽出し、IEC61853-4 で規定されたフォーマットに整形した。日本の代表的な気象データとして、IEC61853-4 規格案に提出した。2018 年 5 月に米国 (Wilmington) 開催された IEC/TC82/WG2 に参加し、IEC61853-3 と IEC61853-4 の審議に引き続き参加した。その後、最終国際規格案 (FDIS) に進み、2018 年 8

月に IEC61853-3, -4 Edition 1.0 は国際規格 (IS) として成立し発行された。IEC61853-4 には、発電量定格を算出するための 6 つの気象データが定義されている。NEDO プロジェクトにおいて佐賀県鳥栖市に位置する産業技術総合研究所九州センターで計測した気象データは、“Subtropical coastal” と称される 1 気象データとして csv ファイルに収録されている。

2. 実用化・事業化見通し

【国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学（再委託先）】

太陽電池モジュールの劣化現象を体系的に整理するとともに、劣化メカニズムを明確化することにより、PID をほぼ完全に抑止可能な手法を考案し、その有効性を実証した。また、劣化抑止の指導原理を提示し、複数の選択肢を示すことにより、太陽電池メーカー個々の事情に応じて複数の解決策から最適解を選択し、指導原理に基づいた劣化抑止法をメーカー自らが個々の製品に最適化して開発することを可能とした。このように、劣化を抑止する原理原則を提示することと、個々のメーカーの事情に応じてアレンジ可能な自由度の大きい選択肢を示すことが、早期の実用化・事業化に繋がると考える。さらに、屋外曝露に対して 100 倍以上の加速係数の試験法を開発すると最終目標に対して、4500 倍と大幅に上回る加速係数の試験法を開発した。さらに、この試験法はモジュール化せずともセルの信頼性を明確化可能なものであり、太陽電池メーカーのセル開発の迅速化に資するものである。当該試験法は SEMI PV79-0817 として標準化が成立しており、既にメーカーでの太陽電池用電極開発に適用されている。

【デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社】

太陽電池モジュールメーカーや部材メーカーにおいて紫外線照射試験の重要性が認識されるようになった。研究・試験機関においては、紫外線照射を含む複合試験法の開発が始まり、IEC 会議での議論も活発になった。

【東レ株式会社】

本研究開発で得られた成果は学会発表や国際標準化会議への提言を行うこと等により実用化される。

【石川県工業試験場】

1998 年に設置した石川県工業試験場の 200 kW 太陽光発電システムは 20 年超の運用実績を有している。本事業にて、集電回路を 400 V から 1000 V に高電圧化し、2016 年 2 月に測定を開始して 4 年間にわたってデータを蓄積しており、屋外長期曝露モジュールの高電圧化にともなう PID 耐性にかかわる種々のデータを蓄積してきた。今後もデータの収集を継続し、収集データの公開を通して県内外の太陽光発電システムのメンテナンス分野における企業への情報提供のみならず、長期運用に関わる製品開発への支援を行っていく。

【国立大学法人岐阜大学】

本プロジェクトで開発した PID 抑止技術および回復技術の検証は、単セルの太陽電池モジュールを基本として行われた。これらの技術を実用化するためには、市販の太陽電池モジュールにおける検証が必要不可欠である。現在岐阜大学では、他機関と共同研究を行っている。その共同研究では、当該機関が所有する市販太陽光発電システムを用いて本プロジェクトで開発した技術の実用化に必要な知見を得ることを目的としている。

【国立大学法人東京農工大学】

錫薄膜センサによるモジュール内酢酸分布計測法については、モジュールメーカー、部材メーカーのニーズを参考に定量性の改善などを進める。

【国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学】

大学での研究であるため、直接の事業化の計画は無いが、本研究において明らかにした、各種 n 型結晶 Si 太陽電池モジュールの PID 挙動とその機構、遅延、抑止の方法に関する知見は、屋外での PID を予見する上で、重要な結果であると考えられ、n 型結晶 Si 太陽電池モジュールメーカーにとって有益な知見を与えられたと認識している。また、PID 試験法の開発の成果として、セルレベルでの PID 試験も可能とし、その際の真空引きなどの重要性も明らかとしており、セルメーカーにおいて、モジュール化せずにセル自体の PID 耐性を検証する手法を提供できたと考えている。

【学校法人東京理科大学】

北杜メガソーラーにおいて分析した実際のシステムの発電特性から得られた知見を活用し、発電量の評価支援を行うツールにおいて実測日射量を用いた推定発電電力量算出機能を実装した。本ツールは発電事業者の発電設備維持管理において簡易的な発電性能確認機能を提供できることから、多くの利用が見込まれる。

【一般財団法人電力中央研究所】

IEC/TC82/WG2 に関しては、IEC 規格に日本が直接寄与する成果を得ている。太陽電池の発電量評価技術では、5 日射気候区における経年劣化を考慮した 30 年発電量を算出する技術を開発した。この技術は、バンカビリティの評価の簡易化や高度化への利用が可能である。さらに、メガソーラーの発電量診断手法については、現在実運用中のサイトのデータを用いて開発を進めており、観測項目の実態も踏まえて、そのまま現場適用可能な技術となっている。これらは、最終的にはガイドラインとしてまとめることをはじめ、IEC 規格活動を通じて、世界標準への寄与が期待できる。

3. 波及効果

【国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学（再委託先）】

セル電極の酢酸耐性が信頼性向上に重要なこと、インターコネクタがセル表面での酢酸滞留の原因となること、Na に限らず Li や B に起因するセル表面汚染も PID を誘発すること、セルの反射防止膜に高電界がかかりにくい構造にすることが PID 抑止に本質的であることなど、モジュールの劣化メカニズムの探究に留まらず、セルを含めた改善がモジュールの信頼性向上に結び付くとの指針を得ることで、セルモジュールを一体として研究を推進することの重要性を明確化し、学界・産業界のいずれにおいても、そのような体制の重要性が認識されつつある。

太陽電池モジュールの劣化メカニズムを明確化するには、従来用いられてきた電流－電圧特性やせいぜいエレクトロルミネセンス特性に限定されていた評価手法では不十分であり、微視的分析法あるいは化学的分析法を駆使した材料科学的アプローチの重要性を広く知らしめた。セラミックス、高分子、金属、半導体の複合材料で構成される太陽電池モジュールの劣化メカニズムを探求した結果、副次的な成果として、「モジュール科学」と名付けた新しい学理の構築に向けた準備が整った。

本研究で得られた知見を活用し、高効率・長寿命の壁面設置タンデムセル・モジュールを実現するための新規 NEDO プロジェクト「壁面設置（非開口部）タンデム太陽電池モジュールの開発」に、新潟大学（産業技術総合研究所の研究代表者が異動）、北陸先端科学技術大学院大学、青山学院大学（奈良先端科学技術大学院大学の研究代表者が異動）、明治大学（再委託先）、岐阜大学（再委託先）の 5 機関の提案が採択され、研究を開始した。

【デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社】

紫外線照射試験装置メーカーや民間の試験機関の売上げ増が期待される。

【東レ株式会社】

本研究成果により、屋外曝露環境下で起こる劣化と乖離の無い加速試験を提供でき、短期間かつ確度の高い信頼性評価を行うことができる。

【石川県工業試験場】

屋外長期曝露した太陽電池モジュールは、固定価格買い取り制度が終了する今後 10 年で急激に増加することが予想される。SDGs(持続可能な開発目標)の実現において、これらの太陽電池モジュールの有効活用は、再生可能エネルギーの主力電源化を目指す日本において必要不可欠な課題である。そのため、低コストでのリユース事業の拡大や、リユース太陽光発電の市場拡大を目指すにあたってのシステム高電圧化は今後の主流となることが考えられる。既存の稼働中の太陽電池モジュールは 1000 V 超の高電圧化対応は想定されていないものの、本研究成果を活用することでリユース用途としての活用可能性が示されたことから、今後の当該分野の需要増加による市場拡大への波及効果が予想される。

【国立大学法人岐阜大学】

本研究で開発した、PID 抑止技術は市販の太陽電池モジュールを含め、多様な太陽電池モジュール構造に応用可能である。また、PID 抑止技術および PID 回復技術を用いることにより、長期間の発電効率

を高く維持することにつながる。これらの太陽電池モジュールの長寿命化は、発電コストの削減に直結する。これらの技術を実用化することにより、太陽光発電システムの普及の促進が期待できる。

【国立大学法人東京農工大学】

錫薄膜センサによるモジュール内酢酸分布計測法については、当初予測していなかったセンサ応答と太陽電池出力が初期値の90%に低下する時間の間の高い相関についてさらに検討し、寿命予測への適用の可能性を探る。

【国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学】

本プロジェクトで開発したセルレベルでのPID試験法は、本学の研究対象であったn型セルだけでなく、汎用のp型セルにも適用可能であることを確認しており、モジュール部材やセル中の薄膜単体へのPID試験を行う手法として、幅広く活用できると考えられる。

【学校法人東京理科大学】

現在市場で最も普及している結晶Si系太陽電池モジュールの長期的な発電特性と劣化率を明らかにし、その特徴を考慮した発電量評価支援を行うツールを作成したことで、発電事業におけるシステムの健全性評価に役立つことが期待できるほか、今後は実際のシステムでもリパワリングや中古市場に向けた発電性能評価が行われることが見込まれているため、そのような分野でも活用が進むと期待される。

【一般財団法人電力中央研究所】

本研究により確立した発電量推定技術により、STCで得られた定格出力(W)で表示された現在の銘板値に加え、推定発電量(Wh)を銘板値に加えることが可能となる。国内では代表的な気象条件である佐賀県鳥栖市のサイトでのデータを使用しているため、国内限定ではあるものの、直接的な価値になる発電量が銘板値に明記されることで、モジュールの付加価値が大いに向上する。さらには、世界各地での気象データに対して、本研究で得られた発電量推定技術を適用することにより、気象条件毎の発電量を銘板値に明記することも可能となり、発電事業者が太陽光発電所の建設地毎に最適な種類の太陽電池モジュールを選択することが可能となる。

国内外のモジュール製造メーカーから測定データに関する問い合わせがあり、すでに、国内モジュール製造メーカーには測定データを提供しており、モジュール製造メーカーの製造品質の向上に貢献した。

メガソーラーの発電量診断技術を開発することにより、適切な保守で発電量の維持が可能になるばかりでなく、上空からのドローンによる赤外線画像撮影での故障検出など、新技術の活用も含め、設備保守点検産業の育成につながる。

IEC61853シリーズ発行され、世界で6ヶ所のモジュールパフォーマンスレシオが算出可能になり、様々な気候条件における太陽光発電システム発電量の比較が容易になる。

4. 今後の展開

【国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学（再委託先）】

太陽電池セルモジュールの高性能化には高効率化と長期信頼性の両立が重要であり、セルモジュールの高効率化を図る研究を進める過程で、今回のプロジェクトで得られた信頼性向上に関する知見を取り込んでいく。

【デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社】

近い将来、屋外曝露時の劣化メカニズムを忠実に再現する実用的な試験法が確立されることで、公正な競争による業界の健全な成長が期待できることとなり、結果、製品の品質と信頼性を重視する特に国内メーカーにおいて、売上げ増や事業拡大を可能とする差別化戦略が実行されることを希望する。

【東レ株式会社】

2019年度最終目標のうち、①加速試験と屋外曝露の相関性を解明する、②モジュールが受けるストレス量を正確に理解する、に関しては達成済みである。一方、③劣化メカニズムを再現する加速試験（加速係数100倍以上、精度±5%以内）を開発する、に関して精度の見極めが課題であり、裏面材に対する加速試験に関し、長期曝露モジュールの分析結果をもとにシミュレーション方法の最適化が必要である。モジュールに対する加速試験に関し、屋外曝露モジュールと加速試験後モジュールとの劣化

状態の比較により劣化モードを検証し、加速試験に反映していくべきと考える。

【石川県工業試験場】

2. 実用化・事業化見通しの項で記したように、太陽光発電のコスト低減の目標実現に向け、引き続き、太陽電池の高電圧化によるシステムコストの低減、PID の抑制技術の開発に取り組む。また、長期曝露した既設の太陽電池をリユースする設備システムの更新が今後増えることが予想されるが、今回の成果を広く周知することで、システム高電圧化の指針となる情報の発信に努める。

【国立大学法人岐阜大学】

現在他機関と行っている共同研究において、PID 抑止技術および回復技術の実用化を目指した検証を行う。得られた知見をもとに、当該機関と協議し実用化の可能性を探る。

【国立大学法人東京農工大学】

錫薄膜センサによるモジュール内酢酸分布計測法については、モジュールレベルでの新規かつ高速な試験法としての適用可能性を探る。

【国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学】

PID に関する学問的な側面として、Na が結晶 Si に侵入する機構が明らかとなっておらず、この解明を進める。汎用 p 型結晶 Si モジュールでは、窒化 Si 膜が無いセルを用いると、PID が全く起きないことが示されており、n 型フロントエミッタ型モジュールにおいても、窒化 Si 膜を除去すると Na 由来の PID が遅延することを本研究において確認した。これらの事実は、窒化 Si が結晶 Si に Na を侵入させる働きを有することを示唆しており、その素過程解明を進めることで、窒化 Si 膜を有するセルを用いたモジュールの Na 由来の PID に対して、基板の極性やセル構造によらない根本的かつ普遍的な解決策の提案を目指す。

【学校法人東京理科大学】

運用開始から 10 年以上が経過する北杜メガソーラーでは、今後、発電性能の劣化に加えて様々な不具合を含む発電性能の低下が徐々に発生することが見込まれる。20 年以上の運用期間に向けて、今後も可能な限り長期的な発電特性と劣化率評価に加えて不具合の影響評価などを行い、得られた知見を発電所の運用技術として活用していく。

【一般財団法人電力中央研究所】

これまで調査してきた 6 種 12 型式の結晶 Si 太陽電池に、新たに 3 型式の高効率結晶 Si 太陽電池を追加導入した。これらの結晶 Si 太陽電池は、2020 年度以降も屋外測定や屋内測定を継続し、より長期間の発電データに基づいて、発電性能の経年変化と故障率を評価する。また、比較的劣化率の大きい高効率結晶 Si 太陽電池の劣化機構の解明に取り組む。

参考文献

Ⅲ-1) 寺田、網岡、田中、太陽エネルギー、vol. 41, no. 2, pp. 17-22 (2015).

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	1 (0)	1 (0)	1 (0)	2 (1)	0 (0)	5 (1)
論文	3	8	8	16	19	54
研究発表・講演 (うち国際会議)	23 (4)	84 (25)	82 (28)	75 (27)	93 (25)	357 (109)
新聞・雑誌等への掲載	2	2	6	7	16	33
受賞	2	1	4	2	1	10
標準化他	0	0	2	2	5	9
展示	1	2	3	4	2	12

(2020年8月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人岐阜 大学	特願 2016-56313	国内	2016/3/18	公開	太陽電池の性能劣 化回復方法	吉田弘樹 野々村修一 大橋史隆
2	国立大学法人岐阜 大学	特願 2017-36400	国内	2017/2/28	公開	太陽電池の性能劣 化回復装置および 方法	吉田弘樹 野々村修一 大橋史隆 志知拓弥
3	国立大学法人岐阜 大学	特願 2017-164885	国内	2017/8/29	公開	太陽電池の性能劣 化を回復する装置 およびその方法	吉田弘樹 野々村修一 大橋史隆
4	国立研究開発法人 産業技術総合研究 所	特願 2019-13756	PCT	2019/1/30	公開	太陽電池セルおよ びその製造方法並 びに太陽電池モ ジュール	城内紗千子 増田淳 鯉田崇 柴田肇
5	国立大学法人岐阜 大学 石川県	特願 2019-26109	国内	2019/2/15	公開	電圧誘起劣化を抑 止した太陽電池モ ジュールおよびそ れに用いる部材	大橋史隆 野々村修一 吉田弘樹 傍島靖 亀山展和 橋泰至 豊田丈紫

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	萩原英昭	産業技術総合研究 所	高分子材料の劣化研究にお ける陽電子消滅寿命測定法 の活用	陽電子科学, vol. 6, pp. 29-34	有	2016/3/1
2	Thierry Fouquet 中村 清香 佐藤浩昭	産業技術総合研究 所	MALDI Spiral TOF high- resolution mass spectrometry and Kendrick mass defect analysis applied to the characterization of poly(ethylene-co-vinyl acetate) copolymers	Communications in Mass Spectrometry, vol. 30, pp. 973- 981	有	2016/3/8
3	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Behavior of the potential-induced degradation of photovoltaic modules fabricated using flat	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, no. 4S, pp. 04ES14-1-5	有	2016/3/24

			mono-crystalline silicon cells with different surface orientations			
4	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Changes in the current density-voltage and external quantum efficiency characteristics of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules with a rear-side emitter undergoing potential-induced degradation	Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 151, pp. 113-119.	有	2016/7
5	Hideaki Hagihara Masao Kunioka Hiroyuki Suda Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Degradation of encapsulants for photovoltaic modules made of ethylene vinyl acetate studied by positron annihilation lifetime spectroscopy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, no. 10, pp. 102302-1-5.	有	2016/9/14
6	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Progression of rapid potential-induced degradation of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules	Applied Physics Express, vol. 9, no. 11, pp. 112301-1-4.	有	2016/10/21
7	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Reduction in the short-circuit current density of silicon heterojunction photovoltaic modules subjected to potential-induced degradation tests	Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 161, pp. 439-443.	有	2016/12/27
8	Atsushi Masuda Chizuko Yamamoto Tadanori Tanahashi Hitoshi Sai Takuya Matsui	産業技術総合研究 所	Direct evidence for pn junction without degradation in crystalline Si photovoltaic modules under hygrothermal stresses	Proceedings of 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 904-906.	無	2016
9	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Potential-induced degradation behavior of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules with a rear-side emitter	Proceedings of 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 938-942.	無	2016
10	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Electrical detection of gap formation underneath finger Electrodes on c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor under hygrothermal conditions	Proceedings of 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1075-1079.	無	2016
11	Atsushi Masuda Yukiko Hara	産業技術総合研究 所	Potential-induced degradation of thin-film Si photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 4S, pp. 04CS04-1-5.	有	2017/2/15

12	Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学	Degradation behavior of crystalline silicon solar cells in a cell- level potential-induced degradation test	Solar Energy, vol. 155, pp. 739-744	有	2017/7/13
13	Naoyuki Nishikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学	Direct observation of changes in the effective minority-carrier lifetime of SiN _x - passivated n-type crystalline-silicon substrates caused by potential-induced degradation and recovery tests	Microelectronics Reliability, vol. 79, pp. 91-95	有	2017/11/5
14	Tadanori Tanahashi Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Degradation behavior with acetic acid in crystalline silicon photovoltaic cells	Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1462-1465	無	2017
15	Yoshiyuki Kobayashi Hideyuki Morita Kentaro Mori Atsushi Masuda	東レ 産業技術総合研究 所	Effect of light irradiation treatment on hygrothermal degradation of crystalline silicon photovoltaic modules	Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1702-1704	無	2017
16	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Cause of current- collection failure observed in I _{sc} -reduction phase of PV cells and modules exposed to acetic acid	Proceedings of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1268-1270.	無	2017
17	Naoyuki Nishikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学	Potential-induced degradation of a Si nitride/crystalline Si interface observed through minority carrier lifetime measurement	Proceedings of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1385-1388.	無	2017
18	Atsushi Masuda Yukiko Hara	産業技術総合研究 所	Guiding principle for crystalline Si photovoltaic modules with high tolerance to acetic acid	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 4S, pp. 04FS06-1-5	有	2018/3/12
19	Yutaka Komatsu Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Multistage performance deterioration in n-type crystalline silicon photovoltaic modules undergoing potential- induced degradation	Microelectronics Reliability vol. 84, pp. 127-133	有	2018/3/26
20	Seira Yamaguchi Chizuko Yamamoto Keisuke Ohdaira Atsushi Masuda	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Comprehensive study of potential-induced degradation in silicon heterojunction photovoltaic cell modules	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 26, no. 9, pp. 697-708	有	2018/4/16
21	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata	産業技術総合研究 所	Localization and characterization of a degraded site in	IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 8, no. 4, pp.	有	2018/6/13

	Atsushi Masuda		crystalline silicon photovoltaic cells exposed to acetic acid vapor	997-1004		
22	Sachiko JoNai Tadanori Tanahashi Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Effect of bias voltage application on potential-induced degradation for crystalline silicon photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 8S3, pp. 08RG01-1-5	有	2018/6/27
23	Fumitaka Ohashi Yoshiki Mizuno Hiroki Yoshida Hiroya Kosuga Taishi Furuya Ryo Fuseya Ruben Jerónimo Freitas Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Sodium distribution at the surface of silicon nitride film after potential-induced degradation test and recovery test of photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 8S3, pp. 08RG05-1-6	有	2018/7/9
24	Hideaki Hagihara Hiroaki Sato Yukiko Hara Sachiko Jonai Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Lamination-interface-dependent deacetylation of ethylene vinyl acetate encapsulant in crystalline Si photovoltaic modules evaluated by positron annihilation lifetime spectroscopy	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 8, pp. 082301-1-6	有	2018/7/12
25	Atsushi Masuda Yukiko Hara	産業技術総合研究所	Effect of light irradiation during potential-induced degradation tests for p-type crystalline Si photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 8S3, 08RG13-1-4	有	2018/7/19
26	Ryo Hamaoka Kentaro Iwami Tomohiro Itayama Hideaki Nagasaki Satoru Takemoto Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大学 産業技術総合研究所	Detection of acetic acid produced in photovoltaic modules based on tin film corrosion during damp heat test	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 8S3, pp. 08RG16-1-5	有	2018/7/20
27	Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学	Effect of evacuating a chamber on the degradation rate of solar cells in a cell-level potential-induced degradation test	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 10, pp. 108002-1-2	有	2018/8/29
28	Kohjiro Hara Minoru Akitomi Atsushi Masuda Yasuo Chiba	産業技術総合研究所	Potential-induced degradation of n-type crystalline Si photovoltaic modules in practical outdoor systems	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 11, pp. 117102-1-8	有	2018/9/27
29	Yoshiyuki Kobayashi	東レ 産業技術総合研究	Effect of barrier property of backsheets on	Japanese Journal of Applied	有	2018/11/8

	Hideyuki Morita Kentaro Mori Atsushi Masuda	所	degradation of crystalline silicon photovoltaic modules under combined acceleration test composed of UV irradiation and subsequent damp-heat stress	Physics., vol. 57, no. 12, pp. 127101-1-7		
30	Seira Yamaguchi Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究所	Rapid progression and subsequent saturation of polarization-type potential-induced degradation of n-type front-emitter crystalline-silicon photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 12, pp. 122301-1-6	有	2018/11/12
31	Sachiko Jonai Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Origin of Na causing potential-induced degradation for p-type crystalline Si photovoltaic modules	AIP Advances, vol. 8, no. 11, pp. 115311-1-8	有	2018/11/13
32	Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Annual degradation rates of recent c-Si PV modules under subtropical coastal climate conditions	Proceedings of 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 705-708	無	2018
33	Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Annual degradation rates estimated from outdoor and indoor performance under STC	Grand Renewable Energy 2018 Proceedings	無	2018
34	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Corrosion-induced AC impedance elevation in front electrodes of crystalline silicon photovoltaic cells within field-aged photovoltaic modules	IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 9, no. 3, pp. 741-751, Erratum: vol. 9, no. 4, p. 1154	有	2019/2/8
35	Atsushi Masuda Yukiko Hara Yasuyoshi Shiina Shota Okamoto Tamotsu Okamoto	産業技術総合研究所 木更津工業高等専門学校	Similarity of potential-induced degradation in superstrate-type thin-film CdTe and Si photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. SB, pp. SBBF07-1-6	有	2019/2/25
36	Yoshiyuki Kobayashi Hideyuki Morita Kentaro Mori Atsushi Masuda	東レ 産業技術総合研究所	Investigation of UV and hygrothermal stresses to back side of rack mounted photovoltaic modules	Renewable Energy Focus, vol. 29, pp. 107-113	有	2019/4/29
37	Keisuke Ohdaira Yutaka Komatsu Tomoyasu Suzuki Seira Yamaguchi Atsushi Masuda	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Influence of sodium on the potential-induced degradation for n-type crystalline silicon photovoltaic modules	Applied Physics Express, vol. 12, no. 6, pp. 064004-1-4	有	2019/5/14
38	Sachiko Jonai Aki Tanaka Kazuo Muramatsu Genki Saito Kyotaro Nakamura	産業技術総合研究所 ナミックス 豊田工業大学 明治大学	Effect of additives in electrode paste of p-type crystalline Si solar cells on	Solar Energy, vol. 188, pp. 1292-1297	有	2019/8

	Atsushi Ogura Yoshio Ohshita Atsushi Masuda		potential-induced degradation			
39	Mohammad Aminul Islam Dong Chung Nguyen Yasuaki Ishikawa	奈良先端科学技術大学院大学	Effective minority carrier lifetime as an indicator for potential-induced degradation in p-type single-crystalline silicon photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. 10, pp. 106507-1-10	有	2019/9/16
40	Sachiko Jonai Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 豊田工業大学	Universal explanation for degradation by charge accumulation in crystalline Si photovoltaic modules with application of high voltage	Applied Physics Express, vol. 12, no. 10, pp. 101003-1-4	有	2019/9/20
41	Seira Yamaguchi Chizuko Yamamoto Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Influence of backsheet materials on potential-induced degradation in n-type crystalline-silicon photovoltaic cell modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. 12, pp. 120901-1-3	有	2019/11/6
42	Tomoyasu Suzuki Seira Yamaguchi Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira,	北陸先端科学技術大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究所	Effect of a SiO ₂ film on the potential-induced degradation of n-type front-emitter crystalline Si photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. SC, pp. SCCD02-1-5	有	2019/11/29
43	Keisuke Ohdaira Yutaka Komatsu Tomoyasu Suzuki Seira Yamaguchi Atsushi Masuda	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation of n-type front-emitter crystalline silicon photovoltaic modules with different degradation stages	Proceedings of 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 822-824	無	2019
44	Dong Chung Nguyen Yasuaki Ishikawa Cong Thanh Nguyen Keisuke Ohdaira Atsushi Masuda Yukiharu Uraoka	奈良先端科学技術大学院大学 北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Influence of UV light on the increase of SiN _x conductivity toward elucidation of potential induced degradation mechanism	Proceedings of 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 317-320	無	2019
45	Sachiko Jonai Yasushi Tachibana Kyotaro Nakamura Yasuaki Ishikawa Yukiharu Uraoka Atsushi Masuda	奈良先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所 石川県工業試験場 豊田工業大学	Roles of SiN _x in potential-induced degradation for p-type crystalline Si photovoltaic modules	Proceedings of 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1969-1971	無	2019
46	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Corrosion under front electrodes of crystalline silicon photovoltaic cells predominantly contributes to their performance degradation	Proceedings of 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 2013-2016	無	2019
47	Atsushi Masuda Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda	産業技術総合研究所 石川県工業試験場 奈良先端科学技術	Influence of shadow on shunt-type potential-induced degradation for crystalline Si	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. SG, pp.	有	2020/2/19

	Toshiharu MiNamikawa Yasuaki Ishikawa Kinichi Ogawa Yukiko Hara Keiichiro Sakurai	大学院大学	photovoltaic modules exposed outdoors	SGGF04-1-7		
48	Dong C. Nguyen Yasuaki Ishikawa Sachiko Jonai Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Yukiharu Uraoka	奈良先端科学技術 大学院大学 VietNam Academy of Science and Technology 産業技術総合研究 所 豊田工業大学	Elucidating the mechanism of potential induced degradation delay effect by ultraviolet light irradiation for p-type crystalline silicon solar cells	Solar Energy, vol. 199, pp. 55-62	有	2020/2/21
49	Yasuo Cho Sachiko Jonai Atsushi Masuda	東北大学 産業技術総合研究 所	A scanning nonlinear dielectric microscopy investigation of potential-induced degradation in monocrystalline silicon solar cells	Applied Physics Letters, vol. 116, no. 18, pp. 182107-1-4	有	2020/5/6
50	Atsushi Masuda Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Sachiko Jonai Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda Toshiharu Minamikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	産業技術総合研究 所 石川県工業試験場 北陸先端科学技術 大学院大学	Influence of hygrothermal stress on potential-induced degradation for homojunction and heterojunction crystalline Si photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. 7, pp. 076503- 1-8	有	2020/6/26
51	Seira Yamaguchi Chizuko Yamamoto Yoshio Ohshita Keisuke Ohdaira Atsushi Masuda	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	Influence of emitter position of silicon heterojunction photovoltaic solar cell modules on their potential-induced degradation behaviors	Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 216, pp. 110716-1- 6,	有	2020/8/14
52	Atsushi Masuda	新潟大学	Reliability improvement and remaining issues on photovoltaic cells and modules	ECS arXIV, DOI: 10.1149/osf.io/ suzay	無	2020/8/20
53	Tomoyasu Suzuki Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所 新潟大学	Effect of a silicon nitride film on the potential-induced degradation of n-type front-emitter crystalline silicon photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. 10, pp. 104002-1-5	有	2020/9/15
54	Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究 所	Potential - induced degradation in photovoltaic modules composed of interdigitated back contact solar cells in photovoltaic systems under actual operating condition	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip.3329	有	2020/9/16

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	萩原英昭 国岡正雄 須田洋幸 原由希子 増田淳	産業技術総合研究 所	陽電子消滅寿命法による太陽電池 封止用エチレンビニルアセテート 樹脂の劣化解析	マテリアルライフ 学会第 26 回研究発 表会	2015/7/3
2	萩原英昭 国岡正雄 須田洋幸 原由希子 増田淳	産業技術総合研究 所	陽電子消滅寿命法による太陽電池 封止材の劣化解析	第 52 回アイソト プ・放射線研究発 表会	2015/7/7
3	辺田祐志 Thi Hong Trang Ngo 土井卓也 増田淳	デュポン 産業技術総合研究 所	紫外光照射と信頼性 (招待講演)	独立行政法人日本 学術振興会産学協 力研究委員会次世 代の太陽光発電シ ステム第 175 委員 会モジュール・シ ステム分科会第 2 回研究会・次世代 シリコン太陽電池 分科会第 3 回研究 会 合同研究会	2015/7/22
4	Taisei Kitamoto Yuzuru Ueda	東京理科大学	Output estimation of the crystalline silicon PV module by linear interpolation method using outdoor data	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/14
5	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	異なる面方位を有する平面基板を 用いて作製された単結晶シリコン 太陽電池の電圧誘起劣化挙動	第 76 回応用物理学 会秋季学術講演会	2015/9/15
6	棚橋紀悟 増田淳	産業技術総合研究 所	c-Si PV モジュールにおける湿熱 ストレス誘引劣化の解析方法	第 76 回応用物理学 会秋季学術講演会	2015/9/15
7	浅香孝 板山知広 若生峻太郎 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	ナノ構造 pH センサーによる太陽 電池モジュール内の発生酢酸分布 の評価	第 76 回応用物理学 会秋季学術講演会	2015/9/15
8	板山知広 浅香孝 若生峻太郎 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	Sn 薄膜の相対反射率変化による太 陽電池モジュール内の酢酸検出	第 76 回応用物理学 会秋季学術講演会	2015/9/15
9	萩原英昭 国岡正雄 須田洋幸 増田淳 原由希子	産業技術総合研究 所	陽電子消滅法による高分子の表面 ／界面近傍の自由体積空隙の評価	第 64 回高分子討論 会	2015/9/15

	伊藤賢志 大島永康				
10	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Behavior of the potential- induced degradation for photovoltaic modules fabricated using flat mono- crystalline silicon cells with different surface orientations	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials	2015/9/29
11	Yuzuru Ueda	東京理科大学	System performance and degradation analysis of different PV technologies (招待講演)	4th PV Performance Modelling and Monitoring Workshop	2015/10/23
12	植田 謙	東京理科大学	北杜メガソーラーの長期発電特性 分析と劣化率評価	2015年度日本太陽 エネルギー学会日 本風力エネルギー 学会合同研究発表 会	2015/11/27
13	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Electrical detection of gap formation underneath finger electrodes on c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor under hygrothermal conditions	2016 PV Module Reliability Workshop	2016/2/24
14	北本大晟 植田 謙	東京理科大学	有効日射を用いた線形補間法によ る太陽電池の出力推定	2016年電気学会全 国大会	2016/3/16
15	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	酢酸蒸気曝露環境における c-Si PV セル劣化機構の解析	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/19
16	城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究 所	p 型結晶シリコン太陽電池モ ジュールにおける PID 現象と Na 拡散の関係	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/19
17	大橋史隆 宮腰悠平 水野佳貴 イン マング マング 吉田弘樹 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化加速試験により拡散 した太陽電池モジュール用部材内 の Na の評価	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/19
18	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	裏面側にエミッタを有する n 型 c- Si 太陽電池モジュールの PID 挙動	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/19
19	吉田弘樹 志知拓弥 イン マング マング 大橋史隆 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化した太陽電池 モジュールのレーザー加熱による 回復	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/19
20	板山知広 浅香 孝 若生 峻太郎 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子	東京農工大学 産業技術総合研究 所	金属薄膜の相対反射率変化による 太陽電池モジュール内の酢酸検出	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/21

	増田淳 梅田倫弘				
21	若生峻太郎 浅香孝 板山知広 長崎秀昭 岩見健太郎 梅田倫弘 山本千津子 原由希子 増田淳	東京農工大学 産業技術総合研究 所	太陽電池モジュール内酢酸検出の ための金ナノコンポジット LSPR センサの開発	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/21
22	長崎秀昭 浅香孝 板山知広 若生峻太郎 岩見健太郎 梅田倫弘 山本千津子 原由希子 増田淳	東京農工大学 産業技術総合研究 所	pH 感受性蛍光色素を用いた太陽電 池モジュール内酢酸検出センサの 信頼性向上	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/21
23	西川斉志 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学	Cat-CVD で形成した窒化 Si 膜の高 温アニール後のパッシベーション 能力	第 63 回応用物理学 会春季学術講演会	2016/3/21
24	橋泰至 豊田丈紫 中野幸一 加藤直孝 原由希子 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	高温高湿環境での太陽電池の劣化 が PID に及ぼす影響	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/5/19
25	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n 型リアエミッタ型結晶シリコン 太陽電池の電圧誘起劣化挙動	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/5/19
26	大橋史隆 水野佳貴 吉田弘樹 イン マング マング 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化加速試験における太 陽電池モジュール部材内の Na 移 動過程の評価	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/5/19
27	吉田弘樹 志知拓弥 イン マング マング 大橋史隆 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化した太陽電池モ ジュールの光照射による回復の加 速	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/5/19
28	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	c-Si PV モジュールにおける寿命 評価指標の探索	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/5/19
29	長崎秀昭 浅香孝 板山知広 若生峻太郎 岩見健太郎 山本千津子 原由希子	東京農工大学 産業技術総合研究 所	pH 感受性蛍光色素を用いた太陽電 池モジュール内酢酸検出センサの 開発	第 13 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2016/5/19

	増田淳 梅田倫弘				
30	板山知広 浅香孝 若生峻太郎 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	錫薄膜の相対反射率変化による太陽電池モジュール内酢酸検出	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
31	城内紗千子 萩原英昭 佐藤浩昭 増田淳	産業技術総合研究 所	p型結晶Si太陽電池におけるPIDのメカニズムについて	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/20
32	Atsushi Masuda Chizuko Yamamoto Tadanori Tanahashi Hitoshi Sai Takuya Matsui	産業技術総合研究 所	Direct evidence for pn junction without degradation in crystalline Si photovoltaic modules under hygrothermal stresses	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/7
33	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Potential-induced degradation behavior of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules with a rear-side emitter	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/7
34	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Electrical detection of gap formation underneath finger electrodes on c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor under hygrothermal conditions	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/7
35	増田淳 原浩二郎	産業技術総合研究 所	各種太陽電池モジュールのPID現象と抑止法	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/15
36	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	結晶シリコン太陽電池モジュールにおける寿命評価指標の探索	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/15 2016/6/16
37	原由希子 増田淳	産業技術総合研究 所	薄膜シリコン太陽電池のPID劣化現象と逆電圧印加効果	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
38	大橋史隆 吉田弘樹 イン マング マング 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化加速試験による太陽電池モジュール部材中を移動するNaの化学状態評価	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
39	城内紗千子 萩原英昭 佐藤浩昭 増田淳	産業技術総合研究 所	p型結晶Si太陽電池におけるPIDのメカニズムの解明	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
40	橘泰至 豊田丈紫 中野幸一 南川俊治 原由希子 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	高温高湿環境での太陽電池の劣化がPIDに及ぼす影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
41	吉田弘樹 大橋史隆 イン マング マング	岐阜大学 産業技術総合研究 所	光照射による電圧誘起劣化回復の加速技術の開発	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16

	原由希子 増田淳 野々村修一				
42	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	裏面側に p ⁺ エミッタを有する n 型 単結晶シリコン太陽電池の電圧誘 起劣化	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2016	2016/6/16
43	山本千津子 山口世力 大平圭介 増田淳	産業技術総合研究 所 北陸先端科学技術 大学院大学	ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池 の PID 試験	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2016	2016/6/16
44	佐藤浩昭 Thierry Fouquet 城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究 所	高分解能質量分析法を用いた EVA の劣化解析	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2016	2016/6/16
45	萩原英昭 国岡正雄 須田洋幸 原由希子 増田淳	産業技術総合研究 所	陽電子消滅寿命法による結晶 Si 太陽電池封止材の劣化解析	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2016	2016/6/16
46	長崎秀昭 浅香孝 板山知広 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	pH 感受性蛍光色素を用いた太陽電 池モジュール内酢酸検出センサの 開発	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2016	2016/6/16
47	板山知広 浅香孝 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	錫薄膜の相対反射率変化による太 陽電池モジュール内酢酸検出	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2016	2016/6/16
48	辺田祐志 松尾春美 増田淳	デュボン 産業技術総合研究 所	紫外線照射を含む複合加速試験に よる封止材劣化の解析	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2016	2016/6/16
49	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	結晶シリコン太陽電池モジュール の電圧誘起劣化現象における基板 面方位の影響	第 13 回 Cat-CVD 研 究会	2016/7/8
50	大橋史隆	岐阜大学	太陽電池モジュールの電圧誘起劣 化現象 (PID) (招待講演)	独立行政法人日本 学術振興会産学協 力研究委員会次世 代の太陽光発電シ ステム第 175 委員 会モジュール・シ ステム分科会第 4 回研究会	2016/7/29
51	橋泰至 豊田丈紫 南川俊治 原由希子 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	高温高湿環境が結晶 Si 太陽電池 の PID に及ぼす影響	第 77 回応用物理学 会秋季学術講演会	2016/9/14

52	原由希子 増田淳	産業技術総合研究所	結晶シリコン太陽電池の光照射PID試験	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
53	城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究所	p型c-Si太陽電池モジュールにおけるPIDとNaの拡散の関係	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
54	大橋史隆 水野佳貴 イン マング マング 吉田弘樹 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化加速試験により移動した太陽電池表面におけるNaの分布評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
55	西川斉志 山口世力 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学	SiN _x 膜のパッシベーション性能の電圧誘起劣化	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
56	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究所	c-Si太陽電池における電極腐食過程の解析	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
57	板山知広 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜の相対反射率変化による太陽電池モジュール内酢酸検出	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
58	森田秀幸 岡善之 増田淳	東レ 産業技術総合研究所	太陽電池モジュールへの光照射と湿熱処理の組み合わせ試験	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
59	増田淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュール信頼性の現状と今後の展開：はじめに	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
60	植田譲	東京理科大学	北杜メガソーラーにおける各種太陽電池モジュールの長期発電性能評価 (招待講演)	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
61	辺田祐志 Trang Ngo 青木倫子 土井卓也 増田淳 William J. Gambogi Thomas Felder Alexander Bradley Katherine Stika Mason Terry T. John Trout	デュボン 産業技術総合研究所 E. I. DuPont	太陽電池モジュールの劣化に及ぼす光照射の影響 (招待講演)	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
62	山口世力 原浩二郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n型c-Si太陽電池モジュールの電圧誘起劣化における飽和挙動	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
63	長崎秀昭 板山知広 Nguyen Van Quyen 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	ペントナイト担持pH感受性蛍光色素を用いた太陽電池モジュール内酢酸検出センサの開発	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15

64	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Potential-induced degradation for thin-film Si photovoltaic modules	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials	2016/9/29
65	Keisuke Ohdaira Seira Yamaguchi Kohjiro Hara Atsushi Masuda	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation of photovoltaic modules with n-type crystalline silicon bifacial cells (招待講演)	3rd bifi PV workshop	2016/9/30
66	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Potential-induced degradation and recovery process for thin-film Si photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4
67	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Progression behavior of the potential-induced degradation of n-type c-Si-wafer-based photovoltaic modules with a front-side p+ emitter	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4
68	Hideyuki Morita Miki Terada Yoshiyuki Oka Kentaro Mori Atsushi Masuda	東レ 産業技術総合研究所	Combined test of UV irradiation and highly accelerated hygrothermal treatment for photovoltaic modules using light source with high intensity	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4
69	Hideaki Nagasaki Tomohiro Itayama Kentaro Iwami Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大学 産業技術総合研究所	Developing an acetic acid detection sensor for photovoltaic modules using a pH-sensitive fluorescent dye	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4
70	Keisuke Ohdaira Seira Yamaguchi Chizuko Yamamoto Kohjiro Hara Atsushi Masuda	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation of n-type crystalline silicon photovoltaic modules (招待講演)	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability	2016/10/4

				Investigations in Photovoltaic Modules	
71	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Degradation mechanisms of c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
72	Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda Toshiharu Minamikawa Yukiko Hara Atsushi Masuda	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	Effects of hygrothermal environment on PID acceleration for crystalline Si photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
73	Fumitaka Ohashi Hiroki Yoshida Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Na migration process in crystalline Si photovoltaic modules by potential induced degradation test	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
74	Naoyuki Nishikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学	Activation of surface recombination at a SiN _x /n-type c-Si interface after potential-induced degradation	InterNatioNal Workshop on the SustaiNable Actions for “Year by Year Aging” under RELiability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
75	Chizuko Yamamoto Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 北陸先端科学技術大学院大学	Potential-induced degradation for silicon heterojunction photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
76	Sachiko Jonai Hideaki Hagihara Hiroaki Sato Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Mechanism of potential-induced degradation for p-type crystalline silicon photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year	2016/10/5

				Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	
77	Tomohiro Itayama Hideaki Nagasaki Kentaro Iwami Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大学 産業技術総合研究所	Detecting acetic acid in photovoltaic modules through changes in the relative reflectance of tin films	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
78	萩原英昭 国岡正雄 須田洋幸 原由希子 城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究所	陽電子消滅寿命測定による太陽電池封止材の劣化構造解析	第 21 回高分子分析討論会	2016/10/20
79	Atsushi Masuda Chizuko Yamamoto Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	産業技術総合研究所 北陸先端科学技術大学院大学	Progression of rapid potential-induced degradation of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
80	Tadanori Tanahashi Yukiko Hara Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Acceleration factor of high-speed degradation of photovoltaic cells exposed to acetic acid vapor against that observed in photovoltaic modules tested under damp heat stress conditions	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
81	Sachiko Jonai Hideaki Hagihara Hiroaki Sato Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Root cause of potential induced degradation for p-type crystalline silicon photovoltaic modules	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
82	Seira Yamaguchi Kohjiro Hara Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Time dependence and saturation behavior of the potential-induced degradation of n-type front-emitter photovoltaic modules	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
83	Fumitaka Ohashi Yoshiki Mizuno Hiroki Yoshida Yin Maung Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Migration and distribution analysis of Na in photovoltaic modules by potential induced degradation test	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
84	Taisei Kitamoto Yuzuru Ueda	東京理科大学	The development of PV module degradation analysis method	26th International Photovoltaic Science and Engineering	2016/10/27

				Conference	
85	Atsushi Masuda Kohjiro Hara	産業技術総合研究所	Potential-induced degradation for various kinds of photovoltaic modules (招待講演)	2nd Singapore-Japan Joint Workshop on Photovoltaics, Singapore	2016/10/28
86	森田秀幸 寺田幹 森健太朗 増田淳	東レ 産業技術総合研究所	メタルハライドランプを用いた光照射試験と湿熱試験の組み合わせ試験	2016年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
87	濱岡遼 長崎秀昭 板山知広 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	太陽電池モジュール内酢酸検出のための錫薄膜センサの長寿命化	第1回フォトンクス研究会「光の境界を開拓する!!」	2016/12/2
88	Nguyen Van Quyen 板山知広 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	局在表面プラズモン共鳴による太陽電池モジュール内樹脂封止材劣化の評価	第1回フォトンクス研究会「光の境界を開拓する!!」	2016/12/2
89	増田淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュールの劣化メカニズムと加速試験法 (招待講演)	共同シンポジウム (金沢大学・北陸先端科学技術大学院大学)「エネルギー創製デバイスの将来展望」	2016/12/14
90	棚橋紀悟 原由希子 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究所	c-Si 太陽電池における酢酸による電極腐食過程の解析 (招待講演)	独立行政法人日本学術振興会産学協力研究委員会次世代の太陽光発電システム第175委員会モジュール・システム分科会第5回研究会	2016/12/16
91	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Cause of current-collection failure observed in Isc-reduction phase of PV cells and modules exposed to acetic acid	2017 NREL/SNL/BNL PV Reliability Workshops	2017/2/28
92	増田淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュール信頼性向上のための劣化要因解析と加速試験法開発 (招待講演)	第10回国際太陽電池展 PV EXPO 2017 専門技術セミナー	2017/3/2
93	山口世力 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学	太陽電池セルレベルのPID試験法における試験条件の確立	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/15
94	青木倫子 辺田祐志 原由希子 増田淳 J. Gambogi William Felder Thomas,	デュポン 産業技術総合研究所 E. I. DuPont	太陽電池モジュールの劣化に及ぼす紫外線を含む環境因子の影響	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/16

	T. Trout				
95	小林祥之 森田秀幸 森健太郎 増田淳	東レ 産業技術総合研究 所	光照射が PV モジュールの湿熱劣 化に与える影響	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
96	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	c-Si 太陽電池における表面電極腐 食過程の解析	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
97	梅田倫弘 長崎秀昭 板山知広 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳	東京農工大学 産業技術総合研究 所	pH 感受性蛍光色素センサによる太 陽電池モジュール内酢酸の非破壊 検出	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
98	板山知広 濱岡遼 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	錫薄膜の相対反射率変化による太 陽電池モジュール内酢酸検出(2)	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
99	水野佳貴 大橋史隆 吉田弘樹 小菅寛也 古谷大志 フレイタス ルーベン 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化回復試験により移動 した太陽電池表面における Na お よび Na 化合物の分布評価	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
100	城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究 所	p 型結晶シリコン太陽電池におけ る PID 回復現象と Na の関係	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
101	秋富稔 原浩二郎 増田淳	産業技術総合研究 所	屋外曝露による n 型結晶 Si 太陽 電池モジュールの高電圧誘起劣化 (PID)	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
102	小松豊 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	c-Si 太陽電池モジュールの長時間 電圧誘起劣化試験	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
103	西川斉志 山口世力 大平圭介 増田淳	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n 型リアエミッタ型結晶 Si 太陽電 池モジュールの PID 試験による表 面再結合活性化とその回復	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
104	山本千津子 山口世力 大平圭介 増田淳	産業技術総合研究 所 北陸先端科学技術 大学院大学	ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池 の電圧誘起劣化要因	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
105	橘泰至 豊田文紫 南川俊治 原由希子 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	PID が結晶 Si 太陽電池の高温高湿 劣化に及ぼす影響	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
106	原由希子 増田淳	産業技術総合研究 所	結晶シリコン太陽電池モジュール の高湿度下における光照射 PID 試	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16

			験		
107	吉田弘樹 志知拓弥 ルーベン ジェロニ モ・フレイタス 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化した太陽電池におけ る劣化箇所の光学的特定	第 64 回応用物理学 会春季学術講演会	2017/3/16
108	Hideaki Hagihara Masao Kunioka Hiroyuki Suda Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Degradation assessment of ethylene vinyl acetate encapsulant in crystalline silicon photovoltaic module using positron annihilation lifetime spectroscopy	30th International Symposium on Polymer Analysis and Characterization	2017/6/12
109	増田淳	産業技術総合研究 所	太陽電池モジュールの科学 明確 化された現象と解決すべき課題	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2017	2017/6/13
110	山本千津子 山口世力 大平圭介 増田淳	産業技術総合研究 所 北陸先端科学技術 大学院大学	ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池 の電圧誘起劣化要因	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2017	2017/6/14
111	Thierry Fouquet Hiroaki Sato Hideaki Hagihara Sachiko Jonai Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Characterization of ethylene vinyl acetate copolymers and their degradation products at a molecular level: current situation, pitfalls and future orientation	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2017	2017/6/14
112	岩見健太郎 長崎秀昭 板山知広 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	pH 感受性蛍光色素センサによる太 陽電池モジュール内酢酸の拡散解 析	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2017	2017/6/14
113	濱岡遼 板山知広 長崎秀昭 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	太陽電池モジュール内酢酸検出の ための錫薄膜センサの改善	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2017	2017/6/14
114	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	c-Si PV セル表面電極における酢 酸による 2 段階劣化の機構解析	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2017	2017/6/14
115	小林祥之 森田秀幸 森健太郎 増田淳	東レ 産業技術総合研究 所	光照射が PV モジュールの湿熱劣 化に与える影響	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2017	2017/6/14
116	青木倫子 辺田祐志 原由希子 増田淳、 William J. Gambogi Thomas Felder T. John Trout	デュポン 産業技術総合研究 所 E. I. DuPont	太陽電池モジュールの劣化に及ぼ す光照射の影響	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2017	2017/6/14

117	萩原英昭 佐藤浩昭 原由希子 城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究所	陽電子消滅寿命法による結晶 Si 太陽電池封止材の劣化構造解析	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
118	原由希子 増田淳	産業技術総合研究所	結晶シリコン太陽電池モジュールの光照射 PID 試験	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
119	橋泰至 豊田丈紫 南川俊治 原由希子 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	p 型結晶 Si 太陽電池における PID と高温高湿劣化の相互影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
120	城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究所	p 型結晶シリコン太陽電池における PID 試験時の pn 接合部へのバイアス印加効果	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
121	大橋史隆 水野佳貴 吉田弘樹 小菅寛也 古谷大志 ルーベン ジェロニモ フレイタス 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	太陽電池モジュールの電圧誘起劣化試験および回復試験後におけるセル表面の Na 分布評価	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
122	吉田弘樹 志知拓弥 ルーベン ジェロニモ フレイタス 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化した太陽電池における劣化・回復の光学的評価	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
123	小松豊 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n 型結晶シリコン太陽電池モジュールの長時間電圧誘起劣化試験における劣化挙動	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
124	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	表面側に p+エミッタ層を有する n 型結晶シリコン太陽電池の電圧誘起劣化とその飽和挙動	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
125	西川斉志 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n 型リアエミッタ型結晶シリコン太陽電池モジュールの電圧誘起劣化とその回復	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
126	秋富稔 原浩二郎 増田淳	産業技術総合研究所	屋外曝露による n 型結晶 Si 太陽電池モジュールの高電圧誘起劣化 (PID)	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
127	Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学	Analysis for leakage currents within unlaminate photovoltaic-module like layer stacks in a cell-level potential-induced degradation test	6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies	2017/6/20
128	Yutaka Komatsu Seira Yamaguchi	北陸先端科学技術大学院大学	Long-term potential-induced degradation tests for n-type	6th International Symposium on	2017/6/21

	Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	産業技術総合研究所	c-Si-wafer-based photovoltaic cell modules	Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies	
129	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Cause of current-collection failure observed in I_{sc} -reduction phase of PV cells and modules exposed to acetic acid	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/27
130	Naoyuki Nishikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学	Potential-induced degradation of a Si nitride/crystalline Si interface observed through minority carrier lifetime measurement	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/27
131	橘泰至 豊田丈紫 南川俊治 原由希子 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	p型結晶Si太陽電池におけるPIDと高温高湿劣化の相互影響 太陽電池の信頼性向上に向けて	2017年度石川イノベーション促進セミナー～産総研石川サイト開所1周年記念セミナー～	2017/7/20-21
132	大橋史隆 水野佳貴 吉田弘樹 小菅寛也 古谷大志 ルーベン・ジェロニモ・フレイタス 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化回復試験後の太陽電池窒化膜表面におけるNaの分布評価	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
133	小松豊 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	長時間の電圧誘起劣化試験におけるn型結晶シリコン太陽電池モジュールの劣化挙動	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
134	小林祥之 森田秀幸 森健太郎 増田淳	東レ 産業技術総合研究所	光照射が太陽電池モジュールの湿熱劣化に与える影響	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
135	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化の進行/飽和挙動	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
136	山口世力 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学	太陽電池セルレベルのPID試験法におけるc-Si太陽電池セルの劣化挙動	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
137	濱岡遼 板山知広 長崎秀昭 岩見健太郎 武元哲 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜センサの膜厚増加による太陽電池モジュール内酢酸検出法の改善	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20

138	吉田弘樹 志知拓弥 大橋史隆 ルーベン・ジェロニ モ・フレイタス 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	逆バイアス電流パルスによる高速 なPID回復現象	第14回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2017/7/20
139	城内紗千子 田中亜樹 村松和郎 中村京太郎 小椋厚志 大下祥雄 増田淳	産業技術総合研究 所 ナミックス 明治大学 豊田工業大学	p型結晶シリコン太陽電池の電極 用ペースト中のNaがPIDに及ぼ す影響	第14回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2017/7/21
140	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	長期屋外曝露 c-Si PV モジュール における湿熱劣化機構の解析	第14回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2017/7/21
141	植田謙	東京理科大学	STEP-PV ver.2 の開発と使用方法 について	日本太陽エネル ギー学会太陽光発 電部会第20回セミ ナー	2017/8/1
142	小林祥之 森田秀幸 森健太郎 増田淳	東レ 産業技術総合研究 所	光照射と湿熱処理による複合試験 時における太陽電池モジュールの 劣化挙動	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/5
143	岩見健太郎 長崎秀昭 板山知広 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	pH感受性蛍光色素センサによる太 陽電池モジュール内酢酸分布の可 視化	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/5
144	濱岡遼 岩見健太郎 武元哲 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	太陽電池内酢酸検出用錫薄膜セン サの膜厚増加によるセンサ寿命の 改善	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/5
145	山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 明治大学 産業技術総合研究 所	n型 c-Si 太陽電池の電圧誘起劣化 における飽和とその起源に関する 考察	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/5
146	小松豊 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	高温・高湿試験により事前劣化さ せた n 型リアエミッタ型 c-Si 太 陽電池モジュールの電圧誘起劣化 挙動	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/5
147	棚橋紀悟 原由希子 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	c-Si 太陽電池セルモジュールにお ける湿熱ストレス耐性評価指標	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/7
148	橋泰至 豊田丈紫	石川県工業試験場 産業技術総合研究	PID 試験中における結晶 Si 太陽電 池モジュール内部の電界及び電流	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/7

	南川俊治 原由希子 増田淳	所	解析		
149	水野佳貴 大橋史隆 吉田弘樹 小菅寛也 フレイタス ルーベン 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化加速試験により移動した太陽電池窒化膜表面におけるNa分布の詳細評価	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/7
150	城内紗千子 棚橋紀悟 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	p型結晶シリコン太陽電池のPID試験時のpn接合部へのバイアス印加効果	第78回応用物理学 会秋季学術講演会	2017/9/7
151	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Guiding principle for crystalline Si photovoltaic modules with high tolerance against acetic acid	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials	2017/9/20
152	Yoshiyuki Kobayashi Hideyuki Morita Kentaro Mori Atsushi Masuda	東レ 産業技術総合研究 所	Effect of light irradiation treatment on hygrothermal degradation of crystalline silicon photovoltaic modules	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/26
153	Tadanori Tanahashi Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Degradation behavior with acetic acid in crystalline silicon photovoltaic cells	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/27
154	河瀬貴俊 植田謙	2017年度 太陽エ ネルギー学会 合 同研究発表会	北杜およびニューメキシコサイトの屋外測定データを用いたPVモジュール劣化傾向の分析	2017年度日本太陽 エネルギー学会日 本風力エネルギー 学会合同研究発表 会	2017/10/26
155	Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	産業技術総合研究 所 北陸先端科学技術 大学院大学	What is the potential-induced degradation? -Systematic study on various kinds of photovoltaic cells- (招待講演)	2nd International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2017	2017/11/11
156	Tadanori Tanahashi Yukiko Hara Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Degradation behavior of Electrical contacts with acetic acid in c-Si PV cells	2nd International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2017	2017/11/11
157	Hideaki Hagihara Hiroaki Sato Yukiko Hara	産業技術総合研究 所	Structural analysis of the degraded EVA encapsulant in crystalline silicon	2nd International Workshop on the Sustainable	2017/11/11

	Sachiko Jonai Atsushi Masuda		photovoltaic module using positron annihilation lifetime spectroscopy	Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2017	
158	Takatoshi Kawase Yuzuru Ueda	東京理科大学	Statistical analysis of aging characteristics of PV module output using linear interpolation method	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14
159	Hideaki Hagihara Hiroaki Sato Yukiko Hara Sachiko Jonai Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Degradation analysis of the encapsulant made of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon photovoltaic modules using positron annihilation spectroscopy	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14
160	Kenji Kamiya Yuzuru Ueda	東京理科大学	Development of automatic defect detection method in photovoltaic modules by infrared image analysis	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14
161	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Electrical identification of "aging signature" in crystalline silicon photovoltaic modules exposed in field for long-term	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/15
162	Yoshiyuki Kobayashi Hideyuki Morita Kentaro Mori Atsushi Masuda	東レ 産業技術総合研究所	Investigation and estimation of UV irradiation dosage to back side of rack mounted photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
163	Ryo Hamaoka Tomohiro Itayama Hideaki Nagasaki Kentaro Iwami Satoru Takemoto Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Ueda	東京農工大学 産業技術総合研究所	Lifetime improvement of tin film sensor for detecting acetic acid produced in photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
164	Minoru Akitomi Kohjiro Hara Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Potential-induced degradation in n-type c-Si photovoltaic modules by outdoor exposure	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
165	Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda Toshiharu Minamikawa Yukiko Hara Atsushi Masuda	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	Effects of hygrothermal environment on PID acceleration for crystalline silicon photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16

166	Tomoko Aoki Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Influence of environmental stress factors including light irradiation on photovoltaic module degradation	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
167	Kentaro Iwami Hideaki Nagasaki Tomohiro Itayama Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大学 産業技術総合研究所	Visualization of temporal pH distribution in PV modules during damp heat test using a pH-sensitive fluorescent dye sensors	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
168	Hiroki Yoshida Takuya Shichi Fumitaka Ohashi Ruben Jerónimo Freitas Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Observation of reverse biased Electroluminescence from local shunt of p-type c-Si solar cell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
169	Seira Yamaguchi Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 明治大学 産業技術総合研究所	Rapid saturation of potential-induced degradation in n-type c-Si photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
170	Yutaka Komatsu Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation behavior of n-type rear-emitter c-Si photovoltaic modules prestressed in damp-heat tests	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
171	Keisuke Ohdaira Seira Yamaguchi Chizuko Yamamoto Atsushi Masuda	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	J_{sc} and V_{oc} reductions in silicon heterojunction photovoltaic modules by potential-induced degradation tests	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/17
172	Fumitaka Ohashi Yoshiki Mizuno Hiroki Yoshida Hiroya Kosuga Taishi Furuya Ruben Jerónimo Freitas Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Sodium distributions at the surface of silicon nitride film after potential induced degradation test and recovery test of PV modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/17
173	Sachiko Jonai Tadanori Tanahashi Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Influence of bias application on potential induced degradation for crystalline silicon photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/17
174	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Effects of light irradiation during potential-induced degradation tests for p-type	27th International Photovoltaic	2017/11/17

			crystalline silicon photovoltaic modules	Science and Engineering Conference	
175	増田淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュール劣化現象の体系化 (招待講演)	第2回フロンティア太陽電池セミナー	2017/11/30
176	濱岡遼 武元哲 岩見健太郎 山本千津子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜センサを用いた劣化試験中の太陽電池モジュール内酢酸検出	第2回フォトンクス研究会「光の極限を探る！」	2017/12/1
177	泉洋志郎 植田謙	東京理科大学	DEを用いた I-V カーブフィッティングと線形補間法による PV モジュールの屋外劣化率評価	2018年電気学会全国大会	2018/3/14
178	増田淳	産業技術総合研究所	セルモジュールと信頼性 (招待講演)	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/17
179	青木倫子 原由希子 増田淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュールの劣化に及ぼす紫外線を含む環境因子の影響	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/18
180	濱岡遼 武元哲 岩見健太郎 原由希子 山本千津子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜センサを用いた複合加速試験中の太陽電池モジュール内酢酸検出	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/18
181	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究所	湿熱ストレスによる c-Si 太陽電池劣化部位の同定と温度特性解析	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/18
182	吉田弘樹 大橋史隆 原由希子 城内紗千子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	p型結晶シリコン太陽電池の電圧誘起劣化モデルの一検討	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/18
183	橘泰至 豊田丈紫 南川俊治 小川 錦一 原由希子 櫻井 啓一郎 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	p型結晶 Si 太陽電池への光照射条件の異なる屋外 PID 加速試験	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/18
184	山口世力 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学	セルレベルの電圧誘起劣化試験におけるチャンバー内の真空引きの影響	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/18
185	城内紗千子 田中垂樹 村松和郎 中村京太郎 小椋厚志 大下祥雄 増田淳	産業技術総合研究所 ナミックス 明治大学 豊田工業大学	p型結晶シリコン太陽電池の電極用ペーストが PID に及ぼす影響	第65回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/19

186	原由希子 椎名和由 岡本祥太 岡本保 増田淳	産業技術総合研究所 木更津工業高等専門学校	CdTe 太陽電池モジュールの PID 特性	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/19
187	小菅寛也 大橋史隆 吉田弘樹 水野佳貴 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	導電性原子間力顕微鏡により評価した太陽電池セル表面における電圧誘起劣化加速試験	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/20
188	小松豊 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n 型 c-Si 太陽電池モジュールの長時間電圧誘起劣化後の回復挙動	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/20
189	高田清志郎 テイ ウィン 川口雄大 ラハユ アスター 大橋史隆 吉田弘樹 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	PID 回復試験中の温度変化が太陽電池モジュールのシャント抵抗に与える影響	第 65 回応用物理学会春季学術講演会	2018/3/20
190	Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Annual degradation rates of recent c-Si PV modules under subtropical coastal climate conditions	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/6/11
191	Sachiko Jonai Aki Tanaka Kazuo Muramatsu Kyotaro Nakamura Atsushi Ogura Yoshio Ohshita Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 ナミックス 明治大学 豊田工業大学	Influence of additives in the electrode paste for crystalline Si solar cells on potential-induced degradation	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/6/13
192	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Identification of degraded site in crystalline silicon photovoltaic cells exposed to acetic acid vapor	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/6/14
193	Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Annual degradation rates estimated from outdoor and indoor performance under STC	Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition	2018/6/20
194	増田淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュール劣化要因の明確化と信頼性向上技術 (招待講演)	第 4 回有機・無機エレクトロニクスシンポジウム	2018/6/23
195	大橋史隆 小菅寛也 古谷大志 伏屋亮 吉田弘樹 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化試験前後の太陽電池表面における導電性原子間力顕微鏡を用いた電流分布評価	第 15 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018/7/12

196	城内紗千子 石河泰明 坂田功 浦岡行治 増田淳	産業技術総合研究所 奈良先端科学技術 大学院大学	p型結晶シリコン太陽電池のPID 現象とpn接合部へのイオン注入 効果	第15回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/7/12
197	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n型リアエミッタ型結晶シリコン 太陽電池モジュールのPIDにおけ るバックシート材料の影響	第15回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/7/12
198	山口世力 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	セルレベルのPID試験における チャンバー内の真空引きが劣化挙 動に与える影響	第15回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/7/12
199	小松豊 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n型c-Si太陽電池モジュールの長 時間電圧誘起劣化とその回復	第15回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/7/12
200	橘泰至 豊田丈紫 上田芳弘 山口世力 大平圭介 山本千津子 増田淳	石川県工業試験場 北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	PID試験における太陽電池裏面の 導体有無によるモジュール内部の 電界及び電流解析	第15回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/7/12
201	濱岡遼 浅野正太 武元哲 岩見健太郎 原由希子 山本千津子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	錫薄膜センサを用いたUV+DH複合 試験中の太陽電池内部酢酸検出	第15回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/7/12
202	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	長期屋外曝露PVモジュールにお いて発現する電極腐食由来イン ピーダンス成分の解析	第15回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/7/12
203	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究 所	実使用条件下のヘテロ接合型太陽 電池の発電性能の経時変化	第15回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2018/7/12
204	橘泰至 豊田丈紫 米沢裕司	石川県工業試験場	長期稼働太陽電池の評価研究-劣 化機構の解明に向けて	2018年度石川イノ ベーション促進セ ミナー～産総研石 川サイト開所2周 年記念セミナー～	2018/7/19
205	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Potential-induced degradation of n-type crystalline silicon photovoltaic modules (招待講演)	28th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	2018/8/13
206	Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Recent understanding and perspective for degradation of p-type crystalline Si solar cells under high-voltage stress	28th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and	2018/8/14

			(招待講演)	Processes	
207	Yukiko Hara Yasuyoshi Shiina Shota Okamoto Tamotsu Okamoto Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 木更津工業高等専門学校	Similarity of potential-induced degradation in superstrate-type thin-film Si and CdTe photovoltaic modules	2018 International Conference on Solid State Devices and Materials	2018/9/12
208	橋泰至 豊田丈紫 上田芳弘 山口世力 大平圭介 山本千津子 増田淳	石川県工業試験場 北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	PID 試験中の太陽電池モジュール内部の電流及び電界解析	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/19
209	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	実使用条件下のシリコンヘテロ接合型太陽電池の発電性能の経時変化	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/21
210	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n 型フロントエミッタ型結晶シリコン太陽電池モジュールの電圧誘起劣化に与える光照射の影響	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/21
211	高田清志郎 Htay Win Go Sian Huai Aster Rahayu 大橋史隆 傍島靖 吉田弘樹 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	逆バイアスパルス電圧印加による結晶シリコンモジュールの電圧誘起劣化回復試験の最適化	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/21
212	城内紗千子 田中亜樹 村松和郎 齋藤元希 中村京太郎 小椋厚志 大下祥雄 増田淳	産業技術総合研究所 ナミックス 豊田工業大学 明治大学	p 型結晶シリコン太陽電池の電極用ペーストが PID に及ぼす影響 (II)	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/21
213	濱岡遼 浅野正太 岩見健太郎 原由希子 山本千津子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜センサによる UV+DH 複合試験中の太陽電池内酢酸検出	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/21
214	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究所	屋外曝露試験と屋内加速試験において共通して発現する c-Si PV モジュールの電極腐食由来インピーダンス変化	第 79 回応用物理学会秋季学術講演会	2018/9/21
215	Htay Win Kiyoshiro Takada Yudai Kawaguchi Go Sian Huai Aster Rahayu	岐阜大学 産業技術総合研究所	Effect of temperature in potential induced degradation recovery process of PV modules with the application of reverse bias pulse voltage	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2018/9/26

	Fumitaka Ohashi Hiroki Yoshida Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura				
216	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Characterization of degraded site in crystalline silicon photovoltaic cells exposed to acetic acid vapor	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2018/9/26
217	萩原英昭 佐藤浩昭 城内紗千子 原由希子 増田淳	産業技術総合研究所	UV 照射と高温高湿試験により劣化した太陽電池封止材 EVA のナノ構造解析	第 23 回高分子分析討論会	2018/10/11
218	大平圭介 小松豊 山口世力 増田淳	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n 型結晶 Si 太陽電池モジュールの電圧誘起劣化-p 型との共通点と相違点ー (招待講演)	日本学術振興会産学協力研究委員会次世代の太陽光発電システム第 175 委員会次世代シリコン太陽電池分科会第 9 回/モジュール・システム分科会第 8 回合同研究会	2018/10/23
219	Tadanori Tanahashi	産業技術総合研究所	State-of-the-art international collaborations in the field of PV reliability research (招待講演)	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2018/10/30
220	Nguyen Chung Dong Yasuaki Ishikawa Atsushi Masuda Yukiharu Uraoka	奈良先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Dependence of UV light wavelength on the PID delay effect during PID stress tests for p-type crystalline Si solar cell	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2018/10/30
221	Keisuke Ohdaira Yutaka Komatsu Seira Yamaguchi Atsushi Masuda	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Performance degradation in front-emitter n-type crystalline silicon photovoltaic modules under long-duration potential-induced degradation tests	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2018/10/30
222	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Effect of light illumination on potential-induced degradation in front-emitter	3rd International Workshop on the Sustainable	2018/10/30

		所	n-type crystalline silicon photovoltaic modules	Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	
223	Fumitaka Ohashi Hiroki Yoshida Yasushi Sobajima Nobukazu Kameyama Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究 所	Sodium and current distribution at the surface of p-type multi-crystalline silicon solar cell after potential induced degradation test	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2018/10/30
224	Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda Yoshihiro Ueda Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira Chizuko Yamamoto Atsushi Masuda	石川県工業試験場 北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Current and electric field analyses inside photovoltaic module during PID acceleration test	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2018/10/30
225	Hiroki Yoshida Fumitaka Ohashi Yasushi Sobajima Nobukazu Kameyama Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究 所	Low-voltage electrical recovery of potential-induced degraded multi-crystalline silicon module	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2018/10/30
226	Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Recent understanding and perspective for potential-induced degradation of p-type crystalline Si photovoltaic modules (招待講演)	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Module	2018/10/30
227	Tadanori Tanahashi Keiichiro Sakurai	産業技術総合研究 所	Effect of UV irradiation on the degradation of PERC modules (Re: Combined stress tests)	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Module	2018/10/31

228	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Localization and characterization of degraded site in the crystalline silicon photovoltaic cells exposed to acetic acid vapor	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Module	2018/10/31
229	Tadanori Tanahashi	産業技術総合研究所	Corrosion-induced AC impedance elevation in front electrodes of crystalline silicon photovoltaic cells within field-aged photovoltaic modules (招待講演)	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Module	2018/10/31
230	Tadanori Tanahashi	産業技術総合研究所	Introduction for general discussion	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Module	2018/10/31
231	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	高効率結晶シリコン太陽電池の実運用下における発電性能の経時変化	2018年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2018/11/9
232	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	シリコンヘテロ接合型太陽電池の実使用条件下の発電性能の経時変化	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14
233	橘泰至 豊田丈紫 上田芳弘 山本千津子 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	PID 試験における太陽電池モジュール内部の電界及び電流解析	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14
234	城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究所	p型結晶シリコン太陽電池のPID現象に対する SiN _x と pn 接合部の影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14
235	大橋史隆 吉田弘樹 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	太陽電池セル表面近傍における導電性原子間力顕微鏡を用いた電圧誘起劣化の影響評価	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14
236	Dong C. Nguyen Atsushi Masuda Yasuaki Ishikawa Yukiharu Uraoka	奈良先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Analysis of delay effect by UV irradiation during PID stress test for p-type crystalline Si solar cells	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14

237	Htay Win 高田清志郎 大橋史隆 吉田弘樹 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化した太陽電池モ ジュールの逆バイアス電圧印加に よる高速回復技術の開発	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2018	2018/11/14
238	小松豊 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n型結晶 Si 太陽電池モジュールの 長時間電圧誘起劣化とその回復	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2018	2018/11/14
239	山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n型結晶 Si 太陽電池モジュールの 電圧誘起劣化に与える光照射の影響	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2018	2018/11/14
240	秋富稔 原 浩二郎 千葉恭男 増田淳	産業技術総合研究 所	実用屋外システムにおける n 型結 晶 Si 太陽電池モジュールの電圧 誘起劣化	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2018	2018/11/14
241	浅野正太 濱岡遼 武元哲 岩見健太郎 原由希子 山本千津子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	太陽電池内酢酸検知のための錫薄 膜センサと酢酸間の検量線作成	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2018	2018/11/14
242	濱岡遼 浅野正太 武元哲 岩見健太郎 原由希子 山本千津子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	錫薄膜センサを用いた加速試験中 の太陽電池内部酢酸検出	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2018	2018/11/14
243	萩原英昭 佐藤浩昭 原由希子 城内紗千子 増田淳	産業技術総合研究 所	様々な環境下で劣化した太陽電池 封止材の陽電子消滅寿命法による 構造解析	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2018	2018/11/14
244	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	フィールド試験と屋内加速試験を 結び付ける劣化指標の探索	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2018	2018/11/14
245	Fumitaka Ohashi Hiroki Yoshida Yasushi Sobajima Nobukazu Kameyama Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究 所	Microscopic analysis of potential induced degradation of p-type multicrystalline silicon solar cell using atomic force microscope	7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11/16
246	Sachiko Jonai Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Hypothesis and remaining issues on potential-induced degradation of p-type crystalline Si photovoltaic modules	7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11/16

247	Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Degradation mechanism and improved reliability of photovoltaic modules (招待講演)	7th Korea-Japan Joint Seminar on PV	2018/11/17
248	城内紗千子	産業技術総合研究所	結晶シリコン太陽電池モジュールのPIDについて (招待講演)	日本学術振興会産学協力研究委員会次世代の太陽光発電システム第175委員会 Women in Photovoltaics 分科会/モジュール・システム分科会合同研究会	2018/11/30
249	鈴木友康 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n型フロントエミッタ型太陽電池モジュールの電圧誘起劣化におけるSiO ₂ 膜の効果	2018年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会	2018/12/1
250	Htay Win Kiyoshiro Takada Yudai Kawaguchi Go Sian Huai Aster Rahayu Fumitaka Ohashi Yasushi Sobajima Hiroki Yoshida Nobukazu Kameyama Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Recovery process for potential induced degradation of PV modules with the application of reverse bias pulse voltage	Korea-Japan University Joint Workshop on Photovoltaic Research	2019/2/18
251	Go Sian Huai Kota Ono Kiyoshiro Takada Hiroya Kosuga Yasushi Sobajima Fumitaka Ohashi Hiroki Yoshida Nobukazu Kameyama Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Outdoor exposure test of potential-induced degraded p-type based multi-crystalline silicon photovoltaic modules with recovery by application of reverse-bias pulse voltage	Korea-Japan University Joint Workshop on Photovoltaic Research	2019/2/18
252	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Corrosion underneath front electrodes of crystalline silicon photovoltaic cells predominantly contributes to their performance degradation	2019 PV Reliability Workshops	2019/2/28
253	浅野正太 濱岡遼 岩見健太郎 梅田倫弘 城内紗千子 山本千津子 増田淳	東京農工大学 産業技術総合研究所	太陽電池内酢酸検出のための錫薄膜センサの検量線作成	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3/9
254	徐原松 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n型リアエミッタ型結晶Si太陽電池モジュールの長時間電圧誘起劣化試験	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3/9
255	濱岡遼 浅野正太	東京農工大学 産業技術総合研究所	セル・EVA界面剥離試験によるUV+DH複合試験後モジュールの密	第66回応用物理学会春季学術講演会	2019/3/9

	岩見健太郎 梅田倫弘 秋富稔 城内紗千子 山本千津子 千葉恭男 増田淳	所	着性評価		
256	大平圭介 小松豊 鈴木友康 山口世力 増田淳	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n型結晶Si太陽電池モジュールの 長時間電圧誘起劣化におけるNa の挙動	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
257	鈴木友康 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 明治大学 産業技術総合研究 所	n型フロントエミッタ型結晶シリ コン太陽電池モジュールの長時間 電圧誘起劣化におけるSiO ₂ 膜の影響	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
258	山本千津子 山口世力 大平圭介 増田淳	産業技術総合研究 所 北陸先端科学技術 大学院大学	シリコンヘテロ接合太陽電池の PIDに及ぼす湿熱負荷の影響	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
259	城内紗千子 田中亜樹 村松和郎 中村京太郎 大下祥雄 増田淳	産業技術総合研究 所 ナミックス 豊田工業大学	p型結晶シリコン太陽電池セルの SiN _x 反射防止膜がPIDに及ぼす影 響	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
260	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	c-Si PVセル裏面の腐食劣化態様	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
261	伏屋亮 大橋史隆 吉田弘樹 傍島靖 亀山展和 橋泰至 増田淳 野々村修一	岐阜大学 石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	ガラス膜を形成したカバーガラス を用いた太陽電池モジュールの電 圧誘起劣化抑止効果の評価	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
262	橋泰至 豊田丈紫 大橋史隆 吉田弘樹 傍島靖 亀山展和 増田淳 野々村修一	石川県工業試験場 岐阜大学 産業技術総合研究 所	太陽電池モジュール内部の電界お よび電流分布解析による高抵抗ガ ラス層を用いたPID抑制効果の検 証	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
263	吉田弘樹 大橋史隆 亀山展和 傍島靖 原由希子 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	太陽電池モジュールにおける電圧 誘起劣化箇所の一検討ーフィン ガー電極近傍での局所的劣化の可 能性ー	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10
264	石井徹之 崔誠佑	電力中央研究所 産業技術総合研究	高効率結晶シリコン太陽電池の発 電性能の経時変化	第66回応用物理学 会春季学術講演会	2019/3/10

	佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	所			
265	Nguyen Chung Dong Yasuaki Ishikawa Keisuke Ohdaira Atsushi Masuda Yukiharu Uraoka	奈良先端科学技術 大学院大学 北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Influence of UV light on the increase of SiN _x conductivity toward elucidation of potential induced degradation mechanism	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/6/17
266	Sachiko Jonai Yasushi Tachibana Kyotaro Nakamura Yasuaki Ishikawa Yukiharu Uraoka Atsushi Masuda	奈良先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所 石川県工業試験場 豊田工業大学	Roles of SiN _x in potential- induced degradation for p-type crystalline Si photovoltaic modules	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/6/19
267	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Corrosion under front electrodes of crystalline silicon photovoltaic cells predominantly contributes to their performance degradation	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/6/19
268	Tomoyasu Suzuki Seira Yamaguchi Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	Effect of a SiO ₂ film on the potential-induced degradation of n-type front-emitter c-Si photovoltaic modules	7th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and r Related Nanotechnologies	2019/6/21
269	Atsushi Masuda Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Sachiko Jonai Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda Toshiharu Minamikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	産業技術総合研究 所 石川県工業試験場 北陸先端科学技術 大学院大学	Influence of hygrothermal stress on potential-induced degradation for homojunction and heterojunction crystalline Si photovoltaic modules	7th International Symposium on Organic and Inorganic ELECTRONIC Materials and Related Nanotechnologies	2019/6/22
270	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究 所	実運用された高効率結晶シリコン 太陽電池の発電性能の経時変化	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/7/4
271	山口世力 山本千津子 大平圭介 増田淳	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	リアエミッタおよびフロントエ ミッタ型 SHJ 太陽電池モジュール の PID 挙動の比較	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/7/4
272	鈴木友康 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	n型フロントエミッタ型結晶シリ コン太陽電池モジュールの電圧誘 起劣化における SiO ₂ 膜の効果	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/7/4
273	徐原松 山口世力 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n型リアエミッタ型結晶 Si 太陽電 池モジュールの長時間 PID 試験で の劣化挙動	第16回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2019/7/4

274	橘泰至 豊田丈紫 城内紗千子 柴田肇 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	太陽電池モジュール内部の電界および電流分布解析によるセル表面への導電膜形成を用いたPID抑制効果の検証	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/4
275	大橋史隆 伏屋亮 吉田弘樹 傍島靖 亀山展和 橘泰至 増田淳 野々村修一	岐阜大学 石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	太陽電池モジュール部材へのガラス層形成による電圧誘起劣化遅延技術の開発	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/4
276	吉田弘樹 大橋史隆 傍島靖 亀山展和 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	p型単結晶Si太陽電池モジュールのPID試験 -I-V特性と少数キャリア寿命の評価-	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/4
277	亀山展和 大橋史隆 傍島靖 吉田弘樹 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	p型単結晶Si太陽電池モジュールのPID試験 -CV測定によるキャリア密度評価-	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/4
278	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究 所	c-Si太陽電池セル/モジュールの腐食過程における交流等価回路の検討	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/4
279	城内紗千子 中村京太郎 石河泰明 浦岡行治 増田淳	奈良先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所 豊田工業大学	結晶Si太陽電池のPIDに及ぼすARC膜の役割	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/4
280	城内紗千子	産業技術総合研究 所	太陽電池モジュールのPIDに対する材料科学的検証 (招待講演)	令和元年度物質科学研究会(第1回iMATERIA研究会合同開催)	2019/8/20
281	Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda Toshiharu Minamikawa Kinichi Ogawa Yukiko Hara Keiichiro Sakurai Atsushi Masuda	石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	Influence of shadow on shunt-type potential-induced degradation for crystalline Si photovoltaic modules exposed outdoors	2019 International Conference on Solid State Devices and Materials	2019/9/5
282	Keisuke Ohdaira Yutaka Komatsu Tomoyasu Suzuki Seira Yamaguchi Atsushi Masuda	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Potential-induced degradation of n-type front-emitter crystalline silicon photovoltaic modules with different degradation stages	36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2019/9/10
283	森本孝紀 浅野正太 城内紗千子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	太陽電池モジュール内酢酸検出のための錫薄膜センサの検量線の改善	第80回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9/19

	岩見健太郎				
284	岩見健太郎 浅野正太 森本孝紀 城内紗千子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究 所	有限要素法による太陽電池モ ジュール内酢酸生成・拡散解析	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/19
285	浅野正太 森本孝紀 城内紗千子 原由希子 増田淳 梅田倫弘 岩見健太郎	東京農工大学 産業技術総合研究 所	太陽電池モジュール内の UV+DH 複 合試験における UV 照射時の酸生 成に対する湿度影響の調査	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/19
286	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究 所	実使用条件下の結晶シリコン太陽 電池の長期信頼性の評価	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/19
287	増田淳	産業技術総合研究 所	結晶シリコン太陽電池の劣化メカ ニズム (招待講演)	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/19
288	山口世力 山本千津子 大平圭介 増田淳	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	リアエミッタおよびフロントエ ミッタ構造を有する SHJ 太陽電池 の PID 挙動の比較	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/21
289	鈴木友康 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	n 型フロントエミッタ型結晶シリ コン太陽電池モジュールの正バイ アス PID 試験と回復試験	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/21
290	伏屋亮 大橋史隆 吉田弘樹 傍島靖 亀山展和 橘泰至 増田淳 野々村修一	岐阜大学 石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	ガラス膜を複数回塗布したカバー ガラスを用いた太陽電池モジュ ールの電圧誘起劣化抑止効果の評価	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/21
291	Dong Chung Nguyen Yasuaki Ishikawa Atsushi Masuda Yukiharu Uraoka	奈良先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Investigation of correlation between the conductivity increasing of SiN _x thin films by UV light and potential induced degradation	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/21
292	徐原松 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	n 型リアエミッタ型 c-Si PV モ ジュールの PID における光照射の 影響	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/21
293	城内紗千子 中村京太郎 石河泰明 浦岡行治 増田淳	奈良先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所 豊田工業大学	結晶 Si 太陽電池の ARC 膜とウエ ハの伝導型が PID に及ぼす固有の 現象	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/21
294	橘泰至 豊田文紫	石川県工業試験場 産業技術総合研究 所	反射防止膜の構造が太陽電池モ ジュール内部の電界分布に及ぼす	第 80 回応用物理学 会秋季学術講演会	2019/9/21

	城内紗千子 原由希子 柴田肇 増田淳	所	影響		
295	吉田弘樹 亀山展和 大橋史隆 傍島靖 野々村修一	岐阜大学	キャリア寿命評価に基づく c-Si 太陽電池モジュールの PID 計算機モデル	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9/21
296	亀山展和 大橋史隆 傍島靖 吉田弘樹 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	PID 試験後の p 型単結晶 Si 太陽電池モジュールへの逆バイアス電圧印加法の検討	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9/21
297	Hiroki Yoshida Fumitaka Ohashi Nobukazu Kameyama Yasushi Sobajima Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Numerical model of potential-induced degradation for p-type crystalline silicon photovoltaic modules for time-degradation analysis	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/4
298	Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学	Systematic study on potential-induced degradation of n-type crystalline Si photovoltaic modules (招待講演)	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/5
299	Yasuaki Ishikawa Mohammad Aminul Islam Dong Chung Nguyen	奈良先端科学技術大学院大学	Detail analysis of potential induced degradation in p-type crystalline silicon photovoltaic modules (招待講演)	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/6
300	Yuansong Xu Seira Yamaguchi Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究所	Influence of light illumination on the potential-induced degradation of n-type rear-emitter crystalline Si photovoltaic modules	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/6
301	Shota Asano Takanori Morimoto Sachiko Jonai Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda Kentaro Iwami	東京農工大学 産業技術総合研究所	Investigation on acid generation by humidity impact for photovoltaic modules during UV irradiation stage in UV and damp-heat combined test	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/7
302	Fumitaka Ohashi Ryo Fuseya Taishi Furuya Go Sian Huai Nobukazu Kameyama Yasushi Sobajima Yasushi Tachibana Hiroki Yoshida Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 石川県工業試験場 産業技術総合研究所	Formation of glass layer on cover glass as anti-potential induced degradation technique of p-type multi-crystalline Si photovoltaic modules	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/7

303	Tomoyasu Suzuki Seira Yamaguchi Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	Potential-induced degradation and recovery behaviors of photovoltaic modules with n- type front-emitter crystalline Si cells without SiO ₂	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/7
304	Kentaro Iwami Shota Asano Takanori Morimoto Sachiko Jonai Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大学 産業技術総合研究 所	Analysis of water penetration acetic acid generation and diffusion in photovoltaic module based on finite element method	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/7
305	Minoru Akitomi Yasuo Chiba Keisuke Ohdaira Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所 北陸先端科学技術 大学院大学	Comparison between indoor and outdoor test results on potential-induced degradation behavior for n-type front- emitter crystalline Si photovoltaic modules	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/7
306	Tetsuyuki Ishii	電力中央研究所	Degradation rates of high- efficiency crystalline silicon photovoltaic technologies under subtropical coastal climate conditions (招待講演)	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/8
307	Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所	Recent understanding and remaining reliability issues on photovoltaic cells and modules (招待講演)	4th International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2019/11/18
308	Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究 所	Annual degradation rates of high-efficiency crystalline silicon photovoltaic technologies estimated from indoor and outdoor measurements (招待講演)	4th International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2019/11/18
309	増田淳	産業技術総合研究 所	太陽電池の劣化機構と信頼性向上 技術 (招待講演)	2019(令和元年)年 度応用物理学会北 陸・信越支部講演 会	2019/12/3
310	趙蓉蓉 鈴木友康 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	酸化膜無 n 型フロンエミッタ型結 晶 Si 太陽電池モジュールの電圧 誘起劣化における光照射の効果	2019(令和元年)年 度応用物理学会北 陸・信越支部講演 会	2019/12/7
311	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇	産業技術総合研究 所	c-Si 太陽電池セル裏面の腐食劣化 態様	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18

	増田淳				
312	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究所	c-Si 太陽電池セル/モジュールの腐食過程における交流等価回路の検討	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
313	棚橋紀悟 坂本憲彦 柴田肇 増田淳	産業技術総合研究所	c-Si 太陽電池セル/モジュールの腐食過程における交流インピーダンス変化	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
314	森本考紀 浅野正太 城内紗千子 原由希子 増田淳 梅田倫弘 岩見健太郎	東京農工大学 産業技術総合研究所	太陽電池モジュール内に封入可能な錫薄膜型酢酸センサの検量線の改善	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
315	岩見健太郎 浅野正太 森本考紀 城内紗千子 原由希子 増田淳 梅田倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	有限要素解析ソフト COMSOL による太陽電池モジュール内酢酸生成・拡散解析	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
316	浅野正太 森本考紀 城内紗千子 原由希子 増田淳 梅田倫弘 岩見健太郎	東京農工大学 産業技術総合研究所	UV 照射時の湿度負荷が UV+DH 複合試験中の太陽電池モジュール内酸生成におよぼす影響の調査	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
317	吉田弘樹 亀山展和 大橋史隆 傍島靖 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	p 型 c-Si 太陽電池モジュールの PID 計算機モデルの開発	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
318	城内紗千子 松井卓矢 鯉田崇 柴田肇 中村京太郎 石河泰明 浦岡行治 増田淳	奈良先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所 豊田工業大学	PID における結晶 Si 太陽電池の ARC 膜の役割および PID 抑止方法	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
319	橘泰至 豊田丈紫 城内紗千子 原由希子 柴田肇 増田淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	セル表面への導電膜形成による PID 抑制効果に対する電界および電流分布解析	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
320	大橋史隆 伏屋亮 亀山展和 傍島靖 吉田弘樹 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	p 型 c-Si 太陽電池モジュールの PID 抑止技術の開発	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18

321	Dong C. Nguyen Yasuaki Ishikawa Sachiko Jonai Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Yukiharu Uraoka	奈良先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所 豊田工業大学	The PID delay effect by UV light irradiation for p-type crystalline Si solar modules based on the different refractive indexes of silicon nitride layer	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
322	麻下直暉 石河泰明 Dong Chung Nguyen 原由希子 鈴木紹太 Marwan Dhamrin 増田淳 浦岡行治	奈良先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所 東洋アルミニウム	両面ガラス封止された P 型 PERC セルの電圧誘起劣化現象	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
323	鈴木友康 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	n 型フロントエミッタ型結晶 Si 太 陽電池モジュールの PID における SiO ₂ 膜の影響	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
324	大平圭介 小松豊 鈴木友康 山口世力 増田淳	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	n 型フロントエミッタ型結晶 Si 太 陽電池モジュールの長時間 PID に おける Na の挙動	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
325	秋富稔 千葉恭男 大平圭介 増田淳	産業技術総合研究 所 北陸先端科学技術 大学院大学	n 型フロントエミッタ結晶 Si 太陽 電池モジュールの電圧誘起劣化挙 動に関する屋内および屋外試験結 果の比較	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
326	徐原松 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	n 型リアエミッタ型結晶 Si 太陽電 池モジュールの PID における光照 射の影響	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
327	原由希子 増田淳	産業技術総合研究 所	薄膜シリコン太陽電池の PID 現象 と光照射効果	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
328	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究 所	高効率結晶シリコン太陽電池の実 使用条件下の発電性能の経時変化	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
329	増田淳	産業技術総合研究 所	太陽電池セルモジュールの劣化機 構と信頼性向上技術	AIST 太陽光発電研 究成果報告会 2019	2019/12/18
330	傍島靖 Go Sian Huai 橋本紳吾 清水健吾 亀山展和 大橋史隆 吉田弘樹 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	PID 劣化多結晶シリコンモジュー ルの p-n 間直流電圧印加による回 復過程	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
331	橋本紳吾 高田清司郎 清水健吾 Go Sian Huai 亀山展和 大橋史隆	岐阜大学 産業技術総合研究 所	PID 劣化多結晶シリコンモジュー ルの逆バイアスパルス電圧印加に よる高速回復手法の開発	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14

	吉田弘樹 増田淳 傍島靖 野々村修一				
332	大橋史隆 古谷大志 亀山展和 傍島靖 吉田弘樹 増田淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究 所	電圧誘起劣化試験の p 型単結晶 Si セル表面への影響	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
333	橘泰至 豊田丈紫 城内紗千子 原由希子 柴田肇 増田淳	石川県工業試験場 新潟大学 産業技術総合研究 所	太陽電池セルの表面構造が電界に 及ぼす影響	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
334	鈴木友康 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	n 型フロントエミッタ型結晶シリ コン太陽電池モジュールの電圧誘 起劣化における SiN _x 膜の影響	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
335	趙蓉蓉 鈴木友康 山口世力 中村京太郎 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	SiO ₂ 膜の無い n 型フロントエミ ッタ型結晶 Si 太陽電池モジュール の電圧誘起劣化における光照射の 効果	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
336	原由希子 増田淳	産業技術総合研究 所	薄膜シリコン太陽電池の PID 現象 と光照射効果	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
337	増田淳	産業技術総合研究 所	太陽電池を例としたモジュール科 学の学理構築に向けて はじめに	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
338	城内紗千子 中村京太郎 増田淳	新潟大学 豊田工業大学 産業技術総合研究 所	結晶 Si 太陽電池における電圧誘 起劣化現象のモデル化 (招待講演)	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
339	大平圭介 山口世力 増田淳	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	高性能 Si 太陽電池モジュールで 観測される電圧誘起劣化 (招待講演)	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
340	徐原松 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	バックコンタクト型結晶 Si 太陽 電池モジュールの PID における光 照射の影響	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
341	浅野正太 森本考紀 城内紗千子 原由希子 増田淳 梅田倫弘 岩見健太郎	東京農工大学 新潟大学 産業技術総合研究 所	錫薄膜センサによる太陽電池モ ジュール劣化の早期予測	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/14
342	徐佳明 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所	Si ヘテロ接合太陽電池モジュール の光照射下での電圧誘起劣化	第 67 回応用物理学 会春季学術講演会	2020/3/15
343	城内紗千子 中村京太郎	新潟大学 豊田工業大学	結晶 Si 太陽電池モジュールの電 圧誘起劣化現象のモデル化	令和 2 年度電気学 会 A 部門大会	2020/9/2

	増田淳				
344	趙蓉蓉 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 新潟大学	SiN _x 膜の屈折率が異なる n 型フ ロントエミッタ型結晶 Si 太陽電池 モジュールの電圧誘起劣化におけ る光照射の効果	第 81 回応用物理学 会秋季学術講演会	2020/9/11
345	徐佳明 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 新潟大学	光照射および温度が Si ヘテロ接 合太陽電池モジュールの電圧誘起 劣化に及ぼす影響	第 81 回応用物理学 会秋季学術講演会	2020/9/11
346	傍島靖 橋本紳吾 清水健吾 Go Sian Huai 野々村修一	岐阜大学	PID を発現した多結晶 Si モジュー ルに対する高速回復手法の検討	第 81 回応用物理学 会秋季学術講演会	2020/9/11
347	Yuansong Xu Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所 新潟大学	Influence of light illumination on the potential- induced degradation of n-type interdigitated back-contact crystalline Si photovoltaic modules	2020 International Conference on Solid State Devices and Materials	2020/9/30
348	Atsushi Masuda	新潟大学	Reliability improvement and remaining issues on photovoltaic cells and modules (招待講演)	PRiME 2020	2020/10/5
349	趙蓉蓉 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 新潟大学	n 型フロントエミッタ型結晶 Si 太 陽電池モジュールの電荷蓄積型電 圧誘起劣化における光照射の効果	第 17 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2020/10/15
350	徐佳明 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 新潟大学	温度が Si ヘテロ接合太陽電池モ ジュールの電圧誘起劣化に及ぼす 影響	第 17 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2020/10/15
351	徐原松 増田淳 大平圭介	北陸先端科学技術 大学院大学 産業技術総合研究 所 新潟大学	裏面電極型結晶 Si 太陽電池モ ジュールの負バイアス下での電圧 誘起劣化	第 17 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2020/10/15
352	原由希子 増田淳	産業技術総合研究 所 新潟大学	薄膜 Si 太陽電池の電圧誘起劣化 に及ぼす光照射の影響	第 17 回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	2020/10/15
353	Keisuke Ohdaira Seira Yamaguchi Atsushi Masuda	北陸先端科学技術 大学院大学 新潟大学	Potential-induced degradation of silicon heterojunction photovoltaic modules (招待講演)	3rd International Workshop on Silicon Heterojunction Solar Cells: Science and Industry Technology	2020/10/19- 21
354	浅野正太 森本考紀 原由希子 城内紗千子 増田淳 梅田倫弘 岩見健太郎	東京農工大学 産業技術総合研究 所 新潟大学	錫薄膜センサによる太陽電池モ ジュール劣化の早期段階での予測	第 37 回「センサ・ マイクロマシンと 応用システム」シ ンポジウム	2020/10/27
355	Zhao Rongrong Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 新潟大学	Effect of light irradiation on the PID of n-type front- emitter crystalline Si photovoltaic modules with SiN _x with different refractive	30th International Photovoltaic Science and Engineering	2020/11/8-13

			indexes	Conference & Global Photovoltaic Conference 2020	
356	Jiaming Xu Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術 大学院大学 新潟大学	Effect of temperature on the potential-induced degradation of silicon heterojunction photovoltaic modules	30th International Photovoltaic Science and Engineering Conference & Global Photovoltaic Conference 2020	2020/11/8-13
357	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所 新潟大学	Influence of light irradiation on potential-induced degradation for thin-film silicon photovoltaic modules	30th International Photovoltaic Science and Engineering Conference & Global Photovoltaic Conference 2020	2020/11/8-13

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	北陸先端科学 技術大学院大 学	グリーンデバイス研究センター・大平准教授らの共同研究が NEDO の研究開発プロジェクトに採択	北陸先端科学技術大学院大学プレスリリース	2015/6/11
2	北陸先端科学 技術大学院大 学 石川県工業試 験場	太陽光発電長寿命化 NEDO 事業に採択	北國新聞	2015/6/12
3	石川県工業試 験場	太陽光発電劣化を判別	北國新聞, 4 面	2016/8/18
4	石川県工業試 験場	テクノコラム「太陽電池の長期使用に向けて」	商工石川, 2016 年 10 月号, p. 24	2016/10/1
5	産業技術総合 研究所	産総研・太陽光発電研究センター 高効率 コスト 1/3 目指す	日経産業新聞, 8 面	2017/5/9
6	産業技術総合 研究所	産総研・太陽光発電研究成果報告会 2017 レポート 「2030 年に発電コスト 7 円」の目標達成目指し進む技術開発	新エネルギー新聞, 1 面と 12 面	2017/6/26
7	東京農工大学	太陽電池、光で劣化判別	日経産業新聞、先端技術面	2017/9/21
8	岐阜大学	太陽電池 十数秒で性能回復	日経産業新聞、先端技術面	2017/9/29
9	岐阜大学	劣化した太陽電池を高速回復する新技術	環境ビジネス	2017/11/24
10	東京農工大学	未来の起源	TBS テレビ	2017/12/10
11	岐阜大学	太陽電池の新たな活用	中部経済新聞	2019/2/26
12	岐阜大学	太陽電池モジュールの電圧誘起劣化を簡便・低コストで抑制する方法を発明	岐阜大学プレスリリース	2019/3/8
13	岐阜大学	メガソーラー発電施設の寿命を延ばし、発電コスト低減につながる 太陽電池モジュールの電圧誘起劣化を簡便・低コストで抑制する方法を発明 岐阜大学工学部電気電子・情報工学科 大橋史隆助教	日本の研究.com	2019/3/8
14	岐阜大学	太陽光パネル劣化を抑制	中部経済新聞	2019/3/9

15	岐阜大学	太陽光発電モジュールの劣化 (PID) 現象を簡単・低コストで抑制する新技術	環境ビジネスオンライン	2019/3/12
16	岐阜大学	岐阜大、太陽光の「PID」抑制技術、設置済みパネルにも対応	日経 xTECH	2019/3/15
17	岐阜大学	太陽電池を劣化させる「PID」、簡単で低コストな抑制手法を新開発	スマートジャパン	2019/3/26
18	岐阜大学	手軽な PID 対策を発見 設置済みパネルにも有効	PVeye, vol. 88, 2019年7月号	2019/6/25
19	奈良先端科学技術大学院大学	Transient carrier recombination dynamics in potential-induced degradation p-type single-crystalline Si photovoltaic modules	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 27, no. 8, The front inside cover	2019/7/22
20	岐阜大学	液体ガラス表面に塗るだけ	化学工業日報	2019/10/9
21	産業技術総合研究所	メガワット級太陽光発電所での太陽電池の出力低下を抑制—高電圧システムでの発電量低下のリスクを回避できる技術を開発—	産業技術総合研究所プレスリリース	2019/12/17
22	産業技術総合研究所	産総研、太陽電池セルの「電圧誘起劣化」抑止につながる簡便な工程を開発	環境展望台	2019/12/17
23	産業技術総合研究所	メガワット級太陽光発電所での太陽電池の出力低下を抑制—高電圧システムでの発電量低下のリスクを回避できる技術を開発—	Jpubb	2019/12/18
24	産業技術総合研究所	太陽電池出力低下 透明導電膜で抑制	化学工業日報, 1面	2019/12/18
25	産業技術総合研究所	【太陽光発電】AIST、メガワット級発電所での太陽電池の出力低下を抑制。高電圧システムでの発電量低下のリスクを回避できる技術開発	加工技術研究会 NEWS	2019/12/18
26	産業技術総合研究所	太陽光：発電損失につながる太陽電池の劣化現象、産総研が低コストな抑制手法を新開発	スマートジャパン	2019/12/19
27	産業技術総合研究所	発電損失につながる太陽電池の劣化現象、産総研が低コストな抑制手法を新開発	YAHOO! JAPAN ニュース	2019/12/19
28	産業技術総合研究所	太陽電池の性能低下を抑止 セル表面を透明導電膜で被覆するだけで大きな効果 産総研が技術開発	電波新聞, 8面	2019/12/20
29	産業技術総合研究所	メガワット級太陽光発電の出力低下を抑制、PID 抑止技術を開発 産総研	環境ビジネスオンライン	2019/12/20
30	産業技術総合研究所	産総研、高電圧による太陽電池の性能低下を抑止する技術	PC Watch	2019/12/20
31	産業技術総合研究所	産総研、高電圧による太陽電池の性能低下を抑止する技術	YAHOO! JAPAN ニュース	2019/12/20
32	産業技術総合研究所	産総研 太陽電池の発電量低下 簡便な抑制技術開発	鉄鋼新聞, 5面	2019/12/27
33	産業技術総合研究所	産総研 ITO 被膜で出力低下抑制 太陽電池、コスト削減	日刊産業新聞, 11面	2020/1/16

【受賞】

番号	受賞者	所属	タイトル	賞の名称	受賞年月
1	萩原英昭	産業技術総合研究所	陽電子消滅寿命法による太陽電池封止用エチレンビニルアセテート樹脂の劣化解析	マテリアルライフ学会研究奨励賞	2015/7/4
2	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto	産業技術総合研究所	Electrical detection of gap formation underneath finger electrodes on c-Si PV cells exposed to acetic	2016 PV Module Reliability Workshop Grand Prize	2016/2/24

	Hajime Shibata Atsushi Masuda		acid vapor under hygrothermal conditions		
3	佐藤浩昭	産業技術総合 研究所	高分解能質量分析を用いたポ リマー材料の構造解析	日本分析化学会 先端 分析技術賞/CERI 評価 技術賞	2016/9/15
4	萩原英昭	産業技術総合 研究所	Degradation assessment of ethylene vinyl acetate encapsulant in crystalline silicon photovoltaic module using positron annihilation lifetime spectroscopy	30th International Symposium on Polymer Analysis and Characterization, Poster Prize	2017/6/14
5	城内紗千子	産業技術総合 研究所	p型結晶シリコン太陽電池の 電極用ペースト中のNaが PIDに及ぼす影響	第14回「次世代の太陽 光発電システム」シン ポジウム イノベイ ティブPV 奨励賞	2017/7/21
6	Keisuke Ohdaira Seira Yamaguchi Chizuko Yamamoto Atsushi Masuda	北陸先端科学 技術大学院大 学 産業技術総合 研究所	J_{sc} and V_{oc} reductions in silicon heterojunction photovoltaic modules by potential-induced degradation tests	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Best Paper Award	2017/11/17
7	Tadanori Tanahashi	産業技術総合 研究所		SEMI PV Materials Technical Committee Award	2017
8	鈴木友康	北陸先端科学 技術大学院大 学	n型フロントエミッタ型太陽 電池モジュールの電圧誘起劣 化におけるSiO ₂ 膜の効果 (鈴木友康、山口世力、中村 京太郎、増田淳、大平圭介)	第23回(2018年度) 応用物理学会北陸・信 越支部発表奨励賞	2018/12/1
9	Tetsuyuki Ishii	電力中央研究 所	Certificate of Achievement in IEC/TC82	Japanese Committee for Photovoltaic System Standardization	2019/3/29
10	増田淳	新潟大学	太陽電池モジュールの劣化機 構解明と信頼性向上に関する 研究	2020(令和2年)年度科 学技術分野の文部科学 大臣表彰 科学技術賞研 究部門	2020/4/7

【標準化他】

1	Tadanori Tanahashi	産業技術総合研 究所	Test method for exposure durability of photovoltaic (PV) cells to acetic acid vapor	SEMI PV79-081	2017/8/2
2	Tadanori Tanahashi et al.	産業技術総合研 究所	Assessment of photovoltaic module failures in the field	International Energy Agency, Rep. IEA- PVPST13-09	2017/9/22
3	Tadanori Tanahashi et al.	産業技術総合研 究所	Review on infrared and electroluminescence imaging for PV field applications	International Energy Agency, Rep. IEA- PVPST13-10,	2018/4/6
4	Tetsuyuki Ishii et al.	電力中央研究所	Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 4: Standard reference climatic profiles	IEC61853-4	2018/8/30
5	Tadanori Tanahashi et al.	産業技術総合研 究所	Combined and sequential accelerated stress testing	IEC TR63279	DTR Voting 完 了(承認)

			for de-risking photovoltaic modules		2020年発行予定
6	Tadanori Tanahashi et al.	産業技術総合研究所	Extended-stress testing of photovoltaic modules for risk analysis	IEC TS 63209 Ed. 1	CD 2019年承認済み DTS完成 2020年 Voting 2021年発行予定
7	Tadanori Tanahashi et al.	産業技術総合研究所	Service life estimation models for photovoltaic modules	International Energy Agency	2021年発行予定
8	Tadanori Tanahashi et al.	産業技術総合研究所	Guidance for energy rating of different PV module technologies in different climates	International Energy Agency	2021年発行予定
9	Tadanori Tanahashi et al.	産業技術総合研究所	Guidelines for operation & maintenance procedures in different climates/countries	International Energy Agency	2021年発行予定

【展示】

番号	発表者	所属	タイトル	形式、詳細	日時、場所月
1	大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学	研究成果に関するブース展示	PVJapan 2015	2015/7/29-31
2	大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学	研究成果に関するブース展示	PVJapan 2016	2016/6/29-7/1
3	橋泰至 豊田丈紫 南川俊治	石川県工業試験場	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発－屋外での電圧誘起劣化の実証研究－	いしかわ環境フェア 2016	2016/8/27-28
4	大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学	研究成果に関するブース展示	PVJapan 2017	2017/7/5-7/7
5	橋泰至 豊田丈紫 南川俊治	石川県工業試験場	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発－屋外での電圧誘起劣化の実証研究－	いしかわ環境フェア 2017	2017/8/19-20
6	吉田弘樹	岐阜大学	劣化太陽電池の高速回復技術	イノベーション・ジャパン 2017～大学見本市 & ビジネスマッチング～	2017/8/31-9/1
7	橋泰至 豊田丈紫 南川俊治	石川県工業試験場	太陽光発電関連の研究紹介	グリーンイノベーション研究会	2018/6/19
8	大平圭介	北陸先端科学技術大学院大学	研究成果に関するブース展示	PVJapan 2018	2018/6/20-22
9	橋泰至 豊田丈紫 南川俊治	石川県工業試験場	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発－屋外での電圧誘起劣化の実証研究－	いしかわ環境フェア 2018	2018/8/25-26
10	吉田弘樹	岐阜大学	太陽電池研究の新たな取り組み～ドローンで調べる・直す・道路で発電する～	文部科学省情報ひろば 企画展示	2019/1/4-4/19

11	大平圭介	北陸先端科学 技術大学院大 学	研究成果に関するブース展示	PV2019 太陽光発電展示 会&フォーラム	2019/7/10-12
12	大平圭介	北陸先端科学 技術大学院大 学	研究成果に関するブース展示	Matching HUB Kanazawa 2019	2019/11/11-12

C 太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発

(産業技術総合研究所、電力中央研究所、東京理科大学、日本気象協会、佐賀大学)

1. 成果詳細

【国立研究開発法人産業技術総合研究所】

本研究では、屋外曝露サイトで系統連系運転中の 22 型式の結晶シリコン系・薄膜系太陽電池モジュールを定期的に取り外し、ソーラシミュレータを用いて標準条件による室内測定で出力変動を観測した。この手法は世界的にも例を見ないものである。図Ⅲ-2-(ホ)-C-1 に本研究に使用した屋外曝露サイトの全景を、表Ⅲ-2-(ホ)-C-1 に屋外曝露サイトに設置した 22 型式の太陽電池モジュールの種類と仕様を示す。最長 9 年間の屋外での発電量データと室内測定データを取得することにより、アルミ裏面電界型 (Al-BSF mono-Si, Al-BSF multi-Si)、ヘテロ接合 (SHJ)、バックコンタクト (IBC)、裏面パッシベーション型 (PERC) 等の結晶シリコン系太陽電池モジュールならびにアモルファスシリコン (a-Si:H)、多接合薄膜シリコン (a-Si:H/ μ c-Si:H)、銅-インジウム-ガリウム-セレン (CIGS)、テルル化カドミウム (CdTe) といった薄膜系太陽電池の屋外曝露にともなう劣化傾向を概ね把握することができた。発電量評価の上で考慮すべき初期劣化は遅くとも曝露開始から 5 年程度以内に飽和傾向を示し、初期劣化の程度や飽和に要する時間等の諸特性を把握することができた。太陽電池の種類毎の劣化率を初期と安定化後に分けて計算し、特徴と課題を抽出した。



図Ⅲ-2-(ホ)-C-1 本研究に使用した屋外曝露サイトの外観

結晶シリコン系太陽電池の経年劣化率を、異なる手法においても 0.5%以内の差異で高精度に評価できることを、屋外データと室内データを用いて検証した。劣化の主要因は、SHJ では開放電圧の減少、IBC では高電位のモジュールにおける電圧誘起劣化であることを見出した。また、PERC では曝露初期に光誘起劣化に起因する大きな出力低下とその後の回復が観測された。これらの太陽電池では初期劣化が比較的大きいものの、曝露開始から遅くとも 5 年程度以内に劣化は飽和することから、今後急激な劣化が生じない限り、劣化が小さいものの初期効率も低い Al-BSF 型結晶シリコン太陽電池の変換効率と逆転することはないことが示唆された。また、薄膜系太陽電池においても、屋外曝露にともなう劣化挙動、季節変動の要因、プレコンディショニング時や暗所保管時における過渡的出力変化について明確化した。

表Ⅲ-2-(ホ)-C-1 屋外曝露サイトに設置した 22 型式の太陽電池モジュールの種類、
銘板値から算出した総出力、アレイ配置、曝露開始年月

Location	Kinds	Total	Array	Installed Year
		P_{max} (kW)	Configuration	
E-1A	mono-Si	5.04	7S × 1P × 4A	09/2010
E-1B	mono-Si	4.9	5S × 1P × 4A	12/2012
E-2A	multi-Si	5.0	6S × 1P × 4A	09/2010
E-2B	multi-Si	5.0	5S × 1P × 4A	12/2012
E-3A	CdTe	1.35	4S × 3P × 1A	11/2016
M-1A	a-SiH/μc-SiH	5.12	5S × 2P × 4A	09/2010
M-1B	a-SiH/μc-SiH	1.76	4S × 4P × 1A	07/2011
M-1C	CIGS	1.65	3S × 2P × 1A	08/2014
M-2A	CIGS	5.0	4S × 2P × 5A	09/2010
M-2B	CIGS	4.95	2S × 5P × 3A	03/2014
M-3A	a-SiH	5.0	2S × 5P × 5A	09/2010
M-3B	a-SiH	1.35	3S × 6P × 1A	07/2011
M-3C	SHJ	1.55	5S × 1P × 1A	06/2016
M-3D	mono-Si	1.89	7S × 1P × 1A	06/2016
W-1A	SHJ	1.25	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1B	IBC mono-Si	1.05	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1C	PERC mono-Si	1.48	5S × 1P × 1A	06/2016
W-1D	PERC mono-Si	1.45	5S × 1P × 1A	06/2016
W-2A	SHJ	4.8	5S × 1P × 4A	12/2012
W-2B	IBC mono-Si	4.68	6S × 1P × 4A	12/2012
W-3A	CdTe	5.2	5S × 4P × 4A	12/2012
W-3B	a-SiH/a-SiGe:H	2.5	3S × 6P × 2A	08/2014

これらの知見をもとに、各種太陽電池の推定発電量と実発電量を比較し、従来型の結晶シリコン系はもとより、SHJ や薄膜シリコン系においても、1.5%以内の精度で発電量推定が可能であることを示した。一例として、表Ⅲ-2-(ホ)-C-2 に SHJ 太陽電池アレイにおける発電量推定の結果を示す。さらに、劣化率の取扱いについて検討し、劣化率が一定になれば、精度よく発電量を推定できることを実証した。これらのことにより、±5%以内の精度との最終目標を十分に上回る精度で発電量推定が可能であることを実証した。

表Ⅲ-2-(ホ)-C-2 SHJ 太陽電池アレイ (W-2A) における発電量推定の結果

屋外曝露期間	屋内測定値 (w)	温度係数 γ (%/°C)	推定発電量 (kWh)	屋外実発電量 (kWh)	推定発電量と屋外実発電量の差 (%)
2013年 1月~12月	4,623.3 (初期値)	-0.437 (実発電量から算出) (-0.30) (カタログ値の概算)	6,615.9	6,621.1	-0.08
			6,675.9		0.83
2014年 1月~12月	4,648.2 (2014年1月測定)	同上	4,938.8	4,983.9	-0.90
			5,018.3		0.69
2015年 1月~12月	4,613.5 (2014年12月測定)	同上	6,148.3	6,167.9	-0.32
			6,270.3		1.66
2016年 1月~12月	4,583.3 (2015年12月測定)	同上	5,779.2	5,791.6	-0.21
			5,903.6		1.93
2017年 1月~12月	4,534.5 (2016年12月測定)	同上	6,117.2	6,141.1	-0.39
			6,220.1		1.29
2018年 1月~12月	4,490.7 (2017年12月測定)	同上	6,379.0	6,314.2	1.03
			6,291.9		-0.35
計(6年間)			35,978.4	36,019.8	-0.11
			36,380.1		1.00

発電量推定の課題も抽出し、特にモジュール上に積雪がある場合は、実発電量が推定発電量を下回り、降雪地域での本手法の取扱いにおいて考慮する必要があることを見出した。一方で、発電量推定に用いるモジュール裏面温度に替わる現実的な温度の指標として気温を用い得ることを実証した。

また、各種有機系太陽電池の屋外発電性能を評価するとともに、有機薄膜太陽電池において、光照射にともなう出力上昇と、暗所保管による出力低下を観測した。有機薄膜太陽電池の二次劣化内の季

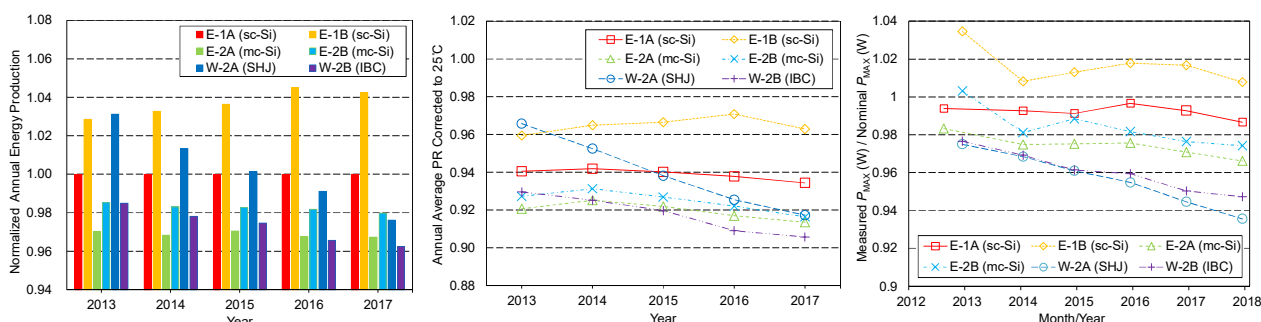
節変動は、夏季のアニールによる性能回復に起因することを見出した。系統連系された商用サイズの有機薄膜太陽電池の屋外曝露による出力変動を世界で初めて明らかにした。

【一般財団法人電力中央研究所】

①各種太陽電池の発電量評価技術の開発（産業技術総合研究所と共同実施）

結晶シリコン太陽電池の発電性能の年劣化率を調査するため、表Ⅲ-2-(ホ)-C-1 に示す 6 型式の結晶シリコン太陽電池（E-1A, E-1B, E-2A, E-2B, W-2A, W-2B）の発電性能を、発電電力等の屋外測定データと標準試験条件における最大出力等の屋内測定データを用いて評価した。

屋内・屋外測定データの解析を行い、結晶シリコン太陽電池の発電性能の推移を「発電量」、「出力係数」、「室内測定出力」の計 3 つのパラメータを用いて調査した。結果を図Ⅲ-2-(ホ)-C-2 に示す。



図Ⅲ-2-(ホ)-C-2 (左)「発電量」、(中央)「出力係数」、(右)「室内測定出力」により示した太陽電池の発電性能の推移

屋内測定出力により、2012 年 12 月に新規に導入した p 型結晶シリコン太陽電池（E-1B, E-2B）は、導入初期に太陽光に曝露されることにより、光誘起劣化を起こし約 2%の発電性能の低下が起きた。この光誘起劣化による導入初期の発電性能の低下を除くと、p 型結晶シリコン太陽電池（E-1A, E-1B, E-2A, E-2B）の発電性能の年劣化率は極めて小さく、SHJ 型や IBC 型太陽電池（W-2A, W-2B）などの、高効率 n 型結晶シリコン太陽電池の発電性能の年劣化率はやや大きいという新しい知見を得た。3 つのパラメータより算出された、6 型式の結晶シリコン太陽電池の発電性能の年劣化率（%/年）を、表Ⅲ-2-(ホ)-C-3 に示す。

表Ⅲ-2-(ホ)-C-3 3つのパラメータより算出された各型式太陽電池の年劣化率（%/年）

Index %/year	E-1A (sc-Si)	E-1B (sc-Si)	E-2A (mc-Si)	E-2B (mc-Si)	W-2A (SHJ)	W-2B (IBC)
(A) Energy production	0.0	-0.4	0.1	0.1	1.0	0.5
(B) Outdoor PR	0.2	-0.1	0.2	0.3	1.2	0.6
(C) Indoor P _{MAX}	0.1	0.0	0.3	0.2	0.8	0.6

②メガソーラーの発電量診断手法の開発

設置後数年程度実稼働しており現在も運用中の合計 7 サイトのメガソーラーの発電データを入手した。詳細を表Ⅲ-2-(ホ)-C-4 に示す。

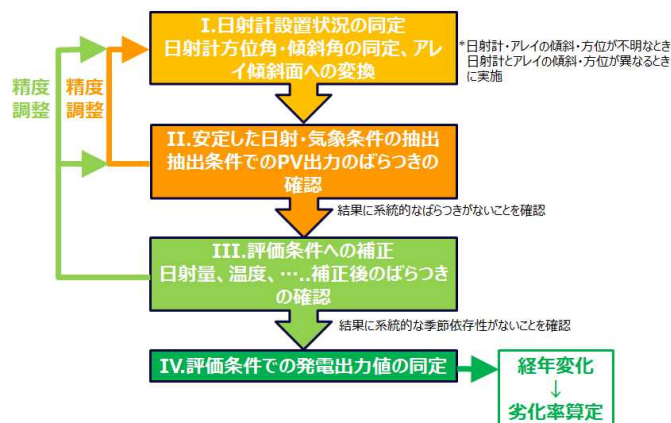
表Ⅲ-2-(ホ)-C-4 7 サイトのメガソーラーの計測期間と計測項目

サイト	データ計測期間 ¹	日射	気温	パネル温度	PCS_DC	PCS_AC ²	連系点 ²
A	2011/6~2016/4	○	○	○	○	○	○
B	2012/1~2016/4	○	○	○	○	○	○
C	2012/6~2016/3	○	○	○	○	○	×
D	2015/2~2016/5	○	○	○	○	○	×
E	2011/1~2016/3	○	○	×	×	○	○
F	2013/11~2016/10	○	×	○	×	○	×
G	2012/4~2016/10	○	×	○	○	○	○

1:一時期欠測有を含む。2:有効電力。(○:計測データ有、×:計測データ無)

独自技術を用いて明らかにした日射強度の時間及びエリア変動特性等に基づき、図Ⅲ-2-(ホ)-C-3 に示す手法を用いて、日射観測などが不備なサイトも含めて計測項目に応じた年劣化率の算出を行った。

その結果、2%程度の精度でメガソーラーの発電性能の年劣化率が算出可能であることを明らかにした。



図Ⅲ-2-(ホ)-C-3 メガソーラーの年劣化率の算定手法

③ IEC/TC82/WG2 における発電量定格 (IEC61853) の確立

一般財団法人日本気象協会が公開している日射スペクトルデータベース ver. 2.0 から、鳥栖サイトで計測した1年間の気象データを抽出し、IEC61853-4で規定されたフォーマットに整形した。日本の代表的な気象データとして、IEC61853-4規格案に提出した。2017年5月に開催されたIEC/TC82/WG2奈良会議における審議の後に、IEC61853-3とIEC61853-4はCD(委員会原案)からCDV(国際規格原案)に一段階進んだ。2016年度に提出した日本の代表的な気象データは、世界の6つの気候モードの1つとして、IEC61853-4 CDVに採用された。

【学校法人東京理科大学】

① 北杜メガソーラーの発電データの取得および分析の実施

山梨県北杜市にて2008年より運用を行っている北杜メガソーラーにおいて、北杜市の協力を得て発電データ等の取得を行い、第1期設置システム(モジュールおよびシステム)について発電特性の分析を実施できる計測環境を維持した。システムの計測では、全25種類、59システムの毎分のパワーコンディショナ入出力電流・電圧・電力と代表モジュールにおけるモジュール裏面温度を計測した。各システムの定格容量は約10kWである。また、一部の種類を除き、太陽電池モジュールについても、モジュール評価スペースにおいて常時電流-電圧カーブとモジュール裏面温度を5分周期で計測した。加えて、気象データについても水平面全天日射、直達日射、傾斜面日射、分光放射照度分布、風向、風速、気温を毎分計測した。

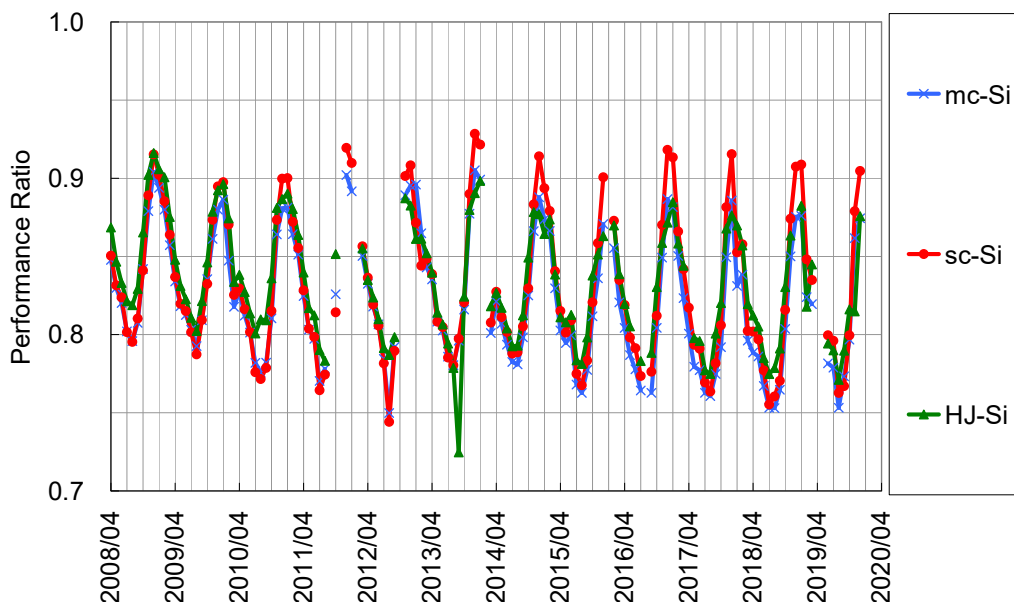
取得したデータを用いて発電特性を分析した結果として、2008年からの分析結果とあわせて太陽電池の種類毎に代表的なシステムのシステム出力係数を算出した結果を図Ⅲ-2-(ホ)-C-4に示す。これらのシステムは解析期間中に大きな不具合がなく、日陰の影響も比較的少ないシステムの中から選んだ。結果より、温度の影響を補正しないシステム出力係数であるため、主として太陽電池モジュール温度上昇の影響で、値は夏期に低く、冬期に高くなっているが、一部の月を除いて安定的に発電している事が確認できる。つぎに、劣化状況の分析結果として、SV法(LevEL 5)におけるアレイ実効最大出力係数の算出結果を図Ⅲ-2-(ホ)-C-5に示す。アレイ実効最大出力係数は、屋内での標準試験条件下での測定に対して、温度や日陰、入射角などの屋外条件下で生じる発電特性に影響する様々な要因を定量的に分離しその影響を除外・補正した後に得られる値であり、システムの実環境下での発電性能を示す。アレイ実効最大出力係数が1.0であれば銘板値どおりの発電性能を示していることを意味する。結果より、2008年の設置当初は1.0またはそれを上回る発電性能を示しており、その後徐々に低下し、2019年末において0.98~0.95程度を示していることが分る。劣化の推移を見ると、設置後3年から4年程度の劣化率が相対的に大きく、以降は設置10年後に至るまで、年間の劣化率に換算するとわずかな劣化となっている。

② モジュール屋内測定と屋外データによる劣化率の評価解析

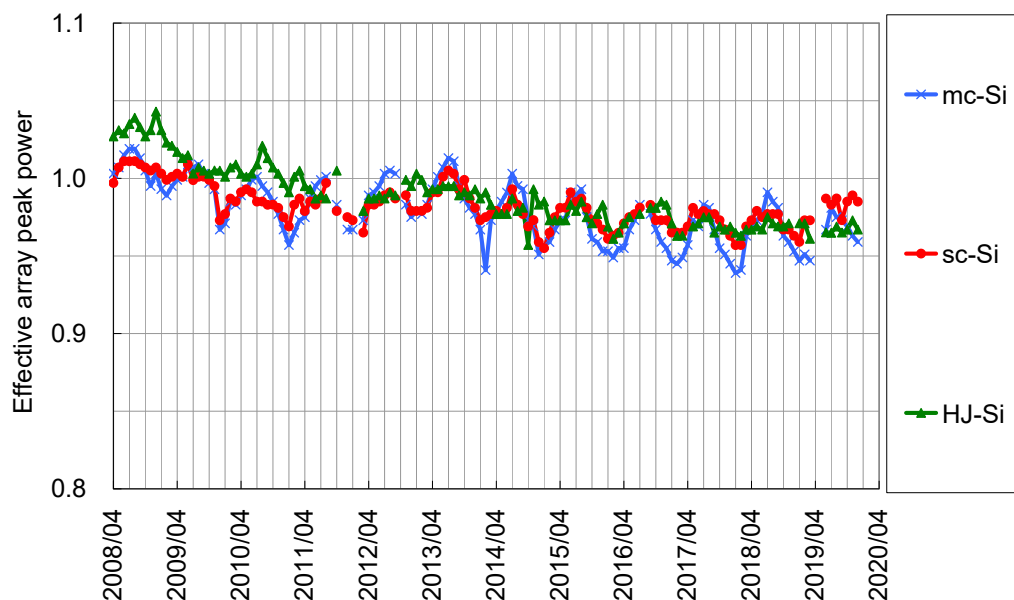
北杜メガソーラーで運用している各種太陽電池モジュールの中から多結晶Si、単結晶Si、SHJ、バックコンタクト型Si等を選び、モジュール評価スペースにて常時電流-電圧測定を行っていたモジュール、および一部の種類においては10kWのシステム内で運用されていたモジュールの標準試験条件下に

おける発電性能を屋内にて測定した。結果より、運用開始後約7年目の測定結果に対して、約10年目となる測定結果でも大きな劣化率の変化はなく、安定的に発電性能を維持していることが確認できた。

常時計測している電流-電圧カーブデータの解析手法として、多点基準型線形補間法を開発し、最大出力の劣化分析に加えて、短絡電流、開放電圧等の劣化傾向についても詳細な分析を行った。結晶系Siの解析結果から、いずれのモジュール種でも短絡電流の劣化に起因する最大出力の劣化傾向が確認された。また、曲線因子の劣化は最大出力の劣化に比べて緩やかであり、主として直列抵抗成分の増加傾向が確認できた。一方で開放電圧はほとんど変化せず、10年間の運用でもほぼ劣化しないことが確認できた。



図Ⅲ-2-(ホ)-C-4 システム出力係数の算出結果



図Ⅲ-2-(ホ)-C-5 アレイ実効最大出力係数の算出結果

③発電量の評価支援を行うツールの開発

発電特性の解析と劣化率の評価から得られた知見を活かし、発電量の評価支援を行うツールを開発した。本ツールは、太陽光発電システムの設備構成などの各種パラメータおよび日射量・気温等の時系列気象データを入力して、時系列の発電量推定等を実行するものであり、傾斜面日射量を計算する「日射量シミュレータ」、計算された日射量および外気温を基にシステムの発電量を推定する「発電量

推定シミュレータ」、および発電量推定シミュレータにより算出された発電量推定値、発電所内負荷量および設計情報を基に発電所としてのエネルギー損失を推定する「発電所エネルギーフローシミュレータ」の機能を実現している。「日射量シミュレータ」では、日射量を算出するための入力データとして、気象庁が 687 か所の AMeDAS の四要素観測所で測定し公開している日照時間の利用も可能とした。日照時間から水平面全天日射を算出するモデルの開発も本研究において行い、全国 41 気象官署の 2013 年～2018 年の 6 年間のデータを用いて算出モデルに用いる係数を決定した。

今回の開発における主な実装機能は以下のとおりである。

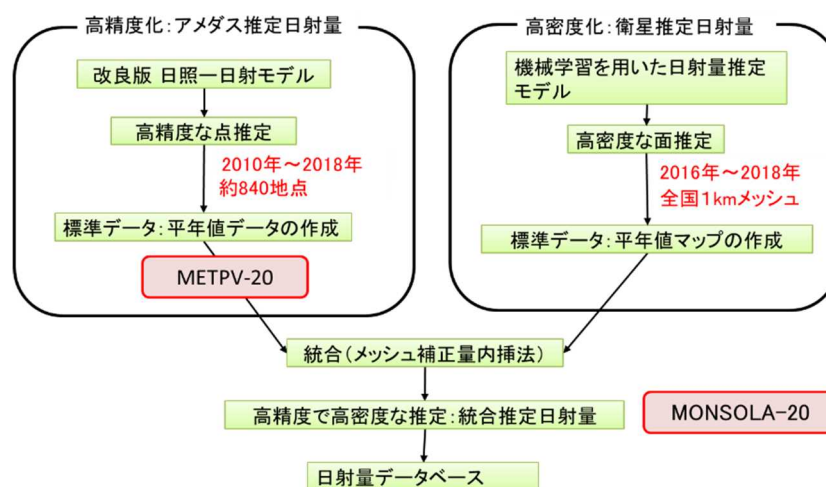
- 1) METPV-11 に基づく推定発電電力量算出機能。
- 2) 気象庁の日射量データと気温データに基づく推定発電電力量算出機能。
- 3) 気象庁の日照時間データと気温データに基づく推定発電電力量算出機能。
- 4) NEDO-FT フォーマットで出力された傾斜面日射量データ、気温データに基づく推定発電電力量算出機能、および推定発電電力量と実績発電電力量のグラフ表示機能。
- 5) NEDO-FT フォーマットで出力された水平面全天日射量データ、気温データに基づく推定発電電力量算出機能、および推定発電電力量と実績発電電力量のグラフ表示機能。
- 6) ユーザーが劣化率や損失係数を直接入力できる機能。
- 7) パワーコンディショナシステムの変換効率の直接入力機能。
- 8) パワーコンディショナ定格容量よりアレイ定格容量が大きい（いわゆる過積載）システムの推定発電電力量算出に対応。
- 9) モジュール温度係数直接入力機能の実装。
- 10) 方位角の入力範囲設定において北面設置にも対応。

【一般財団法人日本気象協会】

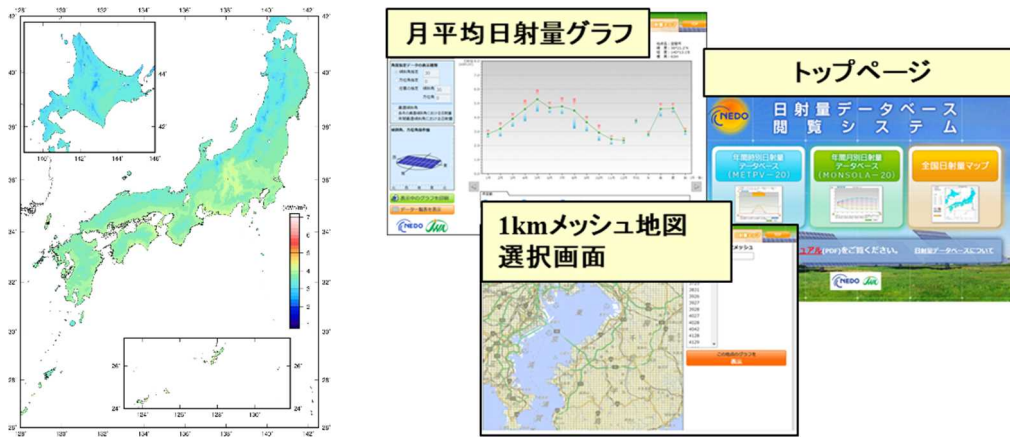
- (1) 日射量データベースの高度化（開発項目②「日射量データベース整備の迅速化」、開発項目③「日射量データベースの高密度化」、開発項目④「日射量データベースの高精度化および日射量データベースの更新」）

日射量データベースの高精度化のために、日照-日射モデル（アメダスで観測している日照時間から日射量を推定するモデル）の改良を行い、METPV-20 データ（代表年時別データ）として整備した。また、ひまわり 8 号のデータを用いて、機械学習により日射量を推定する技術（衛星推定日射量技術）を高度化した。日照-日射モデルの高精度な点推定結果と、衛星推定日射量による高密度な面推定データを統合することで、高精度で高密度な（1 km メッシュの解像度の）MONSOLA-20 データ（月平均日積算日射量データ）を整備した。さらに、METPV-20 データ、MONSOLA-20 データが表示可能なように、日射量データベース閲覧システムを構築した。図Ⅲ-2-(ホ)-C-6 には日射量データベースの高精度化・高密度化の概要を示す。また、図Ⅲ-2-(ホ)-C-7 には日射量マップの例と日射量データベース閲覧システムでの表示例を示す。

また、迅速化の取り組みの一環として、前年の日射量の傾向を日本気象協会のホームページで発表した。



図Ⅲ-2-(ホ)-C-6 日射量データベースの高精度化・高密度化の概要

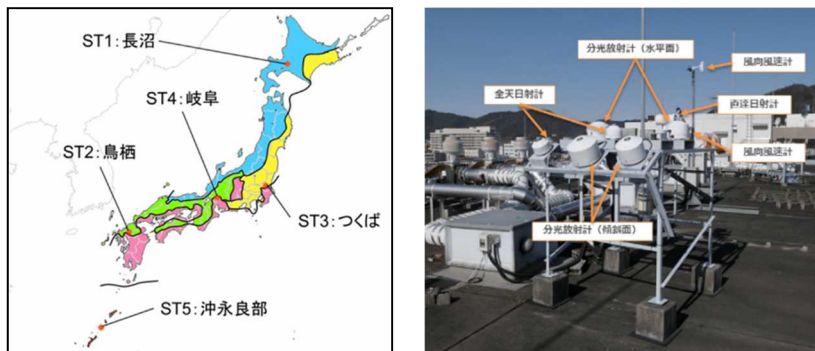


図Ⅲ-2-(ホ)-C-7 日射量マップの例（左図）と日射量データベース閲覧システムでの表示例（右図）

(2) 日射スペクトルデータベースの高度化（開発項目①「5地点における日射スペクトル等の観測」、開発項目⑤「日射スペクトルデータベースの更新と全国整備」）

日本の日射気候区を代表する5地点（長沼、鳥栖、つくば、岐阜、沖永良部）で日射スペクトル等の観測を実施した。データのモニタリング、日常点検、観測機器の校正等を行うなどデータの品質管理を行うとともに、日射スペクトルデータの計測異常を判定する手法を開発した。図Ⅲ-2-(ホ)-C-8に観測地点と観測システムの例を示す。

2018年までの観測データを整理し、公開用のデータ（各年のデータ、代表年データ）として整備した。整備した日射スペクトルデータを用いて、太陽電池の種類ごとにスペクトルミスマッチが発電量評価に与える影響を定量的に評価した。さらに、上記5地点の観測データを学習データとして日射スペクトル推定モデルを開発した。開発した推定モデルを用いて、気象庁が日射量を観測している全国47地点に対して、日射スペクトルの代表年データを整備した。表Ⅲ-2-(ホ)-C-5には整備した日射スペクトルデータの概要を示す。



図Ⅲ-2-(ホ)-C-8 観測地点（左図）と観測システムの例（岐阜地点）（右図）

表Ⅲ-2-(ホ)-C-5 整備した日射スペクトルデータ

	観測データ	推定データ
データの種類	日射スペクトルの観測値等 10分値	日射スペクトル推定モデルによる推定値等 1時間値（10分値データで作成）
収録要素	気温、相対湿度、風向・風速、水平面日射量 傾斜面日射量、直達日射量、太陽高度等の計算値 日射スペクトル（水平面、傾斜面）	気温、相対湿度、風向・風速、水平面日射量 太陽高度等の計算値 日射スペクトル（水平面の計算値）
収録地点	長沼、つくば、岐阜、鳥栖、沖永良部の5地点	日射量を観測している全国47地点
収録期間	2011年～2018年の各年のデータ、代表年データ	2010年～2018年の代表年データ
推定手法	観測値	日射スペクトル推定モデル

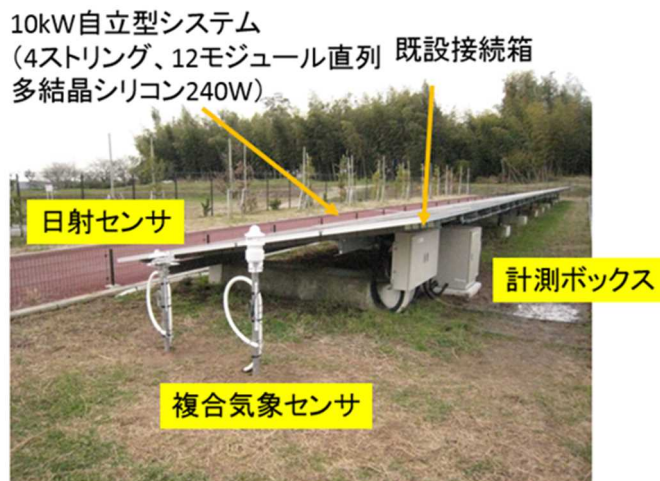
【国立大学法人佐賀大学】

① 屋外曝露メガソーラーで利用可能な高速測定システムの開発

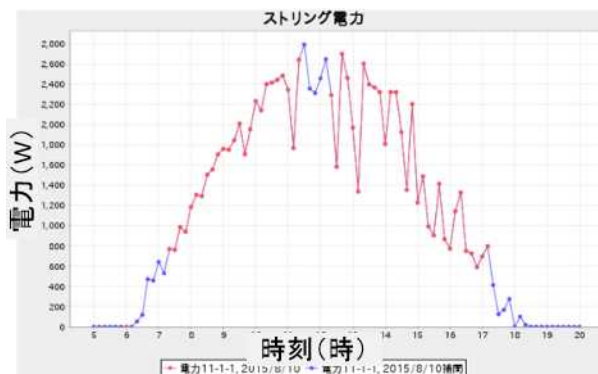
佐賀県の吉野ヶ里メガソーラー発電所で稼働中の4ストリングからなる10 kWシステムに、図Ⅲ-2-(ホ)-C-9に示す高速測定システムを設置した。設置工事は2016年2月に完了し、即日測定開始した。高速測定システムは安定的に測定を継続している。測定項目は、4ストリングの4つの電流、共通のひとつの電圧、2次準器全天日射計とシリコン型日射計による2つの日射強度（以上が測定間隔10 ms）、4ストリング各1箇所のモジュール裏面温度、複合気象装置による風向、風速、気温、湿度、気圧、雨量（以上測定間隔100 ms）である。既設接続箱横に設置した測定ボックス内の1台のデータロガーで全測定信号を記録しているため、測定時間にずれはない。データロガーは発電所管理事務所内のPCとLAN接続しており、屋内で測定データの監視、収集、またデータロガーの設定変更が可能である。パワーコンティンション（PCS）による約3 s周期の細かい電圧変動を見ることができた。本測定システムを2017年7月に産業技術総合研究所とともに特許出願した。2017年9月には全天カメラ撮影システムを追加設置し、また佐賀大学と携帯電話無線回線で接続して測定システムを遠隔制御できるようにした。本システムで測定したストリング電流や電圧の波形を見ると、10 ms間隔という高速でも変動していることがわかった。これはPCSの最大電力点追従（MPPT）制御による変動である。この変動を利用してストリングの故障検出を高速にできることを下記の開発項目③で示した。それにより、測定間隔10 msが最適であると結論した。

② 発電量、日射量データの補間アルゴリズムソフトウェアの開発

太陽光発電の測定データには、屋外測定であること、広域から大量のデータを収集すること、またシステムコストを抑える必要性から測定欠損がよく見られる。天候の不安定な日には太陽光発電の測定データは変動しており、従来の補間アルゴリズムで欠損補間すると誤差が大きくなる。そこで、測定欠損を補間するアルゴリズムとして、離散フーリエ変換（DFT）補間法、日射量データを用いたDFT補間法（図2）、ウェーブレット補間法を開発した。図Ⅲ-2-(ホ)-C-10に示す日射量データを用いたDFT補間法の結果を見てわかるように、補間区間中の振動を再現できており、これは従来の補間法にない本開発手法の特長である。最も成績の良かった日射量データを用いたDFT補間法は、平均補間誤差12.6%、晴天日に対しては補間誤差9.06%となり、目標の誤差10%以内を達成した。



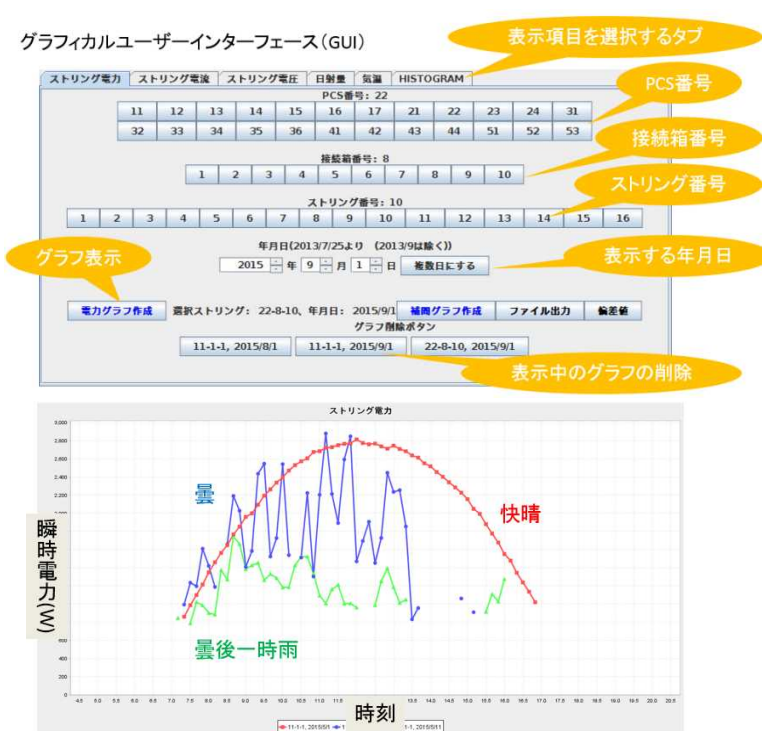
図Ⅲ-2-(ホ)-C-9 高速測定システム



図Ⅲ-2-(ホ)-C-10 日射量 DFT 補間法の補間結果例 (青色が補間)

② 発電量、日射量データの解析ソフトウェアの開発

メガソーラー発電所の大規模な測定データを可視化、解析するソフトウェアである「大規模計測データ可視化システム」を開発した。このシステムは大量の電気計測や気象計測データから、指定した任意期間のデータをグラフ表示することができる。さらに、補間処理機能の他、ヒストグラム表示、地図表示などの統計表示機能を持つ。また、太陽電池ストリングの状態把握や故障検出する機能を、このシステムに実装した。図Ⅲ-2-(ホ)-C-11 には大規模計測データ可視化システムのグラフィカルユーザーインターフェース (GUI) 画面とグラフ表示を示す。この機能を実現する方法の一部として、ストリングの温度推定をするアルゴリズムを作成した。故障検出機能の数学的処理の部分には 2018 年度に開発した「多次元非線形関数最小化ソフトウェア」を用いている。このソフトウェアを高速測定システムの測定データに適用したところ、実装されている最小化方法の中では「焼きなまし法」が最も有効であることがわかった。故障検出機能は、影による出力低下と直列抵抗の増加による出力低下を判別して瞬時に検出することに成功した。検出には本研究で開発した高速測定システムで測定した太陽電池ストリングの高速な電流電圧変動を活用している。10 ms 単位の変化からセルに影がかかったことを検出することに成功している。現在のメガソーラー発電所ですでに測定されているような信号だけを用いて、ストリング出力低下を検出するだけでなく、その原因までを自動判別することにつながる技術である。



図Ⅲ-2-(ホ)-C-11 大規模計測データ可視化システムの GUI 画面とグラフ

2. 実用化・事業化見通し

【国立研究開発法人産業技術総合研究所】

屋外曝露サイトにおける各種太陽電池モジュールの劣化特性、日射・温度データ、年間発電量を公開することにより、太陽光発電所建設時に発電コストを算出する際の指標を与えることができる。また、各種太陽電池モジュールの屋外曝露による劣化を考慮したアレイ単位での発電量推定技術は、太陽光発電所建設に際し、気候条件に適したモジュールの選択を可能とするとともに、精緻な生涯発電量を算出することで、太陽光発電所のバンカビリティ（投資回収性・融資可能性）を高精度に判断することを可能にする。さらに、2018年8月に国際規格として成立した IEC61853-4 が定義する世界の6つの気候プロファイルの一つは、日本気象協会が観測する日本の気象データより作成された気候プロファイルである。日本が発電量定格の一つの気候区として採用されたことにより、日本の気候に最適な太陽電池モジュールの選択が可能になる。このように、本研究成果は、主として発電事業者を通じて、実用化・事業化する見通しである。

【一般財団法人電力中央研究所】

IEC/TC82/WG2 に関しては、IEC 規格に日本が直接寄与する成果を得ている。太陽電池の発電量評価技術では、5日射気候区における経年劣化を考慮した30年発電量を算出する技術を開発する。このことにより、バンカビリティの評価の簡易化や高度化への利用が可能である。さらに、メガソーラーの発電量診断手法については、現在実運用中のサイトのデータを用いて開発を進めており、観測項目の実態も踏まえて、そのまま現場適用可能な技術となっている。これらは、最終的にはガイドラインとしてまとめることをはじめ、IEC 規格活動を通じて、世界標準への寄与が期待できる。

【学校法人東京理科大学】

10年以上前に設置された結晶シリコン系の太陽電池モジュールおよびシステムの長期間にわたる劣化特性を明らかにし、開発したツールにより劣化特性を考慮した発電電力量の推定を可能としたことにより、多くの発電事業者が発電所の運用を効率的に行えるようになることが期待できる。

【一般財団法人日本気象協会】

本研究で開発した、日照-日射モデル（日照時間から日射量を推定するモデル）、ひまわり8号から日射量を推定するモデルを用いることで、発電事業者やO&M事業者等に対して高精度な日射量情報を提供可能である。

本事業の中で、全国47地点の平均的な1年分の日射スペクトルデータを整備しており、高精度な発電量評価に利用可能である。

【国立大学法人佐賀大学】

特になし

3. 波及効果

【国立研究開発法人産業技術総合研究所】

本研究で開発した発電量推定技術を用いることにより、国内太陽電池モジュールメーカーは、日本の気候に最適な太陽電池モジュールを設計することが可能となる。標準試験条件における変換効率の向上に加え、生涯発電量向上のための太陽電池モジュールの設計が可能となるとともに、例えばある気候区分でのパフォーマンスレシオを銘板に記載することで、モジュールの付加価値を大いに向上させることができる。同様に、輸出向けモジュールを作製する場合にも、当該輸出地の気候に適した付加価値の高いモジュールを設計可能である。これらのことを通じて、国内太陽電池モジュールメーカーの復興に資することが波及効果として期待される。

【一般財団法人電力中央研究所】

本研究により発電量推定技術が確立した場合には、STC で得られた定格出力（W）で表示された現在の銘板値に加え、推定発電量（Wh）を銘板値に加えることが可能となる。国内では代表的な気象条件である佐賀県鳥栖市のサイトでのデータを使用しているため、国内限定ではあるものの、直接的な価値になる発電量が銘板値に明記されることで、モジュールの付加価値が大いに向上する。さらには、世界各地での気象データに対して、本研究で得られた発電量推定技術を適用することにより、気象条件毎の発電量を銘板値に明記することも可能となり、発電事業者が太陽光発電所の建設地毎に最適な

種類の太陽電池モジュールを選択することが可能となる。

メガソーラーの発電量診断技術を開発することにより、適切な保守で発電量の維持が可能になるばかりでなく、上空からのドローンによる赤外線画像撮影での故障検出など、新技術の活用も含め、設備保守点検産業の育成につながる。

IEC61853 シリーズが確立することにより、世界で 6 ヶ所のモジュールパフォーマンスレシオが算出可能になり、様々な気候条件における太陽光発電システム発電量の比較が容易に可能となる。

【学校法人東京理科大学】

現在市場で最も普及している結晶 Si 系太陽電池モジュールの長期的な発電特性と劣化率を明らかにし、その特徴を考慮した発電量の評価支援を行うツールを作成したことで、発電事業におけるシステムの健全性評価に役立つことが期待できるほか、今後は実際のシステムでもリパワリングや中古市場に向けた発電性能評価が行われることが見込まれているため、そのような分野でも活用が進むと期待される。

【一般財団法人日本気象協会】

高密度な日射量データベースを利用することで、未利用地域への太陽光発電の普及・利用が促進される。また、高精度な日射量データベースを利用することで、期待発電量を精度良く計算できるようになり、より最適な太陽光発電システム導入への投資、高精度な発電量診断等が行われるようになる。

全国各地の日射スペクトルデータの利用が可能となったことで、日射スペクトルの影響を考慮した用途に応じた高効率な太陽電池の開発の促進が期待される。また、新型太陽電池を含む日射スペクトルの影響が大きい太陽電池のより高精度な評価が可能となり、その利用が促進される。

【国立大学法人佐賀大学】

太陽光発電所では、故障検出、劣化特性の自動化が求められているが、本研究で開発したソフトウェアは、それらの用途に用いられる可能性がある。

4. 今後の展開

【国立研究開発法人産業技術総合研究所】

本研究に使用した屋外曝露サイトを引き続き運用することにより、結晶系・薄膜系の各種太陽電池モジュールの劣化特性をより長期間にわたり把握することが可能となり、特に曝露後 10 年以上を経て発現することが予想される化学的腐食劣化に基づく発電性能低下の振舞いを詳細に観測し、発電量推定に反映させる。さらに、ペロブスカイト／結晶シリコン等の各種新型太陽電池の開発が進んでいるが、これらの太陽電池を新規に設置し、屋外曝露時の発電性能の詳細データを蓄積することにより、新型太陽電池に対する発電量推定を試みる。

【一般財団法人電力中央研究所】

2020 年末までの 8 年間以上の 6 型式の結晶シリコン太陽電池の発電データを解析し、より長期間のデータを用いて発電性能の経年変化と故障率を評価する。また、2016 年 6 月に導入に導入した高効率結晶シリコン太陽電池の 2020 年末まで (3 年半) の発電データを解析し、短期間での高効率太陽電池の発電性能の推移を調査する。これらのデータに基づいた太陽光発電システムの経年劣化モデルを構築し、日本気象協会が気象データを計測している 5 日射気候区における、経年劣化を考慮した太陽光発電の 30 年発電量を算出する。

【学校法人東京理科大学】

運用開始から 10 年以上が経過する北杜メガソーラーでは、今後、発電性能の劣化に加えて様々な不具合を含む発電性能の低下が徐々に発生することが見込まれる。20 年以上の運用期間に向けて、今後も可能な限り長期的な発電特性と劣化率評価に加えて不具合の影響評価などを行い、得られた知見を発電所の運用技術として活用していく。

【一般財団法人日本気象協会】

今後、太陽光発電の導入形態の多様化等に伴い、日射量、日射スペクトルデータの重要性がさらに増していくと考えられる。今後も継続的な日射量、日射スペクトル等の観測、定期的なデータベースの更新 (新たな収録要素の追加、推定モデルの高度化、機能の追加を含む) を行うことで、より多く

の太陽光事業に対して有益な情報を提供することが可能となる。

【国立大学法人佐賀大学】

本研究課題で開発した、太陽光発電所の高速測定システムは、稼働中の太陽光発電所での故障検出、劣化特性の解析の研究に引き続き用いられる見通しである。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
論文	1	4	7	7	4	23
研究発表・講演 (うち国際会議)	14 (4)	39 (10)	36 (14)	30 (9)	16 (3)	135 (40)
新聞・雑誌等への掲載	1	3	6	4	1	15
受賞	0	0	0	0	1	1
展示	1	1	1	0	0	3

(2020年8月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人 佐賀大学 国立研究開発 法人産業技術 総合研究所	特願 2017-139367	国内	2017/7/18	出願	太陽光発電装置、および太陽光発電装置の制御方法	原重臣 嘉数誠 千葉恭男 増田淳

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda Yoshihiro Hishikawa	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Annual degradation rates of bulk crystalline silicon PV modules estimated from indoor and outdoor measurements	Proceedings of 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2571-2574	無	2015
2	Shigeomi Hara Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	Estimation method of solar cell temperature using meteorological data in mega solar power plant	IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 6, no. 5, pp. 1255-1260	有	2016/7/27
3	宇都宮健志	日本気象協会	日射量の経年変動と近年の日射量の特徴について	太陽エネルギー, vol. 43, no. 1, pp. 17-24	有	2017/1/31
4	板垣昭彦	日本気象協会	太陽光発電システムの運用監視に必要な日射量データ	太陽エネルギー, vol. 43, no. 1, pp. 25-30	有	2017/1/31
5	板垣昭彦 佐々木潤 宇都宮健志	日本気象協会	地上観測データを用いた日射スペクトル推定モデルの開発	太陽エネルギー, vol. 43, no. 2, pp. 49-58	有	2017/3/31
6	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Annual degradation rates of recent crystalline-silicon photovoltaic modules	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 25, no. 12, pp. 953-967	有	2017/7/10
7	Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Development of a practical method to estimate electric power with high precision from various photovoltaic technologies	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, no. 8S2, pp. 08MD05-1-5	有	2017/7/19
8	Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Time-dependent changes in CIGS and CdTe photovoltaic modules by outdoor	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56,	有	2017/7/25

	Yasuo Chiba Atsushi Masuda		exposure	no. 8S2, pp. 08MD06-1-5		
9	Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation of photovoltaic modules composed of interdigitated back contact solar cells observed in an actual photovoltaic system	Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1414-1417	無	2017
10	Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Change in output power by light soaking for high efficiency crystalline silicon photovoltaic modules	Proceedings of 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 1720-1722	無	2017
11	Makoto Kasu Shigeomi Hara Takumi Uematsu	佐賀大学	High-speed measurements of generated power and its relationship to weather observations at Yoshinogari mega solar power plant	Proceedings of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1950-1953	無	2017
12	Shigeomi Hara Makoto Kasu Yasuki Masutomi	佐賀大学	Dependence of string power on its height in the array in Yoshinogari mega solar power plant	Proceedings of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 3339-3342	無	2017
13	Yasuo Chiba Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Overall analysis of change in power generation by outdoor exposure of photovoltaic modules installed at AIST Kyushu Center	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 57, no. 8S3, pp. 08RG04-1-5	有	2018/7/6
14	Sungwoo Choi Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Performance degradation due to outdoor exposure and seasonal variation in amorphous silicon photovoltaic modules	Thin Solid Films, vol. 661, pp. 116-121	有	2018/9/1
15	Yoshiro Izumi Yuzuru Ueda	東京理科大学	Evaluation of PV module outdoor degradation rate by means of I-V curve fitting with DE and linear interpolation method	Proceedings of 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 409-414	無	2018
16	Yasuo Chiba Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Comparison between estimated and actual power generation amounts of photovoltaic modules at Tosu City in Japan	Proceedings of 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 681-683	無	2018
17	Shigeomi Hara Makoto Kasu	佐賀大学	Fault discovery method using numerical calculations in mega-watt solar power plant	Proceedings of 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 1194-1197	無	2018
18	Yoshiro Izumi Yuzuru Ueda	東京理科大学	Calculation of degradation rates of poly crystalline Si and CIGS PV nodule using outdoor linear	Proceedings of 7th International Conference on Renewable Energy	無	2018

			interpolation method	Research and Applications, pp. 365-370		
19	Shigeomi Hara Shun Kihara Makoto Kasu	佐賀大学	Rapid variations of irradiance and string power measured in megawatt solar power plant	Grand Renewable Energy 2018 Proceedings	無	2018
20	Ritsuko Sato Yasuo Chiba Masayuki Chikamatsu Yuji Yoshida Tetsuya Taima Makoto Kasu Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 佐賀大学 金沢大学	Investigation of the power generation of organic photovoltaic modules connected to the power grid for more than three years	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. 5, pp. 052001-1-9	有	2019/4/10
21	Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Yasuo Chiba Makoto Kasu Atsushi Masuda	佐賀大学 産業技術総合研究所 電力中央研究所	Output power behavior of passivated emitter and rear cell photovoltaic modules during early installation stage: Influence of light-induced degradation	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, no. 10, pp. 106510-1-7	有	2019/10/4
22	Ritsuko Sato Yasuo Chiba Masayuki Chikamatsu Yuji Yoshida Tetsuya Taima Makoto Kasu Atsushi Masuda	佐賀大学 産業技術総合研究所 金沢大学	Characteristics change in organic photovoltaics by thermal recovery and photodegradation	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, no. SC, pp. SCCD04-1-7	有	2019/11/29
23	Yoshiro Izumi Yuzuru Ueda	東京理科大学	Calculation of degradation rates of PV modules using outdoor measured I-V curves and multi reference linear interpolation /extrapolation method	Proceedings of 46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 855-860	無	2019

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	松岡寛 原重臣 嘉数誠 松井則明	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける大規模計測データの可視化—メガソーラー全体の状態把握のために	2015年電気学会電力・エネルギー部門大会	2015/8/25
2	原重臣 ホンワナ ディニス 嘉数誠 松井則明	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける計測データの欠損区間の補間方法	2015年電気学会電力・エネルギー部門大会	2015/8/27
3	田中裕之 ホンワナ ディニス 井上拓磨 原重臣 嘉数誠 松井則明	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおけるガラス割れモジュールの調査	2015年電気学会電力・エネルギー部門大会	2015/8/27
4	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda Yoshihiro Hishikawa	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Annual degradation rates of bulk crystalline silicon PV modules estimated from indoor and outdoor measurements	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/16

5	宇都宮健志	日本気象協会	全国5地点の日射スペクトルデータベースの整備	日本気象学会 2015年度秋季大会	2015/10/30
6	Shigeomi Hara Hiroyuki TaNaka Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	Estimation method of solar cell temperature using meteorological data in mega solar power plant	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/17
7	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Various degradation mechanism in crystalline PV modules under moderate climate conditions	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/18
8	Shigeomi Hara Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	Estimation method of characteristic parameters of strings in mega solar power plant	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/19
9	石井徹之 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	実運用下のバックコンタクト太陽電池にみられるPID現象	2015年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26
10	板垣昭彦 宇都宮健志 佐々木潤	日本気象協会	推定モデルを用いた日射スペクトルデータの全国整備	2015年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26
11	宇都宮健志 板垣昭彦 佐々木潤	日本気象協会	MONSOLA-11と近年の日射量データの比較	2015年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26
12	松岡寛 原重臣 嘉数誠 松井則明	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける大規模計測データを可視化するシステムの開発	2015年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/27
13	板垣昭彦	日本気象協会	日射関連検討会ー太陽光発電システム普及後の日射量データベースの構築ー	2015年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/27
14	原重臣 嘉数誠 松井則明	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける大規模計測データ可視化システムの開発	2016年電気学会全国大会	2016/3/17
15	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	各種結晶シリコン太陽電池の実使用下における発電特性の経年変化	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
16	佐藤梨都子 崔誠佑 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	実運用下における薄膜シリコン系太陽電池モジュールの経年変化について	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
17	崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	化合物系薄膜太陽電池モジュールの屋外曝露による経年劣化	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
18	原重臣 嘉数誠 松井則明	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラー発電所計測データを用いたストリング内部状態推定法の検討	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
19	宇野史睦 新堀敏基 橋本明弘 大竹秀明 石井徹之	産業技術総合研究所 気象庁気象研究所 電力中央研究所	降灰予測モデルの検証のための太陽電池発電量を利用した降灰量推定	日本地球惑星科学連合2016年大会	2016/5/26
20	崔誠佑 佐藤梨都子	産業技術総合研究所	化合物薄膜系太陽電池モジュールの屋外曝露による経	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16

	増田淳		時変化の考察		
21	佐藤梨都子 崔誠佑 増田淳	産業技術総合研究所	薄膜シリコン系太陽電池モジュールの屋外曝露による経時変化	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
22	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 増田淳	産業技術総合研究所	薄膜系太陽電池モジュールの屋外曝露評価ー発電量と屋内測定との相関ー	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
23	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	結晶シリコン太陽電池の実使用下における発電特性の経年変化	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
24	原重臣 嘉数誠 松井則明 佐藤梨都子 増田淳	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー 産業技術総合研究所	吉野ヶ里メガソーラー発電所における大規模測定データ可視化システムの開発	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
25	原重臣 嘉数誠 松井則明 佐藤梨都子 増田淳	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー 産業技術総合研究所	吉野ヶ里メガソーラー発電所における高速測定システムの構築	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
26	原重臣 嘉数誠 松井則明	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	放射伝熱を考慮した太陽電池セル温度推定法の検討ー理論の構築と吉野ヶ里メガソーラーでの測定ー	2016 年電気学会電力・エネルギー部門大会	2016/9/9
27	崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 千葉恭男 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	薄膜系太陽電池モジュールの屋外曝露による経時変化の検討	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/14
28	石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	各種太陽電池モジュールの屋外における発電性能評価技術の開発	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15
29	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	屋外曝露した薄膜系太陽電池モジュールのシステム出力係数と屋内測定値の相関	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15
30	佐藤梨都子 千葉恭男 近松真之 吉田郵司 増田淳	産業技術総合研究所	有機薄膜太陽電池モジュールの光照射ならびに暗所保管による出力変化	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/16
31	Tetsuyuki Ishii	電力中央研究所	PV systems database at the global perspective (招待講演)	APEC Workshop on Small and Medium PV System Database in the APEC Region	2016/9/26
32	Tetsuyuki Ishii	電力中央研究所	Deliberation of consolidated document and wrapping-up of workshop (招待講演)	APEC Workshop on Small and Medium PV System Database in the APEC Region	2016/9/26
33	Shigeomi Hara Makoto Kasu	佐賀大学	Fast measurement system for operating strings in	International Workshop on the Sustainable	2016/10/5

			Yoshinogari mega solar power plant	Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	
34	Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Time-dependent changes in CIGS and CdTe photovoltaic modules due to outdoor exposure	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
35	Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Development of a methodology to estimate electric power from various photovoltaic technologies	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
36	Sergio Honwana Shigeomi Hara Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	Discrete-Fourier-transform-based interpolation method for missing data of measurement in mega solar power plant	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
37	Shigeomi Hara Sergio Honwana Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	Construction of fast measurement system in Yoshinogari mega solar power plant	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
38	Shigeomi Hara Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	Development of computer program for large-scale measurement data of Yoshinogari mega solar power plant	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
39	Yasuo Chiba Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Relationship between performance ratio and indoor power output measurements for various photovoltaic modules at AIST Kyushu Center	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
40	首藤 謙太郎 原重臣 嘉数誠 増富康記	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける大規模計測データ解析システムの開発	2016年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
41	諸石祐介 原重臣 嘉数誠 増富康記	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラー発電所における高速測定データを解析するソフトウェアの開発	2016年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
42	原重臣 嘉数誠 増富康記	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける測定データに含まれる欠損区間を補間するソフトウェアの開発	2016年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
43	板垣昭彦 宇都宮健志 佐々木潤	日本気象協会	地上観測データを用いた日射スペクトル推定モデルの作成	2016年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
44	宇都宮健志 板垣昭彦 佐々木潤	日本気象協会	日照-日射モデルの改良に向けた取組み	2016年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/25
45	千葉恭男 崔誠佑	産業技術総合研究所	産総研九州センター（鳥栖市）における太陽電池の研究	2016年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーション	2016/12/7

	佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	電力中央研究所	開発モジュールの発電量評価技術開発	デー	
46	崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 千葉恭男 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	薄膜系太陽電池モジュールの屋外発電量評価と屋内測定評価	2016年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーションデー	2016/12/7
47	石井徹之	電力中央研究所	近年に製造された結晶シリコン太陽電池の年劣化率の算出(招待講演)	東京理科大学総合研究院太陽光発電技術研究部門第7回シンポジウム「太陽電池・発電技術の最新動向」	2017/1/30
48	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	化合物系薄膜太陽電池モジュールに対する光照射の検討	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/15
49	佐藤梨都子 崔誠佑 千葉恭男 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	光照射による高効率結晶シリコン太陽電池モジュールの出力変化	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/16
50	石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	近年に製造された結晶シリコン太陽電池モジュールの年劣化率の評価	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/16
51	嘉数誠 原重臣 植松卓巳	佐賀大学	吉野ヶ里メガソーラーにおける高速測定システムの構築	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/16
52	原重臣 嘉数誠 増富康記	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける発電量データ処理および可視化システムの開発	2017年電気学会全国大会	2017/3/16
53	Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Degradation characteristics of thin film photovoltaic modules by outdoor exposure (招待講演)	Global Photovoltaic Conference 2017	2017/3/16
54	Sungwoo Choi	産業技術総合研究所	Indoor and outdoor measurements for various photovoltaic at AIST Kyushu Center (招待講演)	International Green Energy Conference 2017	2017/4/6
55	宇都宮健志 佐々木潤 板垣昭彦	日本気象協会	主成分分析による日射スペクトル変動特性の評価	日本気象学会2017年度春季大会	2017/5/27
56	崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 千葉恭男 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	多数年の屋外曝露による各種太陽電池モジュールの経時変化特性	AIST太陽光発電研究成果報告会2017	2017/6/14
57	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	近年に製造された結晶シリコン太陽電池モジュールの年劣化率の算出	AIST太陽光発電研究成果報告会2017	2017/6/14

58	原重臣 嘉数誠 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	佐賀大学 産業技術総合研 究所	吉野ヶ里メガソーラー発電所 における高速測定システムの データ解析	AIST 太陽光発電研究成果報 告会 2017	2017/6/14
59	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 増田淳 石井徹之 川端秋馬 平山齊 吉村幸雄	産業技術総合研 究所 電力中央研究所 鹿児島大学 鹿児島県工業技術 センター	産総研九州センター屋外曝露 サイトにおける太陽電池モ ジュールの発電量評価	AIST 太陽光発電研究成果報 告会 2017	2017/6/14
60	嘉数誠 原重臣 植松卓巳	佐賀大学	High-speed measurements of generated power and its relationship to weather observations at Yoshinogari mega solar power plant	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/28
61	原重臣 嘉数誠 増富康記	佐賀大学 佐嘉吉野ヶ里ソー ラー	Dependence of string power on its height in the array in Yoshinogari mega solar power plant	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/30
62	崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 千葉恭男 増田淳	産業技術総合研 究所 電力中央研究所	屋外曝露された結晶シリコン 系太陽電池の室内測定による 劣化率の検討	第14回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2017/7/20
63	原重臣 嘉数誠	佐賀大学	メガソーラーにおける発電量 測定欠損区間のウェーブレッ トを用いた補完	第14回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2017/7/20
64	石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研 究所	実使用下にあるバックコンタ クト太陽電池にみられる PID 現象	第14回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2017/7/21
65	崔誠佑 千葉恭男 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研 究所 電力中央研究所	屋外曝露した各種太陽電池モ ジュールの劣化率の検討	第78回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/9/5
66	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研 究所 電力中央研究所	屋内測定から算出した劣化率 を用いた佐賀県鳥栖市におけ る太陽光発電量推定の検討	第78回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/9/7
67	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研 究所	実使用下のバックコンタクト 太陽電池にみられる PID 現象	第78回応用物理学会秋季 学術講演会	2017/9/7
68	Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	産業技術総合研 究所 電力中央研究所	Change in output power by light soaking for high efficiency crystalline silicon photovoltaic modules	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/26

69	Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation of photovoltaic modules composed of interdigitated back contact solar cells observed in an actual photovoltaic system	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/27
70	崔誠佑 千葉恭男 佐藤梨都子 増田淳 石井徹之	産業技術総合研究所 電力中央研究所	各種太陽電池モジュールの屋外曝露による経年劣化	2017年度第7回九州・沖縄産業技オープンイノベーションショーデー	2017/10/11-13
71	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 増田淳 石井徹之	産業技術総合研究所 電力中央研究所	産総研九州センター（鳥栖市）における太陽電池の研究開発ーモジュールの発電量評価技術開発	2017年度第7回九州・沖縄産業技オープンイノベーションショーデー	2017/10/11-13
72	佐々木潤 宇都宮健志 板垣昭彦	日本気象協会	日照ー日射モデル高精度化に向けた取り組み（1）～雲や水蒸気の影響を取り入れた推定モデルの再構築～	2017年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2017/10/26
73	宇都宮健志 佐々木潤 板垣昭彦	日本気象協会	日照ー日射モデル高精度化に向けた取り組み（2）～地域特性導入に関する検討～	2017年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2017/10/26
74	石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	6年間の実使用下における太陽電池モジュールの劣化と故障に関する調査	2017年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2017/10/26
75	板垣昭彦 佐々木潤 宇都宮健志	日本気象協会	日射スペクトル高精度推定に向けたひまわり8号データの利用可能性の検討	2017年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2017/10/26
76	原重臣 木原 駿 嘉数誠	佐賀大学	メガソーラーにおける日射量・発電量の高速な変動の測定	2017年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2017/10/27
77	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Annual degradation rates of recent crystalline silicon PV modules and a study of the energy rating standard for PV modules under subtropical coastal climatic conditions (招待講演)	2nd International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2017	2017/11/11
78	Yasuo Chiba Ritsuko Sato Sungwoo Choi Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Analyses of change in power generation by outdoor exposure of photovoltaic modules installed at AIST Kyushu Center from 2010 to 2016	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/13
79	Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央研究所 産業技術総合研究所	Reliability investigation of five PV technologies under actual operating conditions for six years	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14
80	Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Degradation and seasonal effects of amorphous silicon modules due to	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/14

	Yasuo Chiba Atsushi Masuda		outdoor expose by indoor and outdoor measurements		
81	Ritsuko Sato Yasuo Chiba Masayuki Chikamatsu Yuji Yoshida Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Change in output power of organic photovoltaic module connected to electric power grid for 2 years	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
82	Shigeomi Hara Makoto Kasu	佐賀大学	Interpolation method for missing data of measurement in mega solar power plant using wavelet transforms	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
83	Shigeomi Hara Makoto Kasu	佐賀大学	Subsecond interval measurements of outdoor- operated mega solar power plant	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/16
84	Tetsuyuki Ishii	電力中央研究所	Annual degradation rates of recently produced c-Si PV modules under subtropical coastal climate conditions (招待講演)	2018 PV Reliability Workshop	2018/2/27
85	原重臣 嘉数誠	佐賀大学	ウェーブレットを用いたメガ ソーラーにおける測定欠損の 補間	2018 年電気学会全国大会	2018/3/14
86	Sungwoo Choi	産業技術総合研究所	Photovoltaic degradation - in AIST Kyushu Center (招待講演)	Global Photovoltaic Conference 2018	2018/3/15
87	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市における太陽電池 モジュールの実発電量と推 定発電量の比較	第 65 回応用物理学会春季 学術講演会	2018/3/18
88	石井徹之 崔誠佑 佐藤梨都子 千葉恭男 増田淳	電力中央研究所 産業技術総合研究所	高効率結晶シリコン太陽電池 の実運用下での初期発電性能 の変化	第 65 回応用物理学会春季 学術講演会	2018/3/18
89	崔誠佑 千葉恭男 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	薄膜シリコン系太陽電池モ ジュールの屋外曝露による劣 化特性	第 65 回応用物理学会春季 学術講演会	2018/3/20
90	Sungwoo Choi	産業技術総合研究所	Power generation performance in high efficiency silicon PV (招待講演)	International Green Energy Conference 2018	2018/4/5
91	Yoshiro Izumi Yuzuru Ueda	東京理科大学	Evaluation of PV module outdoor degradation rate by means of I-V curve fitting with DE and linear interpolation method	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/6/11
92	Yasuo Chiba Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Comparison between estimated and actual power generation amounts of	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/6/11

	Sungwoo Choi Atsushi Masuda		photovoltaic modules at Tosu city in Japan		
93	Shigeomi Hara Makoto Kasu	佐賀大学	Fault discovery method using numerical calculations in mega-watt solar power plant	7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	2018/6/12
94	Shigeomi Hara Shun Kihara Makoto Kasu	佐賀大学	Rapid variations of irradiance and string power measured in mega- watt solar power plant	Grand Renewable Energy 2018	2018/6/21
95	千葉恭男 石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 増田淳	産業技術総合研究 所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市における結晶シリ コン系太陽電池モジュール の実発電量と推定発電量の比較	第15回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2018/7/12
96	崔誠佑 千葉恭男 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究 所 電力中央研究所	薄膜系太陽電池モジュールの 室内測定による劣化特性と発 電量の相関	第15回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2018/7/12
97	神谷健司 植田謙	東京理科大学	IR画像解析による太陽電池 モジュール不具合検出手法の 開発	第15回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2018/7/12
98	泉洋志郎 植田謙	東京理科大学	段階別フィルタリングと線形 補間法によるPVモジュール の屋外劣化率解析	第15回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム	2018/7/12
99	植田謙	東京理科大学	大規模太陽光発電システム導 入及び運用のための検討支援 ツールの開発	2018年電気学会電力・エネ ルギー部門大会	2018/9/14
100	原重臣 嘉数誠	佐賀大学	稼働中のストリング測定デー タを用いたストリング故障診 断法の検討	2018年電気学会電力・エネ ルギー部門大会	2018/9/14
101	崔誠佑 千葉恭男 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究 所 電力中央研究所	化合物系薄膜太陽電池モ ジュールの室内測定による劣 化特性と発電量の相関	第79回応用物理学会秋季 学術講演会	2018/9/19
102	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究 所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市における太陽電 池モジュールの実発電量と推 定発電量の比較 (II)	第79回応用物理学会秋季 学術講演会	2018/9/21
103	Sungwoo Choi Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術総合研究 所 電力中央研究所	Degradation of photovoltaic performance due to outdoor exposure at AIST Kyushu Center in Japan	35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2018/9/25
104	Yoshiro Izumi Yuzuru Ueda	東京理科大学	Calculation of degradation rates of poly crystalline Si and CIGS PV module using outdoor linear interpolation method	7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications	2018/10/15
105	Yasuo Chiba	産業技術総合研究 所	Current status of changes in power generation of photovoltaic modules	3rd International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging”	2018/10/31

			installed at AIST Kyushu Center (招待講演)	under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	
106	佐々木潤 宇都宮健志 板垣昭彦	日本気象協会	NEDO 日射量データベース高度化のためのひまわり 8 号データの利用	2018 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2018/11/8
107	宇都宮健志 板垣昭彦 佐々木潤	日本気象協会	NEDO 日射スペクトルデータベース (VER-3) の公開とその活用	2018 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2018/11/9
108	板垣昭彦 佐々木潤 宇都宮健志	日本気象協会	日射スペクトルデータベース (VER-3) を用いた傾斜面における日射スペクトル推定モデルの検討	2018 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2018/11/9
109	佐藤梨都子 千葉恭男 近松真之 吉田郵司 増田淳 嘉数誠	産業技術総合研究所 佐賀大学	系統連系された有機薄膜太陽電池アレイの経年劣化に伴う発電量の変化	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14
110	千葉恭男 石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの推定発電量と実発電量の比較	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14
111	崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 千葉恭男 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	屋外曝露された各種太陽電池モジュールの室内測定による劣化率の検討	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14
112	原重臣 千葉恭男 増田淳 嘉数誠	佐賀大学 産業技術総合研究所	メガソーラー発電所に設置した高速測定システムによる日射量・発電量の速い変動の測定	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2018	2018/11/14
113	千葉恭男 石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	産総研九州センター (鳥栖市) における太陽電池の研究開発ーモジュールの発電量評価技術開発ー	2018 年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーションデー	2018/11/16
114	千葉恭男 石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	産総研九州センター (鳥栖市) における太陽電池の研究開発ー推定発電量と実発電量の比較ー	2018 年度九州・沖縄産業技術オープンイノベーションデー	2018/11/16
115	原重臣 嘉数誠	佐賀大学	太陽電池ストリング測定データを用いたストリング回路モデルパラメータ推定による故障検出	電子情報通信学会電子通信エネルギー技術研究会ー回路技術及び高効率エネルギー変換技術関連、一般ー	2019/1/16
116	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの実発電量と推定発電量の比較 (III)	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3/10
117	佐藤梨都子 千葉恭男 近松真之 吉田郵司	佐賀大学 産業技術総合研究所 金沢大学	有機薄膜太陽電池の準安定性に影響を与える温度の検討	第 66 回応用物理学会春季学術講演会	2019/3/12

	嘉数誠 當摩哲也 増田淳				
118	吉田武洋 植田讓	東京理科大学	屋外 PV システムの電流・電力経年劣化率評価	2019 年電気学会全国大会	2019/3/14
119	Sungwoo Choi	産業技術総合研究所	Power generation performance of various photovoltaic modules due to outdoor exposure (招待講演)	Global Photovoltaic Conference 2019	2019/3/15
120	Yoshiro Izumi Yuzuru Ueda	東京理科大学	Calculation of degradation rates of PV modules using outdoor measured I-V curves and multi reference linear interpolation /extrapolation method	46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2019/6/18
121	Ritsuko Sato Yasuo Chiba Masayuki Chikamatsu Yuji Yoshida Makoto Kasu Tetsuya Taima Atsushi Masuda	佐賀大学 産業技術総合研究所 金沢大学	Metastability of power generation amount in organic photovoltaics experienced by different temperature conditions	7th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies	2019/6/21
122	泉洋志郎 植田讓	東京理科大学	多点基準形線形補間法による太陽電池モジュールの劣化解析	第 16 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/4
123	千葉恭男 石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市における結晶シリコン系太陽電池モジュールの劣化率を用いた実発電量と推定発電量の比較	第 16 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2019/7/4
124	泉洋志郎	東京理科大学	多点基準型線形補間法を用いた太陽モジュールの劣化解析	2019 年度日本太陽エネルギー学会若手研究発表会	2019/8/9
125	古谷拓巳	東京理科大学	太陽光発電システムの簡易的な性能評価に向けた 2 つの日照日射変換モデルの開発	2019 年度日本太陽エネルギー学会若手研究発表会	2019/8/9
126	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの実発電量と推定発電量の比較 (I-V)	第 80 回応用物理学会秋季学術講演会	2019/9/21
127	千葉恭男	産業技術総合研究所	産総研九州センター (鳥栖市) における太陽光発電研究の概要	2019 年度九州・沖縄 産業技術オープンイノベーションデー	2019/9/26
128	千葉恭男 石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	産総研九州センター (鳥栖市) における太陽電池の研究開発ーモジュールの発電量評価技術開発ー	2019 年度九州・沖縄 産業技術オープンイノベーションデー	2019/9/26
129	佐々木潤 宇都宮健志 板垣昭彦	日本気象協会	ひまわり 8 号を用いた NEDO 日射量 DB の高密度化	2019 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会	2019/10/17
130	板垣昭彦 安藤真一 宇都宮健志	日本気象協会	市街地における日射の移動観測	2019 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会	2019/10/17

131	古谷拓巳 植田謙	東京理科大学	太陽光発電システムの簡易的な性能評価に用いるための日照日射変換モデルの開発	2019年度日本太陽エネルギー学会研究発表会	2019/10/17
132	Yasuo Chiba Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 電力中央研究所	Estimated power generation amounts calculated by using the degradation rate of photovoltaic modules exposed outdoors in Japan	29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2019/11/8
133	佐藤梨都子 千葉恭男 近松真之 吉田郵司 當摩哲也 嘉数誠 増田淳	佐賀大学 産業技術総合研究所 金沢大学	有機薄膜太陽電池の熱回復が発電量に与える影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
134	千葉恭男 石井徹之 佐藤梨都子 崔誠佑 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市における太陽電池モジュールの劣化率を加味した推定発電量と実発電量の比較	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2019	2019/12/18
135	千葉恭男 崔誠佑 佐藤梨都子 石井徹之 増田淳	産業技術総合研究所 電力中央研究所	佐賀県鳥栖市において屋外曝露された太陽電池モジュールの屋内測定から求めた劣化の推移	第 67 回応用物理学会春季学術講演会	2020/3/14

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	日本気象協会	2015年年間日射量 例年に比べ『東多西少』～例年に比べると、東北地方で多く、九州南部で少ない傾向～	日本気象協会ホームページ	2016/2/29
2	日本気象協会	国内初！「日射スペクトルデータベース」の公開～日本気象協会が「NEDO 日射量データベース」を拡充～	日本気象協会ホームページ	2016/5/17
3	日本気象協会	2016年の年間日射量 前年の年間日射量に比べ、東日本でやや少なく西日本でやや多い「東少西多」の傾向	日本気象協会ホームページ	2017/1/19
4	日本気象協会	ひまわり 8号のデータにより、雲と積雪を判別して推定日射量の精度を10%向上～衛星推定日射量サービス『SOLASAT 8-Now』に活用～	日本気象協会ホームページ	2017/2/1
5	日本気象協会	「第12回再生可能エネルギー世界展示会」に出展～太陽光・風力・海洋を主軸とした、エネルギー事業の今を紹介展示～	日本気象協会ホームページ	2017/6/27
6	産業技術総合研究所	レビュー AIST 太陽光成果報告会 2017（下）	電子デバイス産業新聞、8面	2017/8/3
7	産業技術総合研究所	割れた太陽光パネル、そのまま放置するとどうなるのか？ 産業技術総合研究所 九州センター・その1	特集—メガソーラービジネス：日経BP社（電子版）	2017/9/13
8	産業技術総合研究所	黄砂による発電量への影響はないのか？ 産業技術総合研究所 九州センター・その2	特集—メガソーラービジネス：日経BP社（電子版）	2017/10/4
9	産業技術総合研究所	バックコンタクトや PERC パネル、約半年でPID や LID による不具合も 産業技術総合研究所 九州センター・その3	特集—メガソーラービジネス：日経BP社（電子版）	2017/10/18
10	日本気象協会	2017年の年間日射量傾向まとめ～例年と比べ西日本でやや多く、東北地方でやや少ない傾	日本気象協会ホームページ	2018/1/31

		向～		
11	日本気象協会	新たに機能拡充した「日射スペクトルデータベース」を公開—高精度な発電量評価や高効率次世代太陽電池の研究開発への活用に期待—	新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ	2018/6/1
12	日本気象協会	「日射スペクトルデータベース」の収録期間を約4年半に拡張～太陽光の発電量評価や太陽電池の研究開発に活用できます～	日本気象協会ホームページ	2018/6/4
13	日本気象協会	日射波長分布 データベースを拡張 NEDO 太陽光開発に一役	電気新聞, 4面	2018/6/5
14	日本気象協会	『2018年の日射量(確定版)』発表～東北南部から沖縄で、例年と比べ「やや多い」傾向～	日本気象協会ホームページ	2019/1/31
15	日本気象協会	(日射量レポート Vol.1)『2019年の日射量』～2019年(令和元年)の日射量の分布は、2018年と比べて「北高南低」の傾向でした～	日本気象協会ホームページ	2020/3/11

【受賞】

番号	受賞者	所属	タイトル	賞の名称	受賞年月
1	泉洋志郎	東京理科大学	多点基準形線形補間法による太陽電池モジュールの劣化解析	第16回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム ノベリティPV奨励賞	2019/7/5

【展示】

番号	区分	発表者	所属	タイトル	形式、詳細	日時、場所月
1	展示	板垣昭彦 宇都宮健志 佐々木潤	日本気象協会	研究成果に関するブース展示	第10回再生可能エネルギー世界展示会	2015/7/29-31
2	展示	板垣昭彦 宇都宮健志 佐々木潤	日本気象協会	研究成果に関するブース展示	第11回再生可能エネルギー世界展示会	2016/6/29-7/1
3	展示	板垣昭彦 宇都宮健志 佐々木潤	日本気象協会	研究成果に関するブース展示	第12回再生可能エネルギー世界展示会	2017/7/5-7

D ZEB 適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術開発 (株式会社カネカ)

1. 成果詳細

ZEB 適用型太陽電池モジュールとして、建築物に実装される太陽電池モジュールには建築物と同等の長期耐久性と安全性が求められる。特に、電気安全性の観点から、太陽電池から発生した電気が流れる経路である「電気配線や接続部」および電気絶縁性を維持するための「封止構造」の長期耐久性が重要である。また、封止構造の棄損につながる封止材の剥がれ（デラミネーション）に関しては、著しく外観を損なうことがあり、電気安全性の観点だけでなく、建築物の外観意匠性の維持という観点でも問題となる。そのため、ZEB 適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術として、「電気配線接続」と「封止構造」の長期耐久性を評価する技術を開発した。

【① ZEB 適用を想定した長期信頼性試験の開発】

ZEB 適用型太陽電池モジュールの 30 年間の運転期間にわたって受けると想定される ZEB 適用型特有の環境負荷として「温度」、「電流」、「機械荷重」等を複合的に負荷できる「電流負荷サイクル試験装置」を用いて、新規の加速評価試験方法である ATC(Acceeded Thermal Cycle)試験を開発した。加速係数としては、通常用いられる温度サイクル試験に比べて、4 倍加速で評価できることを見出した(図 III-2-(ホ)-D-1)。本試験方法により、配線の断線や接続部の高抵抗化といった火災発生に至る可能性のある製品安全上リスクのある劣化モードを加速評価することが可能となった。

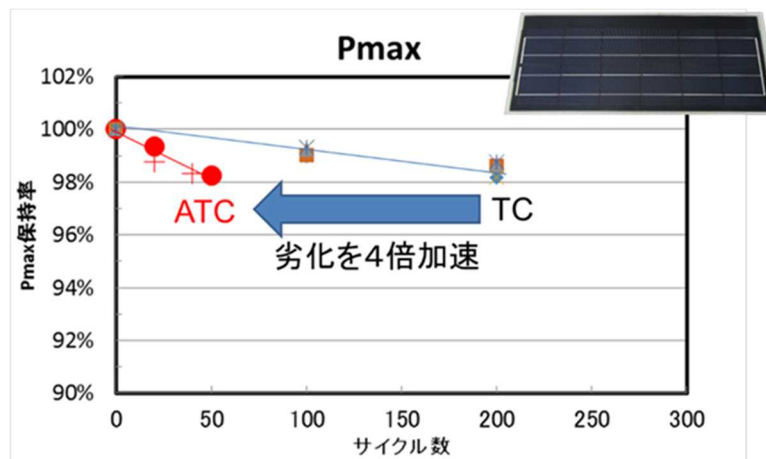


図 III-2-(ホ)-D-1 ATC 試験による温度サイクルの加速評価

まず、配線の断線に関する評価技術について示す。太陽電池モジュールのセル間接続線は、隣り合うセルの表裏を接続させる配線のことで、セルを直列接続している。図 III-2-(ホ)-D-2 にセル間接続配線の破断が発生した事例を示す。通常の TC (Thermal Cycle) 試験においても試験サイクル数が増えるとセル間接続線の断線といった不具合モードが発生することがある。今回、ATC 試験により、より少ない試験サイクル数でセル間接続線の破断を発生させることができていることが確認できた。

通常の太陽電池モジュールに用いられる封止構造であるフィルム封止型太陽電池モジュールの断面構造および、120°C に加熱した際に発生するガラスのひずみ量に関する熱応力シミュレーションの結果を図 III-2-(ホ)-D-3 に示す。通常、太陽電池セルをセル間接続線をつないだストリングが樹脂で封止されており受光面側にはガラス、裏面側にはバックシートが保護材として用いられる。構成としては、ガラス/樹脂/配線/セル/配線/樹脂

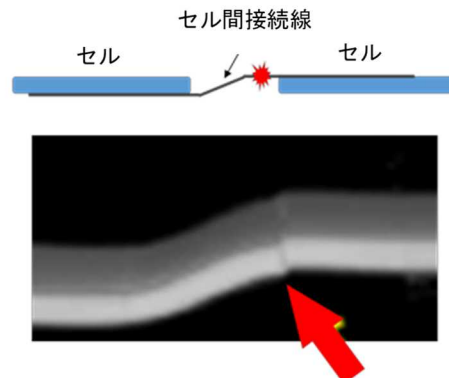
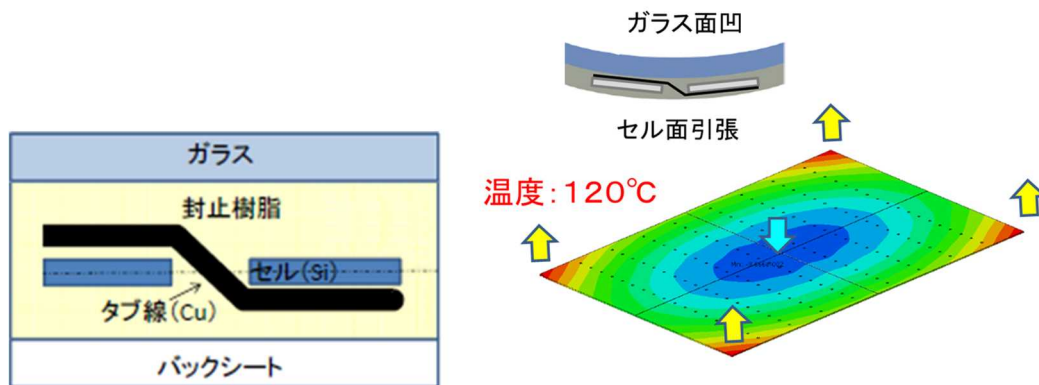


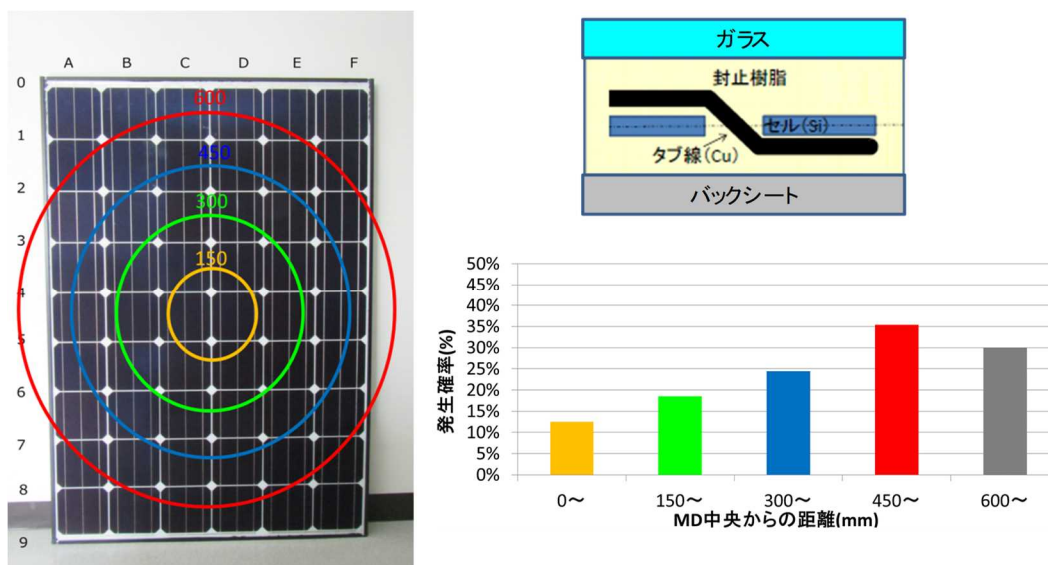
図 III-2-(ホ)-D-2 セル間接続線の断線

バックシートとなり、セルを軸に考えると非対称な構造となる。このような太陽電池モジュールを120℃に加熱すると、ガラス、封止樹脂、バックシートの熱膨張係数の違いにより太陽電池モジュールは凹に反り、セル面は引っ張り応力を受けることになる。一方、低温下では太陽電池モジュールは凸に反り、セル面は圧縮応力をうけることになる。ひずみは、セルやセル間接続線に応力を発生させ、セル間接続線の断線を引き起こす要因になると考えられる。



図III-2-(ホ)-D-3 フィルム封止モジュールの構造と熱応力シミュレーション結果

図III-2-(ホ)-D-4 に ATC 試験後のフィルム封止型太陽電池モジュールのセル間接続線の断線の発生分布と発生確率を示す。発生確率はモジュール中央部から離れるにしたがって増加する傾向があり、図III-2-(ホ)-D-3 に示す熱応力による太陽電池モジュールのひずみ分布と類似している。これは、セル間接続線の断線発生の要因として、熱応力起因のモジュールのひずみが関係していることを示唆している。断線の発生を抑制するために、モジュールのひずみを抑制する、具体的な設計要件としては、バックシートの代わりに裏面側にもガラスを用いる対称な構造が有効である。



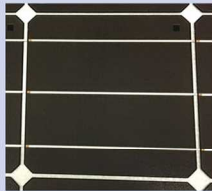


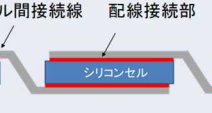


図III-2-(ホ)-D-4 セル間接続線の断線の発生分布と発生確率

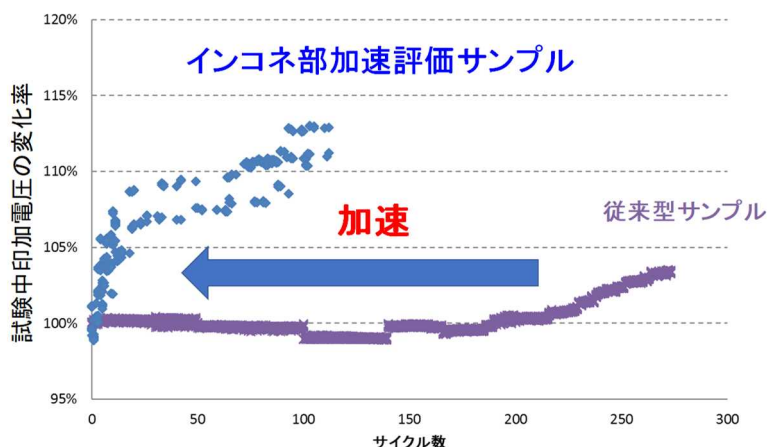
次に、接続部の高抵抗化に関する評価技術について示す。ZEB 適用型太陽電池モジュールに用いられる接続方式としては、表III-2-(ホ)-D-1 に示すものが挙げられる。太陽電池モジュールの直列抵抗要素としては、PN 接合の変性や印刷電極の剥がれといったセル起因、配線の亀裂や断線といった電気配線起因、配線間やセル配線間の接続部起因、に分けられる。従来型の太陽電池モジュールでは、表III-2-(ホ)-D-1 の接続方式 C に示すように、一つのセルに対して複数のセル間接続線を接続することで、接続部の一部が劣化し高抵抗化しても他の接続箇所でも電流が流れることでモジュールとしての直列抵抗増加を抑える設計となっている。モジュールの安全設計としては有効であるが、接続部の設計検証という観点では良否判定が困難となる。今回、接続部の直列抵抗増加を加速評価するためのインコネ部

加速評価サンプルとして、従来型の接続方式Cに比べて、一つのセルに対する配線の接続面積を小さくした接続方式Bでモジュール化したサンプルを用いて、接続部の設計検証する加速評価技術を開発することができた。

表Ⅲ-2-(ホ)-D-1 各種セル間接続（インコネ接続）方式

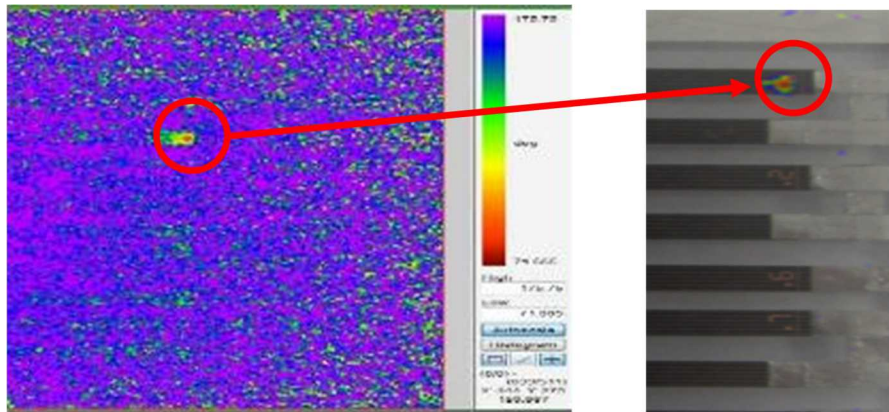
接続方式A	接続方式B	接続方式C (従来型)
		
		

図Ⅲ-2-(ホ)-D-5 にインコネ部加速評価サンプルと従来型（接続方式 C）サンプルの ATC 試験の結果を示す。インコネ部加速評価サンプルについては、試験中サンプルに印加する電圧値の上昇し始める試験サイクル数が従来型に比べて早いことが確認された。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-5 インコネ部加速評価サンプルの ATC 試験結果

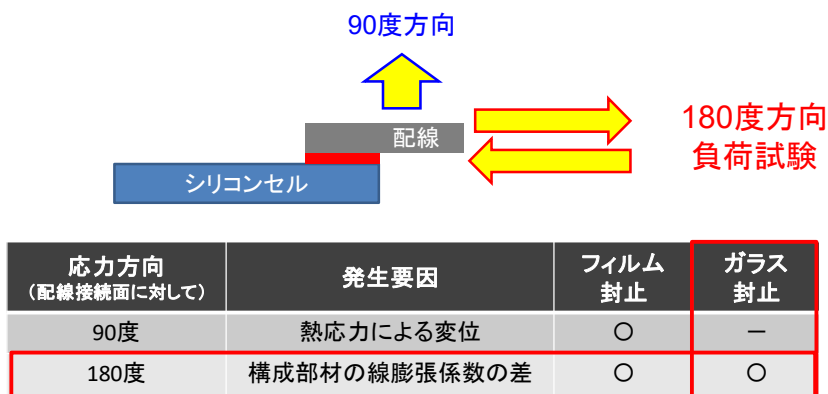
ATC 試験では、試験中サンプルに一定電流を流しており、サンプルに印加する電圧値の上昇は、太陽電池モジュールの直列抵抗の増加を示唆している。試験前後でサンプルのダーク I-V 測定を実施したところ太陽電池モジュールの直列抵抗が増加していることが確認できた。しかし、太陽電池モジュールのダーク I-V 結果からは、モジュールのどの箇所が劣化し、高抵抗化しているのか特定することはできない。インコネ部加速評価サンプルの高抵抗化が接続部に起因するのか、またそうであればどの接続箇所が劣化しているのか特定評価する方法を検討した。サンプルに一定電流を流すと、各部分の抵抗に応じて発熱すること（ジュールの法則）を利用した方法である。ATC 試験後のインコネ部加速評価サンプルに対して、微少な発熱分布を可視化した結果を図Ⅲ-2-(ホ)-D-6 に示す。図Ⅲ-2-(ホ)-D-6 の左図は相対的な発熱の差を色づけして示している。また評価サンプルの発熱画像と光学写真を重ね合わせると、発熱箇所が赤丸で囲った配線とセルの接続部付近であることが特定できた。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-6 微小発熱解析による高抵抗化箇所の特特定評価結果

太陽電池モジュールの加速試験（ATC 試験）は、評価サンプルの作製工数や試験設備の制約等を考慮すると、接続部の設計スクリーニングの評価技術としては、より迅速で簡易に評価できる方法が必要になる。そこで、セルと配線の接続条件を設計検証する評価技術として、セルと配線の接続ユニットに対して直接応力を負荷する試験を開発した。モジュール加速試験である ATC 試験に比べて、評価サンプルの作製工数、一サンプルあたりの評価時間も短縮でき、モジュール作製前の接続部設計を迅速かつ容易にスクリーニングすることが可能である。

通常、配線接続部の接着強度を評価するには、図Ⅲ-2-(ホ)-D-7 に示すように 90 度方向に引張試験するピール試験が一般的である。フィルム封止型の太陽電池モジュールでは、熱応力によるモジュールのひずみが発生することから、配線に対して 90 度方向の応力成分も考慮が必要であるが、裏面側にもガラスを用いたガラス封止構造を前提とすると、モジュールのひずみは抑制され、構成部材である封止材の熱膨張、熱収縮に起因する 180 度方向の応力発生が見込まれる。そのため、構成ユニット加速試験としては、180 度方向の応力を負荷させる試験として開発した。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-7 配線や接続部へ発生する応力方向

図Ⅲ-2-(ホ)-D-8 に配線とセルの接続条件の異なる 2 種類のサンプルの引張試験の結果を示す。室温下での引張試験では 2 種類のサンプルとも 85~100N 程度の接着強度を示しており、大きな差が無い結果であった。一方、高温下での引張試験では、接続条件の違いにより、顕著に接着強度が異なることが明らかとなった。

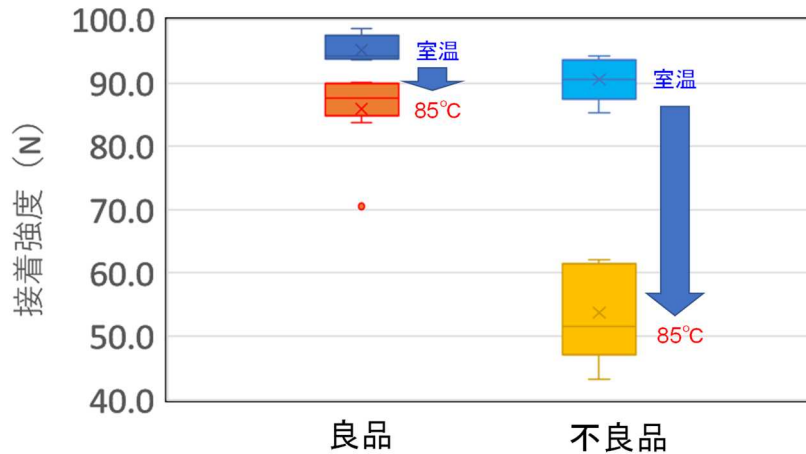


図 III-2-(ホ)-D-8 配線接続部の接着強度

構成ユニット加速試験でえられた接着強度差がモジュール状態での高抵抗化の発生しやすさと関係しているか検証した結果、構成ユニット加速試験で接着強度の低下がみられる接続条件では、ATC 試験においても接続部高抵抗化が早期確認された。ATC 試験中の高温保持状態でより高抵抗化する傾向があり、引張試験の結果と整合することから、構成ユニット加速試験により接続条件の良否を判定できることが分かった。配線や接続部の繰返し負荷試験により寿命評価することが可能であり、耐用年数 30 年以上を評価するための評価期間としては、30 日以内で可能である。

以上、電気配線および接続部の長期耐久性の評価方法として、モジュール加速試験として ATC 試験を開発した。また、設計検証するための評価方法として、構成ユニット加速試験、不具合特定評価方法を開発した。本開発で得られた成果により、図 III-2-(ホ)-D-9 に示すように、電気接続の耐用年数 30 年以上の長期耐久性を設計検証することが可能である。

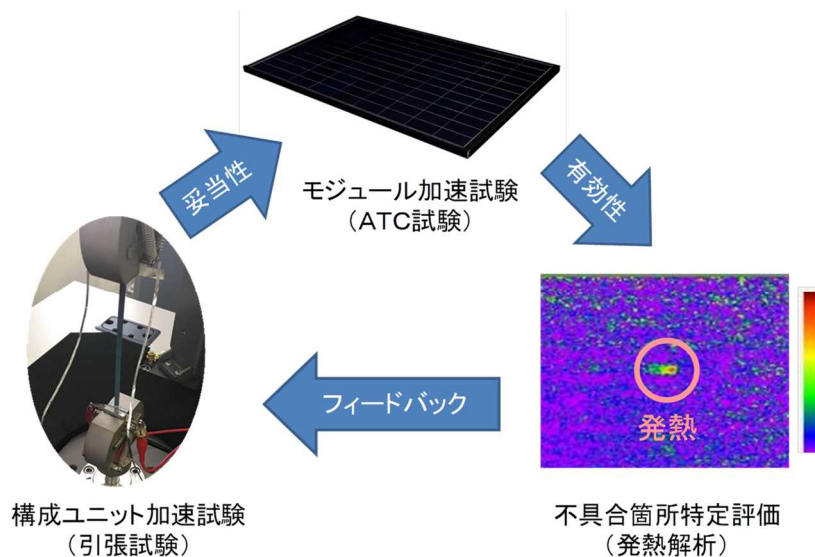
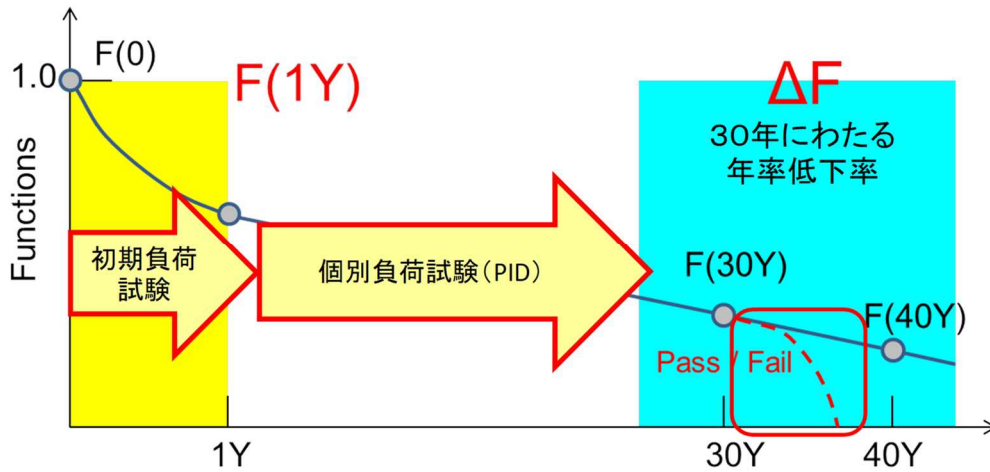


図 III-2-(ホ)-D-9 電気接続の長期耐久性確保のための設計検証

【② 建材寿命を考慮した長期発電性能推定技術の開発】

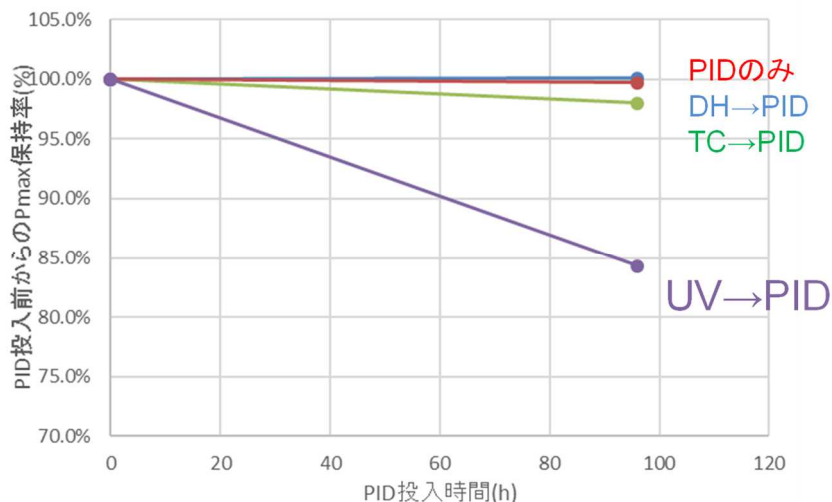
封止構造の長期耐久性を評価するうえで、封止構造の棄損につながる封止材の剥がれ（デラミネーション）に関しては、著しく外観を損なうことがあり、電気安全性の観点だけでなく、建築物の外観意匠性の維持という観点でも問題となる。運転期間 30 年後であっても発生させてはいけない不具合

モードであり、耐久性評価技術としてデラミネーション発生加速を狙った試験を開発した。デラミネーションの発生メカニズムとしては、セル表面において封止材中の水分がガラス起因の Na と反応してガス発生させるといったものが提唱されている。PID (Potential induced degradation) 試験は、出力低下の不具合だけでなくデラミネーションの発生加速としても有効な個別負荷試験となることが想定されるため、今回、PID 試験とのシーケンス試験を開発した。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-10 建材寿命を考慮した長期耐久性、長期発電性能評価技術の開発

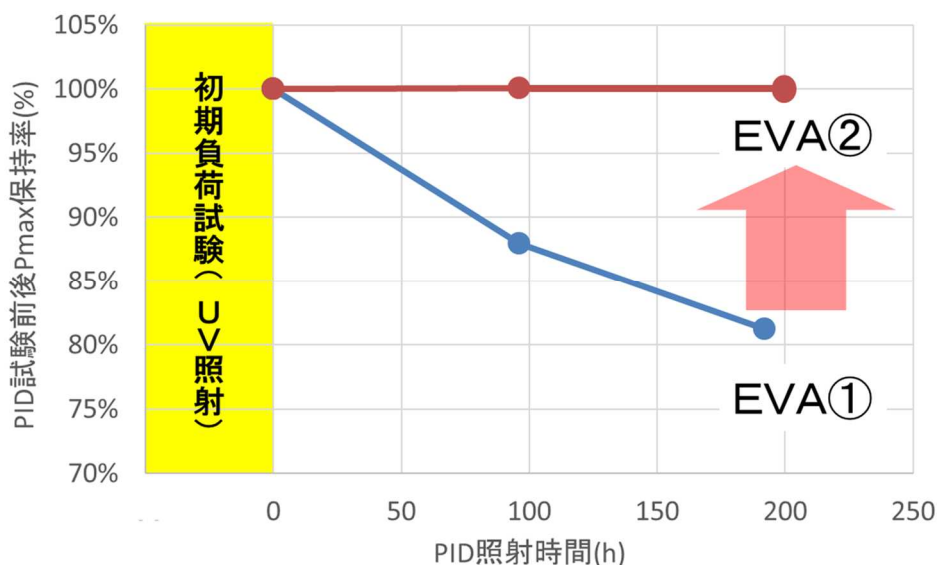
封止構造の長期耐久性評価技術開発および長期発電性能評価技術の開発として、PID 試験と組み合わせる初期負荷試験を検討した (図Ⅲ-2-(ホ)-D-11)。初期負荷試験としては、TC 試験、DH (Damp heat) 試験、紫外線 (UV) 照射試験を検討した。いずれの場合も封止材のデラミネーションは発生確認されず、事前に UV 照射した後 PID 試験を実施したシーケンス試験の場合のみ PID 出力低下が先行発生した。PID 試験後の EL 測定においてもセルの EL 発光の低下が確認されており、事前の UV 照射により太陽電池モジュールの PID 劣化が加速したと考えられる。太陽電池モジュールは、運転期間中太陽光を受け続けることから、紫外線は 30 年以上の運転期間にわたって継続して太陽電池モジュールが受け続ける負荷である。紫外線照射後の太陽電池モジュールにおいて、PID 劣化が促進される懸念があることは長期発電性能維持の観点で非常に重要である。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-11 初期負荷試験の検討

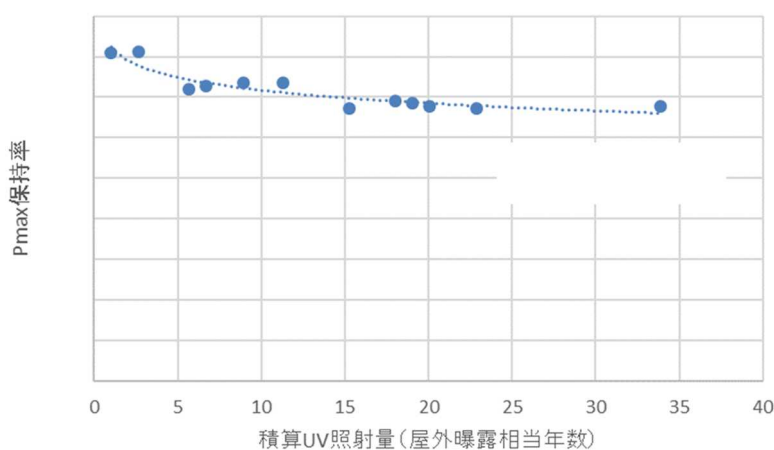
図Ⅲ-2-(ホ)-D-12 に封止材の異なる太陽電池モジュールに対するシーケンス試験 (UV 照射→PID 試験) の結果を示す。封止材を変えることで、UV 照射後の PID 試験耐性は著しく改善することができる。本結果は、適切に封止材を選ぶことで、長期にわたる発電性能を維持することができることを示している。実際に図中の EVA②の封止材を用いた太陽電池モジュールでは、屋外曝露 30 年相当の UV 照射試

験後もその後のPID試験での出力低下がないことが確認できた。UV照射→PID試験のシーケンス試験により、運転年数30年を想定した封止材の選定を行うことができるとともに、長期発電量推定におけるPID出力低下を見積ることが可能である。



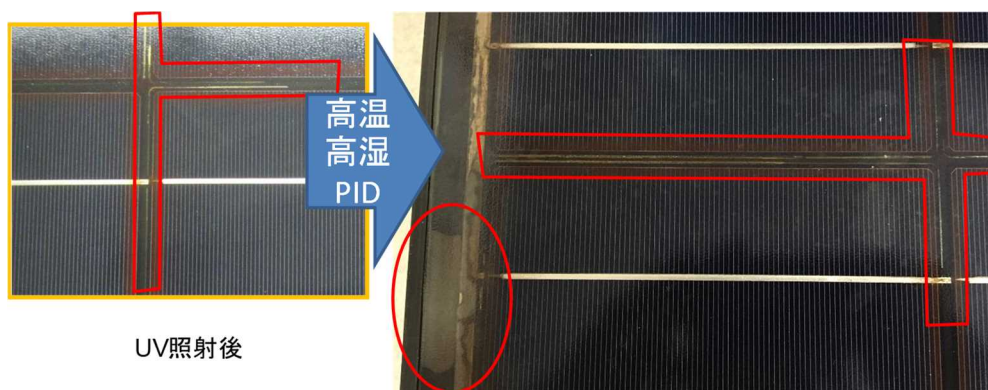
図III-2-(ホ)-D-12 封止材によるUV照射後のPID耐性の違い

長期発電量試算のための出力低下は、通常の太陽電池モジュールで考慮している年率低下分に加えて低下する影響を考慮する必要がある。PIDに起因する出力低下は、前述のとおり適正に封止材を選ぶことによって屋外曝露30年相当の紫外線照射を受けたのちも出力低下を抑制することが可能である。一方で、紫外線照射による出力低下は用いる封止材毎に試算する必要がある。図III-2-(ホ)-D-13に積算UV照射量に対する出力低下の挙動を示す。出力低下は積算UV照射量に対して対数関数で近似できることから、30年以上の出力低下を推定する際でも屋外曝露5年相当程度（評価期間としては、50日程度）まで評価することでその後の予測が可能である。通常考慮している年率低下率に加えて、シーケンス試験による出力低下挙動を考慮することで、長期の出力保証レベルも試算することが可能となった。



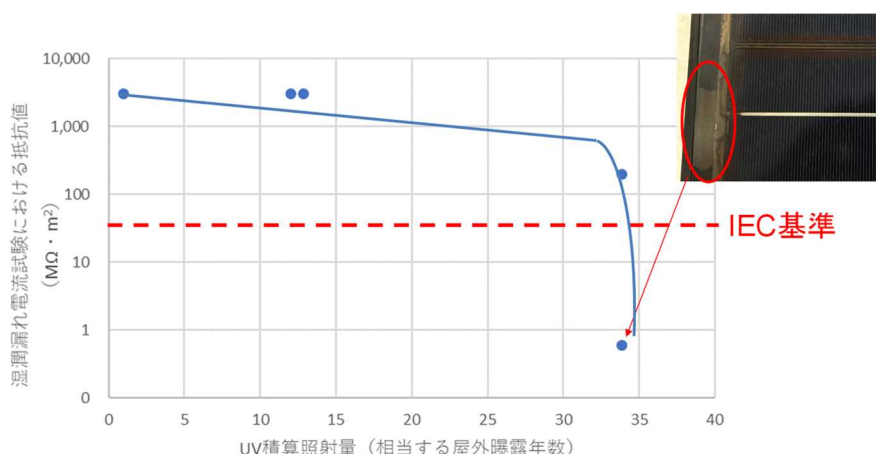
図III-2-(ホ)-D-13 封止材によるPID耐性の違い

前述のシーケンス試験の検討においては、デラミネーションといった封止材の剥がれは確認されなかった。デラミネーションの発生を加速評価するため、紫外線照射と組み合わせるPID試験の温湿度条件を上げた高温高湿PID試験を組み合わせ検討を行った。結果、図III-2-(ホ)-D-14に示すように高温高湿PID試験を組み合わせることでモジュール端部やセル間においてデラミネーションの発生、拡大が確認された。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-14 UV 照射→高温高湿 PID 試験によるデラミネーションの発生

モジュール端部の封止構造は電気絶縁性の点でも重要であり、デラミネーションは単に外観の問題だけではなく、実際に UV 照射→高温高湿 PID 試験でデラミネーションの拡大に伴い、電気絶縁性が IEC 基準を下回るサンプルも確認された（図Ⅲ-2-(ホ)-D-15）。デラミネーションに関しても、モジュール加工時の封止材の選定や製造条件の適切な設定管理により防ぐことが可能である。

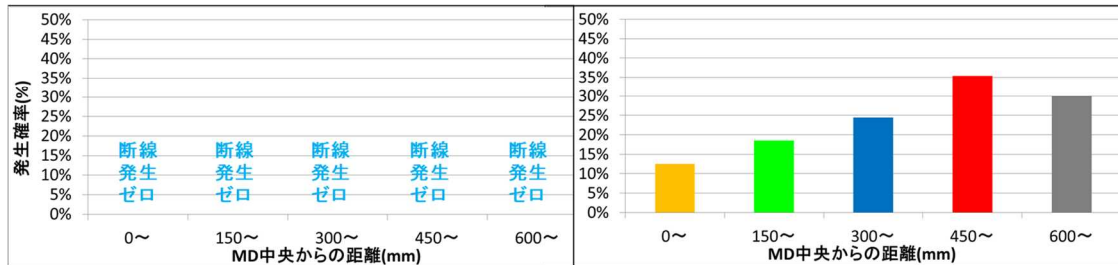
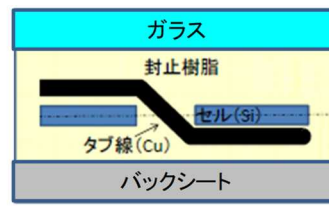
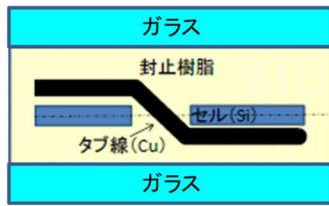


図Ⅲ-2-(ホ)-D-15 UV 照射→高温高湿 PID 試験による電気絶縁性低下

封止構造の長期耐久性および長期発電性能を評価するためのシーケンス試験（UV 照射→PID 試験）を開発した。紫外線照射による PID 劣化の加速および封止材の選定による劣化抑制できることを見出した。またデラミネーションの発生拡大や、それにとまなう電気絶縁性低下という電気安全性上リスクのある故障モードを評価することが可能であり、封止構造の耐用年数 30 年以上の長期耐久性を設計検証することが可能である。

【③低コスト高信頼性太陽電池モジュールの耐久性評価】

ZEB 適用型太陽電池モジュールは 30 年以上の運転年数が想定され、建材としての長期耐久性も要求される。「① ZEB 適用を想定した長期信頼性試験の開発」で示したように配線の断線といった電気安全上リスクのある劣化モードの発生抑制のためにも、モジュール構造としては、「ガラス封止構造」がベースとなる。図Ⅲ-2-(ホ)-D-16 にガラス封止構造の低コスト高信頼性モジュールの ATC 試験における断線の発生結果を示す。通常のフィルム封止構造のモジュールでは、配線の断線が確認されたのに対して、ガラス封止構造の低コスト高信頼性モジュールでは通常のモジュール（耐用年数 20 年）の 3 倍の試験サイクル数を経ても、断線の発生がゼロであった。ガラス封止構造により構成部材の配置が対象となり熱応力によるモジュールのひずみが解消されたことが断線抑制につながっていると考えられる。



低コスト高信頼性モジュール (ガラス封止構造)

通常モジュール (フィルム封止構造)

図Ⅲ-2-(ホ)-D-16 ガラス封止モジュールとの断線発生率比較

ガラス封止構造を前提とすることで、接続部に負荷する応力方向も限られることから、構成ユニット加速試験用いて、繰り返し応力印加による電気接続の寿命評価を行った。運転年数 30 年を想定し、およそ 1 万サイクル繰り返し引張試験を行い配線接続の設計要件を検証した。配線とセルの接続ユニットを作製する際に、配線成型加工を行った場合がある。配線成型加工の有無により、配線の破断サイクル数に変化し、配線成型加工有りのサンプルでは、低サイクル数で破断した。一方、配線成型加工無しのサンプルでは、破断まで 1 万サイクル以上の耐久性を有することを確認できた。ガラス封止構造は合わせガラス建材で広く使われているため、建築材料としても構造的な耐久性が確保しやすく、ZEB 適用型太陽電池モジュールとしての低コスト高信頼性を実現することが可能である。

さらに、構成ユニット加速試験の評価技術の開発を通じて、太陽光パネルとしての継続利用機能耐用年数(継続利用可能期間)を推定する評価技術を開発した。モジュール内に用いられている配線は、運転期間に応じた負荷応力を繰り返し受けることにより疲労蓄積していき、モジュール内に加わる応力により、最終的には配線は破断に至る。運転期間の中の太陽電池モジュールから配線を取り出して構成ユニット加速試験を行うと、その配線はそれまで屋外曝露期間に受けた負荷量に応じて破断までのサイクル数に変化する。このサイクル数を元に残り寿命を評価することが可能である。

ZEB 適用型太陽電池モジュールの発電コストを試算するにあたって、低コスト高信頼性モジュールとしてガラス封止構造を用いることから窓の代替可能な開口部設置を想定した採光型の太陽電池モジュールでかつ遮熱、断熱といった省エネ性能を付与させるために複層構造を対象として発電コスト試算をおこなった。発電コスト試算にあたっては、ZEB 適用型太陽電池モジュールは建材としての窓と置き換わることから、発電コストの試算の方式から「代替する建材にかかるコスト」を引くことで正味の太陽光発電の発電コストが算出できると考えて試算を行った結果、運転年数 40 年、複層ガラス並みの熱性能実現、ならびにサッシ、取り付け工事費は発電コストから引くことで 7 円/kWh を見込めた。

【④ 標準化活動への反映】

BIPV 国際標準化委員会にて、建築サイズの大面積モジュールを対象にリテストガイドラインに関する提案を行った。「代表サンプル試験」によって実試験体を代用できる試験体仕様と試験方法について提案を行った。また、ZEB 適用型太陽電池モジュールを垂直設置した場合の発電量推定について、推定モデルと実績データとの比較から発電量の入射角依存性や地表面の反射効果について課題抽出を行い、BIPV 国際標準化委員会にて報告した。BIPV に関する発電性能の評価方法に関する国際規格提案に向けて検討を進めた。

2. 実用化・事業化見通し

当社では、ZEB を実現するために必要となる屋上設置用太陽電池モジュールとしてヘテロ接合型太陽電池モジュールを、壁面ならびに開口部設置用太陽電池モジュールとしてシースルーならびに結晶系太陽電池モジュールを、30年以上の保証を実現できる製品として開発中である。

本事業「ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術」の開発によって得られた長期信頼性評価技術（新規加速評価試験法、寿命評価法）は、開口部設置用シースルー太陽電池モジュールの開発へ適用しており、建材と同等の寿命をもつZEB適用型高信頼性太陽電池製品を出来る限り速やかに上市していくことに寄与していくと考えている。

事業化の見通しとして、2020年度中には本事業で得られた評価技術を適用して開発した太陽電池モジュールが実建築案件に設置される。2021年度には新製品の量産化ならびに保証年数の拡張を判断し、他に先駆けてZEB市場をターゲットとした競争力のある製品の提供を実施していく計画である。

また、本事業の長期信頼性技術開発で得られた長期信頼性、寿命の試験法ならびに判定基準は、BIPV国際標準化委員会を通じて、国際規格（IEC、ISO）への反映にむけた活動を継続して実施していく。

3. 波及効果

本事業である長期信頼性技術開発で得られた長期信頼性、寿命の試験法を標準化していくことや現在開発している新製品適用することにより、ZEBという新規市場に流通することが危惧される低品質品の流入を抑制することが出来る。これにより新規市場が混乱することを未然に防ぐことができると考えられる。

4. 今後の展開

製品の設計要件、製品規格、品質管理基準に適用可能な長期信頼性評価技術を確立することで、ZEBにもとめられる多種多様な製品の開発に安心して取り組むことが可能となる。本事業で製品開発する上での基盤技術の確立した後は、顧客の多種多様な製品要求事項に応える開発を実施する。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	0	0	0	1	1
論文	0	1	0	0	0	1
研究発表・講演 (うち国際会議)	0	3(1)	1	4	1	9
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年8月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	株式会社カネカ	特願 2019-189694	国内	2019年10月16日		太陽電池モジュールの電気接続部の耐久性試験方法	門田直樹

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	中島昭彦	株式会社カネカ	社会実装としてのBIPVシステムの展望	日本太陽エネルギー学会誌 236号	なし	2016年11月18日

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	中島昭彦	株式会社カネカ	BIPV普及に向けてのカネカの挑戦	第48回秋季化学工学会	2016年9月8日
2	中島昭彦	株式会社カネカ	Challenges to Overcome before Spreading BIPV System	SAYURI-PV2016WS	2016年10月5日
3	中島昭彦	株式会社カネカ	BIPV experience of Kaneka	BIPVワークショップ	2016年12月1日
4	中島昭彦	株式会社カネカ	建築物一体型太陽光発電モジュールの国際標準化	第35回PVTEC技術交流会	2018年2月5日
5	門田直樹	株式会社カネカ	ZEB実現に向けた壁面設置型PVの発電量向上	学振第175委員会第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2018年7月12日
6	中島昭彦	株式会社カネカ	街と人との調和を目指すカネカの太陽光発電への取組み	PVEXPO2018 関西太陽電池展	2018年9月28日
7	門田直樹	株式会社カネカ	太陽電池モジュールの壁面適用の検討 (その2) ZEB実現に向けた壁面設置型PVの発電量向上	2018年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2018年11月9日
8	泥克信	株式会社カネカ	街と人との調和を目指すカネカの太陽光発電への取組み	PVEXPO2019 太陽電池展	2019年2月27日
9	中島昭彦	株式会社カネカ	建物一体型太陽光発電の普及に向けて	公開シンポジウム「再生可能エネルギー次段階の導入に向けて」	2019年3月8日

【新聞・雑誌等への掲載】

特になし

【その他】

特になし

E レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発 (日清紡メカトロニクス株式会社、奈良先端科学技術大学院大学)

1. 成果詳細

(1) 発電劣化メカニズムの解明

結晶系太陽電池モジュールの発電劣化年率は、およそ 0.4~0.8%で、直線的に変化することが実測により示されている。事業性は、この年間平均発電劣化率 (Rd) を用いて、20 年間の生涯発電量を見積り、検討されている。一方、その発電劣化率は、設置環境に影響を受けるので、現場の太陽電池プラントでの寿命予測技術の確立が強く望まれている。

太陽電池モジュールは、「発電素子」を繋ぎ合わせた発電部分とそれらを環境劣化因子から保護する「ケーシング：EVA 封止材」部分からなる。太陽電池モジュールの寿命予測を行うため、「発電素子：セルとセル上銀フィンガー電極・インターコネクタ」部と「ケーシング」部を別々に解析可能な分析技術の検討を行った。

経年劣化モジュール (PID 含む) の発電劣化原因を破壊分析および EL 画像観察などにより検討した結果、EL 画像の明暗に大きく影響を与える変化として、①セル上の銀フィンガー部の細線薄肉化と②インターコネクタのはんだ接合部の剥離が観察された。破壊分析 (SIMS) の結果、P 型セルの銀フィンガー電極とインターコネクタを起点とし、セル表面への「ナトリウムの堆積」を観測した。また、EVA 封止材の劣化による「酢酸」発生が認められた。

モジュール内部の EVA 封止材の劣化 (脱酢酸) は、ラマン分光による EVA ラマンスペクトルの蛍光の強さ：蛍光強度比 ($I_{1800\text{cm}^{-1}}/I_{2850\text{cm}^{-1}}$) で解析した。

国内外の経年劣化モジュール (約 300 枚) の発電劣化率に及ぼす蛍光度比の関係を図 III-2-(ホ)-E-1 に示す。ファーストキュア EVA では、130%を超えるとモジュールの発電劣化率と相関することが分かった。スタンダードキュア EVA では、110%を超えると太陽電池モジュールに発電劣化現象が開始する。これは、Na イオンがガラスから活性化し、セルの電極に引き寄せられ、銀フィンガー電極の腐食による細線薄肉化が発電劣化現象に繋がることに相関していると考えられる。

メガソーラーなどでは、蛍光強度比：130%を基準として、稼働何年でその値に達するかで発電プラントの寿命予測の基準値とすることができる。

最近の封止材は、更に加工タクトが速いウルトラファーストキュア EVA が使用されている。

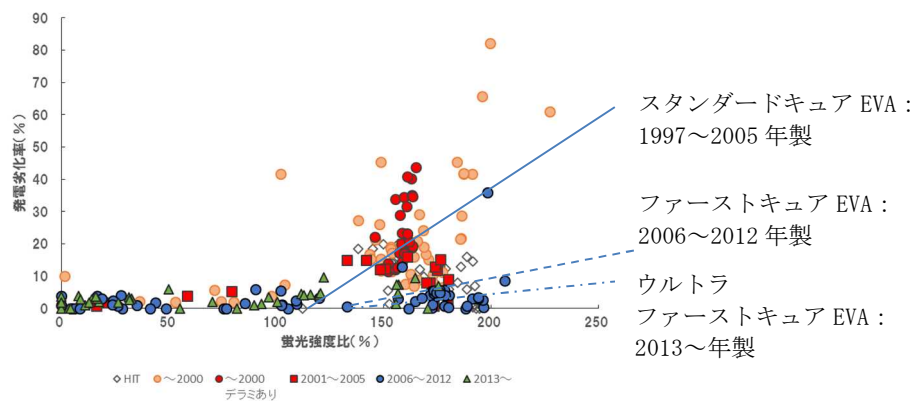
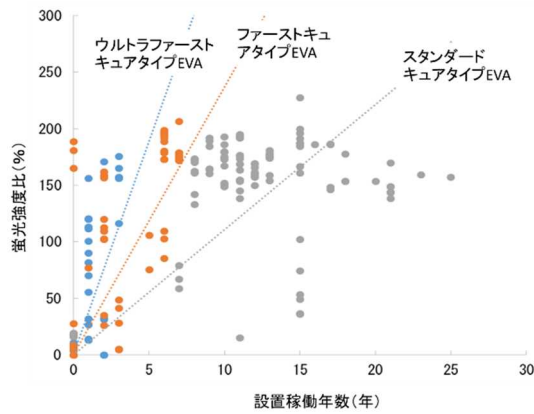


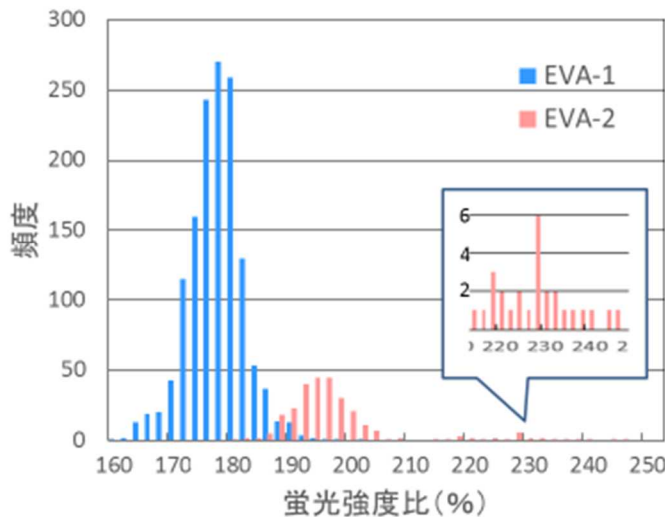
図 III-2-(ホ)-E-1



図III-2-(ホ)-E-2

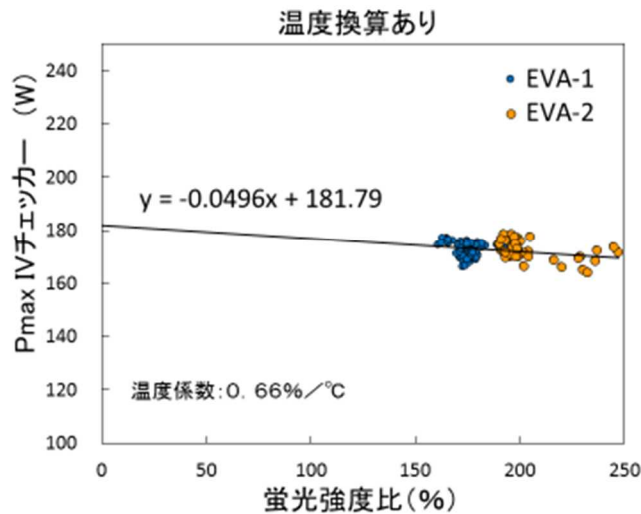
太陽電池モジュール適用の EVA タイプ別の蛍光強度比を図III-2-(ホ)-E-2 に示す。産総研所蔵の約 100 パネルと外部企業からの試料提供 130 パネル、および日清紡所蔵の約 30 パネルの発電劣化率とラマン分光解析を行った。産総研所蔵パネルと外部企業提供パネルの発電劣化率は、パネルの銘板値から求めたものである。製造年と製造場所からモジュール適用の EVA の種類を特定して、タイプ別の劣化度合いを比較した。その結果、ラミネート加工タクトを高速化する目的で開発された EVA 銘柄は、劣化し易いことが分かった。よって、図III-2-(ホ)-E-1 は、EVA 封止材の劣化状態が及ぼす太陽電池モジュールの発電劣化率との関係において、EVA タイプ別の関係が得られた。

発電劣化率の算出は、太陽電池パネルの取り外しが必要であるため計測費用が高い。I-V チェッカー及びモバイルラマン分光器を用いて、300 kW 多結晶系太陽電池プラント (184W、1680 枚、7.5 年間稼働) 各パネルの最大発電量 P_{max} 及び蛍光強度比を測定した。本プラントで使用されている EVA 封止材は、ファーストキュアタイプ品 2 品種であり、EVA-1 品 1400 枚、EVA-2 品 280 枚である。なお、EVA-2 品は、封止材の黄変が生じている。蛍光強度比の分布をヒストグラムで図III-2-(ホ)-E-3 に示す。



図III-2-(ホ)-E-3

I-V チェッカーで測定した P_{max} 値を多結晶シリコンの温度係数 ($0.66\%/^{\circ}\text{C}$) で補正し、 25°C の P_{max} に換算し、横軸：蛍光強度比、縦軸 P_{max} でプロットした。その結果を図III-2-(ホ)-E-4 に示す。



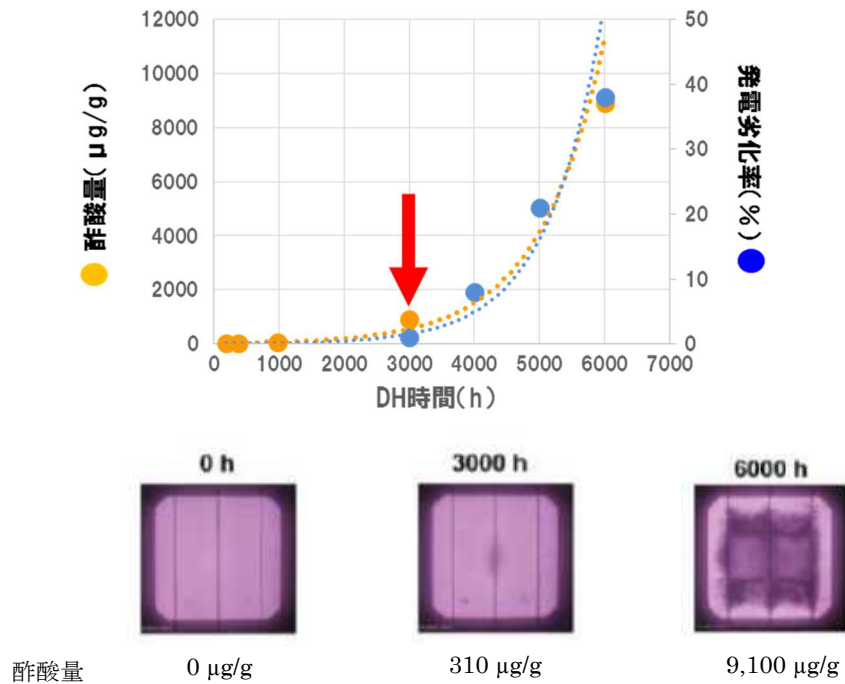
図Ⅲ-2-(ホ)-E-4

パネル表面温度で換算した P_{max} 値と蛍光強度比は直線関係となった。この直線近似式をオンサイトで「寿命予測直線」と定義する。蛍光強度比 0%、つまり EVA が無劣化状態（切片）は 182W であった。1680 枚のシミュレーターによる平均の P_{max} 値は 184W であり、概ね一致した。x に蛍光強度比の値を代入することで、現状のパネル P_{max} を算出することが出来る。オンサイトで得られた寿命予測直線 $y = ax + b$ において、x に 25 年後、30 年後の封止材の蛍光強度比を代入することによって、その年月経過後の P_{max} が得られる。本サイトでは、24.1/年の速度で蛍光強度比が増加している。よって 25 年後は $24.1 \times 25 = 602.5\%$ 、30 年後は $24.1 \times 30 = 723.0\%$ となる。25 年後の P_{max} は 151.9W、30 年後は 145.9W となる。発電劣化率は各々 $\{1 - 151.9/182 (\text{切片})\} \times 100 = 16.5\%$ 、 $\{1 - 145.9/182\} \times 100 = 19.8\%$ と算出できる。

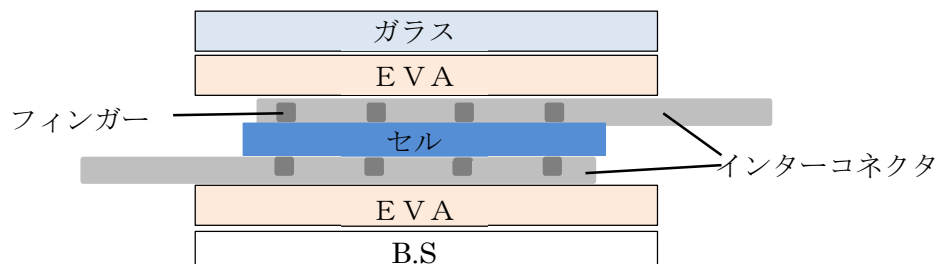
産総研九州センターより提供された、1000時間毎で6000時間迄のダンプヒート試験（85°C、85RH%）後の1セルモジュールの発電劣化率と酢酸量及びEL画像を図Ⅲ-2-(ホ)-E-5に示す。発電劣化率は、発生した酢酸量の増加率とほぼ一致した。本結果は、ラボダンプヒート試験における発電劣化メカニズムは、酢酸量と強く相関していることを示している。

インターコネクタ（図Ⅲ-2-(ホ)-E-6）のはんだは、酢酸等の酸によって容易に溶けるものである。ラボにて、シリコンセルのインターコネクタの一部を塩酸で溶かして EL 画像を撮ると、ダンプヒート試験後の結果を再現した。また、外れたインターコネクタを再配線すると EL 画像が全面明部となった。また、6000 時間ダンプヒート品の銀フィンガー電極の断面写真は、3000 時間後の電極形状と同形状であった。つまり、実フィールドでの発電劣化メカニズムと異なることが分かった。

以上の結果、ダンプヒート試験における発電劣化メカニズムは、「インターコネクタの剥がれ」によるものであることが分かった。実フィールドにおいても、酢酸が大量に発生しているモジュールにおいては、インターコネクタ外れによる発電劣化が観察されている。なお、25年稼働の太陽電池モジュールから採取した平均の酢酸量は $1900 \mu\text{g/g}$ であったので、通常の設定環境で $3000 \mu\text{g/g}$ （赤↓）を超えるのは、40年以上と推定される。



図Ⅲ-2-(ホ)-E-5



図Ⅲ-2-(ホ)-E-6

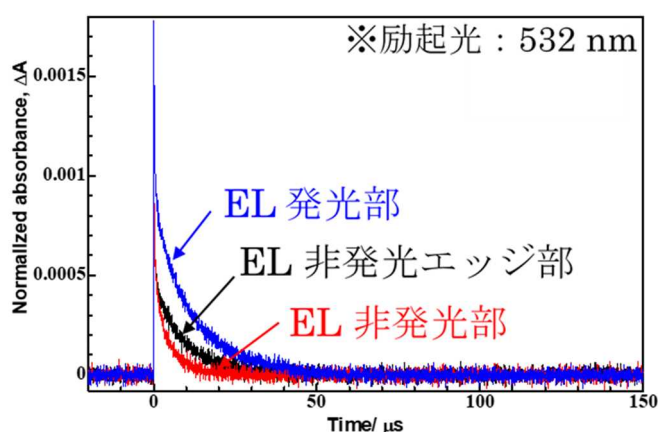
経年劣化モジュール、PID試験モジュール、実フィールド/PID劣化、PID試験モジュールの破壊分析結果を基にそれぞれの発電劣化モードを表Ⅲ-2-(ホ)-E-1に示す。実フィールドでの発電劣化は、発電により、電圧が加わっているため、銀フィンガー電極の細線薄肉化が進行し、酢酸が $1000 \mu\text{g/g}$ を超える場合は、インターコネクタ外れによる大幅な発電劣化が起っている。経年劣化とPID劣化は、ダンプヒート試験条件に電圧を加えるPID試験法により再現される。一方、インターコネクタ外れによる発電劣化不具合は、長時間ダンプヒート試験で評価することができる。しかし、6000時間の試験時間は、現実的ではない。実フィールド環境下の寿命予測試験は、ガラスを含むケーシングに高電圧を加える、所謂PID試験条件こそが実フィールドでの寿命を予測する試験法であると言える。

表Ⅲ-2-(ホ)-E-1

	ラボ試験 ダンプヒート試験	実フィールド	ラボ試験 PID 試験
<条件>	<ul style="list-style-type: none"> 電圧 温度・湿度 時間 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光(紫外線) 電圧 温度・湿度 ~30年 	<ul style="list-style-type: none"> 電圧(-1000V) 温度・湿度 時間
<分析結果>	<ul style="list-style-type: none"> Na 堆積なし フィンガー変化なし デラミなし 酢酸~900 μ g/g 	<ul style="list-style-type: none"> フィンガー電極周辺に Na 堆積 フィンガーの細線薄肉化 デラミ、黄変 酢酸大~3000 μ g/g 	<ul style="list-style-type: none"> フィンガー電極周辺に Na 堆積 フィンガーの細線薄肉化 デラミ、黄変 酢酸小~10 μ g/g
<劣化原因>	インターコネクタのハンダ外れによる発電劣化	<ul style="list-style-type: none"> 酢酸によるインターコネクタ外れ Na イオンによるフィンガー細線薄肉化 	Na イオンのセル上堆積による電気特性変化

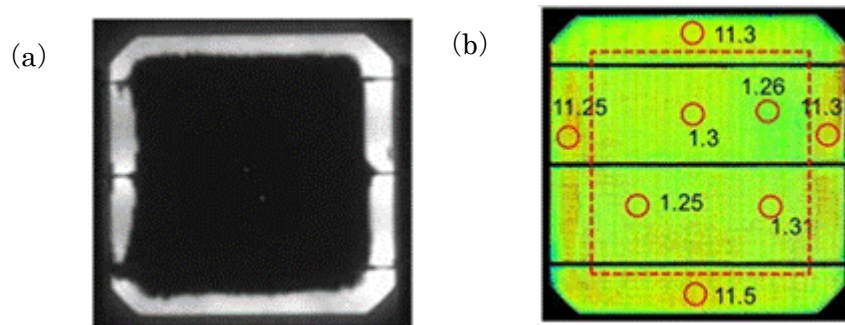
【標準化を目指した寿命予測試験法の検討と劣化メカニズムのモデル化】

PID 現象による劣化メカニズム解明に向けて、過渡吸収分光 (TAS) 法による太陽電池内のキャリア挙動を調査した。PID 現象が発生した部分は、エレクトロルミネッセンス (EL) 法で評価すると非発光化するが、その部分と EL 発光部を TAS 法で評価したところ、キャリア挙動が明らかに変化した。EL 非発光部では、再結合によるキャリア寿命低下が発生していた。



図Ⅲ-2-(ホ)-E-7
TAS法により測定したキャリア減衰曲線

TAS 法は、測定時間が長く、大きな試料の測定ができない。そこで、簡便かつ大面積の試料でもキャリア寿命値が測定可能なマイクロ波光導電率減衰 (μ -PCD) 法を用いて、太陽電池の実効的キャリア寿命値を測定し、PID 現象による特性劣化との相関関係を検証した。P 型 Si 太陽電池に部分的に PID 現象による劣化部分を形成し EL 非発光部化させた。その部分を μ -PCD 法で計測すると、非発光部だけ実効的キャリア寿命値が著しく低下することが判明した。その他、破壊分析結果を含めて劣化メカニズムの構築を試みた。PID 条件になると、カバーガラスに含まれる Na がセル表面に蓄積し (評価した試料では 10^{20} cm^{-3} レベルにまで到達)、太陽電池内で再結合を増加させ、P 型 Si 太陽電池では FF を、N 型 Si 太陽電池では短絡電流を顕著に低下させるメカニズムを構築するに至った。なお、本 μ -PCD 法を用いた PID 現象による特性劣化検出技術は、従来 P 型 Si 太陽電池モジュールだけでなく、今後、導入シェアが増えると思われる次世代太陽電池である N 型 Si、PERC 型への適用も期待できる。さらに、PID 現象による特性劣化場所をピンポイントで検知できるため、高信頼性モジュール開発における検査手法としても有効である。

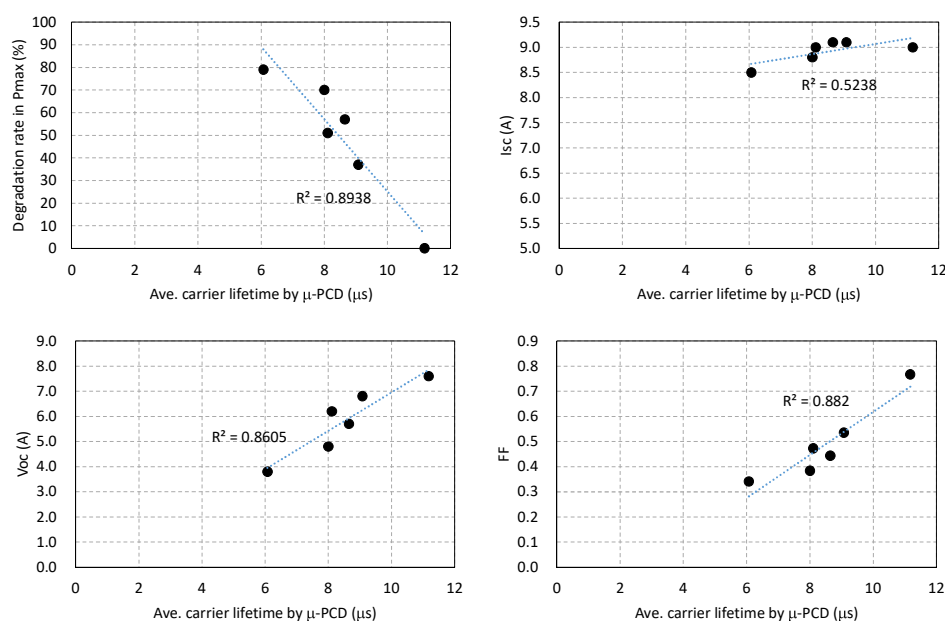


図III-2-(ホ)-E-8

(a)PID 試験を 1500 時間行った P 型単結晶 Si 太陽電池の EL 画像 (b) PID 試験を 1500 時間行った P 型単結晶 Si 太陽電池の光起電流マッピング及び μ -PCD 法により測定した実効的キャリア寿命値 (Time range:80 μ s)

【寿命予測技術の標準化に向けた規格提案】

本測定技術を利用して、それぞれ劣化度が異なる太陽電池モジュールに対して、セル特性の劣化率と実効的キャリア寿命値（モジュール内の平均値を算出）を評価した。特に特性劣化が顕著な FF と実効的キャリア寿命値の低下が良い相関を有していた。フィンガー電極やバスバー断線部分では、 μ -PCD 法による実効的キャリア寿命値は低下しないことから、太陽電池のセル特性劣化モードとして、PID 現象による劣化を効果的に検知する手法として期待できる。なお、本手法が適用できるセル構造・モジュール構造も明らかし、評価条件、手順も示すことができた。屋外でも実施できることを確認したことから、今後、太陽電池モジュールのその場検査への展開が期待できる。



図III-2-(ホ)-E-9

PID 加速試験したミニモジュールの出力特性と実効的キャリア寿命値（平均値）の関係

その他、本研究開発目標ではないが、EL 法を用いた PID 現象による特性劣化のみの検出可能性も検討した。本検討により、PID 現象により特性劣化が発生したセルにおいて、EL 評価時にセル注入する注入電流と EL 発光強度の線形関係が変化することを見出した。線形性を決定係数で表すことで、PID 現象による特性劣化を EL 法によっても評価可能にし、特許として出願した。

2. 実用化・事業化見通し

2017年4月1日、太陽光発電所の保守点検や維持管理が発電事業者に義務づけられたことにより、O&M市場の拡大機運が急激に高まっている。O&Mの標準メニューは、①24時間の監視、②現地駆けつけ、③定期点検、④報告書作成、⑤現場管理であり、売電収入の5%程度の価格設定となっている。その市場は、自社グループやEPCに紐づいた形での案件となっている。

現状のO&Mビジネスは、差別化が難しく、価格勝負という様相になりつつある。この原因は、現O&M技術では、発電プラントの寿命予測ができていないからである。顧客は、安価で、かつ、事業計画通りの発電が20年間継続し、さらにFIT終了後も発電所として活用できることを期待している。

本NEDO委託事業で開発した「レーザーを用いた太陽電池モジュールの寿命予測技術」は、太陽電池モジュールのケース側（EVA封止材）の劣化状態をラマン分光測定器で解析することにより、その設置環境下での太陽電池モジュールの発電劣化率を見積もることができる。さらに、 μ -PCD測定により、セルの品質の詳細評価ができる。これらの評価結果により、パネルの交換を促したり、あるいは、設置した場所の架台周辺の湿気対策を指導するなど、発電劣化メカニズムに基づいたコンサルティングビジネスが可能となる。又、中古パネル販売においては、現在の発電性能の表示に加え、今後の発電劣化率を見積もることで中古市場マーケット用検査装置としての活用が期待できる。

3. 波及効果

太陽電池モジュールの寿命予測が可能となることで、O&Mビジネスでの信頼性向上及び本格的な中古パネル市場の形成が期待できる。

4. 今後の展開

太陽電池モジュールの発電劣化率とラマン分光測定器の蛍光強度比との相関を調査し、現地発電所での発電性能予測が可能になった。現在、ラマン分光測定器を使用した蛍光強度比測定による受託ビジネスを進めている。これで培った技術を応用し、中古パネルビジネス及び寿命予測検査装置及び評価解析システムに関する事業化の取組み（①～④）を進める。

- ① O&Mビジネス用として、O&M業者への販売を計画
- ② 中古パネル市場向け寿命予測検査装置として、中古パネル取扱業者への販売を計画
- ③ 中古パネルの仕分け用検査装置として、中古パネル取扱業者への販売を計画
- ④ 廃棄物件パネルの仕分け用検査装置として、リサイクル業者への販売を計画

一方、 μ -PCD法によるセル特性劣化診断を屋外その場診断化するためには、屋外での実証実験をさらに進めていく必要がある。電氣的に接続されている隣接セルへの光遮蔽を行うことで、測定精度が改善してきている。また、 μ -PCD法による評価では、PID現象によって劣化したセル部をピンポイントで検知できるが、劣化度としての評価が適当であることから、初期特性との比較をしなければいけない。すなわち、初期状態の実効的キャリア寿命値が本手法により測定されているモジュールに対して屋外暴露を行い、PID現象の劣化との整合性を詳細に検証していくことが今後求められる。更に、本研究開発においては、実験室環境での利用が想定されている μ -PCD測定装置を利用したが、屋外環境化での測定により適した測定システムの開発が今後必要となる。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0 (0)	1 (0)	2 (0)	1 (0)	0 (0)	4 (0)
論文	0	0	0	2	2	4
研究発表・講演 (うち国際会議)	5 (0)	16 (6)	5 (4)	2 (0)	0 (0)	28 (10)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	1	1
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年8月31日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	奈良先端科学技術大学院大学	特願 2017-066163	国内	2017年3月29日	出願済	太陽光発電モジュール評価法、評価装置および評価プログラム	石河泰明、 Mohammad Aminul Islam
2	日清紡メカトロニクス株式会社、奈良先端科学技術大学院大学	特願 2018-027611	国内	2018年2月20日	出願済	太陽電池モジュールの寿命予測方法	仲濱秀斉、 飯田浩貴、 高木靖史、 石河泰明
3	日清紡メカトロニクス株式会社	特願 2018-27607	国内	2018年2月20日	出願済	太陽電池モジュールの寿命予測方法	仲濱秀斉、 飯田浩貴、 高木靖史
4	日清紡メカトロニクス株式会社	特願 2018-188705	国内	2018年10月3日	出願済	モバイルラマン分析装置	飯田浩貴

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Mohammad Aminul Islam, Hiroyuki Matsuzaki, Hidenari Nakahama, and Yasuaki Ishikawa	奈良先端科学技術大学院大学、日清紡メカトロニクス(株)	Carrier dynamics in the potential-induced degradation in single-crystalline silicon photovoltaic modules	Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) 08RG14(1-8)	有	2018年7月
2	Nguyen Chung Dong, Mohammad Aminul Islam, Yasuaki Ishikawa, and Yuki Haru	奈良先端科学技術大学院大学	The influence of sodium ion decorated micro-cracks on the evolution of potential induced degradation in p-type crystalline silicon solar cells	Sol. Ener. 174 (2018) pp1-6.	有	2018年9月

	Uraoka					
3	Mohammad Aminul Islam, Hiroyuki Matsuzaki, Yusuke Okabayashi, Yasuaki Ishikawa	奈良先端科学技術大学院大学、産業技術総合研究所	Transient carrier recombination dynamics in potential-induced degradation p-type single-crystalline Si photovoltaic modules	Prog. Photovolt. 27 (2019) pp.682-692.	有	2019年4月
4	Mohammad Aminul Islam, Dong Chung Nguyen and Yasuaki Ishikawa	奈良先端科学技術大学院大学	Effective minority carrier lifetime as an indicator for potential-induced degradation in p-type single-crystalline silicon photovoltaic modules	Jpn. J. Appl. Phys. 58 (2019) 106507(1-10)	有	2019年8月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	化学強化ガラス適用太陽電池モジュールのPID試験結果と発電劣化メカニズム	2015年度第1回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2015年10月20日
2	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	太陽電池パネルの寿命予測技術開発の進捗状況報告	日本学術振興会次世代の太陽電池システム第175委員会 第4回次世代シリコン太陽電池分科会研究会プログラム	2016年2月22日
3	仲濱秀斉 飯田浩貴	日清紡メカトロニクス(株)	HITモジュールの劣化分析結果報告	2015年度第2回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2016年3月14日
4	石河泰明	奈良先端科学技術大学院大学	結晶Si太陽電池モジュールの非破壊評価技術開発	2015年度第2回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2016年3月14日
5	野口一輝, M. A. Islam, 石河泰明, 仲濱秀斉, 浦岡行治	奈良先端科学技術大学院大学、 日清紡メカトロニクス(株)	多結晶Si太陽電池モジュールのKイオンによるPID劣化メカニズム解明に向けた光過渡吸収法の検討	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016年3月19日
6	Mohammad Animul Islam, Kazuki Noguchi, Narihida Nakahama, and Yasuaki Ishikawa	奈良先端科学技術大学院大学、 日清紡メカトロニクス(株)	Localized Defect Study of Laboratory PID Tested Module	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference	2016年6月5日
7	Mohammad Animul Islam, Kazuki	奈良先端科学技術大学院大学、 日清紡メカ	Investigation of the EVA Degradation Mechanism and Prediction of Reliability by the Raman Spectroscopy	European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2016年6月20日

	Noguchi, Narihide Nakahama, and Yasuaki Ishikawa	トロニクス (株)			
8	石河泰明	奈良先端科学技術大学院大学	結晶 Si 太陽電池モジュールの非破壊評価技術開発Ⅱ	2016年度第1回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2016年7月21日
9	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	太陽電池モジュールの寿命予測技術確立検討／モバイルラマン分光計測結果	2016年度第1回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2016年7月21日
10	飯田浩貴	日清紡メカトロニクス(株)	HIT モジュールの破壊分析結果Ⅱ	2016年度第1回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2016年7月21日
11	Mohammad Aminul Islam, Kazuki Noguchi, Hidenari Nakahama, and Yasuaki Ishikawa	奈良先端科学技術大学院大学、 日清紡メカトロニクス(株)	Detail Study on Failure Mechanism of Si-Photovoltaic: Encapsulant to Solar Cells	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月14日
12	Yasuaki Ishikawa, Mohammad Aminul Islam, Kazuki Noguchi, Hirotaka Iida, Yasushi Takagi, and Hidenari Nakahama	奈良先端科学技術大学院大学、 日清紡メカトロニクス(株)	A characterization by using laser-based technique for failure Si PV modules	International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016年10月5日
13	Kazuki Noguchi, Mohammad Aminul Islam, Takuya Oshima, Yasuaki Ishikawa, Hidenari Nakahama, and Yukiharu Uraoka	奈良先端科学技術大学院大学、 日清紡メカトロニクス(株)	Study of carrier lifetime measurement methods for PID tested module	International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016年10月5日

14	Mohammad Aminul Islam, Kazuki Noguchi, Takuya Oshima, Hirotaka Iida, Yasushi Takagi, Yasuaki Ishikawa, and Hidenari Nakahama	奈良先端科学技術大学院大学、日清紡メカトロニクス(株)	Study of potential induced degradation and recovery of c-Si module	International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016年10月5日
15	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発	2016年度成果報告会	2016年11月1日
16	石河泰明、Mohammad Aminul Islam、野口一輝、飯田浩貴、高木靖史、仲濱秀斉	奈良先端科学技術大学院大学、日清紡メカトロニクス(株)	レーザーを利用したSi太陽電池モジュールの劣化特性評価	学振第175委員会 モジュール・システム分科会 第5回研究会	2016年12月12日
17	古部昭広、佐伯雅也、池野裕哉、石河泰明	徳島大学、奈良先端科学技術大学院大学	フェムト秒過渡吸収分光によるシリコン太陽電池の劣化診断の検討	レーザー学会学術講演会 第37回年次大会	2017年1月7日
18	Mohammad Aminul Islam, Yasuaki Ishikawa, Sadao Sakamoto, Hidenari Nakahama, and Atsushi Masuda	奈良先端科学技術大学院大学、日清紡メカトロニクス(株)、産業技術総合研究所	Unexplained Causes of the Most Frequent Degradation Mode of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules	NREL Annual Photovoltaic Reliability Workshop	2017年2月28日
19	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	EVA封止材の分子構造から見た太陽電池発電劣化メカニズム	2016年度第2回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2017年3月21日
20	飯田浩貴	日清紡メカトロニクス(株)	発電劣化メカニズムを踏まえた、PID試験法の検討	2016年度第2回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2017年3月21日
21	石河泰明	奈良先端科学技術大学院大学	結晶Si太陽電池モジュールの非破壊評価技術開発Ⅲ	2016年度第2回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2017年3月21日

22	仲濱秀斉	日清紡メカ トロンクス (株)	レーザー技術を用いた太陽電池 モジュールの寿命予測検査技術 の開発	2017年度成果報告会	2017年9月 22日
23	Mohammad Aminul Islam, Hidenari Nakahama, Yasuaki Ishikawa	奈良先端科 学技術大学 院大学、 日清紡メカ トロンクス (株)	Study on Potential-induced degradation and recovery of n-type single crystalline Si photovoltaic modules	European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2017年9月 25日
24	Yasuaki Ishikawa, Hirotaka Iida, and Hidenari Nakahama	奈良先端科 学技術大学 院大学、 日清紡メカ トロンクス (株)	The long-term life expectancy of 30 years of silicon PV module analyzed by laser technique	International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2017年11月 11日
25	Yasuaki Ishikawa, Mohammad Aminul Islam, Yasushi Takagi, Hirotaka Iida, and Hidenari Nakahama	奈良先端科 学技術大学 院大学、 日清紡メカ トロンクス (株)	Lifetime estimation of silicon photovoltaic module using laser-based diagnosis technology	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017年11月 16日
26	Mohammad Aminul Islam, Hiroyuki Matsuzaki, Hidenari Nakahama, and Yasuaki Ishikawa	奈良先端科 学技術大学 院大学、 日清紡メカ トロンクス (株)	Carrier dynamics in the potential induced degraded photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017年11月 17日
27	石河泰明	奈良先端科 学技術大学 院大学	Si 太陽電池モジュールにおけ る電圧誘起劣化現象	日本材料学会半導体エ レクトロニクス部門委 員会、第1回研究会	2018年7月 21日
28	石河泰明	奈良先端科 学技術大学 院大学	シリコン太陽電池発電機能の屋 外検査技術開発	次世代の太陽光発電シ ステム 175 委員会 次世 代シリコン太陽電池分 科会&モジュール・シ ステム分科会 合同研 究会	2018年10月 23日

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	奈良先端科学技術大学院大学、産業技術総合研究所	The front inside cover page of Prog. Photovolt.	Prog. Photovolt.	2019年7月

【その他】

なし

(へ) 動向調査等

【A 太陽光発電開発戦略に関する動向調査】(みずほ情報総研株式会社)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
太陽光発電開発戦略に関する動向調査	「太陽光発電開発戦略」の推進に係る各種情報収集・分析	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電システムの導入動向、太陽電池セル・モジュールの生産・出荷動向と主要国における生産能力と生産量、パワーコンディショナの出荷動向等を調査するとともに、システム価格、発電コストに関連する各種情報を収集した。 発電コストの試算と感度分析を行った。2020年、2030年の将来発電コストについて分析を実施した。発電コストに関連する動向を調査した。 海外主要機関等のロードマップにおける太陽光発電コストの分析・評価事例を調査し、システム価格や発電コストの算定方法などについて日本との比較を行った。 太陽電池モジュール性能に関する基礎情報を調査した。 	○	
	太陽光発電産業、市場動向等に関するシナリオ分析	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電の各分野における将来ポテンシャルを推計し、2050年に向けた導入量を試算した。 将来の太陽光発電の産業や市場の検討に関連する情報として、グリッドパリティ、制度・政策、中長期的な社会像、再生可能エネルギーを巡る国際イニシアティブの動向、関連技術動向、ビジネスモデルについて調査した 太陽光発電産業、市場の拡大に向けたシナリオ分析を実施した。 	○	
	「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電システム搭載自動車の意義および次世代自動車に関する市場動向を調査した 太陽光発電システム搭載自動車の付加価値および取得日射量に関する予備的検討を行った 	○	

		<ul style="list-style-type: none"> ・時間帯別の日射量・走行パターンを想定した太陽光発電システム搭載自動車によるCo2排出削減効果の試算を行った。 ・太陽光発電搭載自動車に関する国際的な展開として、IEA PVPSにおけるタスク17：PV and Transportの立ち上げ・運営支援をした。 		
--	--	--	--	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【B 発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査】(株式会社資源総合システム)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査	年度毎に太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性を分析する。太陽電池モジュールの製造技術開発と製造コスト、太陽電池モジュールの利用動向と今後の市場と産業の可能性、また太陽電池モジュールの技術開発動向に関する調査・分析を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性および産業競争力に関して調査した。太陽電池の競争力の軸足は、発電コスト低減への貢献が指標となりつつある。大手太陽電池製造各社が試算した太陽光発電所における太陽電池モジュール出力と発電コスト等の相関関係をまとめた。代表的な太陽電池製造企業の技術力、業績等を調査し、分析・評価した。更に、太陽電池モジュールの長期信頼性に関する研究開発動向や国際標準化について調査した。 ・太陽電池モジュールの製造技術と製造コストに関して調査した。結晶シリコンでは、ポストPERCセル技術としてヘテロ接合、TOPConの量産技術の開発が進んでいる。モジュール効率30%超を目指すハイエンド高効率太陽電池技術として、Ⅲ-V族化合物太陽電池、高効率結晶シリコンベース・タンデム化技術の開発状況についても調査した。結晶シリコン/ペロブスカイトタンデム・セルではセル効率29%超が達成された。 ・太陽電池モジュールの利用動向と 	○	

		<p>今後の市場と産業の可能性に関して調査した。導入地域は世界全体へ拡がり、市場規模も増加する見通しである。新たな応用用途を可能にする太陽電池の軽量・フレキシブル化が世界各国の研究機関や企業で模索されている。太陽電池生産拠点は、中国で年産 GW レベルの拡張計画があるほか、現地生産、貿易摩擦への対応等から東南アジア、米国、欧州など中国以外へも広がっている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・海外主要国（米国、欧州、ドイツ、中国、韓国等）における太陽電池の研究開発政策動向を調査し、研究開発戦略や予算等をまとめ、比較した。 ・新たな太陽電池技術として、量産製品における技術トレンド、ペロブスカイト太陽電池等の研究開発動向と実用化に向けた各機関の取り組みや開発ロードマップ等を調査した。 		
--	--	--	--	--

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

【C IEA PVPS 国際協力事業】（株式会社資源総合システム）

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
IEA PVPS 国際協力事業	IEA PVPS タスク 1 の活動において NEDO の調査・分析的・効率的な業務を行う。PVPS の 2018 年以降の活動計画案を作成する。定期刊行物を継続的に発行する。ワークショップ、シンポジウム等における PVPS 活動の普及を図る。	タスク 1 専門家会議、タスク 1 活動に係わるワークショップ及びその活動への参画を通じて、各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。PVPS の 2018 年以降の活動計画案を作成し、タスク 1 専門家会議での今後の計画の審議に反映させ、タスク 17 (PV and Transport) の発行へのタスク 1 としての支援に貢献した。さらに、弊社専門家は、2018 年度からはタスク 1 の副代表に選任され、国際協力活動をリードし、日本のプレゼンスの向上に貢献した。	○	

		<p>この点は、想定以上の成果であったと考えられる。</p> <p>日本における太陽光発電の現状を調査して、日本のタスク 1 に関わる報告書である「国内調査報告書 2018 年 (National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2018)」、「年次報告書 2019 年 (Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2019)」、及び「国別報告 2020 年 (2019 年の統計速報値) (Country Page of Japan, 2020)」を作成した。さらに、「動向報告書 (Trends Report, Trends in Photovoltaic Applications 2019)」の作成に各国の専門家とともに参画した。活動の一環として、動向報告書 (Trends Report) の日本語版「太陽光発電応用の動向報告書」及び主要国の国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications 2018)、Snapshot Report 2019 の日本語版「速報報告書」を作成した。さらに、IEA PVPS の統計情報及び各国施策の概要について調査を行った。</p>		
--	--	--	--	--

* 1 達成度

◎ : 数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○ : 数値目標クリア、△ : 数値目標未達

A 太陽光発電開発戦略に関する動向調査 (みずほ情報総研株式会社)

1. 成果詳細

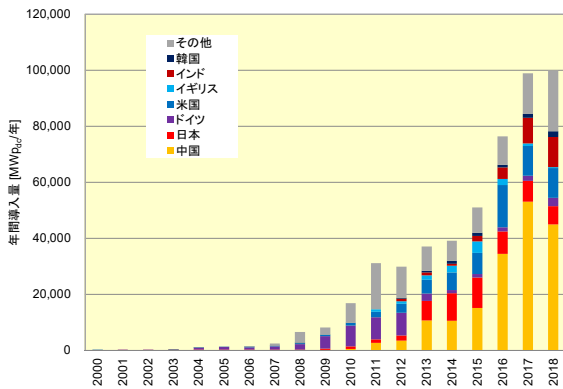
1. 1 太陽光発電の導入、生産動向の調査

○世界の太陽光発電導入量推移

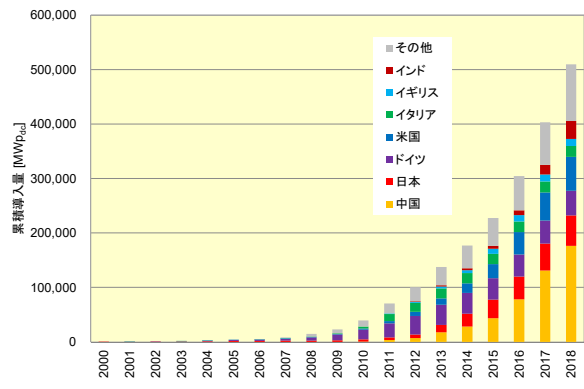
図Ⅲ-2-(へ)-A-1 に世界の主要国における太陽光発電の年間導入量および累積導入量の推移を示す。2012年以降、欧州市場が縮小する一方で、中国や日本、米国における導入量が急激に拡大し、2018年には導入量が直流(DC: Direct Current)の定格容量で100GWを上回った。国別に見ると、制度の改革により前年より市場が縮小したものの、2017年に引き続き中国の導入量が最も大きく約45.0GW/年、次いでインドが約10.8GW/年、米国が約10.6GW/年、日本が約6.5GW/年、オーストラリアが約3.8GW/年となった。2018年の年間導入量では日本は世界第4位に位置し、引き続き太陽光発電導入の先進国として世界市場をけん引している。

2018年末の世界全体の累積導入量はDC容量で約512GWに達し、国別では中国が約175.4GWと最も多く、次いで米国が約62.5GW、日本が約56.2GW、ドイツが約45.4GW、インドが約32.9GWとなっている。2016年以降はインドの市場が急速に拡大している一方で、導入が一巡した欧州の市場の伸びは鈍化し、累積導入量においてもアジアと米国が世界の上位を占めている。

<年間導入量>



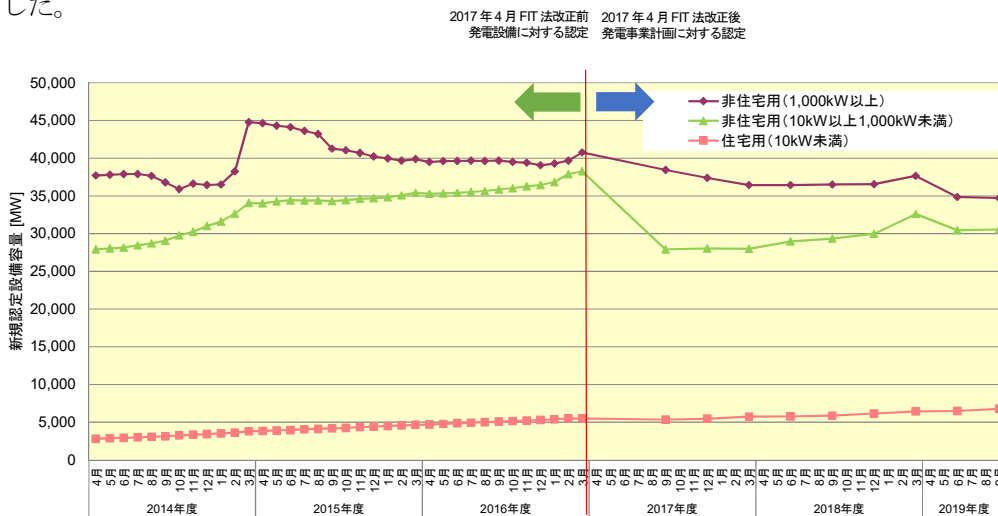
<累積導入量>



図Ⅲ-2-(へ)-A-1 世界の太陽光発電導入量の推移Ⅲ-1-7より作成

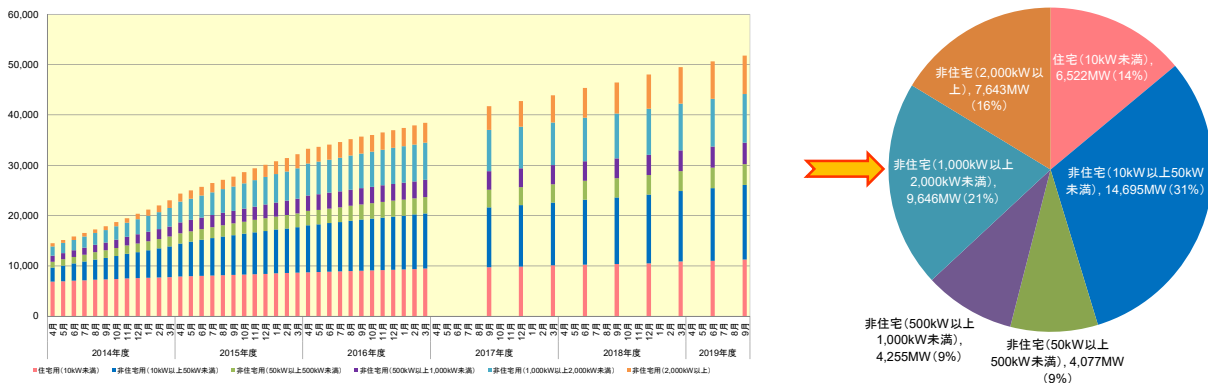
○国内における太陽光発電導入量推移

図Ⅲ-2-(へ)-A-2 は太陽光発電設備認定容量(新規認定分)の推移を住宅用(10kW未満)、非住宅用(10kW以上1,000kW未満)、非住宅用(1,000kW以上)に分けて示したものである。2017年度には、FIT法の改正により新たな制度下で事業認定を受けられなかった発電設備が認定容量から消えたことにより、認定容量が約15GW減少した。



図Ⅲ-2-(へ)-A-2 固定価格買取制度による太陽光発電設備認定容量の推移 (新規認定分: 累積) Ⅲ-8より作成

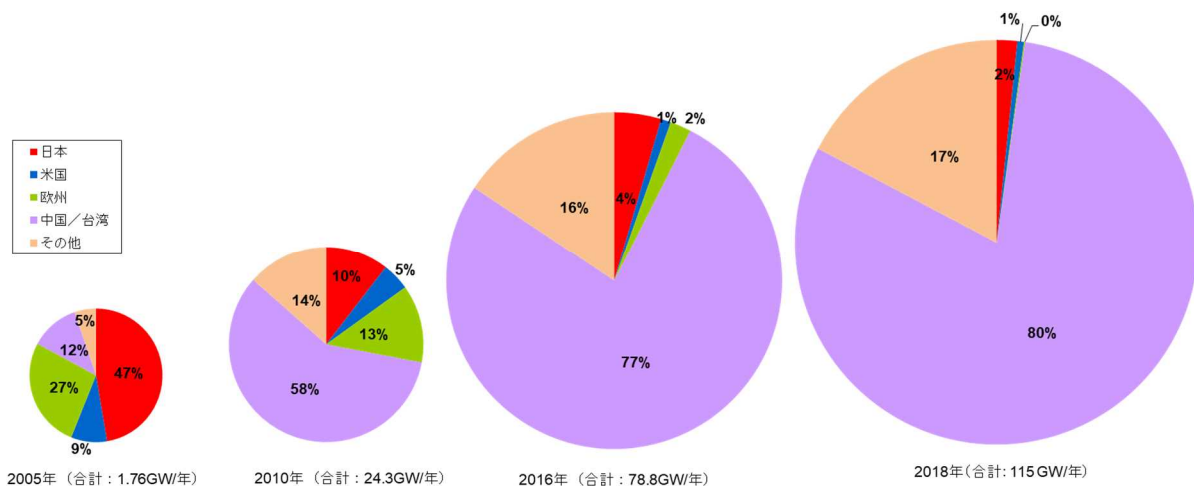
図Ⅲ-2-(へ)-A-3 は、新規認定設備のうち、運転を開始した太陽光発電設備容量（導入量）を示したものである。2019年9月末時点の既導入量は46.8GWで、内訳を見ると10kW以上50kW未満の小型の非住宅用発電設備が最も多く14.7GWとなっている。次いで1,000kW以上2,000kW未満の非住宅用（9.6GW）、2,000kW以上の非住宅用（7.6GW）の順となっており、大型の太陽光発電設備が徐々に増加してきている。



図Ⅲ-2-(へ)-A-3 固定価格買取制度による太陽光発電導入量の推移（左）と2019年9月末時点の導入量内訳（右）（新規認定分）Ⅲ-8より作成

○太陽電池セルの生産量シェア

太陽電池セル・モジュールの世界市場は、かつて日系太陽電池メーカーが大きなシェアを占めていたが、2000年代後半から、コスト競争力を持つ中国・台湾勢が大きくシェアを伸ばし、現在、非常に高いシェアを占めている。図Ⅲ-4は2005年、2010年、2016年および2018年における太陽電池セル生産量の地域別シェア（工場所在地ベース）の推移を示したものである。2005年には日本企業のシェアは世界全体の47%を占め、生産量上位5社のうちの4社が日本企業であったが、中国市場の急激な拡大により中国および台湾企業が生産量を拡大し、2010年には日本企業のシェアは10%に低下、上位10社に入る日本企業は2社となった。その後、2012年には日本企業が上位10社から姿を消し、2018年も同様に上位10社に日本企業は入らず、生産量に占めるシェアも約2%にとどまっている。一方、中国・台湾メーカーは2005年におけるシェアは世界全体の12%であったが、2010年には58%、2018年には80%を占めるに至っている。



図Ⅲ-2-(へ)-A-4 太陽電池セル生産量の地域別シェアの推移（工場所在地ベース）Ⅲ-9～15より作成

1. 2 太陽光発電の価格動向と発電コストの分析

○発電コストの分析

＜発電コスト推定に用いるパラメータ＞

住宅用、非住宅用という区分とし、2012～2019 年度における太陽光発電コストを推定することとした。システム容量は NEDO PV Challenges^{III-16} による太陽光発電コストの推定方法にしたがい、住宅用を 4kW、非住宅用は一律 2,000kW とした。NEDO PV Challenges では、技術開発によるモジュール効率向上の効果を考慮すべく、モジュール効率ならびに kW あたり必要面積（非住宅用のみ）を想定しているが、ここでは 2012～2014 年度についてそれらの想定値（モジュール効率 16%）を用い、2015～2018 年度はモジュール効率を 17%、2019 年度はモジュール効率を 18% とした。また、運転年数、法定耐用年数、固定資産税については NEDO PV Challenges による想定値を用いた。他のパラメータについては NEDO PV Challenges における考え方にに基づき、様々な価格情報は調達価格等算定委員会による公表情報を用いた。

住宅用について、新築住宅に設置する場合の価格は、2012～2015 年度は翌年度の買取価格の想定値（新築平均に相当）とし、2016～2019 年度は実績に基づく中央値を想定した分析を実施した。非住宅用については、2012～2014 年度は、翌年度の買取価格の想定値（1,000kW 以上の平均に相当）とし、2015～2018 年度は実績に基づく中央値（1,000kW 以上）、2019 年度は平均値（1,000kW 以上）を想定した分析を実施した。表 III-1 は、発電コスト推定のために設定したパラメータを示したものである。

＜発電コスト推計＞

① 新築住宅の設置を想定した発電コスト

図 III-2-(へ)-A-5 に新築住宅への設置を想定した発電コストの推定結果を示す。2019 年度の発電コストは 2018 年度より低減し、15.91 円/kWh となった。

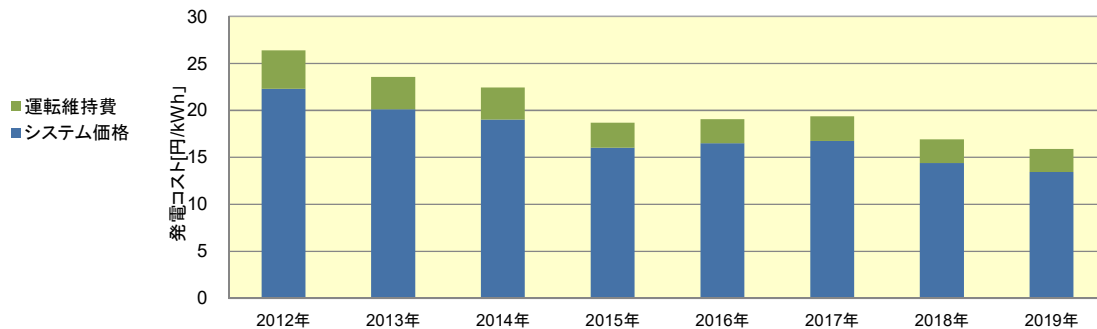


図 III-2-(へ)-A-5 住宅用太陽光発電システムの発電コスト推定結果（新築住宅を想定）

② 非住宅用太陽光発電システムの発電コスト（2,000kW システムを想定）

図 III-2-(へ)-A-6 に非住宅用太陽光発電システムの発電コストの推定結果を示す。システム価格の低減および設備利用率の向上に伴い発電コストが低下し、2019 年度は 14.26 円/kWh となった。2018 年度と比較すると、システム価格が大きく低下しており、発電コストは約 1.76 円/kWh 低下している。

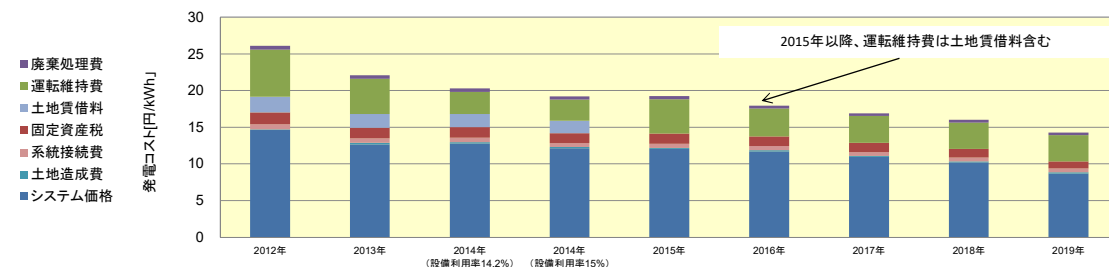


図 III-2-(へ)-A-6 非住宅用太陽光発電システムの発電コスト推定結果（2,000kW を想定）

表Ⅲ-2-(へ)-A-1 現状の発電コストの推定に用いたパラメータ

	住宅用									非住宅用									
	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2019年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年		
システム容量	4 (kW)									2,000 (kW)									
前提	運転年数	20 (年)									20 (年)								
	割引率	3 (%/年)									3 (%/年)								
	法定耐用年数	17 (年)									17 (年)								
	固定資産税	-									1.4 (%/年)								
初期費用	モジュール効率	16 (%)			17 (%)			18 (%)		16 (%)			17 (%)			18 (%)			
(建設費)	設置に必要な面積	-									15			14.12					
	システム単価	<新築住宅>									(m ² /kW)								
		42.7	38.5	36.4	35.3	35.3	35.0	31.2	29.8	28.0	27.5	29.0	29.0	28.2	27.2	25.7	22.2		
		(万円/kW)																	
	<既築住宅>																		
	47.9	43.2	40.5	40.1	37.6	37.1	35.8	34.6											
	(万円/kW)																		
系統接続費	-									13,500 (円/kW)									
土地造成費	-									1,500	4,000								
年間経費	運転維持費	4,300	3,600		3,200	3,000			6,750	5,750	3,750	6,000	5,000						
	(円/kW)									(円/kW)									
	土地賃借料	-									150 (円/m ²)			(運転維持費に含む)					
発電能力	設備利用率	12%		13.8%	13.4%	13.1%	13.6%	13.9%	12%	13.6%	14.2%, 15.0%	14.6%	15.1%	15.6%	15.8%	16.0%			
廃棄	廃棄処理費用	-									建設費の5 (%)								

<発電コストの感度分析>

発電コストを構成する主要なパラメータに関する感度分析結果を示す。基本とする発電コストは、住宅用システムは、第49回調達価格等算定委員会^{Ⅲ-17}にて示された新築住宅への設置価格の中央値(298,000円/kW)、非住宅用システムは同委員会にて示された1,000kW以上システム価格の平均値(222,000円/kW)とし、表Ⅲ-2-(へ)-A-2に示すパラメータについてそれぞれ±1%の幅とした。ここで、モジュール効率の増減は、以下の考え方によりパラメータに反映した。

・住宅用

基本としたシステム価格(298,000円/kW)について、2018年の新築住宅における住宅用太陽光発電システム価格構成^{Ⅲ-18}に基づき、モジュール、架台、設置工事に相当する費用が、モジュール効率の増減に伴い変動(効率1%向上(モジュール効率18%→18.18%))により、相当価格が1%減少)するものとした。

・非住宅用

基本としたシステム価格(222,000円/kW)について、2018年の非住宅用太陽光発電システム価格構成に基づき^{Ⅲ-18}、モジュール、架台、設置工事に相当する費用が、モジュール効率の増減に伴い変動するものとした。

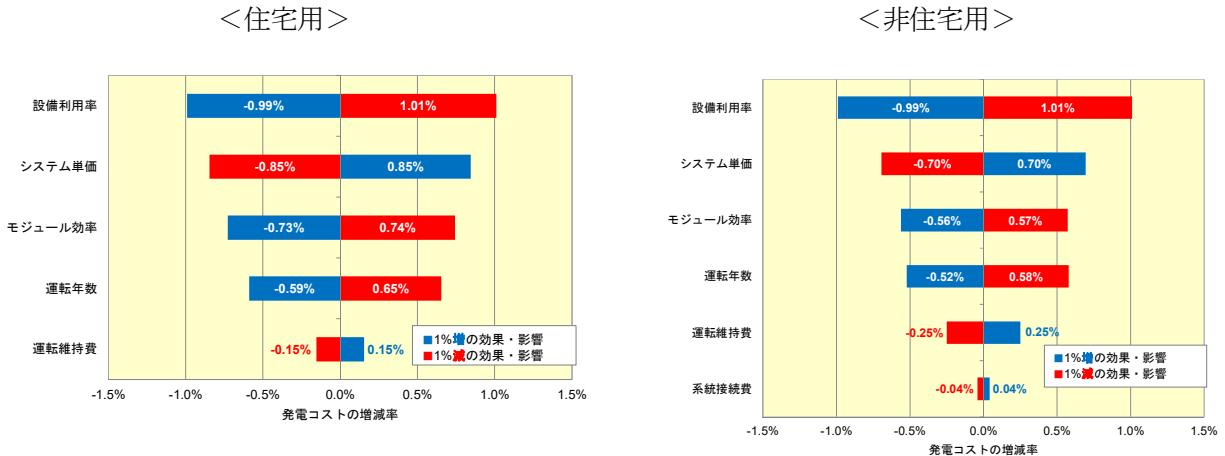
また、モジュール効率の向上に伴う必要面積の低減により、土地造成費も変動するものとした。

表Ⅲ-2-(へ)-A-2 感度分析の対象とした要因、指標

		住宅	非住宅	感度分析の幅	
		(基本の値)	(基本の値)		
設備利用率	○	13.9%	○	16.0%	左記の値に対し±1%
システム価格	○	298,000円/kW	○	222,000円/kW	
モジュール効率	○	18%	○	18%	
運転年数	○	20年	○	20年	
運転維持費	○	3,000円	○	5,000円/kW	
系統接続費	—	—	○	13,500円/kW	

図Ⅲ-2-(へ)-A-7 に住宅用システムおよび非住宅用システムの分析結果を示す。

±1%の増減による効果・影響は、いずれのシステムにおいても設備利用率の増減による効果・影響が最も大きく、ほぼそのまま±1%の発電コストの増減となる。次いで効果が高いのはシステム価格、モジュール効率であるが、いずれも住宅用と比較して非住宅用は効果・影響が小さい。これは、非住宅用の方が発電コストに占めるシステム価格の比率が小さく、また、運転維持費や系統接続費などモジュール効率（設置面積）の影響を受けないコスト要因が相対的に大きいことによる。運転年数の増減による効果・影響も非住宅用の方が小さく、非住宅用では運転維持費や固定資産税などの年間経費が住宅用よりも大きいことが要因である。その一方で、運転維持費による影響は、非住宅用の方がやや大きくなっている。なお、非住宅用システムにて想定される系統接続費の効果・影響は他の要因と比較すると小さく、1%の増減に対し、0.1%以下となっている。



図Ⅲ-2-(へ)-A-7 発電コストの感度分析結果（発電コストの増減への影響）

○ 2020年および2030年における発電コストの試算

表Ⅲ-2-(へ)-A-3 に2020年および2030年の発電コスト試算に用いたパラメータを示す。

住宅用、非住宅用いずれも現状（2019年）の平均値または中央値をベースとして今後の太陽光発電システム価格等を想定し、太陽電池モジュールおよび太陽光発電システムの性能向上を見込んだ。

運転年数はNEDO PV Challenges^{Ⅲ-16}を参照し、現状の20年に対し、2020年に25年、2030年に30年とした。モジュール効率は2019年の想定値18%に対して、2020年に22%、2030年に25%とした（いずれも市場レベル）。システム価格は、発電コスト検証ワーキンググループによる「国際価格に収斂するケース（IEA World Energy Outlookにおける新政策シナリオの太陽光発電導入量の見通しを基準としたもの）」の考え方^{Ⅲ-19}に基づき、設定した。住宅用、非住宅用それぞれについて、現状のシステム価格を設置工事費とそれ以外（機器コストに相当）に分け、設置工事費は2030年までモジュール効率の向上に伴い低減（効率向上により必要面積が減少し、設置工事費も低減）とする一方、機器コストは2030年における国際的な平均価格に収斂する、という考え方とした。

将来の国際的な平均価格は、2019年における日本を除いた太陽光発電システムの国際平均価格を出発点として、習熟率80%の習熟曲線により推定し、習熟曲線を描くにあたっては、IEA World Energy Outlook 2019^{Ⅲ-20}のStated Policies Scenario（以前の新政策シナリオに相当）による2020年および2030年の将来導入量を見込んだ。

設置工事費および非住宅用の土地造成費については、モジュール効率の向上に伴う必要面積の縮小を考慮した。運転維持費は、住宅用、非住宅用いずれも、現状におけるシステム単価に対する比率を一定とし、2020年、2030年のシステム単価に応じた運転維持費を想定した。

また、住宅用システムおよび非住宅用システムの設備利用率はそれぞれ13.9%および16.0%とし、現状のまま一定とした。

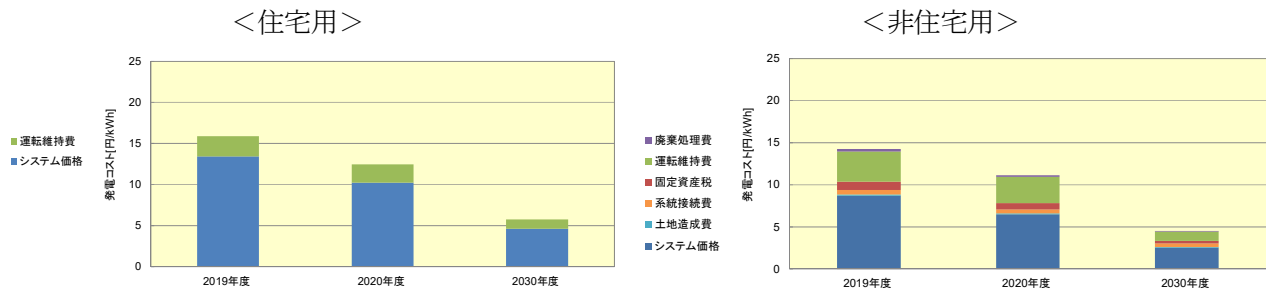
表Ⅲ-2-(へ)-A-3 2020年および2030年の発電コスト試算に用いたパラメータと諸元

		住宅用			非住宅用		
		2019年	2020年	2030年	2019年	2020年	2030年
前提	運転年数	20(年)	25(年)	30(年)	20(年)	25(年)	30(年)
	割引率	3(%/年)			3(%/年)		
	法定耐用年数	17(年)			17(年)		
	固定資産税	-			1.4(%/年)		
初期費用 (建設費)	システム容量	5.0(kW)			2,000(kW)		
	モジュール効率	18(%)	22(%)	25(%)	18(%)	22(%)	25(%)
	設置に必要な面積	-			13.3 (m ² /kW)	10.9 (m ² /kW)	9.6 (m ² /kW)
					機器価格：習熟率80%の習熟曲線 に従って低減 設置工事費：モジュール効率向上 に従って低減		
	システム単価 (2019年は調達価格等算定委 報告による住宅：中央値、非住 宅：平均値)	29.8 [万円/kW]	26.6 [万円/kW]	13.5 [万円/kW]	22.2 [万円/kW]	19.4 [万円/kW]	8.5 [万円/kW]
	系統接続費用	-			13,500(円/kW)		
	kWあたり 土地造成費	-			4,000 (円/kW)	3,273 (円/kW)	2,880 (円/kW)
モジュール効率の向上にしたがって低減							
年間経費	運転維持費	3,000 (円/kW)	2,678 (円/kW)	1,359 (円/kW)	5,000 (円/kW)	4,369 (円/kW)	1,532 (円/kW)
		システム単価に対する比率一定と仮定			システム単価に対する比率一定と仮定 (土地賃借料含む)		
発電能力	設備利用率	13.9%			16.0%		
廃棄	廃棄処理費用	-			建設費の5(%)		

<発電コスト推定結果>

図Ⅲ-2-(へ)-A-8に発電コストの試算結果を示す。住宅用では、初期費(システム価格)の低減と長寿命化に伴い発電コストが低下し、2020年に12.45円/kWh、2030年に5.74円/kWhとなった。また、長寿命化に伴いシステム価格による比率が低下し、運転維持費の比率が高まっている。

非住宅用では、システム価格の低減およびシステム・モジュール性能の向上に伴い、発電コストは低下し、2020年に11.14円/kWh、2030年に4.52円/kWhとなった。内訳を見ると、システム価格による発電コストの比率が、2019年度には61.0%であるのが、2020年には58.3%、2030年には56.0%に低下している。



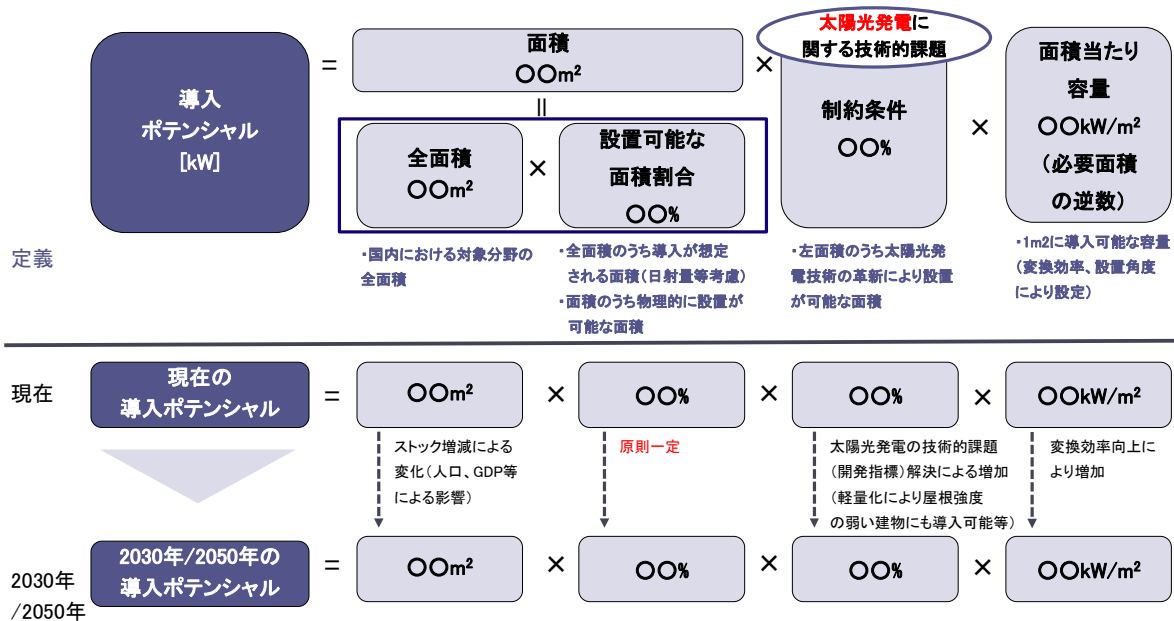
図Ⅲ-2-(へ)-A-8 2020年および2030年における発電コスト推定結果

1. 4 太陽光発電の将来ポテンシャル、導入量試算

＜導入ポテンシャルの考え方＞

図Ⅲ-2-(へ)-A-9 に国内の太陽光発電の導入ポテンシャルおよび導入量の考え方を示す。本試算では、国内において太陽光発電の導入が想定される対象分野の面積を調査し、日射量や物理的に設置が可能な面積を考慮した設置可能な面積の割合を想定し、太陽光発電の導入対象面積とした。それら対象面積に対し、技術的な制約条件を想定し、面積あたり導入可能な容量（その時点の変換効率、設置角度等により設定）を乗じることで、導入ポテンシャルを試算した。

また、対象分野の2050年（および2030年）の面積は、現在の面積から変化することが想定される。そのため、現在の面積から、将来の人口やGDP等による影響等を考慮し、ストック増減による変化を想定し、2050年の面積を推計して使用した。2050年の制約条件については、将来の太陽光発電の技術的課題の解決による増加を見込んだ割合とした。変換効率も2050年の向上を想定して設定した。



図Ⅲ-2-(へ)-A-9 導入ポテンシャルの考え方

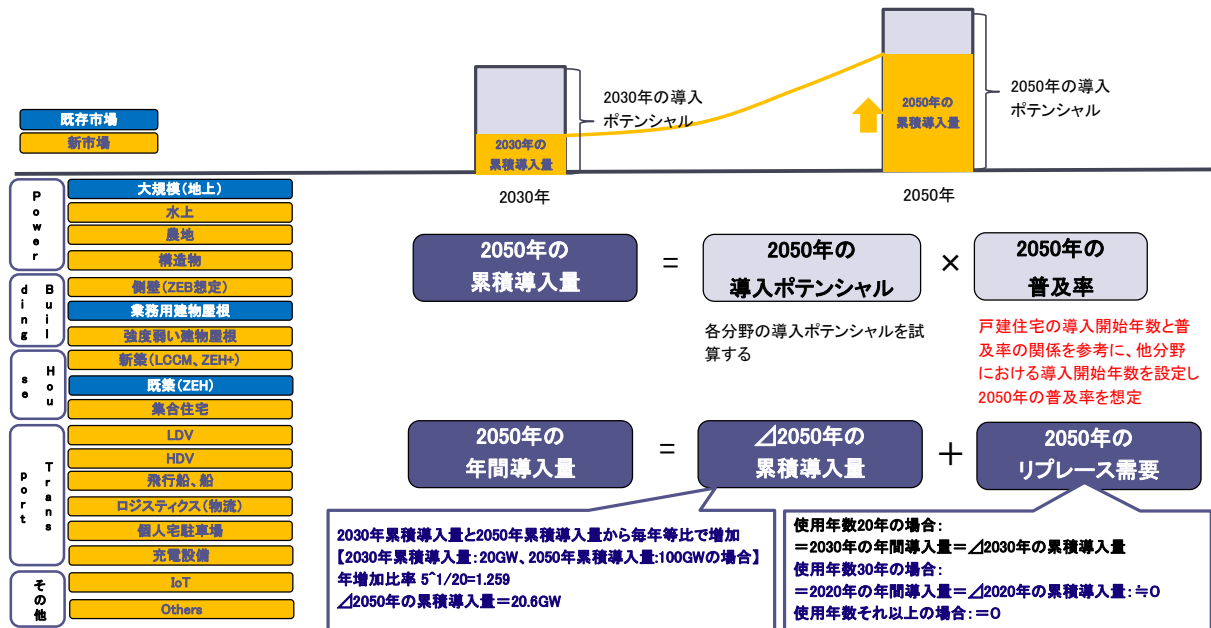
＜累積導入量の考え方＞

累積導入量の考え方を図Ⅲ-2-(へ)-A-10 に示す。前項の考え方に基づく各分野の導入ポテンシャルに、各分野の2050年（および2030年）の普及率を想定して乗じることで、2050年（および2030年）の累積導入量を試算した。

各分野の2050年の普及率は、普及曲線（ロジスティック曲線）を描いて想定した。普及曲線は、メガソーラー、戸建住宅等のこれまでの実績導入量から作成し、各分野に相当する普及曲線を選択した。次に、各分野における導入開始年を設定し、各分野の普及曲線から得られる2050年の普及率を、その分野の導入ポテンシ

ャルに乗じることで、2050年の累積導入量を試算した。

なお、本調査で見積もった累積導入量は普及率を一定の仮定の下に計算をしたものであるため、普及率の仮定を変更すれば、累積導入量は簡単に変動することに留意する必要がある。



図III-2-(へ)-A-10 累積導入量の考え方

<試算結果>

新市場における2050年および2030年の導入ポテンシャルと累積導入量の試算結果を表III-4に示す。ここで、「技術進展あり」は技術開発を推進させ、制約条件がなくなった場合のケース、「技術進展なし」は2030年時点から特段技術進展がなく、制約条件が一定である場合のケースを試算している。

2050年の導入ポテンシャルは、「技術進展なし」では198GW、累積導入量は26GWであるが、「技術進展あり」では導入ポテンシャルは1,492GW、累積導入量は174GWと試算された。

表III-2-(へ)-A-4 導入ポテンシャルと導入量の試算結果

単位[GW] (ACベース)		2030年		2050年			
		導入ポテンシャル	累積導入量	技術進展ありの場合		技術進展なしの場合	
				導入ポテンシャル	累積導入量	導入ポテンシャル	累積導入量
新市場	ZEB	12	0	136	37	11	3
	強度弱い建物屋根	8	0	94	24	8	2
	住宅 (ZEH+, LCCM等)	14	1	36	24	15	10
	車載PV	2	0	76	25	6	2
	水上	6	0	239	32	7	3
	農地	145	0	912	32	152	6
合計		186	1	1,492	174	198	26

※変換効率の想定は以下のとおり

-2030年 導入ポテンシャル:新市場25%、累積導入量:新市場(水上、農地)19%、新市場(水上、農地以外)25%

-2050年技術進展あり 導入ポテンシャル:新市場30%(ただし車載PVは40%)、累積導入量:新市場(水上、農地)23%、新市場(水上、農地以外)30%(ただし車載PVは40%)

-2050年技術進展なし 導入ポテンシャル:新市場25%(ただし車載PVは30%)、累積導入量:新市場(水上、農地)23%、新市場(水上、農地以外)25%(ただし車載PVは30%)

表Ⅲ-2-(へ)-A-5 に、新市場の 2050 年の累積導入量の試算結果に基づく、年間 CO₂ 排出削減効果を示す。技術進展を想定しない場合は、年間 9.2 百万 t-CO₂ の削減効果があるが、技術進展を想定することで、年間 60.0 百万 t-CO₂ の削減効果が見込まれ、技術進展がない場合と比較して年間 50.8 百万 t-CO₂ のさらなる削減効果が期待される。

表Ⅲ-2-(へ)-A-5 2050 年の CO₂ 排出削減効果のまとめ

単位[百万 t-CO ₂]		①2050 年の年間 CO ₂ 排出削減効果 (技術進展あり)	②2050 年の年間 CO ₂ 排出削減効果 (技術進展なし)	①-② 技術進展による 2050 年の 年間 CO ₂ 排出削減効果
新市場	ZEB	9.2	0.8	8.4
	強度弱い建物屋根	9.1	0.8	8.4
	住宅 (ZEH+、 LCCM 等)	8.6	3.6	5.0
	車載 PV	9.0	0.7	8.3
	水上	12.0	1.0	10.9
	農地	12.2	2.4	9.5
	ZEB	9.2	0.8	8.4
合計		60.0	9.2	50.8

次世代自動車から PV 搭載次世代自動車にした場合の削減効果。次世代自動車における蓄電池容量制約がなく、太陽光発電の発電量全てを自動車か系統で使用した場合の効果を試算している。このため、NEDO 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書(2018 年 1 月)の効果とは異なる。

1. 4 太陽光発電産業、市場に関するシナリオ分析

○シナリオ分析の実施方法

シナリオ分析は表Ⅲ-6 に示す 5 ステップで実施した。本項では(5)の検討結果のみを示す。

表Ⅲ-2-(へ)-A-6 シナリオ分析の実施方法

シナリオ分析ステップ	内容
(1)影響因子の洗い出し	太陽光発電の将来導入に影響する影響因子を洗い出して整理する。
(2)影響因子の評価	影響因子を影響度と不確実性で評価する。
(3)重要影響因子の決定	影響因子のうち、影響度が大きく、かつ不確実性も大きいものを重要影響因子として決定する。
(4)重要影響因子の分析	重要影響因子が現状どのような状況にあるか、現時点の情報からみて将来どうなる可能性があるかを分析する。
(5)シナリオパターンの検討	重要影響因子を軸として、複数のシナリオパターンを検討する。

○シナリオパターンの検討

表Ⅲ-2-(へ)-A-6 の(3)で決定した重要影響因子を 2 軸にとり、住宅用 (自家消費) のシナリオパターンを表Ⅲ-7 に、産業用 (メガソーラー) のシナリオパターンを表Ⅲ-2-(へ)-A-8 に示す。なお、各シナリオパターンにおける太陽光発電利用方法等は、あくまでも方向性を示したものであり、他にも様々な具体的な可能性があり得る。

表III-2-(へ)-A-7 住宅用（自家消費）におけるシナリオパターン

		分散型電源を主とした電力システムの変革	
		起こる	起こらない
太陽光発電 +蓄電池パ リティ	達成 する	<p>太陽光発電電力自家消費を中心とした分散型再生可能エネルギー社会（住宅シナリオA）</p> <p>【電源について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 地域マイクログリッドを利用した電力地産地消事業が拡大する。 ● 地域の再生可能エネルギー電源開発が積極的に進められ、大規模需要家も地域マイクログリッドに参加する。 <p>【太陽光発電利用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 多くの住宅で太陽光発電、蓄電池の導入が進み、住宅電力は太陽光発電の自家消費が中心となる。 ● 住民や需要家が太陽光発電所、蓄電池を共有して電源調達するコミュニティソーラーモデルや、事業者が需要家に太陽光発電と蓄電池を設置して電力を供給するTPOモデルが普及している。 ● 需要家の太陽光発電と蓄電池が協調しながら地域マイクログリッド内の調整力に役立てられる。 ● 地域内の発電電力や蓄電池の電力を地域内で有効的に共有するP2P電力取引が進展している。 	<p>太陽光発電電力自家消費+大規模集中型エネルギー社会（住宅シナリオC）</p> <p>【電源について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 住宅以外の多くの大規模需要家は、自家消費を進めるものの不足する電力については、系統を通じた大規模集中型電源から電力を調達している。 <p>【太陽光発電利用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 多くの住宅で太陽光発電、蓄電池の導入が進み、住宅電力は太陽光発電の自家消費が中心となる ● 太陽光発電を導入できない住民、需要家は系統から電力を調達している。
	達成 しない	<p>太陽光発電の余剰電力を活用した分散型再生可能エネルギー社会（住宅シナリオB）</p> <p>【電源について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 地域マイクログリッドを利用した電力地産地消事業が部分的に拡大する。 ● 地域の再生可能エネルギー開発が積極的に進められる。 <p>【太陽光発電利用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 住宅の太陽光発電パリティは達成され、導入量は増加している。 ● 住宅の太陽光発電で発電した余剰分は地域内送配電網を通じて販売され、電力地産地消事業によって利用される。 ● 住民や需要家が太陽光発電所を共有して電源調達するコミュニティソーラーモデルや、事業者が需要家に太陽光発電を設置して電力を供給するTPOモデルが普及している。 ● 太陽光発電の余剰電力を地域内で有効的に共有するP2P電力取引が進展している。 	<p>大規模集中型エネルギー社会（住宅シナリオD）</p> <p>【電源について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 住宅を含めた多くの需要家は、系統を通じた大規模集中型電源から電力を調達している。 <p>【太陽光発電利用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 住宅の太陽光発電パリティは達成され、導入量は増加している。 ● 住宅の太陽光発電で発電した余剰分は系統を通じて販売される。 ● 太陽光発電を導入できない住民、需要家は系統から電力を調達している。

図III-2-(へ)-A-8 産業用（メガソーラー）におけるシナリオパターン

		系統への導入制約	
		緩和される	緩和されない
太陽光発電 パリティ （ジェネ レーション パリティ）	達成 する	<p>太陽光発電の基幹電源化（産業用シナリオA）</p> <p>【電源について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 多くの発電事業者が従来電源への投資を回避し、新たに太陽光発電に投資する。 ● 出力変動する太陽光発電が主な電源となり、出力変動を補完する電源として、火力発電等の従来電源が素早く出力調整が可能なフレキシブルな調整力として活用される。 ● 調整力としての従来電源への投資や設備利用率が少なくなるため、これらの電源を保有、維持するための市場整備が行われる（容量市場、需給調整市場等）。 <p>【太陽光発電利用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 太陽光発電自体も系統や地域マイクログリッドの需給状況に応じてフレキシブルに出力調整をする調整力として寄与する。 ● 太陽光発電の発電量が多い時間帯はP2Gによる水素貯蔵などエネルギー転換が進む。 	<p>太陽光発電ニーズの高まりと系統導入制約の緩和（産業用シナリオC）</p> <p>【電源について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 再エネ電力需要の高まりから、多くの発電事業者が新たに太陽光発電に投資したいと考えるが、導入制約があり投資はあまり進まない。 ● 太陽光発電は従来（現時点のFIT認定量）より系統の導入制約量まで増加。 <p>【太陽光発電利用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 従来どおりの発電所としての活用がされる。 <p>（太陽光発電の需要が高く、かつ事業者も投資したいと考えていることから、系統への導入制約が緩和され、シナリオAに向かう可能性が高い）</p>
	達成 しない	<p>再エネ価値としての太陽光発電の推進（産業用シナリオB）</p> <p>【電源について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 多くの発電事業者が従来電源への投資を維持するが、環境（GHG排出削減）政策や需要家からの再エネニーズの高まりにより、太陽光発電への新たな投資も推進される。 ● 太陽光発電は、従来（現時点のFIT認定量）より増加。 <p>【太陽光発電利用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 太陽光発電の一部は系統や地域マイクログリッドの需給状況に応じてフレキシブルに出力調整をする調整力として寄与する。 ● 太陽光発電の発電量が多い時間帯は一部P2Gによる水素貯蔵などエネルギー転換が進む。 	<p>太陽光発電導入の停滞（産業用シナリオD）</p> <p>【電源について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 多くの発電事業者が従来電源への投資をする（FIT/FIP制度がない場合）。 ● 太陽光発電は、従来（現時点のFIT認定量）からあまり増加しない（FIT制度がない場合）。 <p>【太陽光発電利用方法】</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 従来どおりの発電所としての活用がされる。

1. 5 太陽光発電搭載自動車に関する調査

○太陽光発電搭載自動車の付加価値および取得日射量に関する予備的検討

太陽光発電搭載自動車により期待される効果、付加価値として、充電電力を系統電力から代替することによるCO₂排出量削減効果、充電電力代削減効果（経済効果）が挙げられる。また、蓄電池残量不足による外部からの充電頻度（充電ステーションでの充電等）も低減され、自動車ユーザーにとっての利便性の向上も期待される。その一方で、車両屋根等に搭載される太陽光発電は、走行中や駐車中の環境によっては、従来の建物屋根・屋上や地上等と比較して日照条件に恵まれないことも考えられ、発電量が少なくなる可能性がある。

本調査では、これらの点について「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」による議論を行い、予備的な検討結果として、以下の報告書を作成・公表した。

- ・「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書」（2018年1月）^{III-21}
(<https://www.nedo.go.jp/content/100873452.pdf>)
- ・「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書（2）『太陽光発電システム搭載自動車の取得日射量に関する予備的検討』」（2019年4月）^{III-22}
(<https://www.nedo.go.jp/content/100892361.pdf>)

また、成果を国際的に広く発信し、太陽光発電搭載自動車の実用化に向けた議論に資することを目的に、英語版も作成した。それらもNEDOウェブサイトからダウンロードが可能である。

- ・「PV-Powered Vehicle Strategy Committee Interim Report」（January 2018）
(<https://www.nedo.go.jp/content/100885778.pdf>)
- ・「PV-Powered Vehicle Strategy Committee Interim Report (2) - Preliminary Study on Solar Irradiation of PV-Powered Vehicles -」（April 2019）
(<https://www.nedo.go.jp/content/100896335.pdf>)



図III-2-(へ)-A-11 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書（表紙）^{III-21, 22}

○太陽光発電搭載自動車に関する国際的な展開（IEA PVPS タスク 17：PV and Transport）

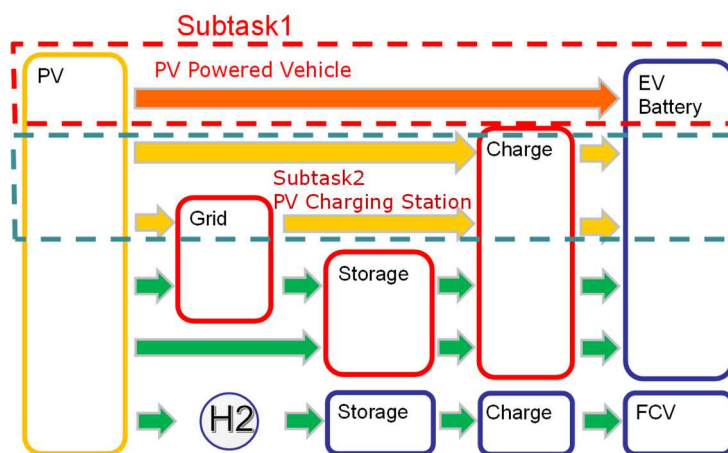
太陽光発電搭載自動車により期待される効果は広く世界にも共通するものと考えられ、本格的な実用化、普及に向けた様々な課題も国内外の英知を結集することでより速やかに解決できるものと考えられる。

そこで、太陽光発電搭載自動車の実用化、導入拡大に向けた取組みを、日本のリードにより、国際的な活動として展開していくことを目的とし、IEA（International Energy Agency：国際エネルギー機関）傘下の太陽光発電システムに関する技術協力プログラムである IEA PVPS（IEA Photovoltaic Power Systems Programme,

Technical Collaboration Programme) に対し、2017年12月、新規プロジェクト（タスクと称される）として「タスク17：PV and Transport」を提案し、承認を取得した。その後、タスク17への参加メンバー（各国専門家）の獲得に向けた活動、タスク活動推進に向けたワークプランの議論を行い、2018年10月に第1回専門家会議（キックオフ会議）を開催し、具体的な活動を開始した。

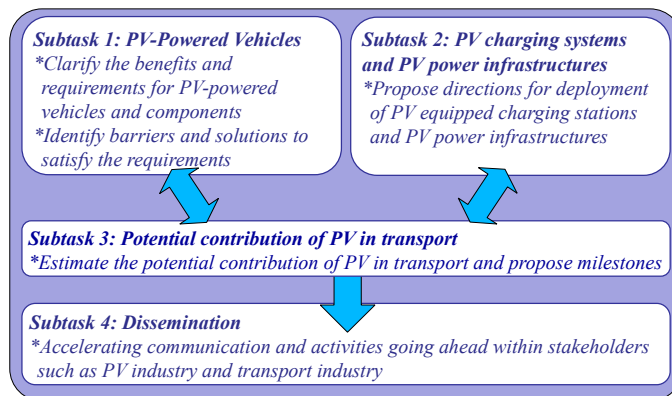
<タスク17 ワークプランの概略>

図III-2-(へ)-A-12はタスク17の範囲を示したものである。今後、電気自動車の普及促進に伴い、走行用動力（電力）が必要となるが、電気自動車からのCO₂排出量を低減するためには、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの利用が不可欠である。その供給（電力の充電）には様々な方法があるが、太陽エネルギーをより効率的に利用するためには、車両に搭載した太陽光発電からの直接供給、太陽光発電電力を利用する充電ステーションからの供給が挙げられる。



図III-2-(へ)-A-12 IEA PVPS タスク17：PV and Transport のコンセプト^{III-23}

タスク17は図III-2-(へ)-A-13に示す四つのサブタスク（Subtask）から構成され、Subtask 1は太陽光発電搭載自動車の実用化に向けた議論を行い、乗用車のみならず、商用車などへの応用も視野に入れている。Subtask 2は太陽光発電電力を利用する充電インフラに関する議論を行う。電気自動車から周辺施設や電力系統への供給（V2X）も応用範囲として挙げられるが、当面は充電ステーションに焦点を当てる。これらの議論と並行して、Subtask 3では、太陽光発電搭載自動車や太陽光発電利用充電インフラの実用化、普及に伴う効果に関する議論を行うとともに、運輸部門における太陽光発電利用の拡大に向けたロードマップ等を検討する。そして、Subtask 4はタスク17の活動により得られた成果を広く世界に発信するとともに、太陽光発電業界と自動車業界の橋渡しにつながる広宣活動を展開していく。



図III-2-(へ)-A-13 IEA PVPS タスク17：PV and Transport の構造^{III-24}

<タスク 17 参加国と日本の役割>

2020年3月時点において、タスク 17 への参加国は以下の 10 ヶ国である。大学や研究機関、企業等からの約 40 名の専門家が集い、議論を行っている。

・タスク 17 参加国

日本（運営責任者：Operating Agent (OA)）、オーストラリア、オーストリア、中国、フランス、ドイツ、モロッコ、オランダ、スペイン、スイス

日本は、タスク 17 の議長（運営責任者：Operating Agent）を担っており、タスク活動の総括的な管理・運営を行い、PVPS 執行委員会に活動報告する責務がある。したがって、日本の貢献に加え、日本以外の参加国・参加メンバーによる活動も的確にコーディネートし、タスク全体としての効率的な運営および成果創出に努める必要がある。活動の推進に伴い、活動成果の広範な普及も積極的に行い、より多くの知見を反映した成果を導くことにも努めていくことが重要である。

このような活動を効率的に推進していくため、本調査の一環として、大学、太陽電池メーカー、自動車メーカー等の専門家により構成される「IEA PVPS タスク 17 に関するワーキンググループ」を編成し、様々な議論を行うとともに、助言をいただいた。

2. 実用化・事業化見通し

本調査研究は、「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」プロジェクト推進に資するため実施している。本調査研究を通じて得られた成果は、発電コスト 7 円/kWh の実現に向けた技術開発、ならびに今後の太陽光発電技術開発の方向性に関する検討に資することが期待される。

本調査研究では、従来の太陽光発電に関する各種情報収集・分析および発電コストに関する分析を毎年実施するとともに、太陽光発電の新市場を検討する上で、各市場のポテンシャル、導入量および CO₂ 排出量削減効果を具体的に試算し、将来の技術開発分野の方向性を検討した。また、シナリオ分析の中では、市場動向や制度動向等を踏まえ、太陽光発電の可能性について議論し、今後の太陽光発電の方向性を検討した。本調査研究における内容は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が開催した太陽光発電開発戦略委員会において議論され、次期 PV Challenges の内容について検討がされた。

また、太陽光発電システム搭載自動車に関する調査では、太陽光発電システム搭載自動車検討委員会を運営し、当委員会で議論した、太陽光発電システム搭載自動車の付加価値および取得日射量に関する予備的検討に関する中間報告の和文および英文で公開し、国際的な普及啓発につなげた。さらに、IEA PVPS において新タスク Task17 : PV and Transport の立ち上げおよび運営を支援した。

3. 波及効果

本調査研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の指導のもと経済産業省資源エネルギー庁とも情報共有して進められ、我が国の太陽光発電産業の今後の方針決定に寄与している。例えば、2016年8月から経済産業省で開催された太陽光発電競争力強化研究会の準備として、太陽光発電のコスト低減に向けた課題の検討や、様々なコスト低減シナリオの設定と試算を実施した。

太陽光発電システム搭載自動車に関する調査では、IEA PVPS において Task17 : PV and Transport が設立され、我が国のみならず、国際的に運輸部門の環境負荷低減を推進する取り組みに貢献している。また、今年度から NEDO 事業でも新たな技術開発が立ち上げられ、今後の太陽光発電開発戦略の具体的な一分野として、国内でも開発が進められていく予定である。

4. 今後の展開

我が国では、太陽光発電の導入普及および主力電源化に向けて、様々な新たな克服すべき課題が出現してきている。本調査研究内容を踏まえ、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が設置した太陽光発電開発戦略委員会の中で、太陽光発電の現状分析および太陽光発電の価値、太陽光発電の目指すべき

方向性などが議論された。これらの成果を踏まえ、今後 NEDO 次期 PV Challenges がまとめられ公開される予定である。

「太陽光発電システム搭載自動車」において立ち上げ・運営支援した IEA PVPS のタスク 17 は、2018 年 10 月に第 1 回専門家会議（キックオフ会議）を開催し、2021 年中庸までの 3 ヶ年の活動予定であり、引き続き国際的な普及、啓蒙に向けて研究が実施される。太陽光発電の世界的な導入拡大のため、個々のタスク活動のみならず、タスク同士の連携・協力によって有意な成果を導き、PVPS としての活動やその成果を日本ならびに世界に対して積極的に発信していくことも重要である。日本は、タスク 0A 国としてこの使命も担い、活動推進のリーダーシップを発揮していくことが必要となる。

5. 特許論文リスト

	2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	合計
研究発表・講演 (うち国際会議)	0	1(1)	1(1)	3(3)	2(2)	7(7)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	1	1

(2020 年 08 月 31 日現在)

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	佐藤 貴文	みずほ情報総研株式会社	The Potential of On-Board PV for Electrified Vehicles to Reduce Lifecycle CO2 Emissions	Poster session on PV systems, deployment and grid integration: PVSEC-26 (シンガポール) : ポスター発表	2016 年 10 月
2	河本 桂一	みずほ情報総研株式会社	PV Installed on EV Reduces Well-to-Wheel CO ₂ Emissions and Has Generation Potential to Realize Charge-Free EV	Poster session on PV systems, PV Systems Including BOS Components: PVSEC-27 (日本: 大津) : ポスター発表	2017 年 11 月
3	河本 桂一	みずほ情報総研株式会社	Towards PV-based e-mobility 'PVPS Task17: PV and Transport'	7 th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion: IEA PVPS Workshop 'PV enablers from PVPS perspective: what will drive the PV market in the coming years?' (米国: ワイコロア) : 口頭発表	2018 年 6 月
4	河本 桂一	みずほ情報総研株式会社	PV and Transport: How PV Can Contribute to Transport?	Grand Renewable Energy 2018 International Conference and Exhibition (横浜) : ポスター発表	2018 年 6 月
5	河本 桂一	みずほ情報総研株式会社	Realizing PV-Powered Mobility, 'PVPS Task17: PV and Transport'	35 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: Solar Mobility Forum (ベルギー: ブリュッセル) : 口頭発表	2018 年 9 月
6	河本 桂一	みずほ情報総研株式会社	Expected Benefits of PV-Powered Vehicles	InterSolar Europe 2019 (ドイツ: ミュンヘン) : 口頭発表	2019 年 5 月
7	河本 桂一	みずほ情報総研株式会社	PVPS Task17: PV and Transport	36 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: Solar Mobility Forum (フランス: マルセイユ) : 口頭発表	2019 年 9 月

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	みずほ情報 総研株	自動車等への太陽光発電利用に向けた動き	PVTEC ニュース No. 83 (太陽光発電 技術研究組合 発 行)	2019年11月

【参考文献】

- III-1 IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2019, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2018, Report IEA-PVPS T1-36: 2019, 2019年
- III-2 IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2018, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2017, Report IEA-PVPS T1-34: 2018, 2018年
- III-3 IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2017, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2016, Report IEA-PVPS T1-32: 2017, 2017年
- III-4 IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2016, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015, Report IEA-PVPS T1-30: 2016, 2016年
- III-5 IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2015, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014, Report IEA-PVPS T1-27: 2015, 2015年
- III-6 IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2016, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2013, Report IEA-PVPS T1-25: 2014, 2014年
- III-7 IEA PVPS : Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2016, Report IEA-PVPS T1-31: 2017, 2017年
- III-8 資源エネルギー庁：再生可能エネルギー発電設備の導入状況（各報）および公表データ
(http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/index.html)
- III-9 株資源総合システム：太陽光発電マーケット2007、2007年7月
- III-10 株資源総合システム：太陽光発電マーケット2007、2007年7月
- III-11 株資源総合システム：太陽光発電マーケット2015、2015年7月
- III-12 株資源総合システム：太陽光発電マーケット2016、2016年6月
- III-13 株資源総合システム：太陽光発電マーケット2017、2017年6月
- III-14 株資源総合システム：太陽光発電マーケット2018、2018年6月
- III-15 株資源総合システム：太陽光発電マーケット2019、2019年7月
- III-16 独立行政法人（現、国立研究開発法人）新エネルギー・産業技術総合開発機構：太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）、2014年9月
- III-17 資源エネルギー庁：第49回調達価格算定委員会資料1（2019年11月5日）
- III-18 IEA PVPS : National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2018, 2019年
- III-19 発電コスト検証ワーキンググループ：長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告、平成27年5月
- III-20 IEA : World Energy Outlook 2019, 2019年
- III-21 NEDO : 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書、平成30年1月
(<https://www.nedo.go.jp/content/100873452.pdf>)
- III-22 NEDO : 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書（2）「太陽光発電システム搭載自動車の取得日射量に関する予備的検討」、平成31年4月
(<https://www.nedo.go.jp/content/100892361.pdf>)
- III-23 K. Komoto, Realizing PV-Powered Mobility ‘PVPS Task17: PV and Transport’, Solar Mobility Forum at the 35th EU-PVSEC, Brussels, Belgium, Sep. 2018

III-24 K. Komoto, IEA PVPS Task17: PV and Transport, Solar Mobility Forum at the 36th EU-PVSEC, Marseille, France, Sep. 2019

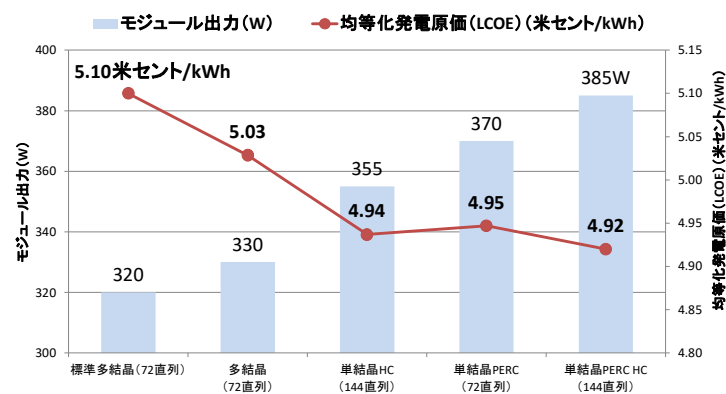
B 発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査（株式会社資源総合システム）

1. 成果詳細

1.1 太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性および産業競争力に関する動向調査

発電コスト低減目標達成に向け、現状の発電コストを把握するため、太陽光発電システム設置コスト内訳について調査・分析を行った。2019年の日本における太陽電池モジュール価格の比率は、住宅用では約59%、非住宅用では低圧で約48%、高圧で約35%、特高で約31%となり、費用内訳のうち最も多くの割合を占めた。

太陽電池モジュール製品の競争力の軸足は、「モジュールの低価格化」から「太陽光発電システムの発電コスト低減への貢献」が指標となりつつある。大手太陽電池製造企業では、高性能太陽電池モジュールにより、発電コスト＝均等化発電原価（LCOE）の低減と太陽光発電投資に対する内部収益率（IRR）の向上を実現できると提案している。図III-2-(へ)-B-1にJinkoSolar社が試算した50MW規模の太陽光発電所における太陽電池モジュール出力とLCOEの関係を示す。



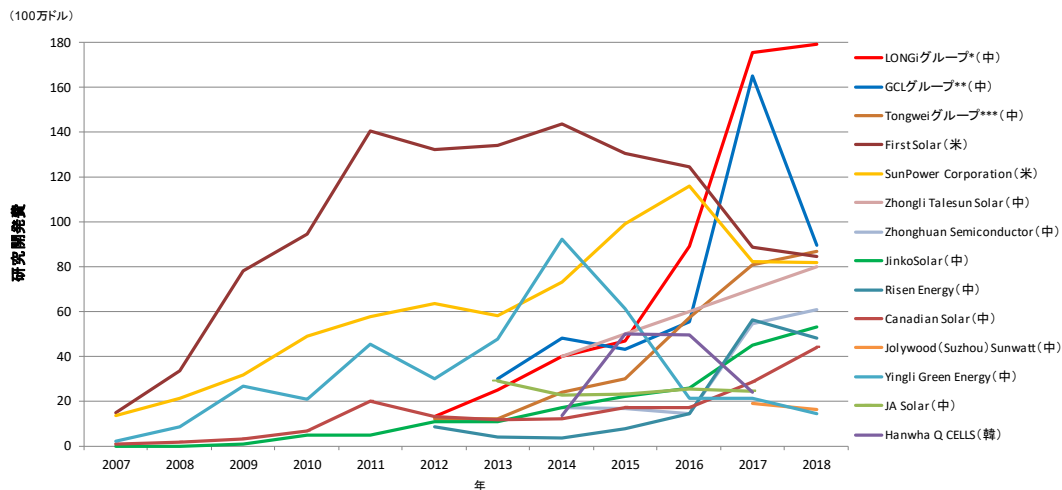
図III-2-(へ)-B-1 JinkoSolar社による高性能結晶シリコン太陽電池モジュール性能の発電コストへの影響分析（2018年現在）

世界における太陽電池モジュール技術および産業の現状は、表III-1に示すとおりである。また太陽電池モジュールに関する産業競争力を分析・評価するため、ベンチマークとして代表的な太陽電池製造企業の生産・供給、技術研究開発、商品展開、業績の状況など事業内容の整理および比較を行った。技術力については、図III-1に示す海外各社の研究開発費も調査した。従来はバックコンタクト型結晶シリコンやCdTe太陽電池製造する米国企業の研究開発費が高い水準であったが、ここ数年で汎用的な結晶シリコン系太陽電池を製造し、急速に事業規模を拡大させている中国系企業の研究開発費が増加している。

更に、発電量、発電コストに直結する太陽電池モジュールの長期信頼性（性能劣化および故障、耐久性等）に関しても、研究開発動向や国際標準化の動向について調査した。投資家や事業者が太陽電池モジュールの信頼性を判別するために、ノルウェー・DNV GLと米・PV Evolution Lab (PVEL)などの民間企業が有力メーカー製太陽電池モジュールの第三者評価を独自に行い、ユーザーに役立つように信頼性評価試験結果を公表する動きが継続して進められている。昨今では大量生産とコストダウンにより世界的にシェアを拡大した中国企業も、信頼性の向上や国際標準化に積極的に取り組んでいる。

表Ⅲ-2-(へ)-B-1 各種太陽電池の性能・供給力・市場価格の現状（2018年、2019年）

太陽電池材料		性能（変換効率）（%）			生産量（2018年）（GW）		生産能力（2018年末）（GW/年）		モジュールスポット平均価格（米セント/W、2019年12月末現在）
		市販モジュール（セル）（2019年末現在）	研究開発（最高値）（2020年2月現在）		セル	モジュール	セル	モジュール	
			セル	モジュール					
全体		—			115	116	172	184	—
結晶シリコン	単結晶	18～22 (20～24)	26.7 (HBC) 25.2 (IBC) 25.11 (SHJ) 26.1 (POLO/IBC) 25.8 (TOPCon) 24.4 (PERC)	24.5 (HBC) 24.1 (IBC) 22.5 (HIT) 22.5 (TOPCon) 22.4 (PERC)	53.5	54.0	78.7	84.2	21～30
	多結晶	16～18 (18～20)	22.8 (PERC) 23.3 (TOPCon)	20.4 (PERC) 5	58.0	58.4	85.2	91.3	19～22
薄膜系	薄膜Si	9	14.0	13.4	0.02		0.1		24
	CIGS系	15～17	23.4	19.8 (7×5cm) 18.6 (1.08m ²)	0.8		2.1		
	CdTe	17～18	22.1	19.0	2.8		5.9		
多接合（III-V）	非集光	—	39.2 (6接合)	31.2 (3接合)	0.01		0.5		—
	集光型	32	47.1 (6接合) 44.4 (3接合)	38.9 (4接合)					—

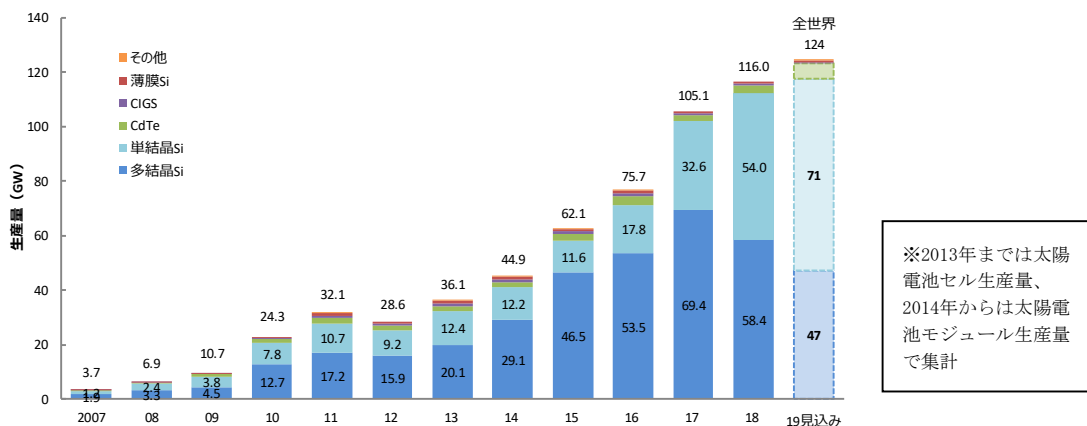


図Ⅲ-2-(へ)-B-2 代表的な太陽電池製造企業における年間研究開発費の推移（2007～2018年）

1.2 太陽電池モジュール製造技術開発と製造コストに関する調査

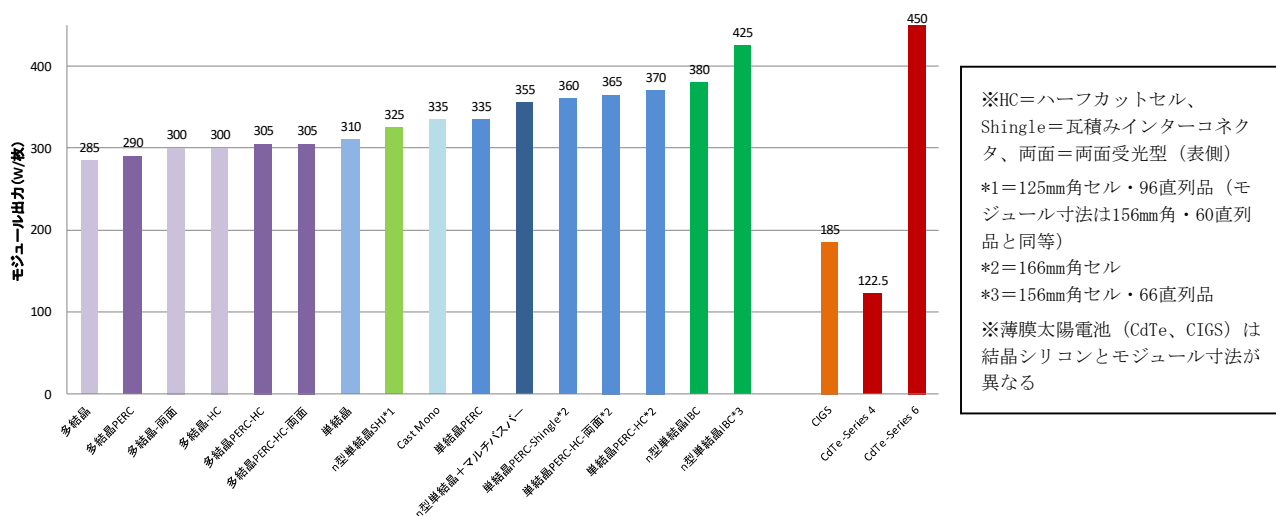
現在市場で主に流通している結晶シリコンおよび化合物系薄膜（CIGS系、CdTe）太陽電池に焦点を当て、太陽電池モジュール製造技術の現状と今後の展望、最新の研究開発の取組み、製造コストについて調査した。世界の太陽電池種類別生産量の推移を図Ⅲ-2-(へ)-B-3に示す。2019年は結晶シリコン系が全体の約95%を占めたと推定される。太陽電池の生産拡大は、安価で増産に適した多

結晶シリコン・ウエハーの供給と高品質化により、これまで主に多結晶シリコンを中心に発展してきた。2016年以降は、太陽光発電の発電コスト（LCOE）の低減のために、シリコン・ウエハーの供給拡大と低コスト化、太陽電池の高性能化が進んだ単結晶シリコンの市場シェアが拡大傾向となっている。2019年には単結晶品の市場シェアが2007年以降初めて過半数を超え、多結晶品を逆転したとみられる。



図Ⅲ-2-(へ)-B-3 世界の太陽電池生産量推移 (種類別、2020年2月現在)

結晶シリコン太陽電池では、汎用太陽電池において通常のA1-BSFセルからPERCセルへのプロセス転換が進み、PERC系のシェアは2015年の約8%から2019年には約50%程度まで増大している。ポストPERCセル技術としてヘテロ接合型、パッシベーションコンタクト技術の一つであるTOPCon型の量産技術の開発も進んでいる。ヘテロ接合型は、GW/年レベルでの商業生産参加が10数社で計画され、2019年には中国、シンガポール、欧州で商業生産が開始された。結晶シリコン太陽電池ではシリコン・ウエハーの大型化と多品種化も大きな技術トレンドとなっている。2019年には、業界標準サイズの156.75mm角（M2規格）を大きく上回る210mm角（M12/G12規格）が、中国ウエハーメーカーより発表された。ただし166mm角を超えるウエハーサイズになると、既存の太陽電池製造設備が使用できなくなることや、太陽電池モジュール1枚あたりの重量が増加し、流通や取り扱いに問題が発生する可能性も指摘されており、業界内での規格化や認識の共有が必要であるとの声も上がっている。量産モジュール性能の現状として、各社の代表的太陽電池製品についても調査を行った。図Ⅲ-2-(へ)-B-4に60直列セルおよび相当サイズの代表的機種種の太陽電池モジュール出力の比較を示す。



図Ⅲ-2-(へ)-B-4 量産太陽電池モジュールの代表的機種種の出力比較 (結晶シリコン60直列、2019年)

2020年度以降の技術開発の方向性として、モジュール効率30%超を目指す超高効率太陽電池技術であるⅢ-V族化合物太陽電池とタンデム型太陽電池技術の研究開発動向について調査した。ペロブスカイト太陽電池をトップセルとするタンデム型では、ボトムセルに結晶シリコンを用いたもので2018年以降に数多くの研究機関でセル変換効率27%超が達成された。2020年2月現在、世界最高記録は、独・ヘルムホルツ・ベルリン物質・エネルギー研究センター（HZB）による29.2%である。実用化および事業化に向けては、英・Oxford PVが先行している。同社は、ドイツ工場においてパイロット生産ラインを構築、2019年7月にパイロット生産を開始しており、2020年末までに250MW/年での量産開始を計画している。CIGSとペロブスカイトの薄膜タンデム型太陽電池では、セル変換効率24%超が達成されている。

一方、薄膜系太陽電池では、CIGS系はナトリウム効果や表面硫化効果、カリウム処理やGa含有量の調整などの技術的なブレークスルーにより、1cm²程度の小面積ではあるが23.35%（世界最高、CIS、Cdフリー、日・ソーラーフロンティア）、22.9%（CIGS、独・Solibro）、22.6%（CIGS、独・ZSW）、21.0%（CIGS、独・Solibro）と、開発面で21%を超えるセル変換効率が2014年以降次々と達成されている。CIGS系太陽電池では、基板に樹脂やステンレス基板を用いてフレキシブル化する開発が活発化している。フレキシブル型では2019年に、スイス・EMPAが20.8%を達成したと発表したほか、中・Hanergy傘下の米・MiaSoleが20.56%を達成した。CdTe太陽電池については、米・First Solarが研究開発と製造面で世界をリードしている。セル変換効率の世界記録は同社が2015年に達成した22.1%に留まるが、モジュールレベルでは自社の世界記録を2019年に更新、19.9%を達成した。量産性能についても大面積のシリーズ6で18%超を達成しており、性能面で結晶シリコン系太陽電池に迫るレベルとなっている。

世界の太陽電池モジュール価格は2017年末の0.354ドル/Wから、2018年末には0.244ドル/Wへと約30%低下した。2009年から2018年の間では、W価格は90%低下している。汎用的な単結晶シリコン太陽電池モジュールの製造コストは、2018年の1.44元/W（約0.21ドル/W）から2019年には約1.31元/W（約0.19米ドル）まで低下している。最も意欲的な製造コストの見通しとして、中国太陽光発電産業連盟（CPIA）の技術ロードマップにおいて、2020年に1.22元/W、更に2025年には0.97元/Wまでコスト低減する見通しが示されている。

1.3 太陽電池モジュールの利用動向と今後の市場と産業の可能性に関する調査

太陽光発電市場が拡大する中、実利用環境下において発生している太陽電池モジュールの不具合や災害等への対応策に関する技術開発動向について、最新の研究論文等を調査した。また、今後市場の創出や拡大が想定される新たな利用環境や応用用途に対応する太陽電池モジュールの研究開発および実用化動向についても調査を行った。荷重や形状に制限のある建物や構造物、移動体など新たな応用を可能にする太陽電池の軽量・フレキシブル化が世界各国の研究機関や企業で模索されている。化合物や有機系の薄膜系だけでなく、結晶シリコン系太陽電池でも軽量かつフレキシブルな太陽電池モジュールの製品化に向けた技術開発が、欧州研究機関や日本・中国企業を中心に進められようとしている。

太陽電池モジュールの今後の需要動向を探るため、各機関より発表されている太陽光発電市場（地域および用途別）の見通しについて調査した。太陽光発電システムの最大市場は中国で、米国やインド、日本、欧州が主要市場となっているが、太陽電池モジュール並びに太陽光発電システムの価格低下が急速に進み、太陽光による発電コストが低下していることから、中東、東南アジア、中南米などの新興市場でも導入拡大が誘発されている。用途別では、国際エネルギー機関（IEA）が発表した2024年までの世界の年間導入量見通しによると、電力事業規模の集中形が最大で安定的に推移し、商業用が徐々に増え均衡していくが、2024年には集中形の比率が再び増加し6割強となる。米国市場でも2024年までは電力事業用が全体の6割程度を占める見通しが示されている。最大市場となっている中国においては、2018年に地上設置型大規模システムが市場（年間導入量）の5割強を占めたが、2025年には7割まで徐々に比率が増加する見通しが発表されている。さらに中国の2050年までの超長期見通しにおいては年間700GW程度が想定されている。気候変動抑制に向けた脱炭素政策もあり電力事業用が6~7割を占めるが、建物等に設置する分散型システムも4割程度まで増えるとの見通しが示されている。産業については、地域別の太陽電池生産拠点の新設・設備拡張計画について調査した。大手企業による中国国内で高効率品へのシフトを進めるための新

技術導入のほか、新興中国企業による年産 GW レベルの拡張計画が相次いでいる。生産拠点は、新興市場での現地生産、貿易摩擦への対応等からマレーシアなどの東南アジア、米国など中国以外へも広がっている。2018 年頃から生産回帰が提言されている欧州地域でも設備投資計画が発表されており、今後生産拠点が広がる可能性がある。

1.4 各国の太陽電池研究開発政策動向及び新たな太陽電池技術に関する調査

1.4.1 主要国における太陽電池研究開発動向に関する調査

海外主要国における太陽電池の研究開発政策動向を調査し、研究開発戦略や予算等をまとめた。米国では SunShot 計画から現行プログラムへの転換期にある。2020 年 2 月には、「太陽エネルギー技術局 (SETO) 2020 年度支援プログラム (SETO 2020)」が発表された。欧州では、太陽電池生産量の回復に関する議論がなされ、「10GW グリーンファブ計画」が打ち出された。中国では第 13 次 5 ヶ年計画 (2016~2020 年) の目標達成に向けて、太陽電池の研究開発を企業主導で進めている。2019 年 11 月に政府が公布した「産業構造調整指導目録」では、奨励すべき産業として各種太陽電池が選定された。主要各国における太陽電池技術開発戦略を体系的かつ明確に比較・分析できるよう、研究開発の目標、重点事項、予算規模、普及施策、産業保護施策等について表 III-2-(へ)-B-2 において比較した。

表 III-2-(へ)-B-2 主要国における太陽光発電研究開発状況のまとめ (1/2)

項目	米国	欧州連合 (EU)	ドイツ	中国	韓国	日本
研究開発の目標	<p>太陽エネルギー技術開発目標</p> <ul style="list-style-type: none"> 2030年の均等化発電原価(LCOE): 住宅用: 5セント/kWh、商用: 4セント/kWh、電力事業用: 3セント/kWh 	<p>SET計画 太陽光発電実行計画 (PV IP)</p> <ul style="list-style-type: none"> 太陽電池モジュール変換効率: 2020年に2015年比で20%以上向上、2030年に少なくとも35%向上 システムコスト: 2020年に2015年比で20%以上削減、2030年に少なくとも50%削減 太陽電池モジュール寿命: 2020年に30年、2025年に35年 ライフサイクル環境影響を最小化 	<ul style="list-style-type: none"> 課題を特定しているが、目標は設定していない 	<p>第13次5ヶ年計画における2020年目標</p> <ul style="list-style-type: none"> 結晶シリコ 23%以上、薄膜: 効率向上 コスト: 2015年比50%以上低減、グリッドパリティ達成 分散型太陽光発電、農地や養殖池への設置、電力系統整備、トップランナープログラム推進、貧困緩和プロジェクトの推進、ハイブリッド型マイクログリッド 	<p>第4次エネルギー技術開発計画</p> <p>太陽電池モジュールのコストを2019年の23米セント/Wから2030年までに10米セント/Wへ低減すること、2030年までに太陽電池セル変換効率を35%、モジュールの変換効率を24%とする目標</p>	<p>太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges)</p> <p>2025年</p> <ul style="list-style-type: none"> モジュール変換効率: 結晶Si 25%、薄膜Si 18%、CIS系 25%、化合物系 40% シリコン消費原単位: 3g/W 寿命: 30年 (2020年)
研究開発の重点 (2019年)	<ul style="list-style-type: none"> 結晶シリコン太陽電池、CdTe太陽電池、ペロブスカイト太陽電池、④タン 	<ul style="list-style-type: none"> 高性能な太陽電池技術 技術革新と製造革新の実証 GW規模、高発 	<ul style="list-style-type: none"> 結晶シリコンの性能向上、効率的プロセス技術 新太陽電池材料や太陽 	<p>エネルギー技術革新第13次5ヶ年計画</p> <ul style="list-style-type: none"> 高効率低コストの太陽電池、大規 	<ul style="list-style-type: none"> コスト低減と高効率化、超高効率電池の産業化 基盤整備: 	<ul style="list-style-type: none"> 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発: ヘテロ接合結晶シリコン太

	デム構造及び多接合構造等 ・製造の革新技術 ・システムインテグレーション、BOS、AI応用	電量スループト及び高効率パイロットラインレベルでの革新的なソリューション実証 ・建材一体型太陽光発電(BIPV)	電池セル構造(例:タンデムペロブスカイト) ・太陽電池部材やシステムの品質・信頼性 ・システム技術 ・BIPV、車載型太陽光発電プロジェクト(ViPV) ・リサイクルなど	模太陽光発電所の設計、建設、O&M、集中管理技術 ・CIGS、CdTe、薄膜シリコン太陽電池、大面積・フレキシブル薄膜量産技術、III-V族化合物、タンデム型、直流電力系統、DC/DCコンバータ、インバータ等	認証制度、テストベッド設立、スマート・グリッドの実証 ・気候変動対策の重点技術:結晶シリコン、CIGS、ペロブスカイト、有機薄膜、色素増感型太陽電池	陽電池、CIS、ペロブスカイト、タンデム型、多接合 ・高効率GaAs太陽電池車載実証 ・太陽光発電システム長期安定電源化基盤技術開発:傾斜地、営農、水上 ・リサイクル
--	---	---	---	---	---	--

表III-2-(へ)-B-2 主要国における太陽光発電研究開発状況のまとめ (2/2)

項目	米国	欧州連合(EU)	ドイツ	中国	韓国	日本
研究開発太陽電池技術*1	ポリシリコン、ウエハー	△	△	△	○	△
	結晶Si太陽電池	○	○	○	○	○
	CIGS太陽電池	○	○	○	○	○
	CdTe太陽電池	○	△	△	○	-
	III-V多接合太陽電池	○	○	○	○	○
	ペロブスカイト	○	○	○	○	○
	有機太陽電池	△	△	△	△	○
	信頼性 BIPV	○ △	○ ○	○ ○	○ △	○ ○
2018年予算規模*2	2億4100万ドル(26.3億円)	不明	7825万ユーロ(95.5億円)	不明	670億ウォン(67.4億円)	54億円(経済産業省予算)
普及施策	<ul style="list-style-type: none"> 税額控除制度(ITC)、加速償却 各州の再生可能エネルギーポートフォリオスタンダード(RPS制度) 	<ul style="list-style-type: none"> 2030年までの再エネ導入計画提出を加盟国に義務付け 自家消費を推進 	<ul style="list-style-type: none"> フィードイン・タリフ(FIT)/入札 集合自家消費制度 小規模太陽光発電システム所有者への蓄電池補助金 	<ul style="list-style-type: none"> 入札制度/分散型補助金 トップランナープログラム(入札) 貧困撲滅プログラム 	<ul style="list-style-type: none"> RPS制度 小規模システム向けFIT制度 	<ul style="list-style-type: none"> 固定価格買取制度(FIT)/入札
産業保護施策	<ul style="list-style-type: none"> 中国・台湾製品への関税 	<ul style="list-style-type: none"> なし(中国製品への関) 	<ul style="list-style-type: none"> 欧州連合(EU)の施策 	<ul style="list-style-type: none"> 米国製及び韓国製ポリ 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし 	<ul style="list-style-type: none"> 特になし

	<ul style="list-style-type: none"> ・セーフガード関税 ・対中制裁関税 	税と最小価格協定は2018年9月に廃止)	に準じる	シリコンに対する関税		
産業育成に資する施策及び取組み	<ul style="list-style-type: none"> ・保護施策により米国における生産能力の向上を狙う 	<ul style="list-style-type: none"> ・エコラベル（低カーボンフットプリント製品）推進 ・GWグリーンファブ構想 	<ul style="list-style-type: none"> ・GWグリーンファブ構想 	<ul style="list-style-type: none"> ・トップランナー制度（変換効率出力要件を設定） ・参入要件を策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・低カーボンフットプリント製品の優遇を計画 	

*1:○重点化技術、△取組みは実施しているが、重点ではない、空欄 取組みはほとんど実施されていない

*2:換算レート：2019年平均値（1ドル=109.05円、1ユーロ=122.07円、1ウォン=0.1006円）

1.4.2 新たな太陽電池モジュール技術の開発動向に関する調査

新たな太陽電池技術として、市場の9割のシェアを占める結晶シリコン太陽電池モジュールでは、性能向上のため様々なモジュール技術が開発されている。トレンド技術として、シリコン・ウエハーの大型化（～210mm角）、両面受光（発電）型（Bifacial）、両面ガラス、瓦積み（ShingleあるいはShingling）などの各種セル間接続（インターコネクション）技術、ハーフカットセル、マルチバスバー（MBB）などの開発と製品への技術導入が進められている。これまで先進的な太陽電池関連技術のほとんどが欧米で開発されてきたが、最近では中国で初めて開発された技術も登場している。また今後実用化が期待される太陽電池技術として、ペロブスカイト太陽電池（Perovskite Solar Cell：PSCまたはPVK）、有機薄膜太陽電池（OPV）、色素増感型太陽電池（DSSC）の開発状況について調査した。このうち特に、低コスト・高効率・軽量・フレキシブル等の特長により次世代太陽電池として最も期待されているペロブスカイト太陽電池の研究開発動向と実用化に向けた取組みについて詳細な調査を実施した。ペロブスカイト太陽電池の高性能化については、欧米日、韓国、中国を中心に研究開発が急速に進展している。ペロブスカイト太陽電池の小面積での高効率化では、韓国、中国が世界をリードしている。2019年には、韓国化学技術研究所（KRICT）と米・マサチューセッツ工科大学（MIT）の研究グループと韓・高麗大学校が、セル変換効率25.2%を達成し、目標とされていたセル変換効率25%超が各種改善により達成された。モジュールレベルでは、小面積ながら世界最高となる20.7%を東京大学が達成した。パナソニックは30cm角レベルの世界最高記録16.09%を、また、1,000cm²超のサイズでは中国企業が14%超を達成した。欧州ではペロブスカイト太陽電池の研究開発共同プラットフォーム「European Perovskite Initiative（EPKI）」が2019年5月に発足し、表Ⅲ-2-(へ)-B-3に示す変換効率や耐久性加速試験を目安とする技術ロードマップが策定された。EPKIでは、欧州の太陽光発電産業の唯一の機会として、大学、研究機関、企業間の共同研究による相乗効果を促進していくことを目指している。EPKIには、2019年9月現在で19ヶ国、77団体、800名以上の研究者が参加している。中国や欧州企業でパイロット生産ラインの構築が進められ、2020年以降の生産計画が発表されている。ただし、量産化にあたっては特に性能の安定化（I-Vヒステリシス、生産分布、熱や光による劣化、長期信頼性）の課題を克服する必要がある。

表Ⅲ-2-(へ)-B-3 European Perovskite Initiative (EPKI) 白書におけるペロブスカイト太陽電池の変換効率及び耐久性に関するロードマップ

種類	項目	年	2020	2022	2024	2026	2028	2030
単接合 (ガラス基板)	変換効率 (%)	研究セル	25	26.5	28	29	30	30.5
		モジュール (≥ 100 cm ²)	17	19	21	23	25	26
	加速試験 ※1	モジュール (≥ 100 cm ²)	IEC	IEC条件の2倍	IEC条件の3倍	-	-	-
多接合 (ガラス基板)	変換効率 (%)	研究セル	25	27	30	32	33	34
		モジュール (≥ 100 cm ²)	15	18	21	24	27	29
	加速試験 ※1	モジュール (≥ 100 cm ²)	-	IEC	IEC条件の2倍	IEC条件の3倍	-	-
結晶シリコン/ペロブスカイトタンデム型太陽電池 (ガラス基板)	変換効率 (%)	研究セル	28	30	31	33	35	36
		モジュール (≥ 100 cm ²)	25 (4~6セル)	26~27 (フルスケール)	-	-	-	-
	加速試験 ※1	モジュール (≥ 100 cm ²)	-	IEC	IEC条件の2倍	IEC条件の3倍	-	-
単接合 (フレキシブル)	変換効率 (%)	研究セル	19	21	23	24.5	26	27
		モジュール (≥ 100 cm ²)	10	15	20	21.5	23	24
	加速試験 ※1	モジュール (≥ 100 cm ²)	IEC	IEC条件の2倍	IEC条件の3倍	-	-	-

※1: IEC (国際電気標準会議) 規格の加速試験は、高温高湿試験 (85° C/85% RH)、光照射試験

出典: European Perovskite Initiative (EPKI), “Perovskite-based photovoltaics: A unique chance for European PV-industry, A White Paper from the European Perovskite Initiative” (2019年9月)

2. 実用化・事業化見通し

本調査研究では、NEDOが「太陽光発電開発戦略」で掲げた発電コスト低減目標の達成に向け、同開発戦略に提示されている各種情報をNEDOが逐次最新のものとして資するべく、今後の技術開発の方向性の検討に際して効果的な情報を適宜追加して情報の分析および発信を実施した。さらにNEDOを通じて本調査研究の成果を一般に周知することで、我が国の太陽光発電産業の更なる発展に貢献することが見込まれる。

3. 波及効果

本調査研究では、太陽電池モジュールの製造に関する状況や、諸外国における太陽電池技術の研究開発状況や研究開発政策等の調査・比較分析を実施した。本調査による成果は、NEDO成果報告会での報告、NEDOをはじめとする各所よりの問い合わせ、弊社の各種の調査レポート、コンサルティング、国内外での講演等にも利用され、世界の太陽電池産業および技術の最新動向を示す情報として幅広く活用されている。我が国の今後の技術研究開発の方向性の検討や、国内における太陽光発電の普及政策の立案に際して必要な情報を明示することで、我が国の太陽光発電産業の更なる発展と国際競争力確保、国内市場の健全な発展に貢献することが期待できる。

4. 今後の展開

本調査研究を実施した5年間(2015~2019年)において、太陽光発電市場(年間設備導入量)は約50GWから100GW超の規模へと急拡大した。市場の中心地は世界最大市場である中国や数GW/年を維持しているインド、日本を含むアジア太平洋地域で5年間にわたり最大シェアを維持した。しかしながら2019年には中国市場が前年比大幅減、欧州市場が前年比倍増以上となるなど、各国普及政策により市場環境は急激に変化している。また太陽電池産業についても、世界全体の年間生産量が2015年の約60GWから2019年には約140GWへと倍増以上へと拡大した。中国の生産シェアは

7割を維持し、中国以外の地域では、大手中国企業が市場拡大地域や貿易摩擦を回避できる地域として米国やマレーシアなど東南アジアで生産増強の動きを継続した。中国企業による結晶シリコン太陽電池の製造コストおよび価格が急低下したことや、大規模な地上設置型システムの市場と太陽電池生産量が急拡大したことなどによりコスト競争が激化する中で、欧州や日本の生産シェアは減少した。

世界では、2016年11月のパリ協定発効以降、「脱炭素社会の実現」が大きな潮流となっている。2020年には、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的流行により社会と経済へ停滞と混乱を生じさせている。こうした中、脱炭素化など環境に配慮した持続可能な復興を目指す「グリーン・リカバリー」が新たな方向性として欧州を中心に動き出そうとしている。太陽光発電をめぐるサプライチェーンについても影響が出たことから、欧州では同地域への製造産業の回帰を目指す動きも出てきている。

日本においては、新たなエネルギー政策として「再エネ経済創造プラン」が打ち出され、再生可能エネルギーの導入拡大による経済構築に舵を切ろうとしている。重要なエネルギー源の一つとなり得る太陽光発電については、普及促進を今後も確実かつ健全に推進し、持続的な市場を形成していくことが望まれている。

こうした状況において、積極的な市場拡大策はもちろんのこと、製品レベルでの太陽電池モジュールをはじめとした構成機器の性能やシステムコストの実態、新たな市場や産業を拡大するため様々な応用形態に適した製品や技術の研究開発および市場動向、主要各国の研究開発戦略の方向性を適確に分析し、我が国の技術開発にフィードバックしていくことが不可欠である。そのためにも、今後も定点観測的な調査を継続することで常に最新の状況を把握し、NEDO及びその関係者に周知するとともに、太陽光発電をめぐる市場、産業、技術動向の変化に応じ、新しい方向性を模索しつつ動向調査を実施する予定である。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)	0	0	0	0	0	0
論文	0	0	0	0	0	0
研究発表・講演 (うち国際会議)	0	0	0	0	0	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0	0	0
その他	0	0	0	0	0	0

(2020年08月31日現在)

C IEA PVPS 国際協力事業（株式会社資源総合システム）

1. 成果詳細

1.1 IEA PVPS タスク1の国際協力活動への参加（専門家会議等への参加、国際協力活動への対応）

タスク1専門家会議、タスク1活動に係わるワークショップ及びその活動への参画を通じて、国際協力活動に貢献すると共に各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。2015年度から2019年度までに参加した会議及びワークショップは、下記の通りである。なお、タスク1の日本の専門家メンバーである弊社・貝塚泉は2018年度からはタスク1の副代表を務めており、国際協力活動の遂行に貢献した。

(1) 第44回タスク1 専門家会合（2015年9月1～5日、タイ・バンコク）

第44回タスク1専門家会議に日本の代表としてタスク14専門家である東京大学・荻本和彦特任教授と出席した。今後のIEA PVPSの新たな活動（電力システムへのインテグレーション、電力事業者の関与、新たなビジネスモデル）についてのディスカッション及び審議に参加した。ASEAN POWER WEEKの併催イベントであるIEA PVPSワークショップにおいて我が国の太陽光発電の動向について講演を行った。また、専門家会議及びワークショップにおいて加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。

(2) 第45回タスク1専門家会議（2015年10月26～30日、トルコ・イスタンブール）

第45回タスク1専門家会議及びタスク1&タスク9合同会議に日本の代表として出席した。タスク1の活動方針に沿って、①今後のIEA PVPSの新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（2016年に開催される欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2016）における併催イベントであるIEA PVPSワークショップ及び第26回太陽光発電国際会議（PVSEC-26）におけるIEA PVPSワークショップ）、③タスク1成果物である動向報告書（Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014）の報告と来年以降の対応、④国内調査報告書（National Survey Report of PV Power Applications）の執筆指針、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニューズレター等）、⑥今後のタスク1活動（ショートレポートの作成）等について審議した。タスク1とタスク9の合同会議においては、両タスクにビジネスモデルをはじめとした共通の関心事項があることから、今後も機会があれば合同会議を実施することが決定した。加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。また、我が国の太陽光発電の動向について報告した。トルコ側のホストであったトルコ太陽エネルギー産業協会（GÜNDER）及びタスク1が共催したワークショップにおいて、東日本大震災以降の日本におけるエネルギーの状況と太陽光発電の貢献について講演を行った。

(3) 2015年欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2015）におけるIEA PVPSワークショップ（2015年9月14日、ドイツ・ハンブルグ）

2015年欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2015）において、パラレルイベントとしてタスク1が開催したIEA PVPSワークショップ「競争力、ソフトコストと新たなビジネスの事例」に参加した。同ワークショップ及びその他の併催ワークショップ及び本会議等において、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。IEA PVPSワークショップにおいては、日本における太陽光発電システムのコストの動向について口頭発表を行った。

(4) 第25回太陽光発電国際会議（PVSEC-25）におけるIEA PVPSワークショップ（2015年11月15日、韓国・釜山）

PVSEC-25においてIEA PVPS及びPVSEC-25運営委員会が共催したIEA PVPSワークショップに参加し

た。ワークショップは、IEA PVPSの活動及びタスク1の刊行物であるTrends Reportの紹介を目的としたパートI及び太陽光発電市場の新たなビジネスモデルに関する議論を行うパートIIから構成された。パートIにおいては、Trends Reportの報告に基づいて、産業動向について講演を行い、パートIIにおいては、電力市場の自由化に伴い太陽光発電産業が我が国において開始した新たな事業展開について報告を行った。同ワークショップ及びその他の併催ワークショップ及び本会議において、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(5) 第46回タスク1専門家会議（2016年4月、スペイン・マドリッド及びラス・パルマス・デ・グラン・カナリア）

第46回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。①今後のIEA PVPSの新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（2016年6月に開催される欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2016）におけるIEA PVPSワークショップ等）、③タスク1成果物であるSnapshotレポート及び動向報告書（Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015）の進捗報告と来年以降の対応、④国内調査報告書（National Survey Report of PV Power Applications）の執筆指針、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニューズレター等）、⑥今後のタスク1活動（ショートレポートの作成）等について審議した。併催されたIEA SHC Task 53（New Generation Solar Cooling & Heating Systems）及びIEA PVPS Task 1共同ワークショップ及びカナリー諸島政府・UNEF・IEA PVPS共催ワークショップ及び専門家会議において我が国における太陽光発電の最新動向について講演した。また、加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。

(6) 第47回タスク1専門家会議（2016年10月、オーストラリア・シドニー）

第47回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。タスク1の活動方針に沿って、①今後のIEA PVPSの新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（第26回太陽光発電国際会議（PVSEC-26）におけるIEA PVPSワークショップ等）、③タスク1成果物である動向報告書（Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015）及びSnapshotレポートの進捗報告と2017年以降の対応、④国内調査報告書（National Survey Report of PV Power Applications）の執筆指針、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニューズレター等）、⑥今後のタスク1活動（ショートレポートの作成）等について審議した。さらに、新たな活動課題として、日本が提案するPV for Transportationについてディスカッションを行った。加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。また、我が国の太陽光発電の動向についてタスク1専門家会議及びオーストラリア太陽光発電研究所（APVI）及びタスク1が共催したワークショップにおいて講演を行った。

(7) 2016年欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2016）におけるIEA PVPSワークショップ（2016年6月、ドイツ・ミュンヘン）

2016年欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2016）において、パラレルイベントとしてタスク1が開催したIEA PVPSワークショップ「競争力、ソフトコストと新たなビジネスの事例」に参加した。同ワークショップにおいて日本のタスク1専門家として日本における住宅用太陽光発電システムと蓄電池について講演を実施した。同ワークショップ及びその他の併催ワークショップ及び本会議等において、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(8) Intersolar Middle East 2016におけるIEA PVPSワークショップ報告（2016年9月）

中東地域における主要な国際会議であるIntersolar Middle East 2016において開催されたIEA PVPSワークショップ「電力会社の役割と中東の砂漠気候に代表される過酷環境における太陽光発電の長期信頼性」に関するワークショップに参加し、中東・北アフリカ（MENA）地域における太陽光発電の動向について調査を実施した。

(9) 第26回太陽光発電国際会議 (PVSEC-26) におけるIEA PVPSワークショップ (2016年10月シンガポール)

PVSEC-26においてIEA PVPS及びPVSEC-26運営委員会が共催したIEA PVPSワークショップ「建築物における太陽光発電：将来の競争力とポテンシャル」に参加した。ワークショップでは、太陽光発電の競争力、自家消費導入モデルの成功要因、建物一体型太陽光発電 (BIPV) のポテンシャルとBIPVモジュール、各国での建物への応用事例について広範な課題について議論した。本ワークショップには、タスク1専門家のほかに、タスク15、タスク9及びタスク14専門家が参加した。また、主催国であるシンガポールより、住宅開発局 (HDB) 及びシンガポール太陽エネルギー研究所 (SERIS) が参加した。ワークショップでは、日本での住宅太陽光発電システムの動向についてタスク1専門家として講演した。同ワークショップ及びその他の併催ワークショップ及び本会議において、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(10) 第48回タスク1専門家会議 (2017年4月、イタリア・ローマ)

第48回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。タスク1の活動方針に沿って、①今後のIEA PVPSの新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画IEA PVPSワークショップ、Modeling Workshop)、③タスク1成果物である動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2016) の計画及びSnapshotレポートの報告、④国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications) の執筆指針、⑤広報活動 (ウェブサイト、ワークショップ及びニューズレター等)、⑥今後のタスク1活動 (ショートレポートの作成) 等について審議した。さらに、新たな活動課題として、日本が提案するPV for TransportationについてNEDOの草案に基づいてディスカッションを行った。また、国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) との協力活動について審議した。加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。

(11) 第49回タスク1専門家会議 (2017年10月、チリ・サンチャゴ及びアントフォーガスタ)

第49回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。タスク1の活動方針に沿って、①今後のIEA PVPSの新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画 (PVSEC-27等)、③タスク1成果物である動向報告書 (Trends Report) 及びSnapshotレポートの進捗報告と2017年以降の対応、④国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications) の執筆指針、⑤広報活動 (ウェブサイト、ワークショップ及びニューズレター等)、⑥今後のタスク1活動 (ショートレポートの作成) 等について審議した。さらに、加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。また、我が国の太陽光発電の動向についてタスク1専門家会議において報告した。また、専門家会議に際して共催されたGENRA2017における太陽光発電ワークショップ (サンチャゴ) 及びENERSOLワークショップ (アントフォーガスタ) において講演を行った。

(12) 2017年欧州太陽光発電国際会議 (EUPVSEC 2017) におけるIEA PVPS/国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) 共催ワークショップ (2017年9月、オランダ・アムステルダム)

2017年欧州太陽光発電国際会議 (EU PVSEC 2017) において、パラレルイベントとしてタスク1がIRENAと共催したIEA PVPSワークショップ「新たな太陽光発電の応用」に講演者として参加した。同ワークショップにおいて日本を含むアジアにおける太陽光発電システムの導入動向及び産業動向について講演を実施した。また、EUPVSEC 2017本会議及びその他のイベントにおいて、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(13) 第27回太陽光発電国際会議 (PVSEC-27) におけるIEA PVPSワークショップ (2017年11月滋賀県・大津市)

PVSEC-27においてIEA PVPS及びNEDO、PVSEC-27運営委員会が共催したIEA PVPSワークショップ「PV and Transport」及び「PV for Sustainability」の事務局業務を遂行すると共に、同ワークシ

ヨップにIEA PVPS専門家として参加した。さらに本会議において、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(14) 第50回タスク1専門家会議（2018年4月、マレーシア・クチン）

第50回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。①今後の活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（第7回太陽光発電世界会議（WCPEC-7）及び欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2018）におけるIEA PVPSワークショップ等）、③タスク1成果物であるSnapshotレポート及び動向報告書（Trends Report）の進捗報告と今後の計画、④国内調査報告書（National Survey Report of PV Power Applications）における調査事項及び執筆指針の確認、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニュースレター等）、⑥今後のタスク1活動（ショートレポートの作成）等について審議した。同会議においては、農業及び漁業への応用、水上設置等について検討することになった。電力システムにおける太陽光発電の貢献、持続可能な市場と産業、自家消費、再エネにおける太陽光発電の価値等を考慮して活動を実施していく方針が決定された。加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。併催イベントの第4回国際持続可能エネルギー・サミット（ISES）においてタスク1専門家として講演を実施した。

(15) 第51回タスク1専門家会議（2018年9月、ベルギー・ブリュッセル）

第51回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。タスク1の活動方針に沿って、①今後のIEA PVPSの新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（EU PVSEC 2019及び2019年に開催される国際会議（PVSEC-29）等）、③タスク1成果物である動向報告書（Trends Report）及びSnapshotレポートの進捗報告と2018年以降の対応、④国内調査報告書（National Survey Report of PV Power Applications）の執筆指針、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニュースレター等）、⑥今後のタスク1活動（ショートレポートの作成）等について審議した。さらに、加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。また、我が国の太陽光発電の動向についてタスク1専門家会議において報告した。

(16) 第7回太陽光発電世界会議（WCPEC-7）におけるIEA PVPSワークショップ（2018年6月、米国・ハワイ州ワイコロア）

第7回太陽光発電世界会議（WCPEC-7）において、パラレルイベントとしてIEA PVPSワークショップを開催した。同ワークショップは、①結晶シリコン太陽電池モジュールのリサイクリングの研究開発ロードマップ、②太陽光発電市場の発展のための見通し分析、③将来における市場及び産業のドライバーから構成された。開催にあたっては、IEA PVPS公式リエゾンとして会期前にWCPEC-7委員長、プログラム委員長との渉外を行い、タスク1、タスク12専門家と共にAgendaを起案した。2014年11月に京都において開催されたWCPEC-6でのPVPSワークショップに継続して開催できたことで、とくにアジア・太平洋地域におけるIEA PVPSのプレゼンスの確立に寄与できたものと考えられる。

(17) 2018年欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2018）におけるIEA PVPSワークショップ（2018年9月、ベルギー・ブリュッセル）

2018年欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2018）において、パラレルイベントとしてタスク1が開催した「太陽光発電の発展の動向」に講演者として参加した。同ワークショップにおいては、2018年の市場動向、蓄電池やヒートポンプと太陽光発電を併用した場合の経済性、欧州における集合住宅での自家消費の状況などが議論された。同ワークショップにおいてはタスク1副代表として、Trends Reportの成果をベースに2017年の世界動向を概説し、中国における政策変更の影響を含む2018年の市場の展望について概説した。EUPVSEC 2018本会議及びその他のイベントにおいて、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(18) 第52回タスク1専門家会議（2019年4月、スイス・モントルー）

第52回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。①今後の活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2019）及び第29回太陽光発電国際会議（PVSEC）等におけるIEA PVPSワークショップ等）、③タスク1成果物であるSnapshot Report及び動向報告書（Trends Report）の進捗報告と今後の計画、④国内調査報告書（National Survey Report of PV Power Applications）における新たな調査事項及び執筆指針の確認、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニュースレター等）、⑥今後のタスク1活動（ショートレポートの作成）等について審議した。今後のタスク1活動については2019～2020年の重点分野を決定するために、①Solar Fuels、②電力市場設計、③市場ドライバー（ポスト補助金）等に関する議論を行い、方向性について審議した。また、欧州を中心とした自家消費に関するワークショップを開催した。さらに加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の市場動向や普及状況、産業動向等の情報を収集・調査した。

(19) 第53回タスク1専門家会議（2019年11月、中国・陝西省・西安）

第53回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。タスク1の活動方針に沿って、①今後のIEA PVPSの新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（2020年に開催される国際会議（PVSEC-30）等でのワークショップ）、③タスク1成果物である動向報告書（Trends Report）及びSnapshot Reportの進捗報告と2020年以降の対応、④国内調査報告書（National Survey Report of PV Power Applications）の執筆指針、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニュースレター等）、⑥今後のタスク1活動（ショートレポートの作成）等について審議した。さらに、加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。また、同会議は、第29回太陽光発電国際会議（PVSEC-29）と併催して開催され、ホストである中国太陽光発電学会（CPVS）の要請によりPVSEC-29におけるIEA PVPSワークショップ（Eco-PY）で座長を務めた。また、PVSEC-29においてタスク1の成果物であるTrends Reportをベースに市場及び産業動向についてタスク1副代表として口頭発表を実施した。

(20) 2019年欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2019）におけるIEA PVPSワークショップ（2019年9月、フランス・マルセイユ）

2019年欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2019）において、パラレルイベントとしてタスク1及び欧州の研究開発プロジェクトPVP4Gridが共催した「革新的自家消費」に関するワークショップに講演者として参加した。同ワークショップにおいては、2018年の市場動向、蓄電池やヒートポンプと太陽光発電を併用した場合の経済性、欧州における集合住宅での自家消費の状況などが議論された。同ワークショップにおいてはタスク1副代表として、Trends Reportの成果をベースに2018年の世界動向及び分散型太陽光発電の新市場として期待される農業への応用、水上設置の漁業等への応用や車載太陽光発電について概説した。EUPVSEC 2019本会議及びその他のイベントにおいて、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の市場動向や非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

1.2 タスク1に係る日本の報告書（調査・作成）

我が国における太陽光発電の動向の調査を実施し、日本のタスク1に関わる報告書を作成した。これまでにIEA PVPSに提出した英文報告書は下記の通りである。

- ・2015年度
 - ・国内調査報告書2014年（National Survey Report of PV Power Applications 2014 Japan）
 - ・年次報告書2015年（Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2015）
 - ・国別報告2016年（2015年の統計速報値）（Country Page of Japan, 2016）
- ・2016年度
 - ・国内調査報告書2015年（National Survey Report of PV Power Applications 2015 Japan）

- ・年次報告書 2016 年 (Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2016)
- ・国別報告 2017 年 (2016 年の統計速報値) (Country Page of Japan, 2017)
- ・2017 年度
 - ・国内調査報告書 2016 年 (National Survey Report of PV Power Applications 2016 Japan)
 - ・年次報告書 2017 年 (Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2017)
 - ・国別報告 2018 年 (2017 年の統計速報値) (Country Page of Japan, 2017)
- ・2018 年度
 - ・国内調査報告書 2017 年 (National Survey Report of PV Power Applications 2017 Japan)
 - ・年次報告書 2018 年 (Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2018)
 - ・国別報告 2019 年 (2018 年の統計速報値) (Country Page of Japan, 2018)
- ・2019 年度
 - ・国内調査報告書 2018 年 (National Survey Report of PV Power Applications 2018 Japan)
 - ・年次報告書 2019 年 (Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2019)
 - ・国別報告 2020 年 (2019 年の統計速報値) (Country Page of Japan, 2019)

1.3 タスク 1 に係る定期刊行物の日本語版作成

IEA PVPSの成果の普及のために定期刊行物の日本語版を作成した。

- ・2015 年度
 - ・動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014) 日本語版
 - ・主要国の国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications 2014)
 - ・Snapshot Report 2014 日本語版
- ・2016 年度
 - ・動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015) 日本語版
 - ・主要国の国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications 2015)
 - ・Snapshot Report 2015 日本語版
- ・2017 年度
 - ・動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2016) 日本語版
 - ・主要国の国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications 2016)
 - ・Snapshot Report 2016 日本語版
- ・2018 年度
 - ・動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2017) 日本語版
 - ・主要国の国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications 2017)
 - ・Snapshot Report 2017 日本語版
- ・2019 年度
 - ・動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2018) 日本語版
 - ・主要国の国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications 2018)
 - ・Snapshot Report 2018 日本語版

1.4 IEA PVPS 活動に関する情報収集と活動提案

1.1の項に示したIEA PVPSのシンクタンクとしての役割を担うタスク1専門家会議において、2020年以降のIEA PVPS活動に関する議論が行われており、専門家会議においての議論の結果を報告した。

直近に実施された議論においては、下記の項目があげられた。また、NEDOの主導により2018年に活動を開始したPV for Transportationに関するタスク活動の計画についてもタスク1専門家会議におけるフィードバックを報告し、活動計画の策定に貢献した。2020年度以降の活動についてもタスク1専門家会議において継続して議論している。

- ・ IEA PVPS が今後必要な活動：政策策定者へのロビイング、非加盟国の情報の網羅、障壁の特定、将来展望及びエネルギーセクタの展望の提供
- ・ 技術的トピック：稼働の知見、技術動向、LCOE、蓄電、電力事業者のための太陽光発電、地上自治体による取り組み、ストレージ、独立形、マイクログリッド、水上設置、農業への応用、水素と太陽光発電、リパワリングなどがある
- ・ 経済性に関するトピック：再生可能エネルギー電源（RES）の価値、ソフトコストとファイナンス、市場の持続可能性、エネルギーセクタにおける他のエネルギーへの補助金との比較、ビジネスモデルなど
- ・ 必要な成果物：Fact Sheets や政策策定者向けのわかりやすい情報の提供、政策的対話への参加、レクチャの提供

1.5 加盟国の統計・データ等の取りまとめ

本協力活動を通じて収集する情報（各国のNational Survey Report、Annual Report及び専門家会議、ワークショップ等での配布資料等）のとりまとめを下記について実施した。統計データ等については、2015年度は過去に遡り、推移の調査・とりまとめを行った。2016年度以降は、更新を実施した。

- a) 加盟国の累積導入量と年間導入量
- b) 主要国の下記の項目に関する総生産量と総生産能力
ポリシリコン、インゴット、ウエハー、セル、モジュール
- c) 加盟国/非加盟国における太陽電池モジュール及び太陽電池モジュール生産能力
- d) 日本のポリシリコン、インゴット、ウエハー、セル、モジュール製造企業の生産量・生産能力
- e) 主要国の太陽電池モジュール、太陽光発電システムの価格
- f) 主要国における雇用人員
- g) 主要国における産業価値
- h) 主要国の公的予算（研究開発、実証及び普及）
- i) 主要国の政策：再生可能エネルギー目標、太陽エネルギーの導入目標、管轄省庁、実施している普及施策及び導入や廃止が計画されている施策概要、太陽光発電関連予算額（研究開発、実証、普及）

2. 実用化・事業化見通し

「動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries)」をはじめとしたタスク1の成果物は、NEDOの太陽光発電技術開発ロードマップPV 2030+や太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges) の策定に利用された。また、タスク1の成果物は、経済産業省 (METI) や米国エネルギー省 (DOE)、欧州委員会 (EC)・共同開発センター (JRC) 等の国内外の政府機関、太陽光発電協会 (JPEA) や欧州太陽光発電産業会 (SolarPower Europe) 等の産業団体、民間企業、金融機関等が利用しており、太陽光発電の研究開発、市場開拓等に貢献してい

る。

3. 波及効果

「動向報告書(Trends in Photovoltaic Applications – Survey Report of Selected IEA Countries)」をはじめとしたタスク1の成果物は、経済産業省(METI)の審議会資料や米国エネルギー省(DOE)、欧州委員会(EC)・共同開発センター(JRC)等の国内外の政府機関、太陽光発電協会(JPEA)や欧州太陽光発電産業会(SolarPower Europe)等の産業団体、民間企業、金融機関等が利用しており、太陽光発電の研究開発、市場開拓等に貢献している。さらに、IEA PVPSに対する日本の貢献はタスク1及び執行委員会でも評価されている。日本の専門家は、動向報告書の執筆者の一人となっており、その専門性を高く評価されている。また、日本の専門家は、2018年度からタスク1の副OA(副代表)に選ばれ、タスク1の広範な活動に貢献しており、日本及びNEDOのプレゼンスの強化につながっていると考えられる。なお、タスク1を通して調査した課題先進市場である欧州の加盟国や米国の状況や太陽電池主要生産国である、中国、韓国及びマレーシア等の動向は、今後の我が国における政策及び研究開発の策定に資すると考えられる。

4. 今後の展開

継続して下記の国際協力活動を実施する計画である。

- ① T a s k 1の国際協力活動への参加による情報収集
- ② I E A P V P S等の成果物の日本語版作成
- ③ 国内でのI E A P V P Sワークショップの開催(2022年度)
- ④ 国内でのI E A P V P S T A S K 1専門家会議及び執行委員会会議の開催(2022年度)
- ⑤ I E A P V P S活動に関わる日本の太陽光発電に関する調査報告書の作成

2020年度は、下記の専門家会議及びワークショップ(オンライン開催)に参加する予定である。

- ・2020年9月：欧州太陽光発電国際会議(EUPVSEC-2019)におけるIEA PVPSタスク1ワークショップ
- ・2020年11月：第31回太陽光発電国際会議(PVSEC-31)におけるワークショップ(オンライン)
- ・2020年11月：第55回タスク1専門家会議(オンライン)
- ・2021年3月：第56回タスク1専門家会議(フランス・ソフィアアンテポリス)

さらに、2021年以降のIEA PVPSの活動に関する計画を策定する戦略会議に参加し、今後のPVPSの活動計画に寄与する予定である。また、加盟国の統計・データ等の取りまとめを継続して実施する。IEA PVPSより新たな要請事項があった場合は、NEDOと協議のうえ対応する予定である。

5. 特許論文リスト

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	合計
特許出願 (うち外国出願)						
論文						
研究発表・講演 (うち国際会議)	4 (4)	6 (6)	4 (4)	7 (7)	7 (7)	28 (28)
新聞・雑誌等への掲載						
その他						

(2020年08月31日現在)

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV in Japan and Utility' s activities	PV &Utility Workshop, ASEAN POWER WEEK 2015	2015/9/3
2	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Soft cost and competitiveness in the booming Japanese market	IEA PVPS Workshop、 EUPVSEC 2015	2015/9/14
3	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Pathway to PV after the 2011 Earthquake	IEA PVPS & GÜNDER Workshop, Istanbul	2015/10/27
4	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Electricity Market Reform in Japan and Emerging Business Models	PVPS Workshop, PVSEC-25, Busan	2015/11/15
5	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Renewable Energy in Japan Focusing on Solar PV	IEA PVPS・UNEF Workshop、Gran Canaria	2016/4/14
6	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV plus electricity storage, a Japanese case	IEA PVPS Workshop, EUPVSEC2016, Munich	2016/6/20
7	G. Masson	IEA PVPS Task 1	A Snapshot of Global PV Markets - The Latest Survey Results on PV Markets and policies from the IEA PVPS Programme 2016	EUPVSEC 2016, Munich	2016/6/24
8	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV Status in Japan, Japanese experience in grid-connected applications	Utilities Workshop, Sydney	2016/10/20
9	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Evolution of residential PV market in Japan	IEA PVPS Workshop, PVSEC-26, Busan	2016/10/27
10	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV Industry Trends 2016	IEA-PVPS/ISES Webinar : PV Market Development	2016/12/8
11	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Trends in Photovoltaic Applications - the Latest Survey Results on PV Markets and Policies from the IEA PVPS Programme	IEA PVPS Workshop, EU PVSEC 2017 (EUPVSEC-33) , Amsterdam	2017/9/29
12	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	A Snapshot of Global PV Markets	GENRA2017 Workshop, Santiago de Chile	2017/10/4
13	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV Industry Trends from IEA PVPS Trends Report	EnerSol 2017 Workshop, Antofogasta SanChiago Chile	2017/10/5
14	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV Industry Trends from IEA PVPS Trends Report	IEA PVPS Task1: Webinar on Trends in PV Market and Industry Developments	2018/3/20
15	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Japanese PV Market: Today and Tomorrow	IEA PVPS Workshop, he International Sustainable Energy Summit (ISES)	2018/4/10

16	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Application of PV + Diversity in Distributed PV in Japan	IEA PVPS Workshop, SNEC PV POWER EXPO 2018, Shanghai	2018/5/27
17	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	APPLICATION OF PV + DIVERSITY IN DISTRIBUTED PV IN JAPAN	IEA PVPS Workshop, SNEC PV POWER EXPO 2018, Shanghai	2018/5/29
18	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Status of the PV market and PV industry mid-2018	IEA-PVPS Workshop, WCPEC-7, Hawaii	2018/6/14
19	G. Masson, 貝塚泉、他	IEA PVPS Task 1	A Snapshot of Global PV Markets - The Latest Survey Results on PV Markets and Policies from the IEA PVPS Programme in 2017	WCPEC-7, Hawaii	2018/6/15
20	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	The State of the PV Market	IEA PVPS Task 1 Workshop, EU PVSEC 2018, Brussels	2018/9/24
21	G. Masson, 貝塚泉、他	IEA PVPS Task 1	A Snapshot of Global PV Markets - The Latest Survey Results on PV Markets and Policies from the IEA PVPS Programme in 2017	EU PVSEC 2018, Brussels	2018/9/27
22	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV Industry in 2019 from IEA PVPS Trends Report	European Technology & Innovation Platform for PV Annual Conference, Brussels	2019/5/28
23	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Status of the global PV Market and Industry from IEA PVPS Snapshot report	SNEC PV POWER EXPO 2019, Shanghai	2019/6/3
24	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Key features of PV development (Session 2 - Innovative Distributed Applications for PV, Smart Buildings and Electric Mobility)	IEA PVPS Task 1 Workshop, EUPVSEC 2019, Marseille	2019/9/9
25	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV Industry Trends from IEA PVPS Trends Report	UNEF Solar Forum, Madrid	2019/11/23

26	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Area 14 Invited Speaker: Evolution of Global PV Markets - The Latest Survey Results on PV Markets and Policies From the IEA PVPS Programme in 2018	PVSEC-29, Xi'an	2019/11/6
27	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	PV Industry Trends from IEA PVPS Trends Report	IEA PVPS Webinars: Past and Future Trends in PV Industry Developments (online)	2019/12/4
28	貝塚泉	(株) 資源 総合シス テム	Global PV Market Analysis and Recent Developments	PV Module Forum 2020, Cologne	2020/2/18

(ト) 高性能太陽電池製造技術実証

【A 低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証】
(株式会社カネカ)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	備考
低コスト p/n、電極パターン形成技術の量産実証	小規模量産レベルにおいて、変動費 5 円/W が実現可能であることを実証する。	p/n、電極パターン形成に用いる部材を安価材料で適用可能であることを確認。また、既存材料の利用効率を大幅に改善可能な見込みを得た。これらにより、パターン形成の変動費 5 円/W の実現見込みを得た。	○	
高変換効率化技術の量産実証	小規模量産レベルにおいてモジュール変換効率 22%に資するヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池セルを実現する。(セル変換効率 24%相当。ただし、モジュール構造による。)	小規模量産実証ラインを活用したヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池セルにて、各プロセスの改善を進め、再現性良くセル変換効率 24%相当の特性が得られるようになった。	○	

* 1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達

A 低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証(株式会社カネカ)

1. 成果詳細

1.1 低コスト p/n、電極パターン形成技術の量産実証

ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池は、高出力が得られることは研究レベルで実証されているが実用化されていない太陽電池である。実用化にあたっては、高効率というヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の特長を活かしつつ、製造コストの低減技術をいち早く確立することが最大のポイントとなる。本助成事業開始以前、弊社では p 領域、n 領域及び電極のパターン形成工程での工程数を低減させる短縮プロセスの開発やパターン形成に必要な材料コストの低コスト化技術の開発等にこれまで取り組み、気相処理と液相処理を組み合わせた提案者独自のパターン形成技術を研究レベルで既に確立し、パターン形成コストを大幅に低減できる見込みを得ていた。本助成事業において、このパターン形成技術の量産実証を行うことを第一の実証項目とした。

パターン形成技術の量産実証に向けて、小規模量産実証ラインの構築を行った。主要な設備となるウェット処理設備は太陽電池用ウェット処理設備として一般的に普及している方式を採用しており、低コスト化が進んだ量産設備や 6 インチウエハを利用することができるため、設備投資額、材料コストを抑制可能となった。

小規模量産実証ラインの導入後、低コストパターンニング技術の検討を実施し、p/n、電極パターンニングに用いる部材を安価材料で適用可能であることを実証した。また、各プロセスの見直しによりパターンニングに関わる既存材料の利用効率を大幅に改善可能であることを確認し、これらにより、パターン形成の変動費に関する最終目標を達成した。(下表に目標値に対する相対値を記載)

更に、大規模生産においては、ユーティリティ費や消耗品使用の効率化により、大幅に変動費を低減できる見込みを得た。

表Ⅲ-2-(ト)-A-1 パターンニング変動費の成果(目標値を基準)

	目標値	事業開始時点	事業終了時点	大規模量産時(想定)
変動費	1.0	48	0.8	0.1

1.2 高変換効率化技術の量産実証

小規模量産実証ラインを活用したヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池セルにて、プロセスやセル工程の見直しを行うことで、再現性良く安定的にセル変換効率目標を満たすセルが得られることを確認した。下図に事業開始前と終了時の変換効率相対比較を示す。変換効率の分布は、作製したセルの変換効率の標準偏差により評価した。

本事業での取り組みにより変換効率の分布が抑制され、また、目標とする変換効率のセルが得られ、高変換効率化技術の量産実証における最終目標を達成した。

表Ⅲ-2-(ト)-A-2 試作セルの変換効率の評価結果
(セル変換効率は目標値を、分布(標準偏差)事業開始時点のデータを基準とした)

	目標値	事業開始時点	事業終了時点
セル変換効率	1.00	0.91	1.00
分布(標準偏差)	---	1.00	0.79

2. 実用化・事業化見通し

ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池において、弊社がターゲットとする事業は、住宅用太陽光発電システムにおけるモジュール販売であり、メインターゲットを国内住宅向けとし、高効率かつ優れた美観の特色を活かし狭小住宅の屋根や建材一体型などの高性能が要求されるハイエンドモデルである。高効率かつ美観の特色を活かし、住宅用を主たる用途とし、既に提案者が市場投入している瓦型の建材一体型モジュール(商品名 VISOLA)の高出力化を実現し、住宅メーカ

への販売を行うことを目指している。また、更に今後の市場展開が期待されるビル壁面・屋上等の用途も想定している。

現状、更なる競争力獲得に向けて研究開発を進めており、更に当初計画していた用途とは異なるIoT向け用途や、移動体向け用途など、新規のハイエンド用途への展開を開始しており、試作品の開発等を急速に進めている。

3. 波及効果

小規模量産スケールでヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池を生産することにより、微小な外観上の分散に対する選別技術が向上した。この事により、通常の両面電極型の太陽電池を用いた建材一体型モジュールにおいても美観の向上に対する知見を得られ、今後の弊社製品における品質向上の可能性が見いだせた。

また、ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の電極構造によるモジュール化への影響や信頼性向上に関わる新規の知見も得られ、ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池に限定されない、モジュール化における高品質化の可能性が見いだせた。

4. 今後の展開

「2. 実用化・事業化見通し」において記載した通り、本助成事業での開発成果を一部活用した新規用途への開発及び試作品供給を計画している。当初計画の住宅用途に比べ、より高い美観性や低照度時も含めた高変換効率品が要求されるハイエンド用途であり、早期の社会実装実現に向けて開発を加速する。また、さらなる開発による高効率化・低コスト化により当初計画の住宅用途への搭載も図り、国内住宅用途への競争力向上を図る。

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」基本計画

新エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

① 政策的な重要性

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。太陽光発電は、「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である」と期待されている。一方で、発電コストが高い等の課題も指摘され、更なる技術革新が必要とされている。

また、固定価格買取制度の効果で国内市場は急拡大しているが、今後、太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの普及がさらに進めば、賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれるとの指摘もある。将来の国民負担を軽減するためには、発電コストの低減は重要な課題である。

こうした状況を踏まえ、NEDOは2014年9月に「太陽光発電開発戦略（以下、「開発戦略」という。）」を策定し、発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh（グリッドパリティ）、2030年に従来型火力発電の発電コスト並みあるいはそれ以下に相当する7円/kWh（ジェネレーションパリティ）を掲げた。また、開発戦略では、その目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。

② 我が国の状況

2014年度までNEDOが「革新的太陽光発電技術研究開発」と「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」で進めてきた発電コスト低減に資する技術の開発は、多くの成果をあげている。例えば、結晶シリコン太陽電池ではヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池で25%を超える要素技術を開発し、CIS系薄膜太陽電池でも30cm角サブモジュールで変換効率17.8%（世界最高）を達成する等の成果をあげてきた。また、Ⅲ－Ⅴ族の薄膜多接合型太陽電池で世

界最高効率のセル変換効率を達成、量子ドット等の新概念の太陽電池で世界最高水準の技術を開発、ペロブスカイト太陽電池等の革新的な技術を開発する等、新分野の開拓でも大きな成果をあげている。

③ 世界の取組状況

欧州では、戦略的研究計画（Strategic Research Agenda : SRA）を策定し、発電コスト低減に取り組んでいる。欧州フレームワーク計画 FP7 (2007～2013) では、製造装置プロセス、集光型太陽電池、次世代太陽電池、薄膜系太陽電池、結晶シリコン太陽電池等、国家横断的な技術開発を行っている。また、FP7の後継プログラム Horizon 2020 (2014～2020) を策定し研究開発に取り組んでいる。

また、米国では、2011年2月に新たな技術開発戦略として「Sunshot イニシアティブ」を策定し、太陽光発電技術に係るコスト削減、太陽光発電の系統連系に係るコスト削減、太陽光発電の設置・運用に係るコスト削減等の開発を行っている。

一方、中国では、第12次5ヵ年計画（2011～2015年）で、変換効率 単結晶シリコン太陽電池で21%、多結晶シリコン太陽電池19%、太陽電池のモジュール製造コスト2020年7元/W等の目標を設定し、研究開発を推進している。

世界各国で国を挙げた研究開発が行われており、2013年時点で、中国メーカーが太陽電池の販売量として出力ベースで6割のシェアを占めるに至り、太陽電池技術分野における我が国の技術の優位性が低下しつつある。

④ 本事業のねらい

本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。ただし、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、国内外での競争力確保の観点から太陽電池のコスト低減と効率向上を急ぎ、日本国内における発電コスト7円/kWhの達成目標年を2025年に前倒しする。

具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを十分に下回る太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとともに、2025年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術を開発する。

また、上記開発の進捗により、中間目標年までに多くの成果が生まれ、と

くにヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等の高効率太陽電池の技術は確立しつつある。こうした高効率太陽電池は内外から高く評価されているものの、低コストでの製造プロセスにはまだ課題が残り、2025年の発電コスト目標達成には、技術的ブレークスルーが必要な状況である。そこで、高効率太陽電池の発電コスト目標達成をより強固なものとするべく、「高効率太陽電池製造技術実証」を行う。

(2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

2014年度までに実施した「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果から、結晶シリコン太陽電池と CIS 太陽電池については、14 円/kWh 達成の技術的見通しを得たことから、当該技術を着実に実用化するための技術を開発することとする。

また、結晶シリコンと CIS 太陽電池については 2025 年までに発電コスト 7 円/kWh 実現に資する要素技術開発を進める。加えて、実用化まで時間を要するものの、これまでの開発成果から発電コスト低減に有効な太陽電池の実現に有望と考えられる技術を対象に、2030 年発電コスト 7 円/kWh 達成に資する高性能太陽電池を開発する。なお、これまでは主として高性能化に取り組んできたが、実用化を加速するべく、低コスト化や信頼性も重視する。

さらに、上記開発に必要な測定、評価、分析技術等の開発等を共通基盤技術として開発する。

「高効率太陽電池製造技術実証」では、ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、裏面の接合形成プロセス、パターンニングプロセスなど、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行う。

【最終目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト 14 円/kWh を十分に下回る性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト (円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 14 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25 年で 20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境（条件）によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2025年までに発電コスト 7 円/kWh を実現するための開発計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 30%
- ・モジュール製造コスト : 想定する使用環境で、システム価格 125 円/W を実現するコスト

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 20%
- ・モジュール製造コスト : 15 円/W を実現するコスト

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p 型、n 型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の 3 倍以上にする。

材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

b) 高性能 CIS 太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm 角程度）で変換効率 23% 以上

② 欠陥密度の低減化技術の開発

③ CIS 太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

a) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ （1 σ ）以内

を目指す。

- ・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

b) 発電量評価技術

- ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築し、NEDOホームページ等のWebサイトに掲載する。

c) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ・低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。
- ・太陽電池モジュールの性能 30 年を予測できる加速試験方法を開発する。

5) 動向調査等

a) 動向調査

- ・発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

b) I E A国際協力事業

PVPS の動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

6) 高効率太陽電池製造技術実証

高効率太陽電池を低製造コストで実用化が可能なプロセスの開発を行い、2025 年に発電コスト 7 円/kWh を達成するための製造技術を試作レベルで実証する。

【中間目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト 17 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト (円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 17 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%
- ・モジュールの出力劣化 20 年で 20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境（条件）によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2020年までの実用化計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率 30%以上、且つ、結晶シリコン並の製造コストを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率 20%の達成。

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の2倍以上にする。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

b) 高性能 CIS 太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm 角程度）で変換効率 22%以上

② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化

③ CIS 太陽電池の電子構造の明確化

4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

a) 出力測定技術の開発

・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

・市販されている結晶 Si 系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

b) 発電量評価技術

- ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

c) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ・PID現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。
- ・太陽電池モジュールの性能 25 年を予測できる加速試験方法を開発する。

5) 動向調査等

a) 動向調査

- ① 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
- ② 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

b) I E A国際協力事業

N E D Oが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。

② アウトカム目標

本プロジェクトで開発した太陽電池モジュールが実用化、販売され、当該モジュールが採用される太陽光発電システムについて、2020年には発電コスト 14 円/kWh を十分に下回り、2025年には発電コスト 7 円/kWh を実現する。これにより、固定価格買取制度の早期卒業が実現すれば、年間数千億円の費用負担削減効果が見込まれる。また、「高効率太陽電池製造技術実証」においては、既に研究レベルで高効率を実証している高効率太陽電池の早期市場投入により、国内住宅屋根設置市場（需要地近接型市場）をはじめ、国内外の設置面積制約の大きい太陽電池市場の獲得に貢献する。

③ アウトカム目標達成に向けての取組

N E D Oは、2020年に発電コスト 14 円/kWh を十分に下回る性能の実現に向け、参画企業の事業戦略を確認する仕組みを構築する。

また、先端複合技術型シリコン太陽電池及び高性能C I S太陽電池については2025年、革新的新構造太陽電池については2030年の発電コスト 7 円/kWh、実現に向け、開発技術の実用化を進めるための産学連携体制を構築する。

さらに、開発技術の信頼性評価技術を開発、公表し、発電コスト低減技術の普及拡大に努める。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

【共同研究事業（NEDO負担率2／3）】

① 先端複合技術型シリコン太陽電池、C I S太陽電池の技術開発

本研究開発項目は、大学等の関与が必要となる基盤的な研究要素を含むが、すでに実用化が進んでいる太陽電池を対象として主として企業が実施する開発項目であり、共同研究（NEDO負担率2／3）で実施する。

【委託事業／共同研究事業（NEDO負担率2／3）】

② 革新的新構造太陽電池の研究開発

本研究開発項目は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

③太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

本研究開発項目は、大学等が研究開発項目①に取り組む企業と産学官で連携して取り組む基盤的技術の開発に係る事業であり、原則委託事業として実施する。

ただし、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

④ 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

本研究開発項目は、試験・評価方法の提案等、国民経済的には大きな便益がありながらも、民間企業の研究開発投資に見合うものが見込めない「公共財の研究開発」事業であり、原則委託事業として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

【委託事業】

⑤ 動向調査等

諸外国の技術開発動向や政策動向等を把握し、技術開発の方向性や分析・評価手法等の判断に活用するため、各種動向調査やI E A国際協力事業等を実施するもので、委託事業として実施する。

【助成事業（助成率：1／2）】

⑥ 高効率太陽電池製造技術実証

本研究開発項目は、高効率太陽電池の開発実績を有する民間企業が、その技術の事業化を加速し、国際的に競争力を有するために行う開発・実証事業であり、助成事業（助成率：1／2）で実施する。

2. 研究開発の実施方式

（1）研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャーにNEDO 新エネルギー部 山崎光浩 主任研究員を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。NEDOが公募によって研究開発実施者を選定する。研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは、研究開発項目②、③及び④の各項目の下に研究テーマ毎の研究開発責任者（テーマリーダー）を選定し、各実施者はテーマリーダーの下でそれぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

（2）研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理・執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な対策を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

① 研究開発の進捗把握・管理

NEDOは、研究開発実施者あるいはテーマリーダーと緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握するとともに、実用化時期を配慮した適切な産業財産権の出願管理を行う。また、外部有識者で構成する技術検討委員会等を組織し、知財管理や標準化等の重要事項について検討する他、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

② 技術分野における動向の把握・分析

NEDOは、プロジェクトで取り組む技術分野について、研究開発項目⑤や適宜行う調査から内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について把握し、

技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から、一部は委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

2015年度から2019年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を2017年度、事後評価を2020年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じ研究開発の加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 総論

研究開発実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。NEDOは、研究開発実施者による研究成果の普及を促進する。

② 開発成果の実用化による発電コスト低減への寄与

開発成果については、その実用化を前倒して実現し、発電コスト低減目標の早期達成を目指す。

③ 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発項目②、③及び④の成果については、広く太陽光発電産業、市場に展開可能な共通基盤技術として、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDO及び実施者が協力して普及に努めるものとする。

④ データベース等の整備

研究開発項目④の成果のうち、日射量等のデータベースを構築するものについては、NEDOのWebサイト等で積極的にデータの提供を行う。

⑤ 標準化施策等との連携

NEDO及び研究開発実施者は、研究開発項目④で得られた評価手法等の成果について、国際標準化に向けた役割を果たしていくこととする。具体的には、開発した新規試験法を太陽電池モジュールの長期信頼性を裏付ける国際標準として成立させる。

⑥ 知的財産権の帰属、管理等取扱い

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、研究開発開始段階から、事業化を見据えた知財戦略を構築し、適切な知財管理を実施する。

⑦ 知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

(2) 基本計画の見直し

NEDOは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応をおこなう。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法」第15条第1号イ、第3号に基づき実施する。

(4) その他

NEDOは、NEDOが実施する他の事業とも連携し、太陽光発電システム全体で発電コスト低減に取り組むこととする。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2015年3月、制定。

(2) 2018年2月、アウトプット目標を追記し、研究開発項目⑥「高効率太陽電池製造技術実証」を追加。

(3) 2019年2月、研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」について、最終目標を修正。

(4) 2019年4月、プロジェクトマネージャーを山田主任研究員から山崎主査に変更。

(5) 2019年7月、プロジェクトマネージャーの役職を山崎主査から山崎主任研究員に変更。

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発」

1. 研究開発の必要性

現在普及している結晶シリコン太陽電池や CIS 太陽電池は、技術開発の進展、市場拡大による量産効果によって、性能向上と価格低減が進んでいる。NEDO の「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」プロジェクトでも、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合とバックコンタクトの統合技術によって、セル効率で 25.1% を達成。CIS 太陽電池でも高品質光吸収層と Cd フリーバッファ層を開発し、小面積セルで変換効率 23.35% (2018 年 11 月)、30cm 角サブモジュールで変換効率 17.8% (世界最高) を達成する等、大きな成果をあげた。しかしながら、2030 年までにこれらの成果を実用化し、発電コスト 7 円/kWh を実現するためには、性能を維持しつつ、大面積化や低製造コストプロセスの開発等を進めるため、更なる技術革新が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。

(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

CIS 太陽電池では、実用化規模の大面積モジュールの高効率化及び低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 試作モジュールで、発電コスト 17 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 17 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%
- ・モジュールの出力劣化 20 年で 20%相当

(加速評価試験の方法については、試験条件(例えば JISC8917 の温湿度サイクル試験の試験時間等)を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)

なお、発電コスト目標を達成する使用環境(条件)によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

(2) 2020 年までの実用化計画を提示すること。

【最終目標】

(1) 試作モジュールで、発電コスト 14 円/kWh を十分に下回る性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 14 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25 年で 20%相当

(加速評価試験の方法については、試験条件(例えば JISC8917 の温湿度サイクル試験の試験時間等)を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)

なお、発電コスト目標を達成する使用環境(条件)によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

(2) 2025 年までに発電コスト 7 円/kWh を実現するための開発計画を提示すること。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1. 研究開発の必要性

従来の延長線上にはない、Ⅲ-V 族等の革新的高効率太陽電池や、コスト構造を革新する太陽電池は、2020 年の実用化は困難であるが、変換効率の高さや、製造コストの低さから、2030 年に 7 円/kWh の達成が見込める有力な太陽電池である。

しかしながら、革新的高効率太陽電池は、現在は一般に普及する価格での製造

はきわめて困難であり、事業目標達成のためには太陽電池の製造装置及び製造プロセスの開発や、多接合化のための太陽電池層の剥離、接合技術の開発が必要である。

また、近年短期間で発電効率を大幅に伸ばしている、ペロブスカイト太陽電池など、コスト構造を革新する太陽電池の実現が期待される技術も見いだされているが、実用化には、原理検証や、信頼性の確認、新しいコンセプトの製造装置の実現が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

一般には普及していないⅢ-V族太陽電池等の超高効率太陽電池において、将来の普及を目指し、現在普及している太陽電池並みのコストで製造するための低コスト化の要素技術開発並びに、太陽電池の効率向上により発電コスト低減を実現する要素技術開発を合わせて行うことで、2030年に7円/kWhを達成する手段を明らかにする。

具体的には、変換効率30%以上の薄膜化合物の超高効率太陽電池で発電コスト7円/kWhを達成するために、Ⅲ-V族の太陽電池の製造装置、製造プロセス、多接合化の為に剥離・接合などの製造コスト低減のための要素技術開発や、モジュール化の要素技術開発を行い、その実現性を見極める。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

太陽電池に新材料、新構造を用いることで製造コストを革新的に低減させ2030年に発電コスト7円/kWhを目指す。モジュール変換効率は20%程度ながら、新材料、新構造を用いることでモジュール製造コストを15円/Wまで革新的に低減することができる技術を実現する。具体的には、新構造のペロブスカイト系太陽電池等の研究開発を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率 20%の達成。

【最終目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率 30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格 125 円/W を実現する要素技術を確立する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術の開発。

実験室レベルの小型太陽電池モジュールでの変換効率 20%の達成。

研究開発項目③ 「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1. 研究開発の必要性

発電コスト 7 円/kWh、14 円/kWh を実現するためには、従来の太陽電池モジュールを超える性能を、低コストで実現しなければならない。そのためには、材料や構造の設計において、基礎的、科学的知見を踏まえた検討を行う必要がある。本研究開発項目は、研究開発項目①の実施者と産学官連携で進める。

2. 研究開発の具体的内容

以下の研究開発項目を実施する。

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

太陽電池セル・モジュールの各製造プロセスにおいて、評価解析を行い、得られた知見をもとに、原料、結晶、装置、セル、モジュールメーカーの高効率化、低コスト化、高信頼性化に貢献する。

①高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

転位密度が低くライフタイムの長い高品質で低コストな材料の開発を行う。また、ウエハスライス技術については、低コスト化、低ダメージ化のための知見を得るための研究開発を行う。さらに、材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響の研究を行う。

②高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

受光面構造、受光面成膜、裏面成膜、裏面パターン形成、裏面電極構造、高

品質透明導電膜、高品質パッシベーション膜、高性能エミッタ、細線低抵抗電極、銀代替電極、ヘテロ接合等の研究開発を行い、技術開発指針を確立する。

(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

発電コスト 7 円/kWh 達成のために、CIS 太陽電池モジュールの高効率化および発電コスト低減を可能とする界面制御技術、再結合パッシベーション、バンドプロファイル評価技術等、要素技術の研究開発を行う。また、実デバイスでの評価検証を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

- ① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発
p 型、n 型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の 2 倍以上にする。
- ② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発
新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

- ① 小面積セル（1cm 角程度）で変換効率 22%以上
- ② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化
- ③ CIS 太陽電池の電子構造の明確化

【最終目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

- ① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発
p 型、n 型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の 3 倍以上にする。
材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

- ② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発
新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、

セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

- ① 小面積セル（1cm 角程度）で変換効率 23% 以上
- ② 欠陥密度低減化の技術開発指針の構築
- ③ CIS 太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

研究開発項目④ 「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

1. 研究開発の必要性

太陽光発電の発電コスト低減を実現するためには、長期に亘り安定した発電量を得られることが必要であることから、太陽電池モジュールに対しても、長期信頼性の確保が求められている。

これまでNEDOでは、太陽光発電システム次世代高性能技術の開発において、太陽電池モジュールの評価技術の開発に取り組んできており、出力測定精度の向上や劣化要因について知見が得られつつあるものの、その寿命（耐久性等）を効率的に評価出来る試験技術の確立には至っていない。

発電システムとして信頼性を向上するためには、太陽電池モジュールの耐久性向上に資する技術開発と同時に、実際に設置する環境下での出力測定や寿命を予測できる試験方法といった評価技術の開発と、PID等の太陽電池モジュールの劣化原因の解明が必要である。

更に、これら評価技術の向上や技術開発と併せて、ガイドライン等の作成、認証機関への技術移転や、標準化・国際規格化を進めるための取り組みも実施することで、信頼性の高い太陽電池が適正に評価される環境を作り、日本の太陽光発電産業の国際競争力の向上に貢献する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 出力等測定技術の開発

本プロジェクトで開発する太陽電池等、標準化や規格化が進んでいない太陽電池の出力等を正しく評価するための測定技術を開発する。

(2) 発電量評価技術

NEDO日射量データベースについて、データの更新、高精度化等、拡充を進め、ユーザーの利便性向上を図る。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ①実際の太陽光発電システムから発電データを取得、分析評価し、発電システムの劣化要因の抽出、劣化メカニズムの解明、および劣化予防対策技術を開発する。
- ②太陽電池モジュールが設置される環境を考慮した、長期信頼性を評価するための試験方法を開発する。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1 σ) 以内を目指す。
- ・市販されている結晶 Si 系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1 σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

- ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ①PID 現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。
- ②太陽電池モジュールの性能 25 年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数 100 倍以上等）を開発する。

【最終目標】

(1) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ (1 σ) 以内を目指す。
- ・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1 σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

- ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築し、NEDOホームページ等のWebサ

イトに掲載する。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ① 低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。
- ② 太陽電池モジュールの性能 30 年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数 100 倍以上等）を開発する。

研究開発項目⑤ 「動向調査等」

1. 調査等の必要性

太陽光発電は、産業、市場、技術等、どの視点においても、国内外で急激に変化している。発電コスト低減を着実に進めるとともに、我が国産業の国際競争力を確保するためには、国内外の動向を把握し、プロジェクトマネジメントに反映していく必要がある。

2. 調査等の具体的内容

(1) 動向調査

開発戦略の発電コスト低減目標の達成に向け、必要な情報を収集、整理、分析する。

(2) IEA国際協力事業

諸外国の技術開発動向や政策動向等について、国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定 (PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた調査・分析を実施すると共に、諸外国の技術開発、政策及び市場動向を把握する。併せてこの活動を通じて日本の太陽光発電の国際競争力向上等を図る。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 動向調査

- ① 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
- ② 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

(2) I E A国際協力事業

N E D Oが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。
2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。

【最終目標】

(1) 動向調査

発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

(2) I E A国際協力事業

PVPSの動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

研究開発項目⑥ 「高効率太陽電池製造技術実証」

1. 研究開発の必要性

ヘテロ接合バックコンタクト型シリコン太陽電池等の高効率太陽電池は我が国の太陽電池メーカーが世界最高効率を達成する等、技術開発レベルで世界をリードしている。しかしながら、製造工程が複雑なため、量産化と低コスト化には、まだ多くの課題がある。事業化段階においても競争力を有するためには、これらの技術開発と並行して早期に量産プロセスの課題を抽出、解決することが必要である。

2. 研究開発の具体的内容

ヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池等、海外メーカーに対し圧倒的に高効率な太陽電池の低コストプロセス技術を構築するべく、生産プロセスを設計するとともに、裏面の接合形成プロセス、パターニングプロセスなど、量産において低コスト化につながる製造技術の実証を行う。

3. 達成目標

【最終目標】

高効率太陽電池を低製造コストで実用化が可能なプロセスの開発を行い、2025年に発電コスト7円/kWhを達成するための製造技術を試作レベルで実証する。

事前評価書

	作成日	平成27年2月13日
1. プロジェクト名	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	
2. 推進部署名	新エネルギー部	
3. プロジェクト概要（予定）		
(1) 概要		
1) 背景		
<p>2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。太陽光発電は、「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である」と期待されている。一方で、発電コストが高い等の課題も指摘され、更なる技術革新が必要とされている。</p> <p>また、固定価格買取制度の効果で国内市場は急拡大しているが、今後、太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの普及がさらに進めば、賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれるとの指摘もある。将来の国民負担を軽減するためには、発電コストの低減は重要な課題である。</p> <p>こうした状況を踏まえ、NEDOは2014年9月に「太陽光発電開発戦略（以下、「開発戦略」という。）」を策定し、発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh（グリッドパリティ）、2030年に従来型火力発電の発電コスト並みあるいはそれ以下に相当する7円/kWh（ジェネレーションパリティ）を掲げた。また、開発戦略では、その目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。</p>		
2) 目的		
<p>本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。</p> <p>具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとと</p>		

もに、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術を開発する。

3) 実施内容

- ① 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発
- ② 革新的新構造太陽電池の研究開発
- ③ 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発
- ④ 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）
- ⑤ 動向調査等

(2) 規模 総事業費（需給）262.5億円（委託100%、共同：2/3）

(3) 期間 平成27年度～31年度（5年間）

4. 評価内容

(1) 研究開発の目的・目標・内容

1) 研究開発の目的

① 政策的な重要性

国内外の周辺動向（規制・政策動向、エネルギー需給動向、社会・経済動向、産業構造、市場動向等）を踏まえているか。また、政策課題や中期目標に掲げるNEDOのミッションに合致しているか。更に、民間活動のみでは改善できない又は公共性や緊急性が高いプロジェクトであるか。

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、太陽光発電を「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で、系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である。一方、発電コストが高く、出力不安定性などの安定供給上の問題があることから、更なる技術革新が必要である。中長期的には、コスト低減が達成されることで、分散型エネルギーシステムにおける昼間のピーク需要を補い、消費者参加型のエネルギーマネジメントの実現等に貢献するエネルギー源としての位置付けも踏まえた導入が進むことが期待される」と位置付けている。

また、NEDOの中期目標では、「長期的に太陽光発電の発電コストを基幹電源並みに低減させるため、低コスト化に係る技術開発を行うこと」とされており、太陽光発電の発電コスト低減は、政策課題、NEDOの中期目標と合致している。

さらに、固定価格買取制度による太陽光発電の導入拡大が、将来の国民負担増となるとの指摘があり、太陽光発電の発電コスト低減の早期実現は重要な課題であることから、公共性、緊急性の高いプロジェクトである。

② 本事業を実施しない場合、日本の政策上、産業競争力上又はエネルギー・環境上のリスクは何か。

本事業を実施しない場合、太陽光発電の発電コスト低減が遅れるだけでなく、開発戦略に掲げる目標の達成は非常に困難になると考えられる。さらに、日本の太陽電池産業の競争力が著しく低下することが予想される。

2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

国内外の競合技術のポジショニング状況を踏まえ、戦略的かつ具体的（定量的）な成果目標の設定がなされているか。また、想定する成果（アウトプット）は、十分に意義があり、市場競争力（コスト、クォリティー、バリュー等）が見込めるものか。

2020年の発電コスト14円/kWh、2030年の発電コスト7円/kWhの実現に向け、ヘテロ接合技術やバックコンタクト技術等の先端技術を複数用いた複合技術型シリコン太陽電池や、CIS太陽電池の高効率化、大面積化、モジュール化、量産化技術の開発等によりモジュール変換効率22%、モジュールの出力劣化25年で20%相当、さらには、モジュール変換効率25%、モジュールの出力劣化30年で20%相当を目指す。これにより現在の市場で、市場競争力を有する太陽電池の早期実用化が期待される。

また、2030年の発電コスト7円/kWhの実現に向け、モジュール変換効率30%、システム価格125円/Wを実現する従来の延長線上にはない革新的高効率太陽電池、モジュール製造コスト15円/Wを実現する革新的低製造コスト太陽電池の要素技術の確立を目指す。これらの技術が実用化すれば、従来の太陽電池とは異なる新たな市場の創出が可能となる。また、高効率化、低コスト化、高信頼性化のための技術開発指針を確立し、あわせて、出力等の測定技術、発電量評価、信頼性寿命評価技術を開発することで、日本の太陽電池の優位性が示され、その国際競争力の向上が期待される。

② アウトカム目標

目的の達成による効果予測（アウトカム）は、投じる予算との比較において想定される市場規模または産業インフラ育成の観点から十分であるか。

本研究開発では、2020年の発電コスト14円/kWhの達成、および、2030年の発電コスト7円/kWhに向けた要素技術の確立を目指す。初年度に投じる予算は44億円で、5年間では総額262億円程度の予定である。これにより、2020年には発電コスト14円/kWh（グリッドパリティ）の達成が見込まれる。

仮に、固定価格買取制度の法律に基づくスキーム見直しが法定されている2020年までに、買取価格20円/kWhが実現できれば、2013年～2020年の8年間で国民負担総額を600億円以上低減することに相当する。加えて、家庭用電力料金を下回ることにより、太陽光発電分野における固定価格買取制度の早期卒業が実現できれば、その後の費用負担削減効果は、年間数千億円レベルになると考えられ、本研究開発の効果は十分であると考えられる。

3) 研究開発の内容と設定根拠

プロジェクトの全体目標からみて、研究開発項目と内容が論理的に設定されているか。

研究開発項目①では、「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果を踏まえ、発電コスト7円/kWh達成の可能性が高い結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池に重点化しており、その目標は開発戦略で検討された発電コスト目標、シナリオに合致している。

研究開発項目②は、研究開発項目①に対して大きな優位性を確保できる開発目標を設定しており、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池と差別化され、新たな市場創出をも見据えた内容となっている。

研究開発項目③は、実用化は進んでいるものの、今後の開発では特に科学的知見を要求される課題が多いことを踏まえ産学連携で要素技術の確立を目指すこととしている。

研究開発項目④では、長期信頼性の確保により発電コスト低減を目指す開発戦略のシナリオを踏まえ、14円/kWh、7円/kWh実現に必要な劣化率を確認する技術開発目標を設定している。

さらに、国際競争力を常に把握するための動向調査も行うこととしている。

これらの項目、内容は、発電コスト低減という全体目標に照らして、論理的に設定されている。

(1) 研究開発の目的・目標・内容についての総合的評価

太陽光発電は、エネルギー基本計画でも発電コストが高いと指摘されており、更なる技術革新が求められている。よって、発電コスト低減を目的とした本プロジェクトを実施する意義は大きいと考えられる。また、目標に掲げている2020年の発電コスト14円/kWh、2030年の7円/kWhについては、開発戦略で十分に検討されたものであり、これから実施していく技術開発を具体的に想定できていることから、目標として適当であると考えられる。

研究開発項目の内容については、今後目標達成の実現に寄与することができる技術にテーマを絞り、基幹電源並みの発電コストに向けた実用化のための技術開発と要素技術の確立を検討されていることから総合的に判断しても妥当である。

(2) 研究開発の実施方式

1) 研究開発の実施体制・運営方式

成果目標を効果的・効率的に達成するうえで、適切な実施体制の想定はあるか。また、外部有識者による委員会やステージゲート方式等を検討しているか。

各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、研究開発項目①は、これまでの開発で成果を分けている結晶シリコン太陽電池と CIS 太陽電池に重点化し、競争的に実施する。ただし、実用化も進んでいることから NEDO 負担率 2/3 とする。また、研究開発項目②、③及び④は産学官連携で推進することとし、各項目の下に研究テーマ毎の研究開発責任者（テーマリーダー）を選定し、各実施者はテーマリーダーの下でそれぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

研究開発の進捗管理については、研究開発実施者あるいはテーマリーダーと緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討委員会等を組織し、知財管理や標準化等の重要事項について検討する他、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握する。

(2) 研究開発の実施方式についての総合的評価

本プロジェクトの実施方式は、効率的かつ効果的に発電コスト目標の早期達成を図る取り組みとして適切である。

2. 分科会公開資料

次ページより、プロジェクト推進部署・実施者が、分科会においてプロジェクトを説明する際に使用した資料を示す。

「高性能・高信頼性太陽光発電の 発電コスト低減技術開発」(事後評価) (2015～2019年度 5年間)

プロジェクトの概要 (公開)

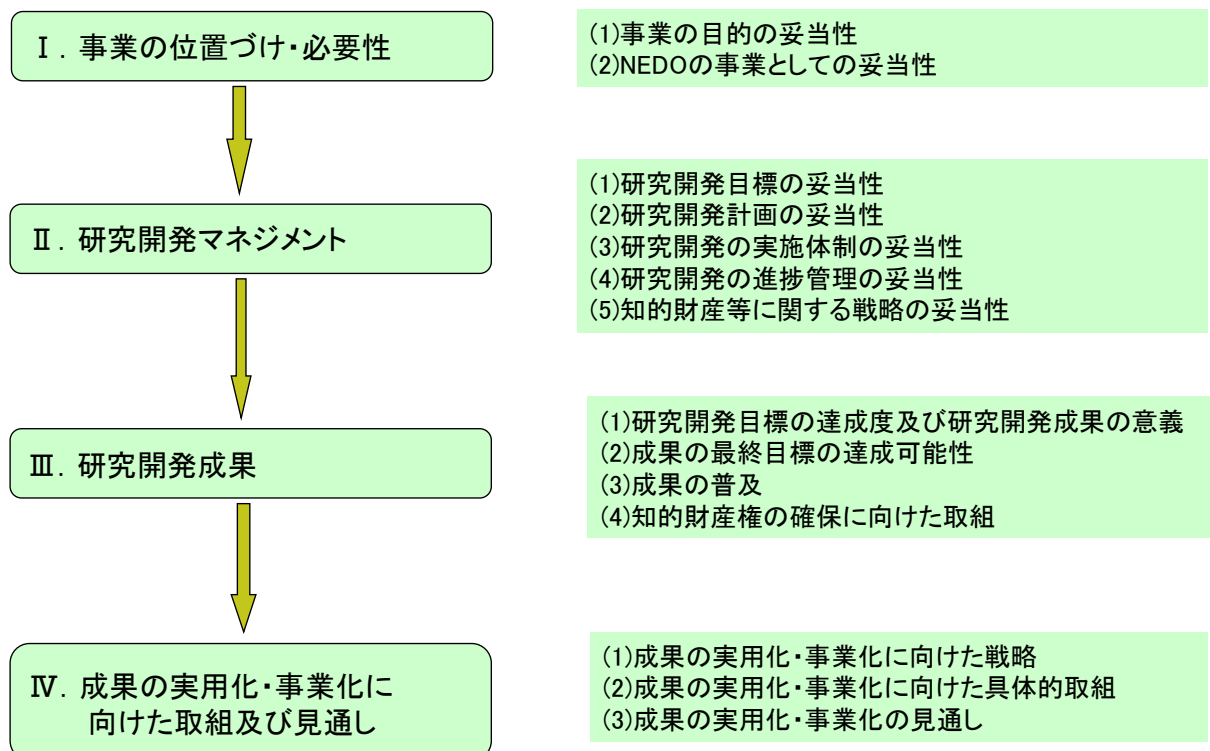
NEDO

新エネルギー一部

2020年11月27日

0

発表内容

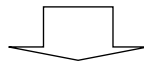


1

◆事業実施の背景と事業の目的

【社会的背景】(2014年当時)

- 2009年の太陽光発電ロードマップ(PV2030+)策定から5年が経過。この間、太陽光発電をめぐる環境も大きく変化した。
- 国内においては、固定価格買取制度の効果で大量導入社会の実現は目前となり、従来の「普及させるための戦略」から、「**普及後の社会を支える戦略**」の検討が必要となってきた。
- 世界に目を向ければ、「太陽電池」の価格競争は激化し、産業構造も変化しつつあった。



- 太陽光発電の大量導入社会における、**1)太陽光発電の安定的拡大、2)産業基盤の強化、3)新たな価値創造の実現**の3つの視点から、現状分析、課題抽出を包括的に行い、その課題解決の方策を検討。そこから今後の技術開発の指針を得ることを目的として、2014年に「**太陽光発電開発戦略**」を策定。この開発戦略を実現するための新しいプロジェクトが必要となった。

2

◆事業実施の背景と事業の目的

【事業の目的】

2030年までに公的支援に頼らず自立して普及する「普通のエネルギー」にするための発電コスト目標を設定(2014年当時)。

- (1)2020年には、すでに拡大した住宅用、メガソーラーだけでなく、ポテンシャルの大きい業務部門、産業部門で自家消費向けに、系統電力に代わって選択される発電コストを実現し、エネルギー消費を支える。

業務用電力価格並の発電コスト14円/kWh を目指す。(グリッドパリティ)

- (2)2030年までには、発電事業あるいは自家発電向け電源として、選択される発電コストを実現し、エネルギー供給を支える。

従来型火力発電並の発電コスト 7円/kWh を目指す。

(ジェネレーションパリティ)

- (3)これらを実現する「信頼性」も確保。



目標を達成するため、**高性能・高信頼性・低コストをあわせもつ太陽電池及び共通基盤技術を開発**

3

◆政策的位置付け

■第4次エネルギー基本計画(2014年4月)

再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。

■「2017年度以降の調達価格等に関する意見(2016年12月、調達価格等算定委員会)」において、非住宅用太陽光発電の価格目標を(発電コストで)2020年に14円/kWh、2030年に7円/kWhとの方向で設定すべきとされており、また、「科学技術イノベーション総合戦略2016(2016年5月閣議決定)」においても、2020年までを目途に太陽光発電の発電コスト14円/kWhを達成、2030年に発電コスト7円/kWhを達成、とされている。

◆国内外の研究開発の動向と比較(2014年当時)

太陽電池の分野では国内においては1974年のサンシャイン計画開始以降、NEDOが主導して技術開発を推進してきた。日本以外の主要地域における開発状況をみると、現在では世界各国で国を挙げた研究開発が行われている。

欧州:戦略的研究計画(Strategic Research Agenda:SRA)を策定し、発電コスト低減に取り組んでいた。欧州フレームワーク計画FP7(2007~2013)では、製造装置プロセス、集光型太陽電池、次世代太陽電池、薄膜系太陽電池、結晶シリコン太陽電池等、国家横断的な技術開発を行っており、その後はFP7の後継プログラムHorizon 2020(2014~2020)を策定し、更なる研究開発に取り組んでいる。

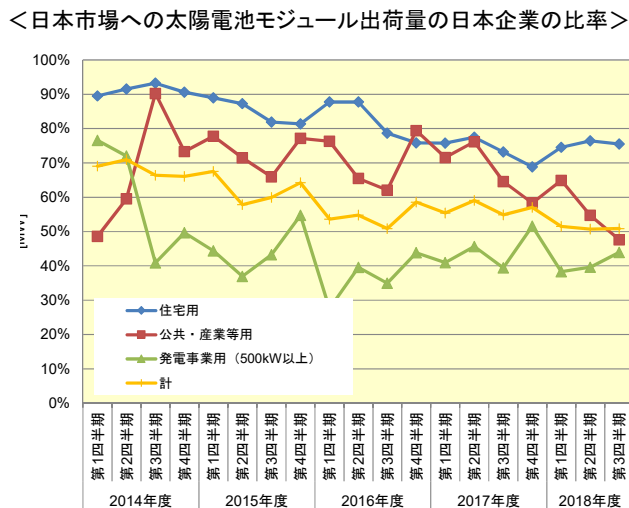
米国:2011年2月に新たな技術開発戦略として「Sunshot イニシアティブ」を策定し、太陽光発電技術に係るコスト削減、太陽光発電の系統連系に係るコスト削減、太陽光発電の設置・運用に係るコスト削減等の開発を行っている。

中国:第12次5ヵ年計画(2011~2015年)で、変換効率単結晶シリコン太陽電池で21%、多結晶シリコン太陽電池19%、太陽電池のモジュール製造コスト2020年7元/W等の目標を設定し、研究開発を推進していた。

2013年時点で、中国メーカーが太陽電池の販売量として出力ベースで6割のシェアを占めるに至ったが、**研究開発推進の結果、中国製モジュールの効率、品質とも大きく改善し、さらなるシェアの拡大を実現している。**

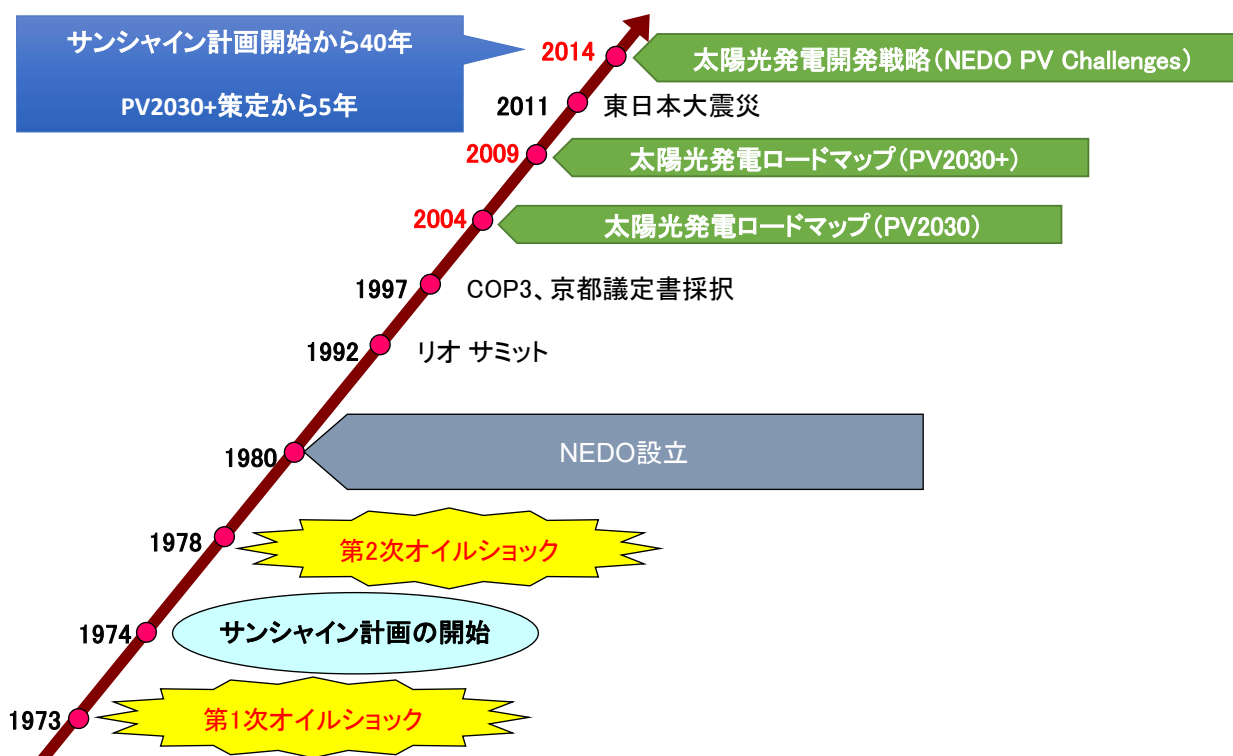
◆国内外の研究開発の動向と比較(市場動向)

FIT制度が開始された2012年から導入量は急増。累積導入量は50GWに到達。
 地上設置等では低価格の海外製モジュールのシェアが増えているが、信頼性が重要な住宅用とでは日系企業のシェアは依然として高い。⇒用途を見極めた上で、高効率低コストモジュールの開発を支援する意義はある。



出典：経済産業省および太陽光発電協会の統計をもとにNEDO作成

◆技術戦略上の位置付け



◆技術戦略上の位置付け

「太陽光発電開発戦略（2014年）」の課題認識
太陽光発電大量導入社会における5つの課題

国民負担の増大

- 固定価格買取制度の再エネ賦課金の増加を抑制し、国民負担を軽減する必要。

長期に安定した発電量確保の要求

- 事業性の追求が進み、信頼性の確保に対する要求も高まっている。
- 発電コスト低減のためにも信頼性の高い発電システムが必要。
- 安全性の確保も重要。

廃棄物大量発生への対応

- 大量導入は、将来の大量廃棄を招く。リサイクルシステムの構築が必要。

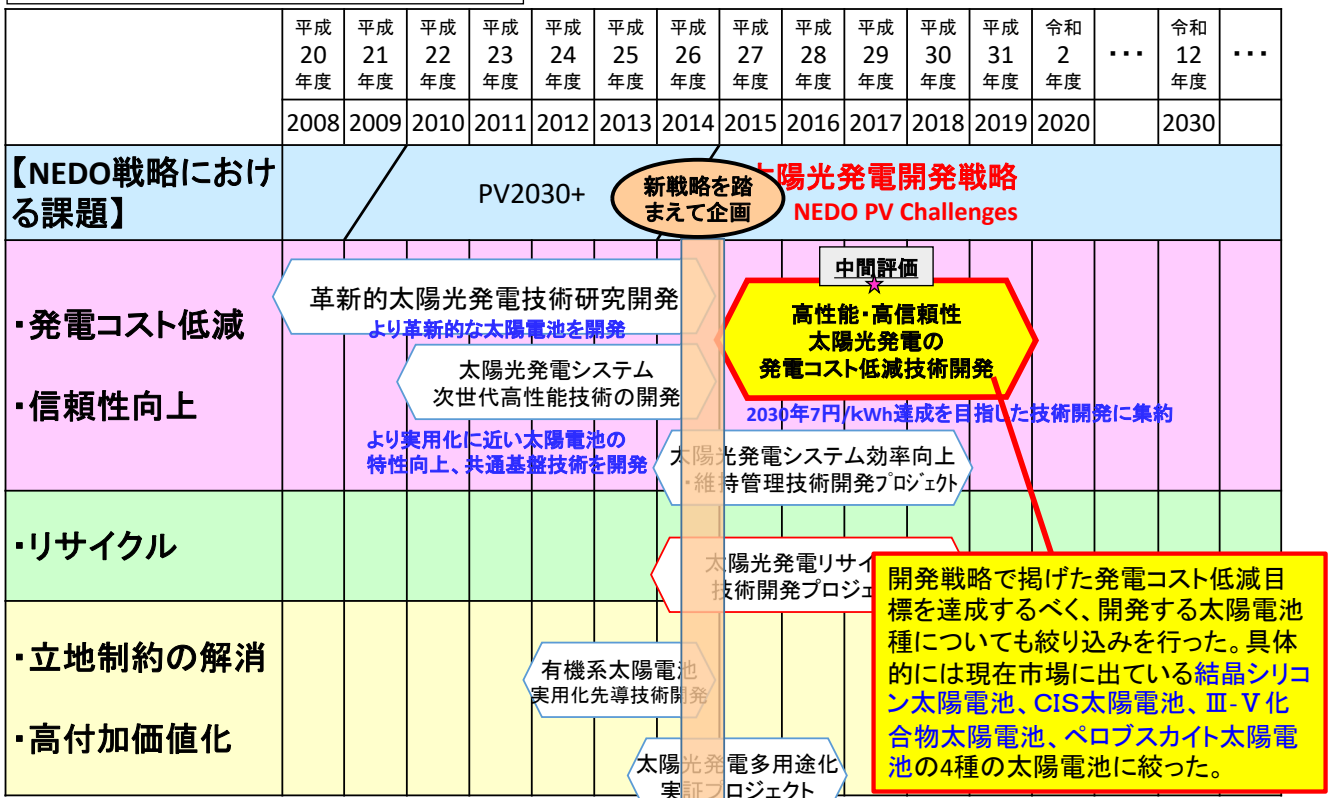
立地制約の顕在化

- 導入ポテンシャルの限界
- 土地コストの上昇。
- 系統制約の顕在化

グローバル競争の激化

- 太陽電池モジュールの価格競争が激化。国内市場でも海外企業のシェアが増。

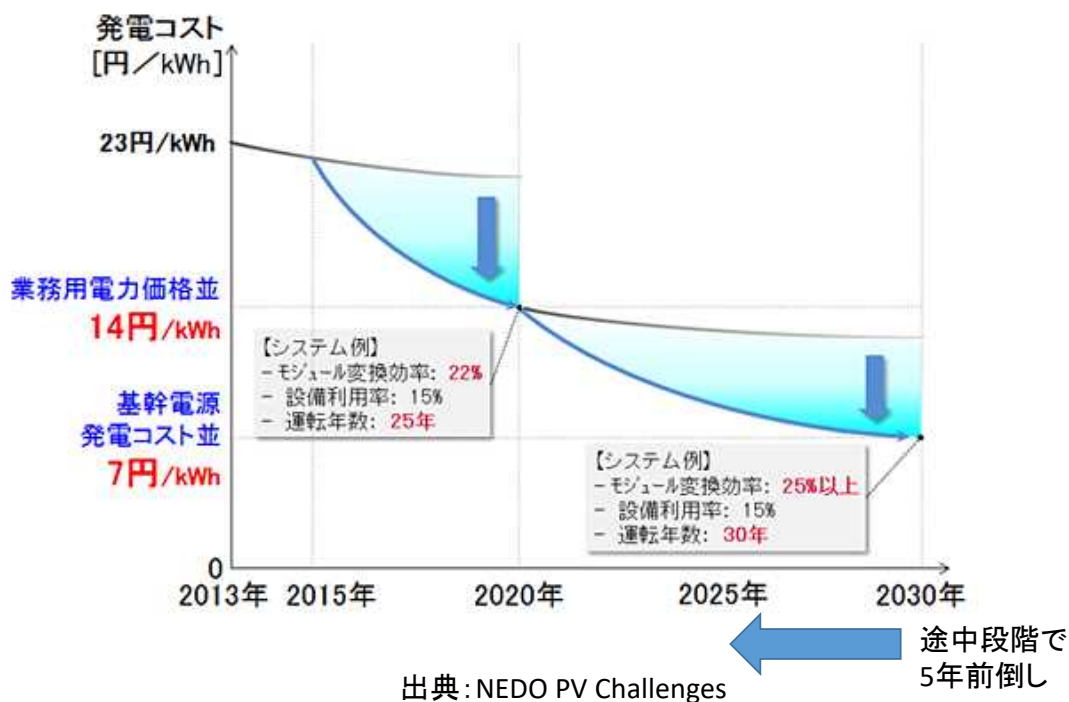
◆技術戦略上の位置付け



➢ 太陽光発電設備導入に係る支援事業は都道府県等が実施しているが、太陽光発電セル、モジュール関連に特化した技術開発については、本事業のみである。

○コスト低減については以下の「太陽光発電開発戦略(2014年)」のロードマップの下で実施。

<非住宅用システムの発電コスト目標と低減シナリオ>



—NEDO関与の意義—

マネジメント
プロセス

企画・立案

体制構築

事業推進

NEDOの
強み

- ✓産学官を取り纏めてロードマップを策定(事業環境の変化に即して改訂)
- ✓国策を盛り込んだ企画が可能

- ✓産学官を組み合わせた柔軟な体制を構築可能
- ✓30年以上に亘るコーディネート経験

- ✓公的機関としての中立性
- ✓運営費交付金制度を最大限に活かして柔軟に推進

長期間に亘る太陽電池の技術開発を牽引しているNEDOが関与するのが適切

マネジメント
のポイント

- ✓業界全体のニーズを把握するために産学官のヒアリングを実施
- ✓開発戦略を踏まえた目標設定

- ✓複数の競合企業を、コンソーシアムに纏め上げ、共通の技術目標に向けて研究開発を推進
- ✓企業、大学、公的研究機関でコンソーシアムを形成

- ✓大学及び公的研究機関の基礎研究成果を企業の事業化に活かせるように調整
- ✓必要に応じて加速資金を投入
- ✓事業環境の変化に即して追加公募を実施

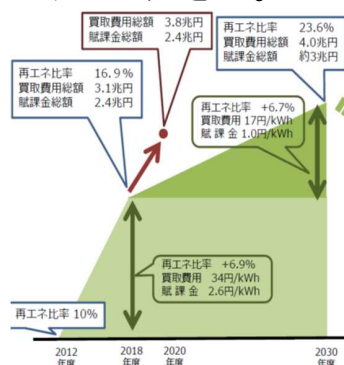
◆実施の効果 (費用対効果)

●インプット

➢プロジェクト費用の総額 **211.1億円**(2015～2019年)

- FIT賦課金：FIT制度の賦課金の負担額は**毎年2兆円**を超えており、今後の賦課金総額を抑制させていくためには、調達価格の低減が必要、シリコン、CIS系電池のコスト低減の技術開発は将来の賦課金の抑制に対して、波及効果を持つ。
- また、ペロブスカイト(PSC)、ヒ化ガリウム(GsAs)等の新型・次世代太陽電池の世界市場規模は現時点では6億円だが、**2030年には4563億円**にまで拡大すると予測(富士経済)、将来の市場のポテンシャルは大きい。

FIT制度に伴い、再エネ賦課金は増加している(出典：経済産業省)



12

2. 研究開発マネジメント (1)研究開発目標の妥当性

◆事業の目標

- ・本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、**2025年までに7円/kWh(※)**の実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。
- ・具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、**14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化**するとともに、**2025年までに7円/kWh(※)**を実現する要素技術の確立を目指す。
- ・また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、**2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立**を目指す。
- ・上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための**評価技術等の共通基盤技術の開発と、国内外の開発動向等を把握**するための動向調査を行う。

※当初、2030年を目標としたが、国内外の市場動向を踏まえて前倒しした。

13

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆事業の目標

開発項目	ねらい	主な目標									
結晶Si / CIS 太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> ・発電コスト低減を着実に実現 ・日本で7円/kWh実現の性能で競争力を確保 ・実用化が進んでいる結晶Si/CIS太陽電池で、高性能化、低コスト化を追求 	2025年7円/kWh 2020年14円/kWh									
高効率太陽電池 低コスト太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶Si/CISと異なるアプローチで7円/kWh実現 ・圧倒的な特性の違いで差別化 ・特性を生かして新市場を創出 ・30%超Ⅲ-V族太陽電池を低コスト化 ・低製造コストのペロブスカイト太陽電池を開発 	2030年7円/kWh 【差別化の指標】 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>モジュール効率</th> <th>モジュール製造コスト</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>高効率</td> <td>30%</td> <td>システム価格125円/Wを実現するコスト</td> </tr> <tr> <td>低コスト</td> <td>20%</td> <td>15円/W</td> </tr> </tbody> </table>		モジュール効率	モジュール製造コスト	高効率	30%	システム価格125円/Wを実現するコスト	低コスト	20%	15円/W
	モジュール効率	モジュール製造コスト									
高効率	30%	システム価格125円/Wを実現するコスト									
低コスト	20%	15円/W									
高信頼性評価技術等	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽光発電の信頼性を高め、確実に社会定着を実現 ・「長期信頼性」を実現、評価する技術を開発 	劣化機構解明、新たな加速試験方法の開発等									
動向調査	・情勢変化を把握し、マネージメントに反映	開発戦略の見直しの可否検討 必要に応じ見直し案作成									

14

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	根拠
研究開発項目① 「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」	(1) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。 (2) 2025年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示する。	<ul style="list-style-type: none"> ・発電コスト低減を着実に実現。 ・日本で7円/kWh実現の性能で競争力を確保。 ・実用化が進んでいる結晶Si/CIS太陽電池で、高性能化、低コスト化を追求。
研究開発項目② 「革新的新構造太陽電池の研究開発」	(1) 30%超Ⅲ-V族太陽電池を低コスト化。モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するセルモジュール構造と達成手段を明確化する。 (2) 低製造コストのペロブスカイト太陽電池を開発。量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術の開発。実験室レベルの小型太陽電池モジュールでの変換効率20%達成。	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶Si/CISと異なるアプローチで7円/kWh実現。 ・圧倒的な特性の違いで差別化。 ・特性を生かして新市場を創出。
研究開発項目③ 「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」	a) 先端複合技術型シリコン太陽電池 (1) p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。 (2)、各要素技術(成膜、電極、パッシベーション等)がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。 b) 高性能CIS太陽電池の開発 ① 小面積セル(1cm角程度)で変換効率23%以上。 ② 欠陥密度の低減化技術の開発。 ③ CIS太陽電池の理想的な材料設計技術の提案。	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶シリコン太陽電池セルにおけるキャリアライフタイム及び各要素技術、CIS太陽電池におけるセル高効率化のための共通基盤技術を開発することで14円/kWh達成に貢献。 ・研究開発項目①に対し、大学、研究機関において基盤技術を開発(①の2/3NEDO負担に対し負担率100%)。

15

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆研究開発目標と根拠		
研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	根拠
研究開発項目④ 「共通基盤技術の開発」	<p>a) 出力測定技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度±0.5%(1σ)以内を目指す。 ・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度±1.0%(1σ)以内を目指す。 <p>b) 発電量評価技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築し、NEDOホームページ等のWebサイトに掲載する。 <p>c) 信頼性・寿命評価技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。 ・太陽電池モジュールの性能30年を予測できる加速試験方法を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽電池の高効率化、信頼性向上のためには精度の高い評価方法や、劣化機構等の解明が必要。 ・30年の加速試験についても、低コスト化達成のための方策の一つ。
研究開発項目⑤ 「動向調査等」	<p>a) 動向調査</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。 <p>b) IEA国際協力事業</p> <ul style="list-style-type: none"> PVPSの動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・情勢変化に対応するためには動向調査が不可欠。
研究開発項目⑥ 「高性能太陽電池製造技術実証」	<p>ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池セルを用い2025年に発電コスト7円/kWhを達成するための製造技術を試作レベルで実証する。</p>	<p>高効率太陽電池の低コスト化に資する製造技術の実証が必要</p>

16

2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

◆研究開発のスケジュール					
	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度
研究開発項目① 「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」	結晶シリコン、CISモジュール製造技術	14円/kWh達成技術	中間評価で開発内容絞り込み	14円、7円/kWh達成技術	7円/kWh開発計画提示
研究開発項目③ 「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」	結晶シリコン、CISセル、モジュール高性能化技術	結晶シリコン、CIS基盤技術開発	▲	開発継続、高効率低コスト化技術	最終目標
研究開発項目② 「革新的新構造太陽電池の研究開発」	III-V化合物太陽電池低コスト化技術開発	適宜各太陽電池開発に反映	▲	開発継続、車載への適用検討	
		ペロブスカイト太陽電池基礎技術開発	▲	開発継続、大型モジュール実証	
研究開発項目④ 「共通基盤技術の開発」	評価方法、発電量評価、寿命評価技術開発		▲	開発継続、標準化への展開	
研究開発項目⑤ 「動向調査等」	調査	プロジェクトの運営、開発戦略等へ反映	▲	調査継続	
			▲	次期開発戦略へ反映	
研究開発項目⑥ 「高性能太陽電池製造技術実証」				高効率低コスト化製造技術の実証	研究開発項目①の成果を受け

17

◆プロジェクト費用

- 当初公募(2015年度)
 - ✓ 30件の応募に対し、22件のテーマを採択。
- 追加公募(2018年度)
 - ✓ 研究開発項目①③で各1件、新たに実証事業(研究開発項目⑥)で1件採択

－研究開発予算の推移(単位:億円)－

年度	2015	2016	2017	2018	2019	総額
研究開発項目①(結晶Si)	7.5	8.7	7.4	7.1	2.3	33.1
〃 (CIS)	2.0	2.4	3.0	3.1	1.1	11.2
研究開発項目②(Ⅲ-V)	9.7	11.4	10.6	11.7	9.2	52.5
〃 (ペロブスカイト)	9.0	8.4	9.9	7.9	7.2	42.3
研究開発項目③(結晶Si)	8.9	8.7	5.3	6.9	4.3	34.1
〃 (CIS)	3.3	2.4	1.8	1.8	1.0	10.3
研究開発項目④(共通基盤)	4.8	6.1	4.8	3.2	2.4	21.3
研究開発項目⑤(動向調査)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	2.9
研究開発項目⑥(実証)	—	—	—	1.9	1.0	2.9
計 特別会計(需給勘定)	45.7	48.5	43.5	44.3	29.1	211.1

18

◆研究開発の進捗管理

外部有識者で構成する技術検討委員会を組織し、知財管理や標準化等の重要事項について検討する他、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努めた。

年度	2015	2016	2017	2018	2019
技術検討委員会 (5テーマそれぞれ開催)	0	2	2 (中間評価)	3	3
成果報告会	1	1	1	1	1

進捗報告会	主な指導内容(中間評価以降)
結晶シリコン太陽電池①、③	(2018年1月) 実用化に向けた開発スケジュールをより明確にしていきたい。 (2018年10月) オリジナル技術の出口イメージを出してほしい。企業との連携を進めてほしい。 (2020年2月) 企業は実用化・事業化を見据えた技術開発、大学・国研は開発した技術の出口イメージができる成果につながる研究開発をお願いしたい。
CIS太陽電池①、③	(2018年2月) 小面積でEfficiency Tableに掲載できるデータなど、良い成果が得られている。研究レベルは高いが、各機関の横のつながりが見えない点については改善を求む。 (2020年2月) 今回のプロジェクトのアウトカムをより明確に打ち出してほしい。軽量化、軽量を生かした展開への取り組みとアピールもあると望ましい。
Ⅲ-V族②	(2018年10月) HVPEの高速成膜やELO基板再生などの低コスト化プロセスについて、実用化に向けコスト計算を絶対値で示すべき。車載やZEBなどⅢ-V太陽電池を使うストーリーを用意すべき。 (2020年2月) モジュール効率30%以上の達成やELO剥離技術、高速成膜技術など多くの進捗が見られた。展開できるものから適用して早期の実用化、事業化につなげていただきたい。
ペロブスカイト②	(2018年1月) 高効率化への寄与が期待できるカリウムドーパの汎用性について明確にすべき。 (2020年1月) 小面積セルの変換効率24.4%は非常に評価できる。大面積セル、モジュールでの高効率化、光劣化現象要因の明確化が課題であると考え。
共通基盤④	(2018年2月) 寿命予測ならびに試験法の開発で得られた知見をもとにPID劣化が起きないモジュール開発に向けた提案を検討して欲しい。

◆ 動向・情勢の把握と対応

研究開発項目⑤の動向調査を通して研究開発動向、市場動向における情勢変化を把握し、マネジメントに反映させた。

情勢	対応
世界で予想以上に発電コスト低減が実現。 発電コスト14円/kWh、7円/kWhは調達価格等算定委員会でも価格目標として設定され、太陽光発電の固定価格買取制度からの早期自立が明確に求められるようになった。	7円/kWhの早期達成(2030年から2025年) そのための高効率セルの小規模設備製造実証 など、量産への架け橋となる技術開発を計画。 また、一部テーマについては途中終了として 絞り込んだ(13件) 。
海外モジュールとの競争激化や国内外において、自家消費等の新たなビジネスモデルが出てきた。	新たなアプリケーションの創出のため、導入ポテンシャルの議論を開始。 BIPV(ZEB)、車載太陽電池などのFSを開始。プロジェクトへの発展を計画。
2018年の行政事業レビューにおいて、コスト低減、効率向上以外に新たな価値の確立を行うべきとの指摘。	それ以前から取り組んでいた車載やZEB等の検討を加速するとともに、 企業ヒアリングや動向調査において、太陽光発電がこれまで導入されていなかった分野への導入可能性を検討。

20

◆ 開発促進(加速)財源投入実績

事業の進捗(計画の具体化に伴う予算精査、開発成果等)に応じて、予算の再配分を実施。そのうち主な拡充は以下の通り。**特に量産化技術や新分野への展開等に加速を行い、一部はプレスリリースにつながる成果を出した。**

研究開発項目	年度	金額 (百万円)	目的、内容	効果
研究開発項目① (結晶シリコン)	2017年	286	パターニング層形成装置等を導入し、低コストパターニングの実用化技術開発を加速。	モジュール変換効率の最終目標値向上、達成の前倒し、運転年数延長につなげた。
研究開発項目② (超高効率: III-V族化合物)	2017年	36	HVPE、MOCVD装置の製膜高速化要素技術の設計及び改造。	量産化装置の設計指針を早期に取得することができる。
	2017年	120	車載用太陽電池 の開発及び化合物太陽電池量産化検討。	化合物の低コスト化 目標達成に向けた見通しを明確にすることができる。
	2018年	108	基板剥離プロセス高速化のためのELO装置改造、格子整合系4接合実現のための成膜装置、及び評価装置の改良	低コストプロセス開発 の加速、超高効率化技術開発の推進を実施。

21

2. 研究開発マネジメント (4) 研究開発の進捗管理の妥当性

研究開発項目	年度	金額(百万円)	目的、内容	効果
研究開発項目② (超低コスト: ペロブスカイト)	2017年	27	バリア膜、電極膜用スパッタ装置のR2R化。R2R付帯設備前倒し導入及び試験研究材料の追加。	量産に向けたR2Rプロセス全体の開発を加速できるとともに、 太陽電池モジュール の早期実証が可能となった。
	2017年	12	基板への塗布液の被覆性の向上のための塗布液循環機構と塗布液供給制御機構を追加及び透明電極のパターニング用のレーザの変更。	30cm角サイズの大面積モジュール での効率向上につながった。
	2017年	57	雰囲気制御機能付き蒸着装置、成膜装置一式および材料秤量装置の導入。	膜質向上 に向けた雰囲気管理および膜厚管理に求められる水準を把握できた。
	2018年	15	SEM(リース)の手配。	耐久性向上 に向けた劣化機構分析が可能となった。
	2019年	11	大面積(30cm角)モジュール変換効率測定頻度の向上。	大面積モジュール 研究開発の促進につながった。
研究開発項目④ (共通基盤技術の開発)	2018年	12	特定の市街地を対象に秋季および冬季における日射の移動観測を行い、建物等の影や積雪の反射の影響等について調査・検討を行う。	市街地での日射 の移動観測の要件、課題等が明らかになった。
研究開発項目⑤ (調査)	2015~2017年	22	「太陽光発電システム搭載自動車」 に関する調査。	「高効率太陽電池」の特長を生かした「面積制約」を受ける環境での活用例に関する情報収集、課題の抽出等を行った。

3. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

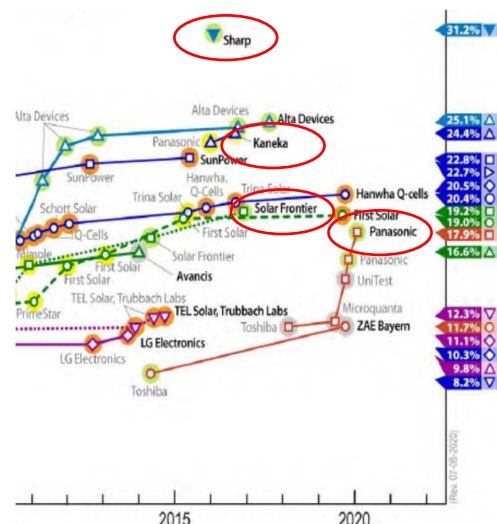
◆ 研究開発項目毎の目標と達成状況

変換効率向上: 各太陽電池で世界最高効率を達成するなど、大きな成果をあげた。

低コスト化: 高い変換効率を維持しながらコストを低減させる技術を開発しており、各太陽電池において発電コスト目標を達成できるコスト試算を行いながら、**最終目標として研究開発項目①、③は14円/kWh相当を達成した。**

研究開発項目②(Ⅲ-V系、ペロブスカイト)は量産化につながる要素技術の確立を行った。

NRELのモジュールチャートにはシャープ(Ⅲ-V)、カネカ(シリコン)、ソーラーフロンティア(CIS)、パナソニック(ペロブスカイト)が記載されている。(出展: NREL)



◆研究開発項目毎の目標と達成状況

耐久性向上: 材料、製造プロセスなど太陽電池セル／モジュール開発のアプローチに加え、共通基盤技術として**太陽電池特性評価、発電量評価や劣化要因解析、寿命試験方法**の開発など、耐久性向上につなげる技術についても大きな進展があった。

新市場への展開: 開発を行ったモジュールは**太陽光発電の新分野(建物壁面、重量制限のある屋根、車載等)**への展開可能性が見えてきた。

動向調査: 調達価格等算定委員会の議論から、発電コスト算定方法を最新のものに見直すとともに、最新の発電コストの分析を行うとともに**車載太陽光**の可能性についても調査を行った。



◆プロジェクトとしての達成状況と成果の意義

— 本プロジェクトにおける主な成果 — 下記成果を達成し、更にコスト低減等の技術開発を進めた。

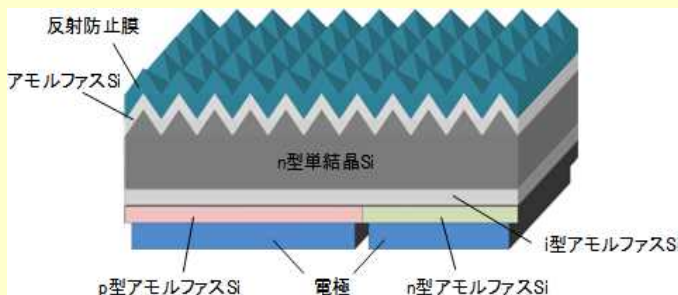
種別	委託者	成果
シリコン(ヘテロ接合バックコンタクト)太陽電池	カネカ	<ul style="list-style-type: none"> ・実用面積セル(180cm²)で変換効率26.6% 結晶シリコン太陽電池で世界最高(2020年11月時点) ・実用面積モジュール(1.3m²)で変換効率24.4% 結晶シリコン太陽電池で世界最高(2020年11月時点) ・製造技術実証等に加えて、更に車載、壁面へ展開を実施。
CIS系薄膜太陽電池	ソーラーフロンティア	<ul style="list-style-type: none"> ・小面積セル(約1cm角)で変換効率23.3% (2019年1月) ・30cm角サブモジュールで変換効率19.2%(その後19.8%) 薄膜系太陽電池では世界最高(2020年11月時点) ・軽量モジュールを含めて事業化に向けた開発を実施。
Ⅲ-V化合物太陽電池	シャープ	<ul style="list-style-type: none"> ・31cm角モジュールで変換効率31.17% 太陽電池モジュールの中で世界最高(2020年11月時点) ・低コスト化に向けた開発とともに、車載モジュールを試作。
ペロブスカイト太陽電池	東京大学 パナソニック	<ul style="list-style-type: none"> ・ミニセル(0.18cm²)で変換効率24.92%(2019年12月) ・30cm角モジュールで16.09%。世界最高(2020年1月) (その後、17.93%に記録を更新) ・大面積化や耐久性向上に向けた技術開発も実施。

先端複合技術型シリコン太陽電池(研究開発項目①、③)

2019年度最終目標

- (1) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。
14円/kWhの目安(モジュール変換効率22%、モジュール出力劣化25年で20%相当)
- (2) 2025年までに発電コスト7円/KWhを実現するための開発計画を提示する。

結晶シリコン太陽電池の原料メーカー、装置メーカー、セル・モジュールメーカーが大学等と連携し、ヘテロ接合バックコンタクト等、先端技術を複合した、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。



開発するヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池の一例

- ① 太陽電池用ポリシリコンおよび単結晶の開発
トクヤマ NEDO負担2/3
- ② 高品質低コストシリコン単結晶の開発
クリスタルシステム
- ③ 薄型ウエハ用低ダメージスライス技術開発
コマツNTC
- ④ 結晶Si太陽電池用新規電極の開発
ナミックス
- ⑤ 高効率長寿命結晶Si太陽電池セル・モジュール開発
シャープ、京セラ、カネカ(産総研、京大、東工大)



- ① 低ダメージ成膜技術開発
北陸先端科学技術大学院大学
- ② 薄型セルおよび高効率・高信頼性モジュール開発
産業技術総合研究所
- ③ 先端複合技術型シリコン太陽電池の共通基盤技術開発
豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学
東京工業大学、兵庫県立大学

開発内容 先端複合技術型シリコン太陽電池(研究開発項目①、③)

バックコンタクトヘテロ構造や積層型太陽電池など、新型の結晶シリコン太陽電池について、原料、ウエハ、パッシベーション、電極までのセル形成プロセスを産学連携のもとで総合的に開発。

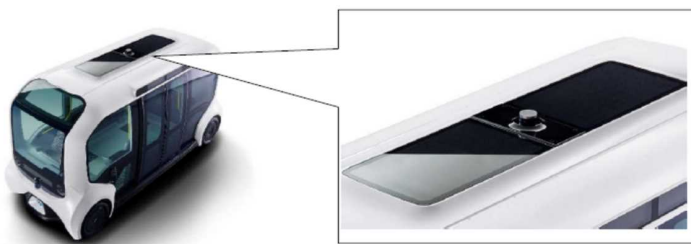


開発成果 先端複合技術型シリコン太陽電池(研究開発項目①、③)

ヘテロ接合技術とバックコンタクト技術を組み合わせた新構造の結晶シリコン太陽電池で**世界最高記録(セル変換効率26.7%、モジュール変換効率24.5%)達成変換効率を達成(2017年2月)、屋根用途以外に壁面や車載への展開を目指す。**
(株式会社カネカ)



ヘテロ接合バックコンタクト太陽電池モジュール



トヨタの低速自動運転EV「e-Palette」
(トヨタ自動車株式会社提供)



導入イメージ
(中・小規模ビルの外装)



結晶シリコン太陽電池モジュールでも、**世界最高となる変換効率24.37%を達成(モジュール面積×13,177cm²)**

開発成果 先端複合技術型シリコン太陽電池(研究開発項目①、③)

各社異なる手法で高効率化、低コスト化、高信頼性を追求。

シャープ(株):「高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発」
①モジュール変換効率22.1%を42直の試作モジュールで確認
② 2025年発電コスト目標 7円/kWhの定量的なシナリオを提示 (株式会社シャープ)

京セラ(株):「低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発」
・シードキャスト基板を用いた両面受光PERC仕様
・セル効率22.0%、モジュール効率20.1%を確認
・PERC60直モジュールにて非住宅市場で予測寿命35年以上であることを確認

パナソニック(株):「低コスト・高信頼性・高効率Super Si Hetero-Junction (SSHJ)太陽電池の開発」
・量産化試作ラインを用いた、6インチ基板太陽電池の開発
・新構造セル(SBF, SBC-SHJ)の要素技術の開発
・ヘテロ接合形成プロセス技術の開発において産総研、北陸先端科学技術大学院大学と連携することで開発効率を向上

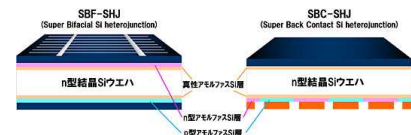
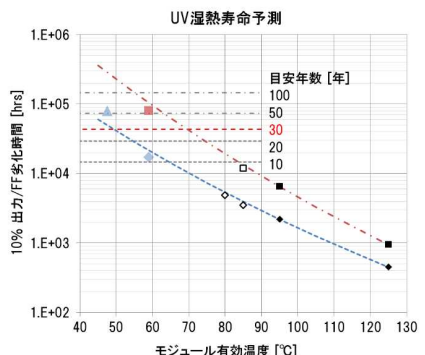


図 新構造(SBF, SBC)セル

高性能CIS太陽電池の技術開発(研究開発項目①、③)

2019年度最終目標

- (1) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。
14円/kWhの目安(モジュール変換効率16%)
- (2) 2025年までに発電コスト7円/KWhを実現するための開発計画を提示する。

CIS太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発

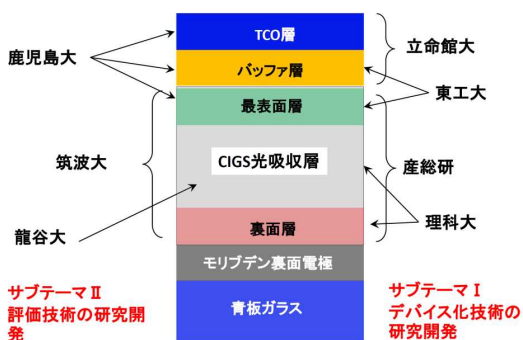
ソーラーフロンティア NEDO負担2/3



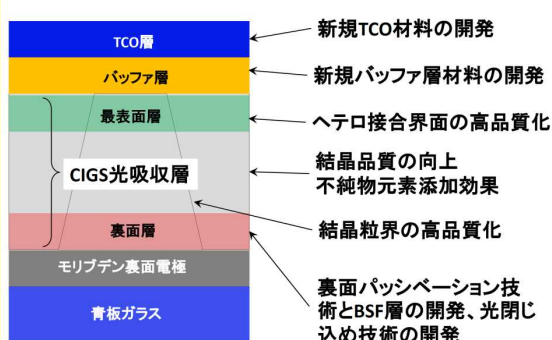
CIS太陽電池高性能化技術の研究開発

産業技術総合研究所、東京工業大学、学校法人立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学

共同提案者の主な研究役割分担



CIGS太陽電池の研究課題



開発成果 高性能CIS太陽電池の技術開発(研究開発項目①、③)

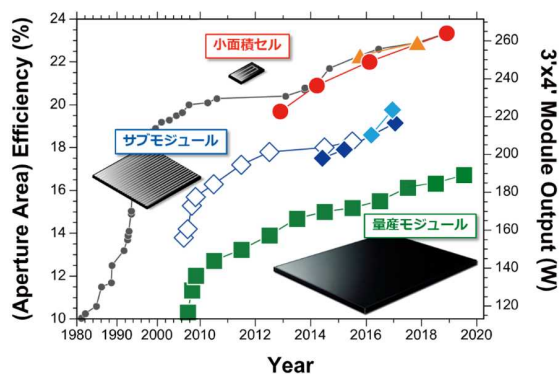
【成果のポイント】出光興産株式会社 (ソーラーフロンティア株式会社)

- ・発電コスト(試算) 13.3円/kWh (事業開始前:19円/kWh)
- ・製品サイズ試作モジュール変換効率 16.1% (事業開始前:13.8%)
- ・サブモジュール変換効率 19.8% (事業開始前:18%)
- ・小面積セル変換効率 23.4% (事業開始前:20.9%)

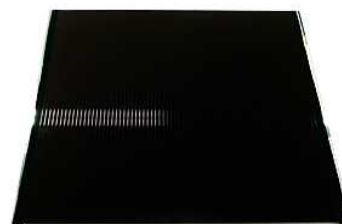
【効率向上のポイント】

- ① CIS光吸収層の品質改善
- ② 太陽電池内部の界面形成技術の改良

開発した軽量 CISモジュール



CIS太陽電池の変換効率の推移



世界最高変換効率19.2%を達成したCIS系薄膜太陽電池サブモジュール(30cm角)

III-V族化合物太陽電池(研究開発項目②:革新的高効率太陽電池)

2019年度最終目標

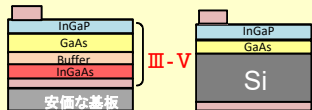
(1)モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するセルモジュール構造と達成手段を明確化する。

超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発

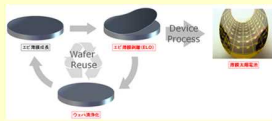
超高効率化技術、成膜速度の高速化技術、安価基板上への成膜や接着技術、高価な基板の再利用技術等、従来の延長線上にない革新的高効率太陽電池をセル・モジュールメーカー、成膜装置メーカー、大学等が連携し開発を進める。

I. 低コスト化技術開発

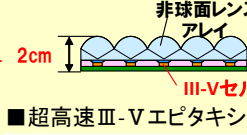
■ 薄膜III-Vセル, on-Siセル



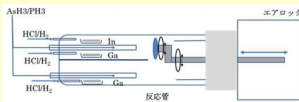
■ エピタキシャルリフトオフ(ELO)



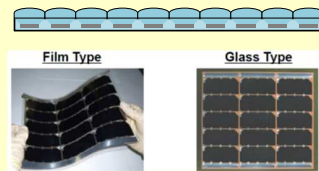
■ プラスチックレンズ一体型セル



■ 超高速III-Vエピタキシャル成長

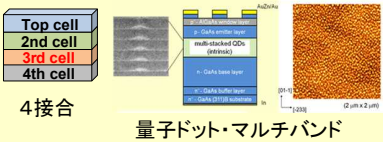


II. 低コストモジュール開発



2030年
LCOE
7円/kWh

III. 超高効率セル開発

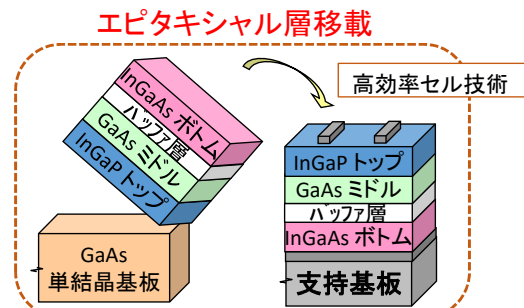
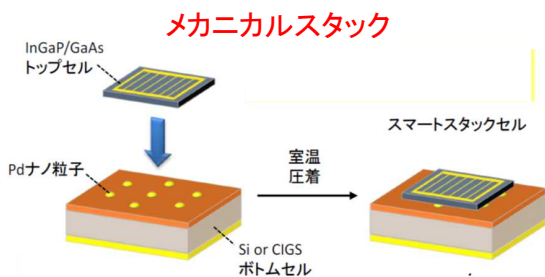


- ※ 括弧内は再委託先
- ① 超高効率セルおよび低コスト化技術開発 東京大学(埼玉大、タカノ)
 - ② 多接合セル・モジュールの低コスト化技術開発 シャープ(株)
 - ③ プラスチックレンズ一体型セル・モジュール パナソニック(株)
 - ④ 低コスト化技術・量子ドット成長技術 産総研
 - ⑤ 高効率・低コストIII-V/Siタンデム 豊田工大(九州大、大阪市大)
 - ⑥ 低コスト化製膜技術開発 大陽日酸(株)
 - ⑦ 高密度ドット成長技術 電気通信大学
 - ⑧ 量子ドットセル評価 神戸大学
 - ⑨ 窒化物ハイブリッド 名古屋大学/名城大学
 - ⑩ III-Vセル・モジュール開発・評価 宮崎大学
 - ⑪ メカニカルスタック 東京農工大学

開発内容 III-V族化合物太陽電池(研究開発項目②:革新的高効率太陽電池)

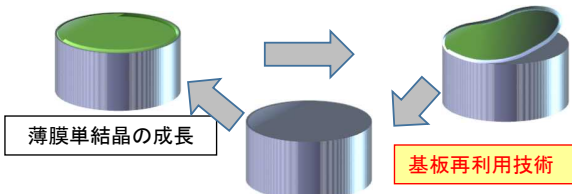
高速で太陽電池を製造する技術や高コストな基板を用いない技術の開発により高効率なIII-V化合物太陽電池を低コストで製造できる技術を開発する。

- ・発電層成膜速度の高速化技術(ハイドライド気相成長法など)
- ・高価なGaAs基板を再利用することで原料費を低減する技術
- ・シリコンや樹脂基板など、安価な基板上への成膜や接着技術

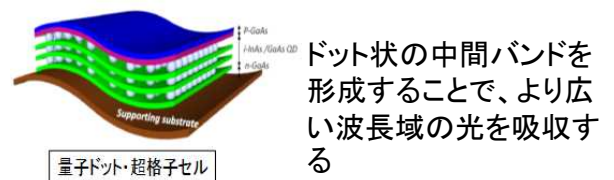


・高価なGaAs基板を再利用する技術

エピタキシャルリフトオフ(薄膜太陽電池層の剥離)



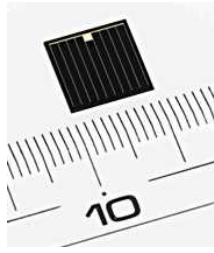
・量子ドットや超格子構造を用いた超高効率化技術



開発成果 III-V族化合物太陽電池(研究開発項目②:革新的高効率太陽電池)

太陽電池モジュールで**世界最高変換効率31.17%**を達成。軽量・フレキシブルも実現、その後低コスト化に向けた開発を実施。(シャープ株式会社)

2013年4月リリース



セル大型化
モジュール化

変換効率**37.9%**
セル面積1.047cm²

①世界最高効率III-V化合物太陽電池モジュール

2016年5月リリース



世界最高

変換効率**31.17%**
セル面積27.86cm²
モジュール面積968cm²

【セルサイズの大型化への技術開発のポイント】

- ①太陽電池製造基板サイズの大径化
- ②製造条件最適化による基板面内の均一性の向上
- ③基板サイズの大径化に適したセル製造プロセスの開発

太陽光発電システム搭載自動車走行実証試験

トヨタ自動車、NEDO、シャープの3社は協力して太陽光発電システム搭載自動車を作製。2019年7月のRE展のNEDOブースで展示した。その後公道走行での実証試験を実施中。



太陽電池モジュールを搭載した「プリウスPHV」



(日産実証車)

ボンネット、ルーフ、リアゲートに太陽電池を搭載(発電量1,150W以上)



NEDO事業でシャープが開発した世界最高の変換効率31.17%のIII-V族化合物太陽電池モジュール製造技術を活用し、トヨタ自動車を実施する走行実証の仕様に基づき、新たにモジュール化した。自動車のフード(ボンネット)やルーフ、バックドア(リアハッチ)など、曲面部分に沿って搭載。「プリウスPHV」に搭載することにより、860Wの発電容量を実現、一日の充電で30km以上走行可能を実証できた。日産でも同様のモジュール(発電量1150kw)を組み込んだ実証車を作製し、実証走行を開始した。

表1 「プリウスPHV」の市販モデルと実証車の性能比較

性能項目	車両	「プリウスPHV」 (ソーラー充電システム装着車)	実証車
太陽電池セルの変換効率		22.5%	34%以上
定格発電電力		180W	約860W
駐車時の駆動用バッテリーへの最大充電電力量(日当たり) ^{※注}		EV航続距離6.1km相当	EV航続距離44.5km相当
走行時の駆動用・補機バッテリーシステムへの最大充電・給電電力量(日当たり) ^{※注}		カーナビなどに使用する補機バッテリーシステムにのみ電力を供給	EV航続距離56.3km相当

ペロブスカイト太陽電池(研究開発項目②: 革新的低コスト太陽電池)

2019年度最終目標

(1) 量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術の開発。実験室レベルの小型太陽電池モジュールでの変換効率20%達成。

ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

新コンセプトの製造装置、信頼性確保技術、発電原理の検証と信頼性の高い性能評価技術の確立、さらなる性能向上を目指す新構造、新材料の基礎研究を産官学連携による集中研体制で進める。


A. 塗布製造技術の開発 パナソニック



D. 高性能・高信頼性 確保製造技術の開発
アイシン精機 (アイシンコスモス研究所)



E. 高性能材料 合成技術の開発
富士フィルム(2017年度まで)
(1)ペロブスカイト材料
(2)正孔輸送材料

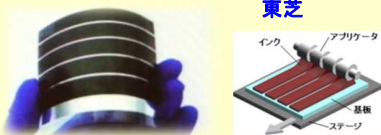


F. 基盤材料技術と 性能評価技術の開発
早稲田大学 (物材機構、KISTEC)



エネルギーレベルの自在調整
構造に依存するヒステシス
問題の解決で性能評価方法
の確立

B. 超軽量太陽電池モジュール技術の開発
東芝



G. 新素材と新構造による高性能化技術の開発
東京大学(産総研、九州工業大、東工大、兵庫県立大、京大、熊本大)
ペロブスカイト太陽電池構造制御 大型ペロブスカイト太陽電池セル




C. 低コストR2R太陽電池製造技術の開発
積水化学工業



※ 括弧内は再委託先

開発成果 ペロブスカイト太陽電池 (研究開発項目②: 革新的低コスト太陽電池)

ペロブスカイト層の高品質化や太陽電池構造の最適化を行い、新規ペロブスカイト材料を用いた**小面積セル(0.18cm²)**で**変換効率24.92%**、**3直列ミニモジュール(面積2.76cm²)**で**変換効率20.7%**を達成(東京大学)。

このような技術開発と連携して、各企業において**大面積モジュール**や**量産技術**を開発。併せて**耐久性向上**にも取り組む。



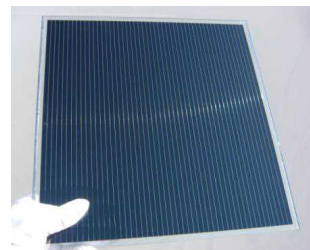
東芝: **世界最大面積のフィルム型**ペロブスカイト太陽電池モジュール (24.15cm × 29.10cm、面積703cm²)



パナソニック: インクジェットを用いた大面積塗布法を開発し、太陽電池モジュール(802cm²)で**世界最高のエネルギー変換効率16.09%**を達成。(その後17.93%)



積水化学: **ロールtoロール法**による量産化技術を検討。

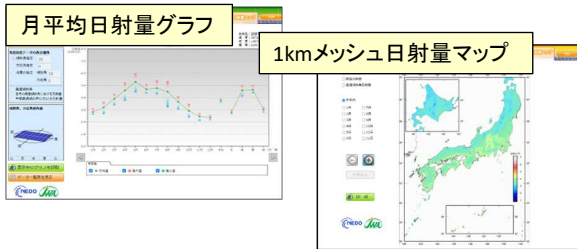


アイシン精機: **スプレー塗布工法**による大面積モジュール製造技術の開発(30cm角)。

開発内容 共通基盤技術の開発(研究開発項目④)

太陽光モジュールの発電量を推定するための技術開発

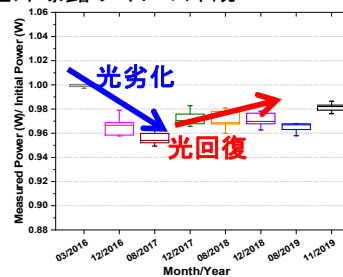
日射量データベースを構築し、メガソーラーの発電データからメガソーラーの発電量及び信頼性評価技術を開発する。



開発した日射量データベースの画面の例



発電量推定のためのデータを取得した屋外曝露サイトの外観

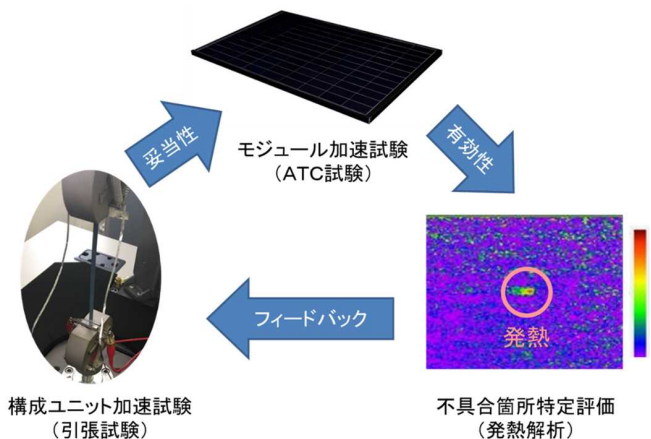
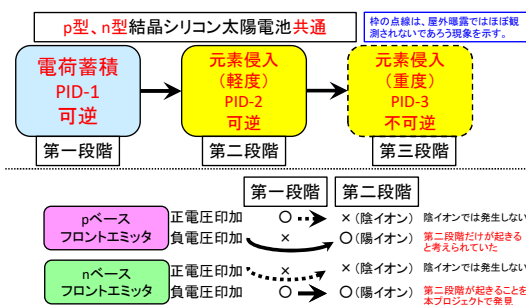


屋外曝露にともなうp型単結晶シリコン PERC太陽電池の出力の推移

開発内容 共通基盤技術の開発(研究開発項目④)

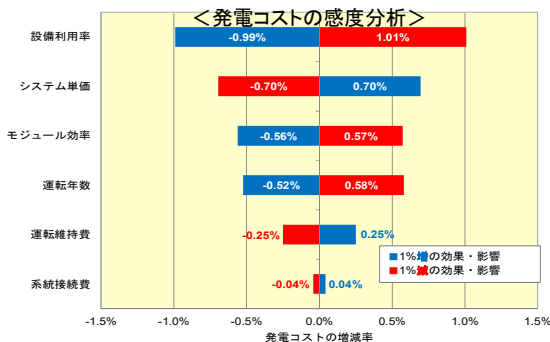
太陽電池モジュールの劣化要因の解明と加速試験方法の開発

太陽電池モジュールの劣化要因(PID現象等)を究明した。また、建材一体型太陽電池モジュール特有の加速試験の開発を行った。



成果 動向調査等 (研究開発項目⑤)

- ・セルモジュールを中心とした海外技術市場動向を調査した。
- ・今後実施すべき太陽光発電技術の戦略の検討として、**発電コストの感度分析**、**新市場の導入ポテンシャル**の試算を行った。
- ・新しい価値としての太陽光発電車載自動車の検討、シュミレーション、海外動向の情報収集等を実施した。
- ・**IEA PVPSタスク17「PV and Transport」**を初めとしてIEAにおける各種情報収集の支援を実施した。



NEDOウェブサイト：太陽光発電におけるNEDOの取り組み

・Snapshot Report日本語版、Trends Report日本語版、主要国の国内調査報告書日本語版（ダウンロード可能）。PVPS関連刊行物へのリンクもあります。



Snapshot Report (市場に関する速報報告書)
<http://www.iea-pvps.org/?id=266>
 日本語版：<https://www.nedo.go.jp/content/100785821.pdf>



Trends Report (太陽光発電に関する動向報告書)
<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=trends>
 日本語版：<https://www.nedo.go.jp/content/100778293.pdf>



主要国の動向調査報告書日本語版
<https://www.nedo.go.jp/content/100780924.pdf>
 最新の報告書はIEA PVPSウェブサイト
<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=93>



Annual Report (IEA PVPS及び加盟国/機関の年次報告)
http://www.iea-pvps.org/index.php?id=6&elD=dam_frontend_push&docID=4412



成果 動向調査等 (研究開発項目⑤)

IEA PVPS Members



Australia



Austria



Canada



China



Denmark



France



Germany



Israel



Italy



Japan



Korea



Malaysia



Mexico



The Netherlands



Norway



Portugal



Spain



Switzerland



Sweden



Turkey



Cu Copper Alliance™



USA



Belgium



Thailand



Finland



EC



South Africa



Chile

◆成果の普及

◆特許出願件数と学会発表等

(2020年8月末時点)

項 目	特許出願		論文 (査読付)	研究発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への掲載	受賞 実績	展示会 への出 展
	国内	外国					
研究開発項目①(結晶Si)	134	119	14	99	36	0	11
〃 (CIS)	18	9	6	41	488	1	7
研究開発項目②(Ⅲ-V)	11	4	248	1085	37	18	18
〃 (ペロブスカイト)	50	60	238	797	136	62	21
研究開発項目③(結晶Si)	15	3	155	778	14	14	13
〃 (CIS)	6	0	88	216	0	1	7
研究開発項目④	10	1	112	686	53	15	15
研究開発項目⑤	0	0	0	35	1	0	0
研究開発項目⑥	0	0	0	0	1	0	0
計	244	196	861	3,737	766	111	92

44

◆成果の普及

- ◆開発成果の普及については、NEDO自らも毎年「成果報告会」を開催したほか、国際会議、展示会等で広報に努めた。**2019年のRE展では太陽光発電搭載の実証車を展示**。数々の報道記事で紹介された。
- ◆また、プレスリリースについては**セル・モジュールの効率達成に加えて、太陽光発電の新分野への展開等**についても発行した。



◆ 成果の普及

以下はNEDOが行ったプレスリリースの実績。

掲載	件名
2020年7月6日	世界最高水準の高出力な太陽電池セルを活用し、電気自動車用太陽電池パネルを製作(シャープ株式会社と共同)
2020年1月20日	ペロブスカイト太陽電池大面積モジュールで世界最高変換効率16.09%を達成(パナソニック株式会社と共同)
2019年7月4日	世界最高水準の高出力太陽電池を搭載した電動車の公道走行実証を開始(シャープ株式会社と共同)
2019年5月13日	「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」中間報告書第2報を公表
2019年1月17日	CIS系薄膜太陽電池セルで世界最高変換効率23.35%を達成(ソーラーフロンティア株式会社)

ペロブスカイト太陽電池大面積モジュールで世界最高変換効率16.09%を達成
—世界、設置面積の大きい高効率太陽光発電が可能に—

2020年1月20日
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
パナソニック株式会社

NEDOは、太陽光発電の導入促進を目的に「高性能・高信頼性太陽電池の発電コスト低減技術開発」に取り組んでおり、今後、同事業でパナソニック（株）と共同で世界最高水準となる変換効率16.09%を達成し、さらなる効率向上を目指して開発したペロブスカイト太陽電池モジュール（開口面積30cm²、厚さ0.6mm、重量2.9mm）で世界最高変換効率16.09%を達成しました。
本モジュールの製造工程にインクジェットを用いた印刷製造技術を採用したことにより、製造コストを従来より大幅に削減し、高変換効率の電池を製造することができ、低コスト・高信頼性・高効率の太陽電池の製造が可能となります。
今後、ペロブスカイト材料の改良により結晶シリコン太陽電池並みの高効率化を達成し、軽便型での実用化に向けた技術開発を目指します。



図1 世界最高水準となる変換効率16.09%を達成したペロブスカイト太陽電池モジュール

世界最高水準の高出力太陽電池を搭載した電動車の公道走行実証を開始
—運輸分野におけるCO₂排出削減に向け、太陽電池活用可能性を検証—

2019年7月4日
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
シャープ株式会社
トヨタ自動車株式会社

NEDO、シャープ（株）（以下、シャープ）、トヨタ自動車（株）（以下、トヨタ）は、高出力太陽電池を搭載した電気自動車による、EV駆動距離や消費電力の検証を目的とした、公道走行実証を2019年7月下旬から開始します。
本実証を行うにあたり、シャープはNEDO事業の一環として開発した高出力太陽電池セル（変換効率14%以上）を専用車にモジュール化して太陽電池パネルを製作しました。トヨタは、「アリアスPHEV」のルーフラック、バックドアなどに同パネルを装着し、定格発電電力を約800Wまで高める公道走行用電気自動車（以下、実証車）を製作しました。大塚に高出力太陽電池を応用させたことに加え、「アリアスPHEV」では駐車中にのみ行っていた駆動用バッテリーへの充電を、実証車で公道走行中に実行するシステムを採用しており、EV駆動距離や消費電力の検証を想定しています。
トヨタは、実証車製造や実証車などについて、さまざまな走行条件下で走行実証を行い、本搭載セルからの発電量や駆動用バッテリーへの充電量などのデータの検証を通じて、今後の車載ソーラー充電システムの開発に活かすことを目的としています。また、実証車の一部は3車体制とし、NEDOが主催する「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」などで、CO₂削減効果をはじめ、充電効率向上などの利便性向上効果などを検証し、運輸部門を主とした太陽電池パネルの新規市場創出とエネルギー・環境問題解決へのさらなる貢献を目指します。



図1 太陽電池パネルを装着した「アリアスPHEV」実証車

◆ 成果の普及

掲載日	件名
2018年10月25日	太陽光発電の輸送分野における普及に向けた国際調査活動を開始
2018年6月18日	面積世界最大のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールを開発(株式会社東芝と共同)
2018年6月1日	新たに機能拡充した「日射スペクトルデータベース」を公開
2018年5月28日	太陽光発電の発電コスト低減を目指した2事業で新たにテーマを採択
2018年1月31日	「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」中間報告書を公表

面積世界最大のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールを開発
—モジュール面積703cm²で変換効率11.7%を実現—

2018年6月18日
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
株式会社東芝

NEDOと（株）東芝は、（株）東芝が保有するメソスコス技術に追加で新たなプロセス開発などにより、従来両立の困難であったセルの大面積化と高効率化を実現する、モジュール面積703cm²（面積世界最大）、変換効率11.7%のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールを開発しました。開発の応用に加え、さらなる高信頼性を併せ持つことで、今後の太陽電池の設置場所が広がることを期待されます。
今後、さらなる大面積化を達成し、材料選択・印刷技術の開発やペロブスカイト層の材料改良などにより、結晶シリコン太陽電池並みの高効率を目指すとともに、最終的にはプロジェクト目標である2030年に発電コスト1円/ kWhの削減に向けて、さらに技術開発を進めます。



図1 面積世界最大のフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール
(24.13cm×29.10cm、変換11.7%)

「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」中間報告書第2報を公表
—太陽光発電システム搭載自動車走行時に取得可能な日射量を計測—

2019年5月13日
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 石川智也

NEDOは、太陽光発電システム搭載自動車検討委員会の中間報告書第2報を本日公表しました。この中間報告書は、自動車に日射計を搭載して走行時に取得する日射量を計測した実証結果をまとめたもので、「太陽光発電システム搭載自動車の取得日射量は、道路沿いの建物や樹木、電柱などの影により低下することがあるが、建物などからの反射により、自動車取得する日射量が建物の影や、屋上などよりも大きくなる可能性もある」とを指摘しました。
なお、今回の中間報告書は、太陽光発電システム搭載自動車の実用による効果の試算結果を2018年1月に公開したものに続く第2報です。



図1 太陽光発電システム搭載自動車イメージ

◆ 成果の普及

掲載日	件名
2017年12月20日	CIS系薄膜太陽電池セルで世界最高変換効率22.9%を達成 (ソーラーフロンティア株式会社と共同)
2017年2月27日	CIS系薄膜太陽電池サブモジュールで世界最高変換効率19.2%を達成 (ソーラーフロンティア株式会社と共同)
2016年10月27日	結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高変換効率24.37%を達成 (株式会社カネカと共同)
2016年9月14日	結晶シリコン太陽電池で世界最高変換効率26.33% (株式会社カネカと共同)
2016年5月19日	太陽電池モジュールで世界最高変換効率31.17%を達成 (シャープ株式会社と共同)
2016年3月28日	ペロブスカイト太陽電池で変換効率18%超を達成 (物質・材料研究機構(NIMS)と共同)
2015年10月23日	実用サイズの太陽電池セルで変換効率25.1%を達成 (シャープ株式会社と共同)
2015年6月4日	太陽光発電の発電コスト低減に向けた新たなプロジェクトを始動

48

◆ 知的財産権の確保に向けた取組

各テーマ毎の取り組みは個別のプロジェクトの詳細説明および実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みにて説明。

特許出願(うち外国出願)	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	計
研究開発項目①(結晶Si)	16(0)	41(16)	58(30)	76(40)	62(33)	253(119)
〃 (CIS)	1(0)	5(1)	6(0)	5(3)	10(5)	27(9)
研究開発項目②(Ⅲ-V)	1(1)	1(0)	4(0)	6(1)	3(2)	15(4)
〃 (ペロブスカイト)	7(0)	32(12)	37(17)	40(31)	4(0)	110(60)
研究開発項目③(結晶Si)	0(0)	3(1)	3(0)	2(0)	10(2)	18(3)
〃 (CIS)	0(0)	2(0)	4(0)	0(0)	0(0)	6(0)
研究開発項目④	1(0)	2(0)	3(0)	3(1)	2(0)	11(1)
研究開発項目⑤	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)
研究開発項目⑥	-	-	-	0(0)	0(0)	0(0)
計	26(1)	86(30)	115(47)	132(76)	91(42)	440(196)

※2020年8月31日現在

49

◆本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

研究開発項目①、③

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを言う。

研究開発項目②

Ⅲ-Vやペロブスカイト等の次世代太陽電池については、コスト低減、効率向上、量産技術の開発等を行い、将来の事業化計画に反映すること。

研究開発項目④

太陽電池の評価や日射量データベースについては、技術確立を行うとともに、それが活用できる環境整備を行うこと。

◆実用化・事業化に向けた戦略と具体的取組み

- NEDOは実施期間中に各事業者を訪問し、幹部や研究開発のキーパーソンとディスカッションを行うことにより各機関の戦略、事業化の予定について議論を行い、マネジメント(体制変更や加速資金の配賦)に反映を行った。
- また、上記の議論や研究開発項目⑤(動向調査)を通して、研究開発項目⑥(高性能太陽電池製造技術実証)の追加や車載、ビル壁面等、これまで太陽光発電が導入されていなかった領域へ向けた検討を行い、例えば、車載については実証車の作製、実証走行を行った。

※実用化・事業化に向けての「取組み及び見通し」は「個別テーマの詳細説明および実用化・事業化に向けての見通し及び取組み」にて説明。

◆成果の実用化に対する課題と今後の方針

- 研究開発項目①、③については、シリコンとCISという既に海外企業との競争が激しい分野であり、競争優位性が出せるよう、企業の事業化状況を確認する。
- 研究開発項目②については、Ⅲ-V、ペロブスカイトの次世代電池については、コスト低減、効率のみならず、**量産技術、耐久性等の向上**が不可欠。また、シリコン、CIS等の既存太陽電池との棲み分けが可能な新規用途開拓が必要。
- 研究開発項目④については、電池の評価や日射量データベースといった共通基盤技術については、それが活用できる**環境整備**につなげる。



- 高性能高信頼性プロジェクトの成果については、企業が事業化への検討を進めるとともに、新市場等、今後の展開可能性については2020年度から開始した**「太陽光主力電源化推進技術開発」**において、事業化に向けた技術開発について引き続き支援を行う。

◆波及効果

- 研究開発項目①、②、③については、日本の太陽光発電モジュールを中心とした関連の産業力強化、国内シェア増加につなげる。また、新規分野への展開により、市場規模の拡大が見込める。
- 研究開発項目④については、太陽光モジュール企業のみならず、太陽光発電システム、事業者にとっても裨益するものである。

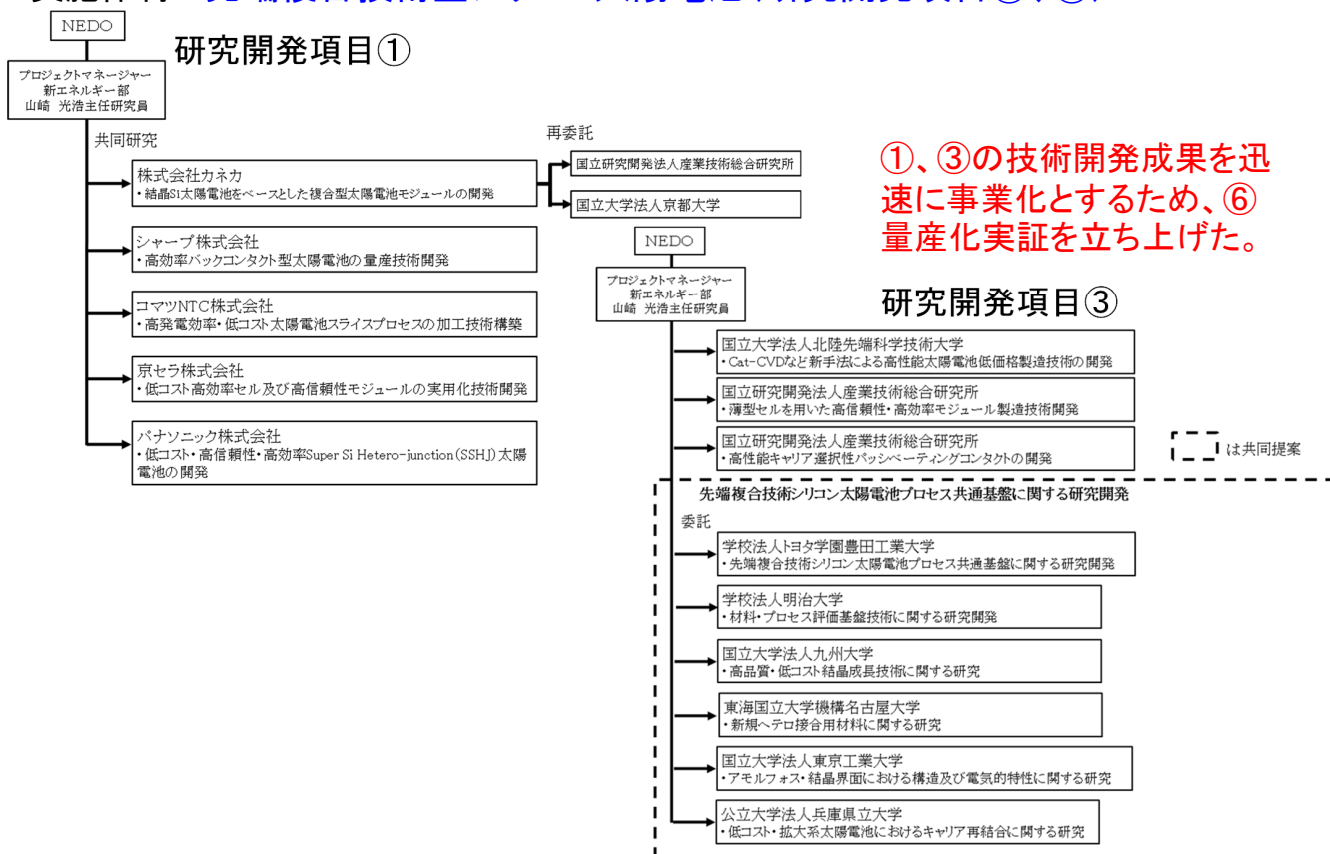


- 上記を通じて、日系企業モジュールの産業競争力強化や国内導入量の増加、更にはCO2削減等につなげる。

補足資料

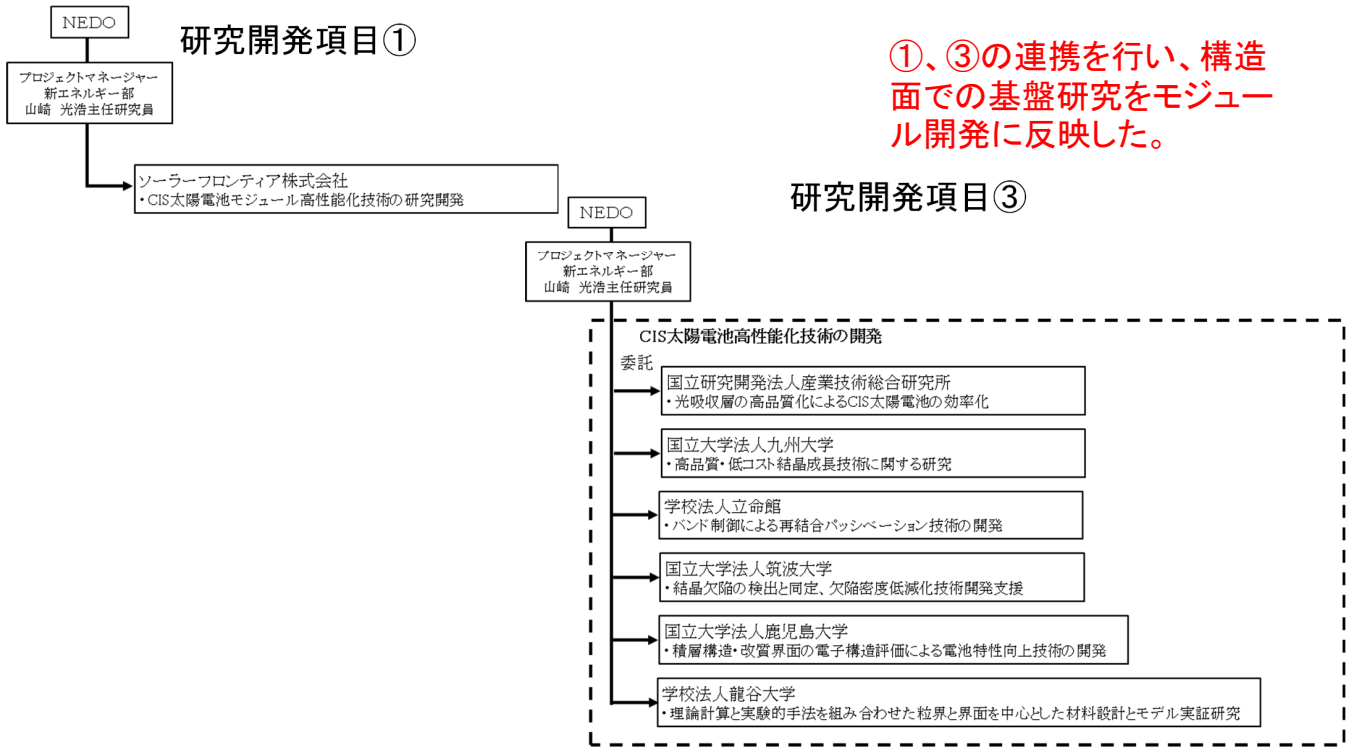
2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

実施体制 先端複合技術型シリコン太陽電池(研究開発項目①、③)



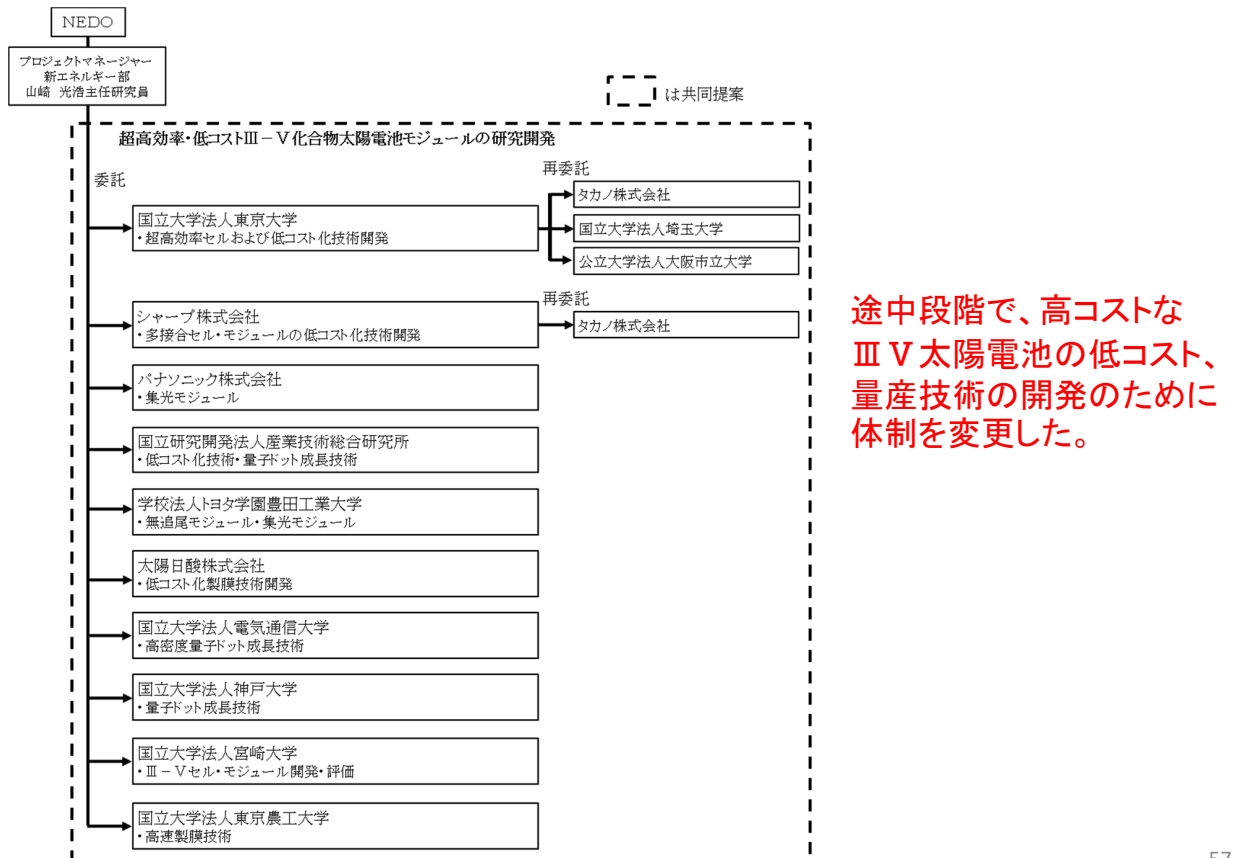
2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

実施体制 高性能CIS太陽電池の技術開発(研究開発項目①、③)



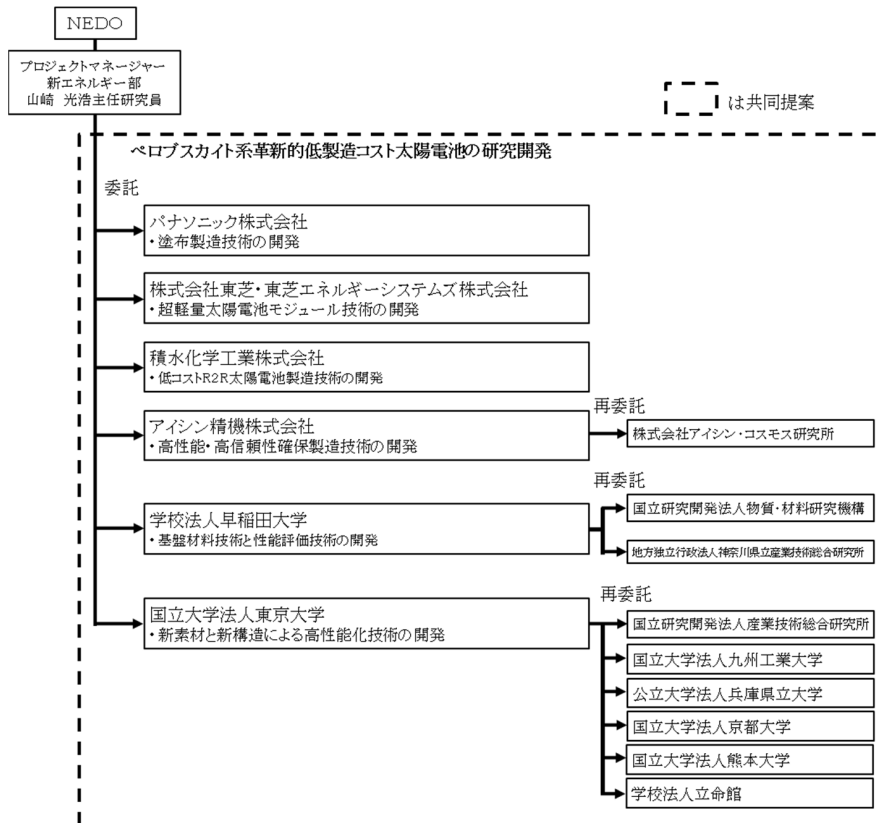
2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

実施体制 III-V族化合物太陽電池(研究開発項目②: 革新的高効率太陽電池)



2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

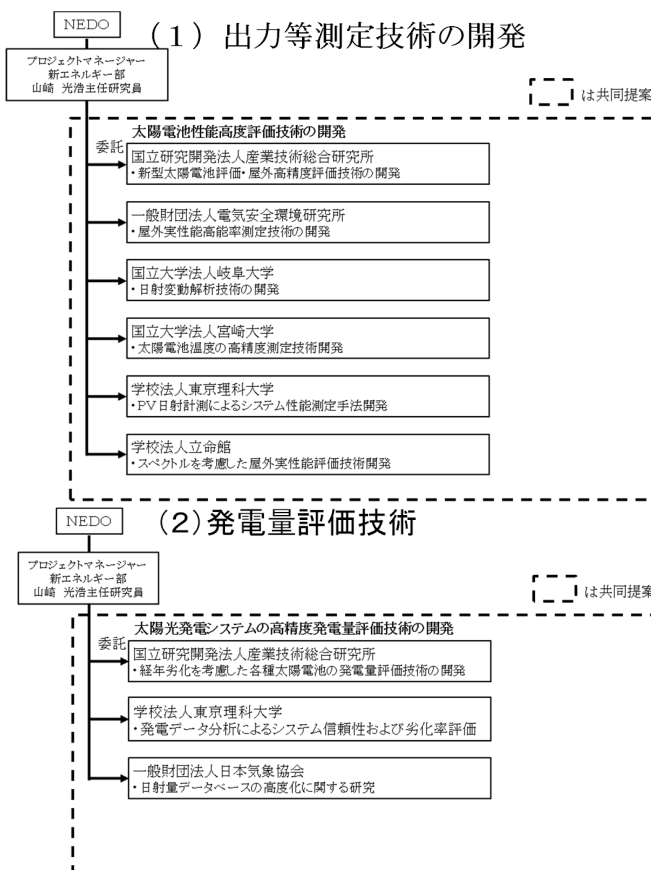
実施体制 ペロブスカイト太陽電池(研究開発項目②): 革新的低コスト太陽電池



大学の基盤研究と用途毎のモジュール開発を連携し、一体的な開発体制にて実施。

2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

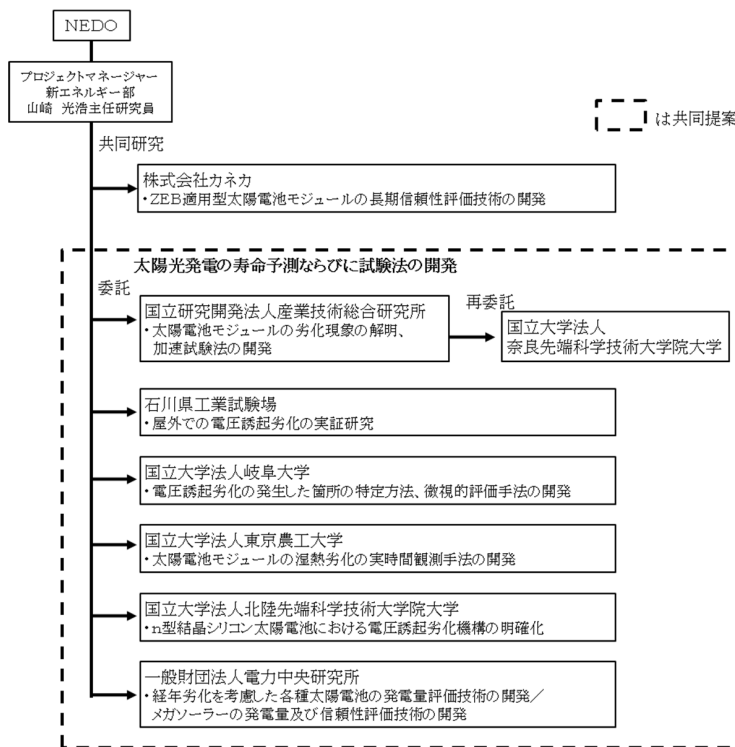
実施体制 共通基盤技術の開発(研究開発項目④)



産総研を中核として、各大学が強みを持つ技術開発と連携。

実施体制 共通基盤技術の開発(研究開発項目④)

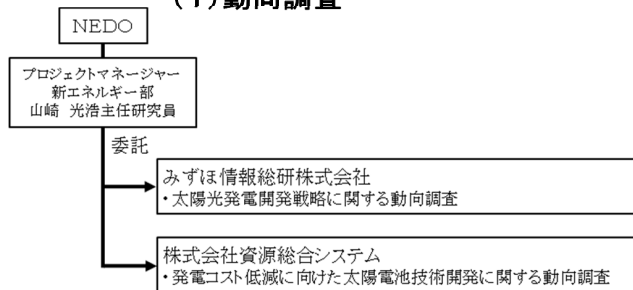
(3) 信頼性・寿命評価技術の開発



産総研を中核とした劣化、加速試験の開発と壁面設置のモジュールの長期信頼性評価を連携。

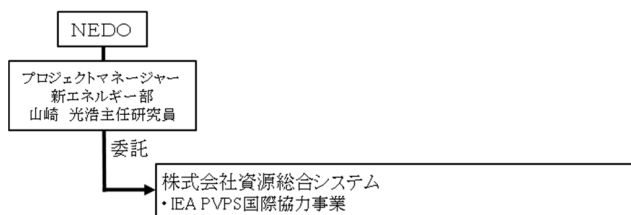
実施体制 動向調査等(研究開発項目⑤)

(1) 動向調査

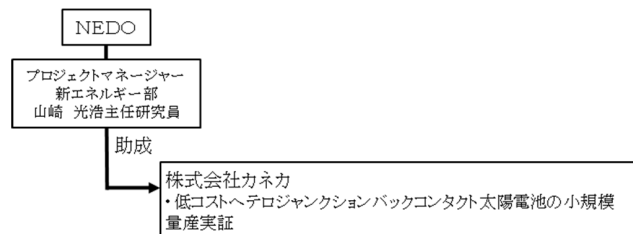


途中段階で、動向調査において、車載太陽光の項目を追加。

(2) IEA国際協力事業



実施体制 高性能太陽電池製造技術実証(研究開発項目⑥)



Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

研究開発項目①

先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発

【結晶シリコン】

- ・結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発(株式会社カネカ)
- ・高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発(シャープ株式会社)
- ・低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発(京セラ株式会社)
- ・基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発(ナミックス株式会社)
- ・赤外線FZ法による高品質低コストシリコン単結晶の開発(株式会社クリスタルシステム)
- ・高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築(コマツNTC株式会社)
- ・太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御(株式会社トクヤマ)
- ・低コスト・高信頼性・高効率 Super Si Hetero—junction(SSHJ)太陽電池の開発(パナソニック株式会社)

【CIS】

- ・CIS太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発(ソーラーフロンティア株式会社)

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発
実施者	株式会社カネカ、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人京都大学
期間・予算	2015年7月～2020年2月末 5年間、総額：約1,332.5百万円
目標	(1) モジュール変換効率：24%（実用サイズモジュールにて）(2) 発電コスト 14円/kWh
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ヘテロ接合バックコンタクト結晶Si太陽電池により、Si太陽電池の世界最高記録(セル変換効率26.7%、モジュール変換効率24.5%)達成（産総研測定） ・住宅用建材一体型モジュールにおける発電コスト14円/kWh以下
ポイント	<ol style="list-style-type: none"> ① 高品位ヘテロ接合形成技術、パターン形成技術、セル高性能化技術を開発。 ② 高出力、高信頼性モジュール技術を開発。 ③ 実用化技術(特に高効率技術、低コストパターン形成技術)を開発し、発電コストを低減。



結晶Si太陽電池における世界最高変換効率モジュール（ヘテロ接合バックコンタクト太陽電池）

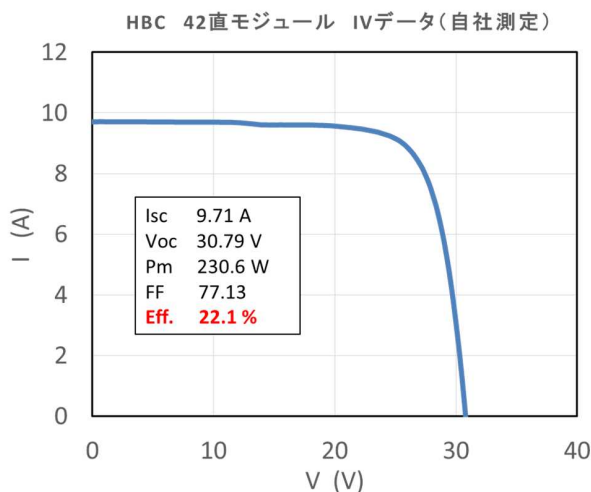
64

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発
実施者	シャープ株式会社
期間・予算	2015年5月22日～2020年2月29日 5年間 1,511百万円(税込)
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・モジュール変換効率22%を試作モジュールで確認する。 ・7円/kWhの定量的なシナリオの作成
概要	<ol style="list-style-type: none"> ①モジュール変換効率22.1%を42直の試作モジュールで確認 ② 2025年発電コスト目標 7円/kWhの定量的なシナリオを提示
ポイント	



42直モジュール



65

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発
実施者	京セラ株式会社
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額:605.3百万円
目標	発電コスト14円/kWhを実現する太陽電池モジュールの製造技術導入
概要	高効率・高信頼性モジュール技術を製造導入し、発電コスト14円/kWh以下を実現した。

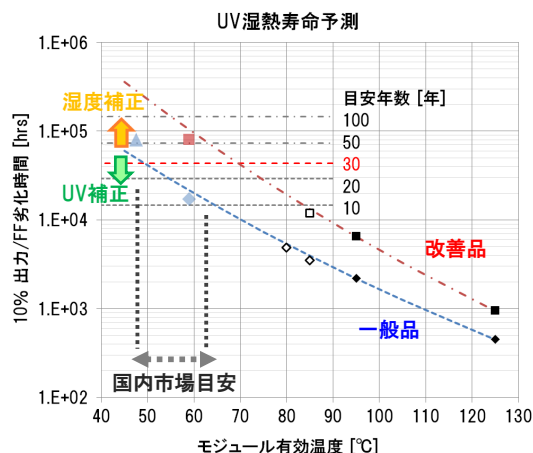
ポイント

【高効率、低コストセル/モジュール技術開発】

- ・シードキャスト基板を用いた両面受光PERC仕様セル効率22.0%(AIST測定)
- ・モジュール効率20.1%(社内測定)を確認

【高信頼性モジュール開発】

- ・信頼性加速試験、市場回収品追加加速試験、及び劣化原理解析に基づく寿命予測技術を開発
- ・PERC60直モジュールにて非住宅市場で予測寿命35年以上であることを確認



Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	1.n-PERT用低再結合電極の開発
実施者	ナミックス株式会社
期間・予算	2015年7月21日～2018年3月31日
目標	①低表面濃度のn+層に対する接触抵抗低減 $2\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下 (基板表面濃度 $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$) ②p+層に対する接触抵抗低減 $5\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 以下 (基板表面濃度 $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$) ③電極形成による再結合 ($j_0\text{-met}$)抑制 500fAcm^{-2} 以下

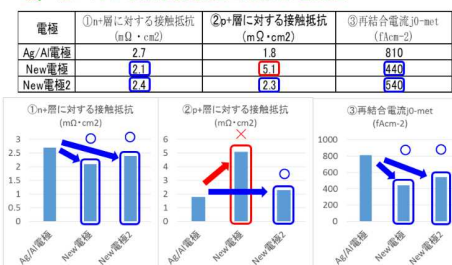
概要

n-PERT型のp+エミッター、n+エミッター用に使用される電極ペーストにおいて、焼成後の電極直下での再結合に起因する開放電圧低下を抑制する電極開発を行った。

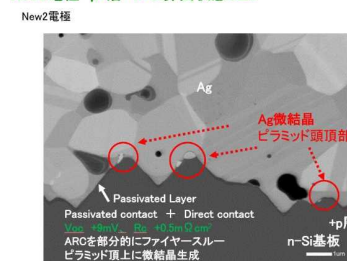
ポイント

アルミ金属を使用せずガラスフリットの反射防止膜への反応性を調整することで、目標値も達成し、適切にパッシベーション膜を残したまま基板との接続性を確保することに成功した。この結果、電極-シリコン基板間の再結合電流密度を小さく抑えることができるようになり高い変換効率が得られる電極ペーストの開発に成功した。

n+, p+層に対する接触抵抗値と再結合電流値



New2電極 p+層 n-Si界面状態SEM

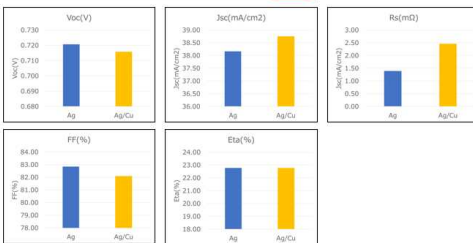


Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	2.ヘテロジャンクション用卑金属電極の開発
実施者	ナミックス株式会社
期間・予算	2015年4月1日～2017年3月31日
目標	①電極コスト削減率(%) -30%(銀ペースト対比) ②変換効率(%) -0.05%以内(銀ペースト対比) ③接触抵抗 8.0mΩ cm ² 以内(銀ペースト対比)
概要	ヘテロジャンクション型の太陽電池用の銀ペーストのコスト削減のために非金属を使用した電極を開発する
ポイント	銀粉末と銀コート粉末を混合使用したペーストにより目標値を達成する電極が出来た。変換効率、信頼性ともに銀ペーストと同等であり実用レベルであることがわかった。

4BB セル 太陽電池特性結果

ペースト	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	Rs(mΩ)	FF(%)	Eta(%)
Ag	0.721	38.16	1.39	82.04	22.78
Ag/Cu	0.716	38.75	2.46	82.08	22.76

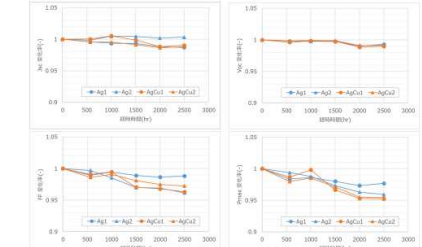


Ag/Cu 変換効率Eta -0.02%差 (Ag対比)
→ 目標値変換効率Eta -0.05%以内達成

1セルモジュール信頼性結果

DH 85°C/85% 2500hr結果

IV測定結果 (n面)



-DH85%/85°C 2500hrまでは0.5%以内の変化にとどまっている。OK。

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	赤外線FZ法による高品質低コストシリコン単結晶の開発
実施者	株式会社クリスタルシステム
期間・予算	2015年7月～2018年2月末 3年間、 総額299.9百万円
目標	①直径: 220mm ②長さ: 300mm以上 ③導電型: N型リンドープ ④ライフタイム: 5000 usec以上 ⑤結晶欠陥: ≤0.1個/cm ³ (大きさ100nm以上) ⑥転位: 0 個/cm ² ⑦抵抗面内分布: 12%以下 (100Ω cm, N型) ⑧酸素成分濃度: ≤2×10 ¹⁶ atoms/cm ³ ⑨炭素成分濃度: ≤2×10 ¹⁶ atoms/cm ³
概要	赤外線FZ法技術の確立により、N型シリコン単結晶基板の安価な製造を実用し、2020年における14円/kWh、及び2030年における7円/kWhの発電コスト低減の実現に寄与する。
ポイント	①直径130mm/長さ105mmの単結晶、及び厚さ525umのウェーハの製造を実現 ②結晶成長方向比抵抗分布≤15%による歩留改善による低コスト化の実現 ③ネッキング法の導入による無転位化の達成 ④高ライフタイム化、低Oi・Csによる品質向上(表1)



左: 赤外線FZ法により育成されたシリコン単結晶
右: 得られた単結晶より加工したシリコンウェーハ

表1.赤外線FZシリコン単結晶の比抵抗別の特性評価結果

NO.	比抵抗 (Ωcm)	ライフタイム (μsec)	酸素成分濃度 (Oi) (atoms/cm ³)	炭素成分濃度 (Cs) (atoms/cm ³)
目標		5000	≤2.0×10 ¹⁶	≤2.0×10 ¹⁶
条件1	1	7397	1.6×10 ¹⁴	6.9×10 ¹⁵
条件2	5	7962	6.9×10 ¹³	1.2×10 ¹⁵

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

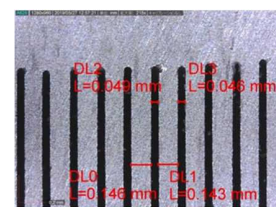
テーマ名	高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築
実施者	コマツNTC株式会社
期間・予算	2015年5月～2020年2月 5年間、総額:100.9百万円(うちNEDO負担 2/3)
目標	①14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化 ②2025年までに7円/kWhを実現する要素技術確立 に資するスライス技術の構築
概要	発電効率への影響把握と改善、シリコン材料歩留向上およびスライスコスト削減を開発 ⇒1.33円/kWhの発電コスト低減に寄与し、7円/kWh達成シナリオを提示した
ポイント	

*達成度
◎:数値目標クリア+想定以上の付加価値を実証、○:数値目標クリア、△:数値目標未達

開発内容	最終目標	研究開発成果	達成度*
結晶シリコン太陽電池の発電効率向上	太陽電池性能影響把握	・影響明確化/改善技術構築 ・低ダメージ加工優位性確認済	○
	大学試作セル効率 $\geq 25\%$	・薄板PV発電効率22.4% ・薄板PV製作の課題抽出済	○ *スライス品質問題し
結晶シリコン太陽電池の製造コスト低減	切断ピッチ0.11mm	・ピッチ0.15mm加工技術構築 ・t80 μm までのPV試作完了	△
	カーフロス60 μm 以下	・カーフ60 μm 加工技術構築 ・カーフ50 μm 加工確認済	◎
	スライスコスト18円/枚以下	・12.5円/枚を達成	◎



極薄N型bifacial PERTセル外観

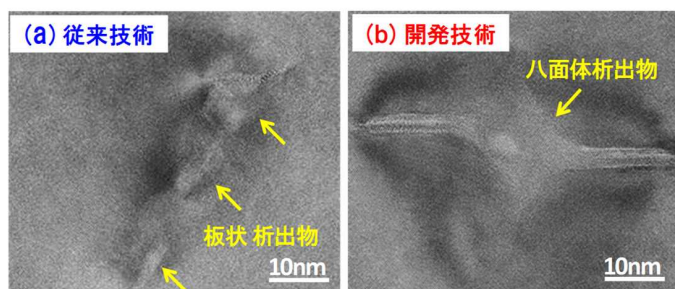


カーフ50 μm 切断面

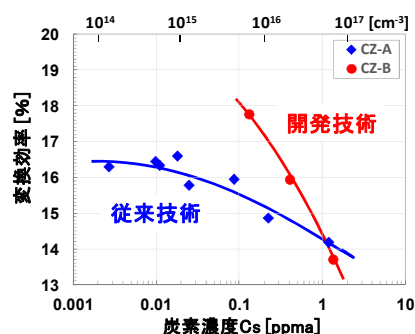
70

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御
実施者	株式会社トクヤマ
期間・予算	2015年5月～2017年3月末 2年間、総額:60.0百万円
目標	① 不純物および欠陥の影響把握と制御化 ② ライフタイム目標値は1000 μsec とし、ライフタイム下限値は300 μsec 以上
概要	① 炭素不純物を核に成長する酸素析出物がキラ欠陥となり、ライフタイムや変換効率に悪影響を及ぼす。炭素濃度と結晶成長条件により、酸素析出物の形態と数密度が変化し、ライフタイムが変化することを明らかにした。 ② 酸素析出物の形態と数密度を制御して、高ライフタイムの単結晶インゴットを得るCZ法結晶成長技術を開発した。直径8～9インチの実用サイズのn型インゴット全長で、ライフタイム2000 μsec 以上が得られ、目標を達成した。



(a)従来技術と(b)開発技術の結晶中に成長した酸素析出物



インゴットトップの変換効率と炭素濃度の関係

71

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コスト・高信頼性・高効率Super Si Hetero-Junction (SSHJ)太陽電池の開発
実施者	パナソニック株式会社
期間・予算	2018年6月～2019年9月末 1年3カ月 総額: 117.8百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池の高効率化と高信頼性の両立やその低コスト製造技術を開発。2020年に発電コスト14円/kWhを実現 2025年に発電コスト7円/kWhを目指す 目標を達成するためには、6インチサイズの太陽電池として下記目標値が必要と試算。自社量産化試作ラインを用いて開発を実施。

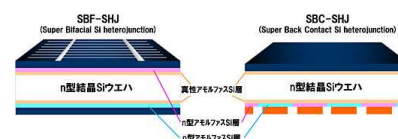


図 新構造(SBF, SBC)セル

構造	コスト見込み	達成時期	モジュール効率	セル効率
SBF-SHJ	<14 円/kWh	2020年	20.5%	23.7%
SBF-SHJ	<7円/kWh	2024年	20.8%	24.0%
SBC-SHJ	<7円/kWh	2024年	22.0%	25.0%

概要	<ul style="list-style-type: none"> 量産化試作ラインを用いた、6インチ基板太陽電池の開発 新構造セル(SBF, SBC-SHJ)の要素技術の開発 基板サイズの拡大+プロセス技術, ヘテロ接合技術の高度化技術, テクスチャ形状, リソレス電極などの新規技術 ヘテロ接合形成プロセス技術の開発において産総研、北陸先端科学技術大学院大学と連携することで開発効率を向上
----	--

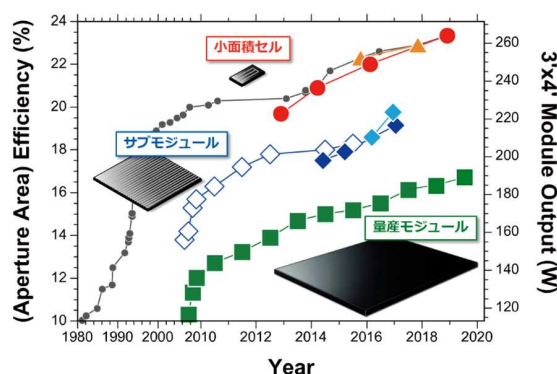
ポイント	太陽電池の高効率化と高信頼性の両立やその低コスト製造技術の開発に成功 発電コスト達成の見込み、モジュール効率・セル効率を短期間で達成
------	--

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	CIS太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発
実施者	出光興産株式会社(ソーラーフロンティア株式会社、昭和シェル石油株式会社)
期間・予算	2015～2019年度(NEDO負担額計1,112百万円)
目標	発電コスト14円/kWh(製品サイズ試作モジュール変換効率16%)

概要	発電コスト低減に資するCIS太陽電池モジュール出力向上のための技術開発を行った
----	---

ポイント	<ul style="list-style-type: none"> 発電コスト 13.3円/kWh (事業開始前:19円/kWh) 製品サイズ試作モジュール変換効率 16.1% (事業開始前:13.8%) サブモジュール変換効率 19.8% (事業開始前:18%) 小面積セル変換効率 23.4% (事業開始前:20.9%)
------	---



CIS太陽電池の変換効率の推移

研究開発項目②

革新的新構造太陽電池の研究開発／

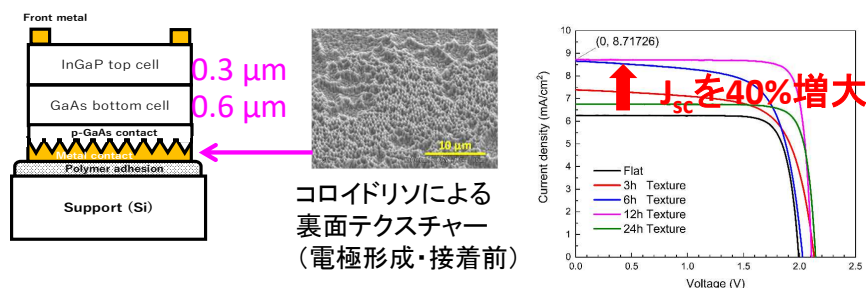
超高効率・低コストⅢ-V化合物太陽電池モジュールの研究開発

- ・低コストセル技術開発(東京大学、シャープ株式会社、産業技術総合研究所、大阪市立大学(再))
- ・低コスト化プロセス技術開発(産業技術総合研究所、東京農工大学、東京大学、タカノ(再)、シャープ株式会社、豊田工業大学、大陽日酸株式会社)
- ・低コストモジュール開発(シャープ株式会社、パナソニック株式会社、宮崎大学、豊田工業大学)
- ・超高効率セル開発(東京大学、埼玉大学(再)、シャープ株式会社、宮崎大学、産業技術総合研究所、電気通信大学、神戸大学)

74

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

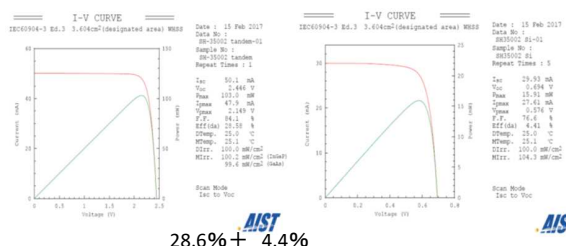
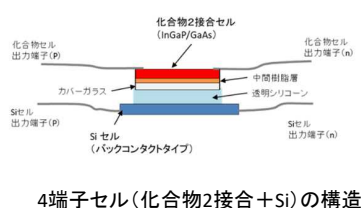
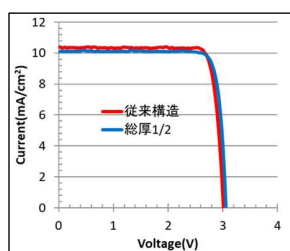
テーマ名	高効率Ⅲ-V 薄膜セル開発(光閉じ込め)
実施者	東京大学
期間・予算	2015～2019年度(5年間) 1498百万円(他テーマとの合算額)
目標	量子井戸を含むⅢ-V薄膜3接合セルおよびⅢ-V薄膜2接合+シリコンセルに光閉じ込め構造を実装し、光閉じ込め効果を有効に用いることで変換効率33%の達成に資する
概要	サブセルの総厚を3.5 μmから1.0 μmまで約7割削減しても、効率は33.2%から30.2%まで約1割しか低下しないことをシミュレーションで示した。 コロイドリソグラフィー+ドライエッチングによる裏面テクスチャ形成を、薄膜2接合セル(InGaP 300 nm/GaAs 600 nm)に適用。裏面ミラーの場合に比べて主にGaAsの光吸収を増大してJ _{sc} を40%増大。
ポイント	裏面テクスチャつき薄膜2接合セル →裏面ミラーの場合に比べて主にGaAsの光吸収を増大してJ _{sc} を40%増大。



75

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コストセル技術開発／高効率Ⅲ-V薄膜セル開発(光閉じ込め)、シリコン上Ⅲ-V多接合セル
実施者	シャープ株式会社
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:1234.2百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> 化合物太陽電池層の膜厚を従来の1/4に低減した構造で、変換効率33%を達成する。 Ⅲ-V族2接合セルとSiセルとの接合を行ったセルで、変換効率33%を達成する。
概要	<p>高効率を維持しながらⅢ-V化合物エピタキシャル膜の膜厚を低減し、低コスト化を目指す。</p> <p>①Ⅲ-V族化合物セルのみと、②Ⅲ-V族セルとSiセルのスタック構造の2構造を開発</p>
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> ①の構造は従来比1/2は達成、目標の1/4には達せず。 ②の構造は、非導電性接着剤を用いたメカニカルスタックの4端子構造で33%を達成

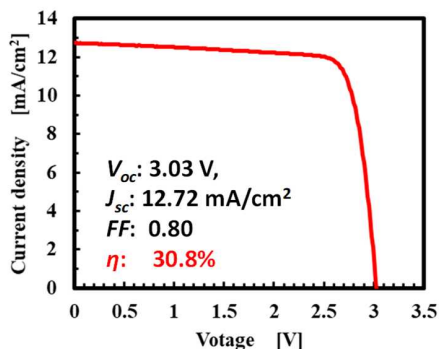


薄型化したⅢ-V化合物セルの電気特性

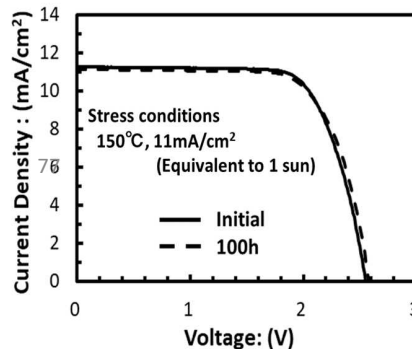
電気特性：化合物2接合(左)28.6% Si(右)4.4%

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コスト化技術・量子ドット成長技術 (スマートスタックセル)
実施者	産業技術総合研究所
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額：446.7百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> GaAs/Si多接合太陽電池で効率30% ・素子寿命30年以上の高信頼性化技術指針確立 システム価格125円/W実現のためのスタック技術確立の指針獲得
概要	<p>・Pdナノ粒子配列を利用したスマートスタック技術により、発電効率30%以上を有しかつコストミナムなセル構造および実用化技術を検討する。</p>
ポイント	<p>・InGaP/GaAs//Si 3接合太陽電池で効率30/8%達成。 スマートスタック、HVPEによる低コスト化・高効率化によりシステムコスト125円/Wが実現できることを示した。</p>



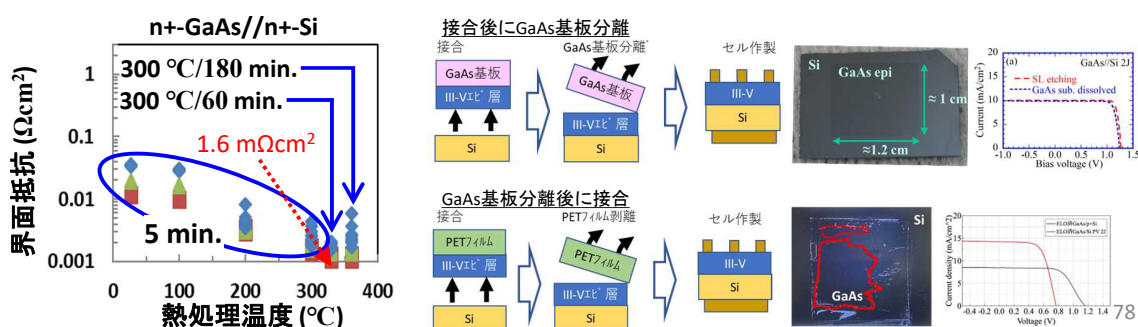
InGaP/AlGaAs//Si 3接合セルのJ-V特性: 効率30.8%で最終目標達成



Ⅲ-V//Siセルの加速劣化試験結果: アレニウスプロットにより素子寿命30年以上確認: 最終目標達成

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コストセル技術開発／シリコン上Ⅲ-Vセル(直接接合)
実施者	公立大学法人大阪 大阪市立大学
期間・予算	2015年4月～2020年3月末 5年間、40百万円
目標	ウエハ接合によるシリコン上Ⅲ-V多接合セルにおいて、非集光下でセル効率33%を実現する。
概要	低抵抗直接接合界面を実現する。 Siボトムセルに接合と両立するパッシベーション層を導入する。 GaAs基板の再利用を可能とする直接接合プロセスを探索する。
ポイント	低界面抵抗 ($1.6 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$)、高プロセス耐性のGaAs//Si接合を実現し、手法を他材料系の検討にフィードバックした。 ITO、グリッドメタルを介した接合を導入し、セル動作を実証した。 GaAs基板の分離・再利用に向けたプロセスの有効性実証、技術課題の明確化を行った。



Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発(大項目)革新的新構造太陽電池の研究開発(中項目)超高効率・低コストⅢ-V化合物太陽電池モジュールの研究開発(メカニカルスタック)(小項目)」
実施者	国立大学法人東京農工大学
期間・予算	期間:2015年6月1日～2020年2月29日 予算:52,505,000円
目標	<ol style="list-style-type: none"> 1. 高度光利用技術開発:メカニカルスタック層の光の伝達効率94%(光反射ロス6%) 2. 大面積低抵抗接合技術開発: 4インチレベルにおいてメカニカルスタック層の接合抵抗率$0.5 \Omega \text{ cm}^2$ 3. 高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発: 効率30%セルの実現とシステムコスト125円/Wを見込むスタック技術確立
概要	<ol style="list-style-type: none"> 1. IGZO無反射導電薄膜導入により光の伝達効率95%を達成した。 2. 40 nm程度の表面ラフネス導入により$0.12 \Omega \text{ cm}^2$ の低抵抗率を達成した。 3. Ⅲ-V トップセルとシリコンボトムセルの2接合メカニカルスタックソーラーセルを作製し、変換効率= 24.9%を得た。

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

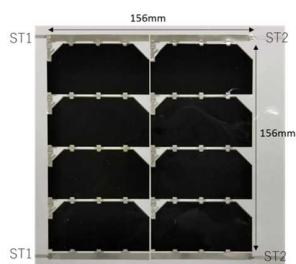
テーマ名	低コスト化プロセス技術開発／低コスト実装プロセス:エピ層移載・ 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術:MOCVD	
実施者	東京大学・タカノ株式会社(再委託)	
期間・予算	2015～2019年度(5年間) 1,498百万円(他テーマとの合算額)	
目標	4インチウエハ対応のELO, 10回以上の再利用基板上へのⅢ-V化合物セル作製 高速MOVPEによりGaAsセル効率20%(100 μm/h成長), InGaPセル効率12%(20 μm/h成長)	
概要	チップサイズ試料で50mm/h、4インチ基板で20mm/hの速度でのELOを実証 高速成長GaAsセル: 120 μm/hの成長速度でAIST認証効率24.5%を達成(世界最高記録) 高速成長InGaPセル: 30 μm/hの成長速度で効率15.3%を達成.	
ポイント	4インチ対応のELO自動機を開発 再生処置後の4インチウエハについて 1時間以内の全面観察技術の確立	大陽日酸と共同して高速MOCVD装置を開発 高速成長でもセル効率を劣化させない 成長条件とセル構造を開発.



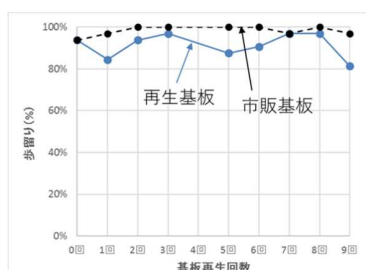
80

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

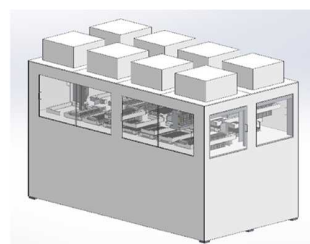
テーマ名	低コスト化プロセス技術開発／低コスト実装プロセス:エピ層移載・ウエハ再利用	
実施者	シャープ株式会社	
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:1,234.2百万円	
目標	基板の再利用可能回数を10回まで向上させる.	
概要	エピタキシャル層を基板から剥離し再利用可能なプロセス、および剥離膜の太陽電池セル化プロセスを確立する	
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> エピ層剥離装置の開発により安定したエピ剥離が可能、かつ、低コストの技術を確立 剥離後基板を低コストで再利用可能にする技術を開発し、開発した技術を用いて基板の再利用が10回以上可能であることを実証 量産装置の設計および価格見積を行い、開発したプロセスのコスト試算を実施 	



基板剥離で剥離した太陽電池層を用いて作製したモジュール



太陽電池歩留と基板再生回数の相関



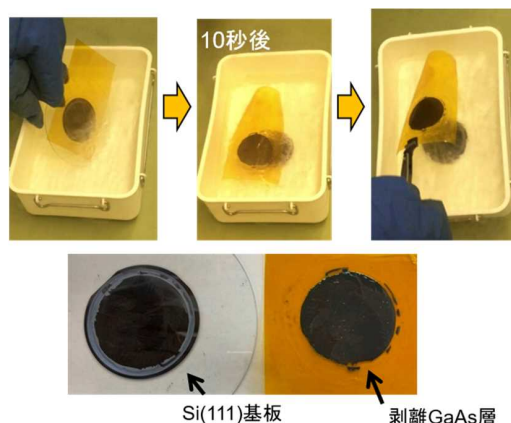
基板剥離量産装置(イメージ)

81

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コスト化プロセス技術開発／低コスト実装プロセス: エピ層移載・シリコン上III-Vエピ成長
実施者	豊田工業大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:368.7百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・3インチウエハサイズの高速リフトオフ ・10回以上の再利用基板上へのIII-V化合物セル作製
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・Si上III-Vセルのヘテロエピ成膜技術を開発する。 ・層状化合物の劈開性を利用してIII-Vセル層を基板から高速リフトオフし、安価な支持基板上に移載する技術を開発する。
ポイント	

- ・Si上のGaAsヘテロエピ成膜において、GaAs層の転位密度を $3 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$ に低減した。
- ・GaAs、およびSi基板上に層状化合物GaSe/In₂Se₃をバッファ層で挿入してGaAs層をエピ成長し、GaAsエピ層を基板から**高速リフトオフする手法を開発**した。液体窒素冷却による熱応力を利用し、3インチSi基板から**約10秒でGaAsエピ層剥離を実現**した。(最終目標:3インチウエハサイズの高速リフトオフ、達成 :10回以上の再利用基板上へのIII-V化合物セル作製、未達)



82

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コスト化プロセス技術開発／低コストIII-V化合物半導体製膜技術
実施者	大陽日酸株式会社
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:393.8百万円
目標	HVPE装置、MOCVD装置によるGaAs、InGaP高速成長技術開発
概要	化合物太陽電池普及に必要な低コスト化製膜装置の要素技術の獲得を目的としたHVPE装置、MOCVD装置の開発。
ポイント	

- ・GaAs、InGaP薄膜などの化合物太陽電池の製造に適したHVPE装置、MOCVD装置を開発した。
- ・いずれも開発目標であるGaAs成長速度 $100 \mu\text{m/h}$ を大きく上回る成果を得た。
- ・今後、得られた知見をもとに量産対応の化合物太陽電池向け製膜装置を開発し、市場投入する。



開発したHVPE装置 H260外観

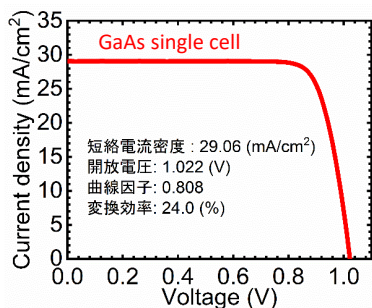


開発したMOCVD装置 HR3335外観

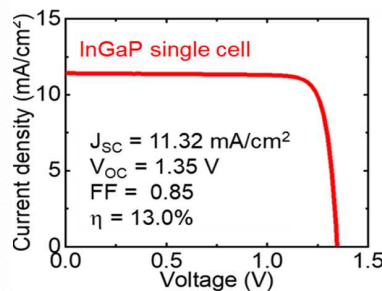
83

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

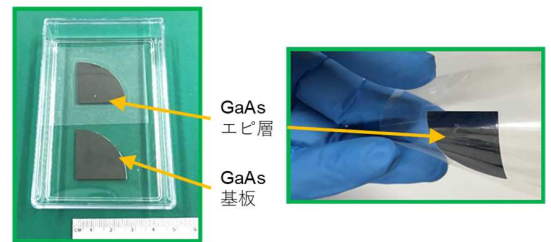
テーマ名	低コスト化プロセス技術開発／低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE
実施者	産業技術総合研究所
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額：446.7百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・単セル効率24% (GaAs)、12% (InGaP) の達成、成長速度100 $\mu\text{m}/\text{h}$以上の達成。 ・AlAs層の成長によるELO技術の実証
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・HVPE法によるⅢ-V族化合物半導体太陽電池作製技術の研究開発。超高速成長及び高効率化により成膜コストを1/10以下に削減する革新的成膜技術の開発を目指す。
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs効率24%、InGaPセル効率13%で最終目標達成。成長速度はGaAs170 $\mu\text{m}/\text{h}$、InGaPで140 $\mu\text{m}/\text{h}$達成。HVPEによるGaAs膜のELOに世界で初めて成功。



HVPE成長GaAsセルのJ-V特性：
効率24.0%で最終目標達成



HVPE成長InGaPセルのJ-V特性：
効率13.0%で最終目標達成



HVPE成長AlAsによりELOで剥離したGaAs膜：世界初

84

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

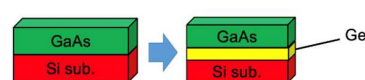
テーマ名	低コスト化プロセス技術開発／低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE
実施者	国立大学法人東京農工大学
期間・予算	期間：2015年6月1日～2020年2月29日 予算：52,505,000円
目標	<ol style="list-style-type: none"> 1. GaAs結晶に対して成長速度100 $\mu\text{m}/\text{h}$、効率20%、InGaP三元混晶に対して成長速度20 $\mu\text{m}/\text{h}$、効率12% 2. Al元素を含む二元結晶および三元混晶の成長
概要	<ol style="list-style-type: none"> 1. GaAsおよびInGaP成長ともに140mm/h以上の高速成長を達成、さらにセル効率も24.0% (GaAs)、13.0% (InGaP)を得た。 2. Al元素を含む化合物半導体のHVPE成長の可能性の熱力学解析結果を応用し、AlAsのHVPE成長に世界で初めて成功した。

85

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

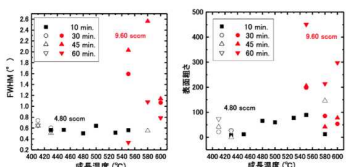
テーマ名	低コスト化プロセス技術開発／シリコン上III-Vエピ成長
実施者	宮崎大学
期間・予算	2015年6月～2018年2月末 3年間、総額:20.0百万円
目標	シリコン上III-Vエピ成長シリコン上III-V層において、転位密度 10^5 cm^{-2} 以下
概要	新規Ge原料を用いたSi基板上Geバッファ層の作製条件を確認 低温成長Si基板上GaAs薄膜に対するレーザーアニールで結晶性向上を確認

ポイント

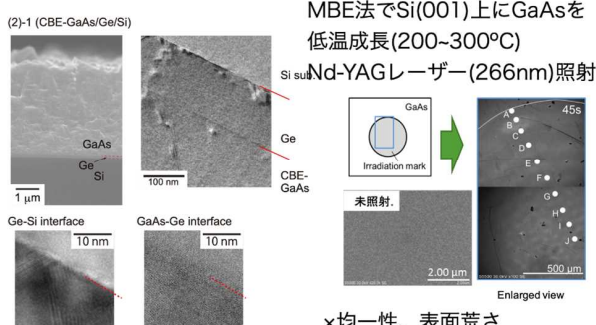


新規原料tBGe

- ・t-C₄H₉GeH₃ (tBGe)
→比較的安全に使用可能
- ・ALE法との組み合わせで初期層制御



○基礎的成長条件と結晶性・荒さの関係取得

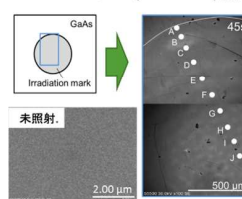


× 転位密度

○ 平坦な初期層/界面実現

○ 初期層改善で欠陥低減の可能性

MBE法でSi(001)上にGaAsを低温成長(200~300°C)
Nd-YAGレーザー(266nm)照射

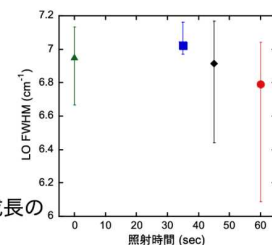
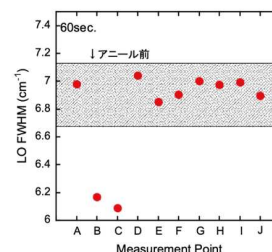


× 均一性、表面荒さ

○ 結晶性向上

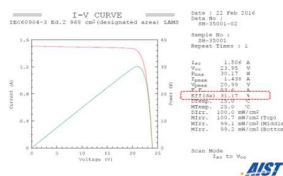
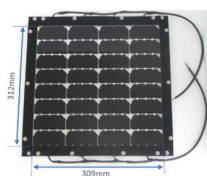
○ MBEによるGaAs on Siエピ成長の

基礎データを取得

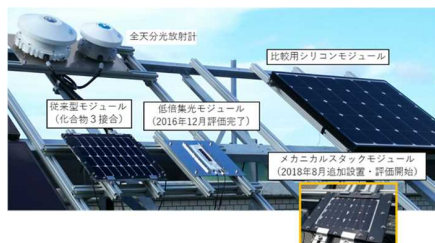


Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コストセル技術開発／低コストモジュール開発、低コストモジュール発電量試算、屋外評価
実施者	シャープ株式会社
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:1,234.2百万円
目標	・開発テーマ I および II の成果を利用して作製したセルで、モジュール変換効率30%以上を達成する。 ・フィールドテストを実施し、発電量や設備稼働率の実測結果から、発電コスト7円/kWhの達成に向けた見通しを得る。 ・実車両に搭載した場合の化合物太陽電池の発電性能の検証を行い、車載用途の実現可能性について見極めを行う。
概要	・低コストプロセスで作製したセルを用いたモジュールの作製実証、および、このモジュールの発電量測定 ・新規応用先の開拓
ポイント	・高効率モジュールの実証、屋外発電量測定 ・低コストプロセスセルを用いたモジュール(化合物2接合+Si)の実証、屋外発電量測定 ・車載用途の可能性検証



高効率モジュール(31.2%)の外観と電気特性



各種モジュールの屋外測定



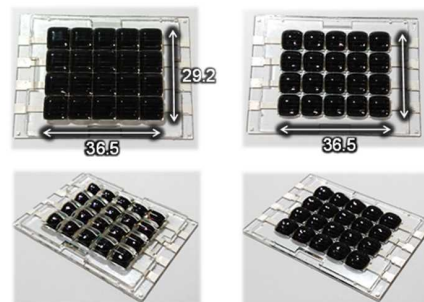
化合物太陽電池搭載車両

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コストモジュール開発／ 低コストモジュール開発・低コストモジュール発電量試算、屋外評価
実施者	豊田工業大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:368.7百万円
目標	非集光下で効率33%のセルを用い、モジュール効率30%を達成
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ III-Vセルを用い、モジュールの固定設置(追尾なし)あるいは簡易追尾架台でモジュール効率30%以上を達成できる低倍集光モジュールを開発する。 ・ 日本の気象条件での発電量試算およびモジュール設計技術を確立する。
ポイント	

- ・ 30分に1回の追尾でも追尾誤差による発電量損失を1%に抑制できる**広角集光光学系**を開発した。
- ・ 広角集光光学系を用いた**無追尾集光モジュールでモジュール効率32.8%**(産総研測定)を達成した。(最終目標達成)
- ・ 上記広角集光モジュール技術はトヨタ自動車(車載モジュール製品開発)、パナソニック(プラスチック型集光発電システム製品開発)に技術移転した。

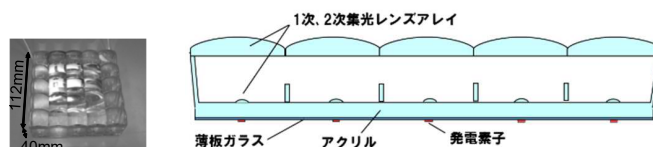
効率志向タイプ 許容角 55° 効率 32.8%	広角・曲面对応タイプ 許容角 77° 効率 27.4%
--------------------------------	-----------------------------------



試作した無追尾集光モジュール

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コストモジュール開発／ 低コストモジュール開発・低コストモジュール発電量試算、屋外評価
実施者	パナソニック株式会社
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:841.9百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1m角PICパネルの実現 ・ PICシステムコスト\leq125円/W 発電コスト\leq7円/kWhの2030年実現の見通しを得る
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 長期信頼性を確保したPIC構造にて、1m角パネルを完成し、屋外効率32.2%を確認した。 ・ システムコスト試算(2030年)を行い、119円/W及び7円/kWh実現の見通しを得た。
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> ・ 超高効率発電素子の大きさを最適化し、構成部品のほとんどを低価格で軽量のプラスチック材料にすることで、材料コスト、重量、および体積を従来型CPVよりも約1桁低い、高効率なプラスチックレンズ一体型セル・モジュール(Plastic lens integrated III-V compound semiconductor cell module、略称PIC)を実現した。

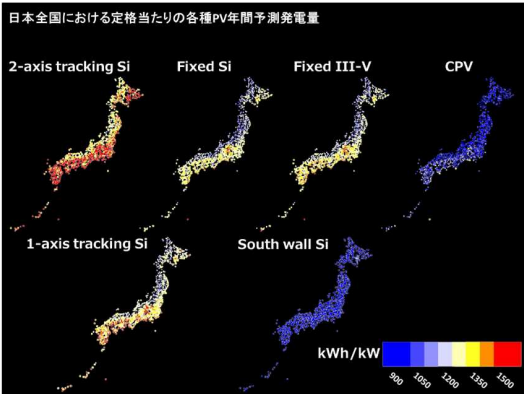


11cm角PICモジュール(左)と断面模式図(右)



1m角PICパネル

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

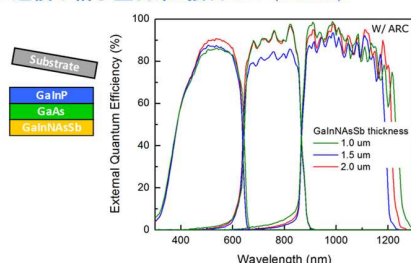
テーマ名	低コストモジュール開発／ 低コストモジュール開発・低コストモジュール発電量試算、屋外評価
実施者	国立大学法人 宮崎大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額126.5百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> モジュール表面コート技術の開発により、非集光下での効率33%セルを使用して、モジュール効率30%を達成する。 低コストモジュールの発電量や設備利用率の試算を実施し、7円/kWhの検証に必要なデータを取得する。
概要	<ul style="list-style-type: none"> シリカベースの反射防止コートがモジュール構造に採用され、変換効率30%を超えるモジュールが開発された。(目標達成) 宮崎大学に設置している各種太陽電池の実動作データをもとに、発電量シミュレーションモデルを構築し、日本全国における各種太陽電池の定格出力あたりの年間発電量予測が可能となった。(目標達成)
ポイント	 <p>日本全国における定格出力あたりの各種PV年間予測発電量</p> <p>スペクトル等の気象条件が各種PVIにおよぼす影響を調査 ↓ 発電特性の高精度モデル化 ↓ METPV11データベースをモデルに入力 ↓ 日本全国における定格出力あたりの年間発電量予測 7円/kWhの検証に必要なデータの取得</p>

90

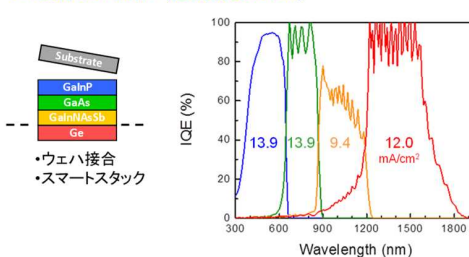
Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	超高効率セル開発／多接合希釈窒化物(MBE)
実施者	国立大学法人 東京大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:1498百万円(他テーマとの合算額)
目標	希釈窒化物サブセルの高品質化と4接合セルへの実装技術を確立し、変換効率50%を目指す。
概要	<ul style="list-style-type: none"> 逆積み型GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb格子整合型3接合セルにおいて、非集光効率～30%を達成。 GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セル化の実現(ウエハ接合)。
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> 電流整合条件を満足するGaInNAs:Sb 1.0 eVセル開発 多接合セルへの実装に向けたMOCVD/MBEハイブリッド成長、ウエハ接合の最適化

▶逆積み格子整合系3接合セル(ILM3J)



▶4接合セル試作(直接接合3J+1J)

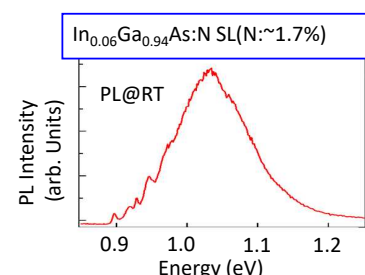
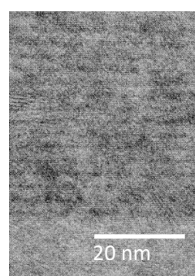


91

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	超高効率セル開発／多接合希釈窒化物
実施者	国立大学法人 東京大学、埼玉大学(再委託)
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:40.0百万円
目標	GaAs基板上GaInNAsヘテロ接合セルの構造設計及び試作を行い、GaAsフィルタ下で短絡電流密度14 mA/cm ² 以上を得る。
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・InGaAs中へのN δドーピング層導入による歪・バンドギャップ制御の実証 ・1 eV帯InGaAs:N δドーピング超格子成長条件の確立 ・試作セルの発電動作実証
ポイント	

- ・窒素δドーピングを利用した1 eV InGaAs:N超格子の結晶成長条件を確立
- ・成長条件とアニール条件の最適化で約300 cm²/Vsの電子移動度を達成
- ・試作セルで1 eVまでのスペクトル感度を実証

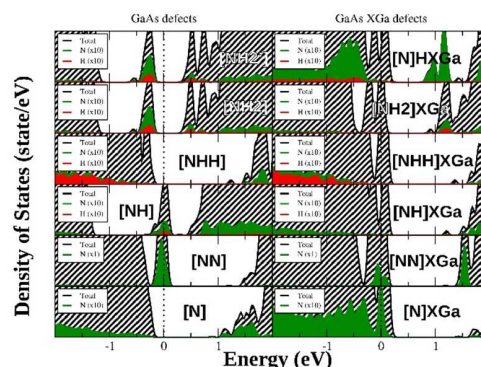


92

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	超高効率セル開発／多接合希釈窒化物(CBE)
実施者	豊田工業大学、九州大学(再委託)
期間・予算	2015年6月～2017年3月末 2年間、総額:176.8百万円
目標	4接合セルで集光時のセル効率50%を目指す。(中間評価前に終了)
概要	GaInNAsセルの高效率化に必要な欠陥評価・解析を実施した。
ポイント	

- ・GaInNAs材料の欠陥解析を行い、残留アクセプタの起源がNH複合欠陥であり、ダブルアクセプタである可能性を示した。
- ・GaAsN薄膜における欠陥構造と電子物性についての理論解析を行い、高品質化のためには、これらのN起因欠陥の低減が必要であることを示した。



第一原理計算による複合欠陥を含むGaAsN材料の電子状態密度

93

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名 低コストセル技術開発／エピタキシャル多接合:既存構造

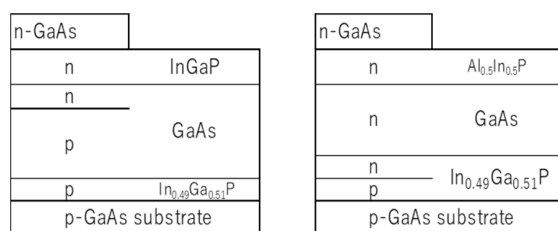
実施者 シャープ株式会社

期間・予算 2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:1234.2百万円

目標 他機関と共同で4接合もしくは5接合型太陽電池を開発し、50%(集光時)の変換効率を目指す。

概要 他機関と共同で化合物太陽電池の高効率化に取り組み当社はInGaPおよびGaAsセルの高効率化を担当

ポイント ・pn接合部の改良(リアヘテロ構造)により開放電圧の向上を得た。
・他機関(東京大学)での高効率検証のためにセルの提供を行った。



	従来構造		裏面ヘテロ構造		
	(順積み)	(順積み)	上昇幅	(逆積み)	上昇幅
InGaP	1.440	1.486	0.046	1.445	0.005
GaAs	1.020	1.064	0.044	1.087	0.067
InGaP/GaAs	2.460	2.527	0.067	2.488	0.028

プロジェクト前後での開放電圧の比較

構造比較(GaAs) : 従来構造(左)、リアヘテロ構造(右)

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名 超高効率セル開発／多接合量子構造・多接合ウエハ接合

実施者 国立大学法人 東京大学

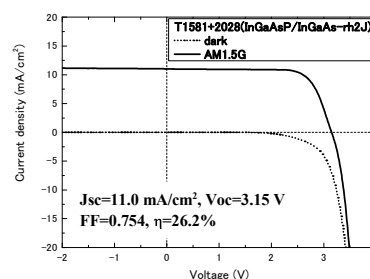
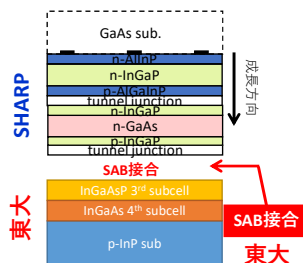
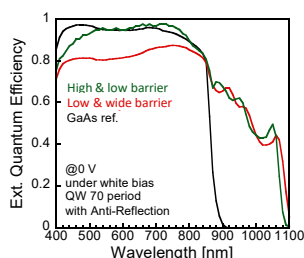
期間・予算 2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:1,498百万円(他テーマとの合算額)

目標 4接合セルにより集光下効率50%を目指す。

概要 ・量子井戸挿入第3セルにより4接合セルの電流整合を達成。
・表面活性化ウエハ接合により、GaAs基板上のトップ2セルとInP基板上のボトム2セルを低抵抗トンネル接合で接合し、4接合セルを実現。

ポイント 量子井戸構造の最適化により、第3セルの電流整合条件を達成。

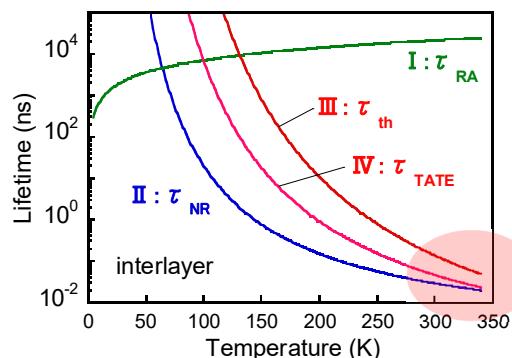
p型およびn型高ドーピング表面同士の接合により低抵抗トンネル接合を実現し、4接合動作を実証。更なるサブセル特性の向上により効率50%が視野に入る。



Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	超高効率セル開発／多接合動作解析
実施者	国立大学法人 宮崎大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:126.5百万円
目標	集光下効率50%以上の多接合セル実現のための動作解析
概要	太陽電池光吸収層に多重量子井戸や超格子あるいは量子ドット構造を挿入したエピタキシャル多接合セルにおけるキャリア回収過程について、内部電界およびセル温度の影響を明確にする。

- ポイント**
- 歪緩和層を挿入したInGaAs/GaAsP超格子太陽電池におけるキャリア緩和過程を3つの非破壊評価法で解析した。
 - 光吸収によって超格子内に励起された電子の4つの緩和過程の寿命を算出できた(右図)。
 - 全温度領域でII:非発光損失が最短つまり支配的であるが、温度上昇でIII:熱脱出やIV:トンネリング脱出が短くなることが分かった。
- ⇒ キャリア回収効率向上が期待できる構造



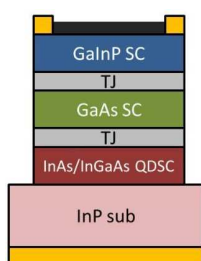
4つの緩和過程:
 I:発光損失 τ_{RA} , II:非発光損失 τ_{NR} ,
 III:トンネリング脱出 τ_{TATE} , IV:熱脱出 τ_{th}

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

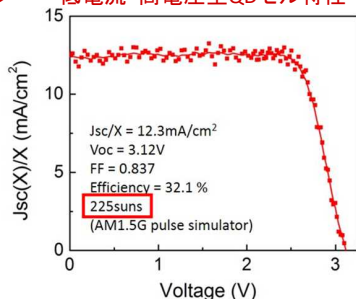
テーマ名	超高効率セル開発／量子ドット・マルチバンド
実施者	国立大学法人 東京大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:1,498百万円(他テーマとの合算額)
目標	タイプII超格子セル、及び低電流・高電圧型低倍集光セルにより、効率45%を目指す。
概要	<ul style="list-style-type: none"> 低電流・高電圧型量子ドットセルの開発 量子ドット超格子太陽電池の高効率化と構造設計 量子ドットセル集光特性解析:開放電圧の向上

- ポイント**
- 低電流・高電圧型量子ドットセルにおいて効率32.1%(225 sun)を確認→最適化で向上見込み。
 - 2段階光吸収の設計指針解明と室温動作、集光での電圧向上効果を確認→実用化に資する。

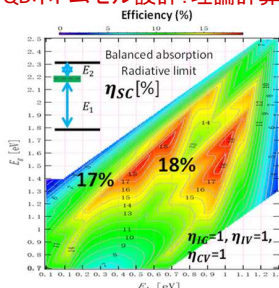
低電流・高電圧型QDセル



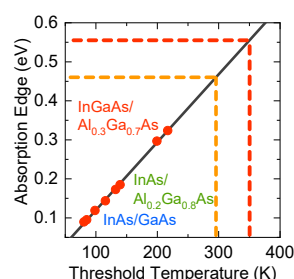
低電流・高電圧型QDセル特性



QDボトムセル設計:理論計算



室温2段階光吸収の設計指針



Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	超高効率セル開発／量子ドット・マルチバンド(ナローギャップ)
実施者	国立大学法人 東京大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:1,498百万円(他テーマとの合算額)
目標	プラズモン金属ナノ粒子層を組み込んだPbS QD/ZnO NW太陽電池のNIR領域(0.9 μm以上)で、 $\eta=4\%$ 以上(14 mA/cm ²)を達成し、接合層を実装した多接合太陽電池を実現
概要	<ul style="list-style-type: none"> Ⅲ-V化合物トップ・ミドルセル(InGaP/GaAs)との組み合わせに資する 低コストボトムセルを開発
ポイント	

・赤外吸収コロイド量子ドットにより、Ge太陽電池と同等の波長域での分光感度と開放電圧を実現し、多接合太陽電池のボトムセルとして有効性を実証

- ①簡便な低温・溶液プロセスで、先行事例のない高効率赤外エネルギー変換(図1)
- ②Ⅲ-V 2Jセル(InGaP/GaAs)との分光多接合動作で、世界初となる30%超(1-sun)を実現(図2)

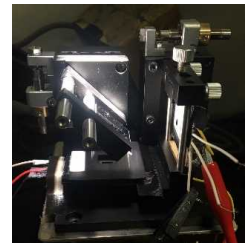
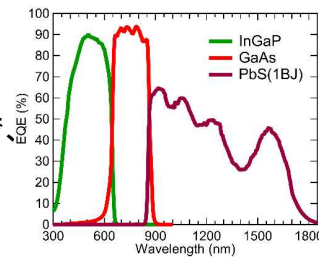
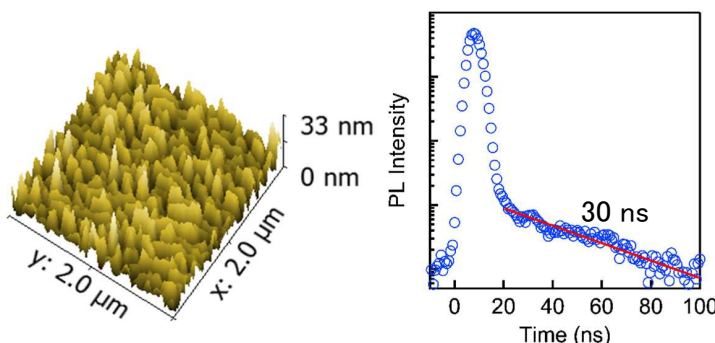


図1. Geセルと同等な波長域で光電変換 図2. 分光多接合動作 98

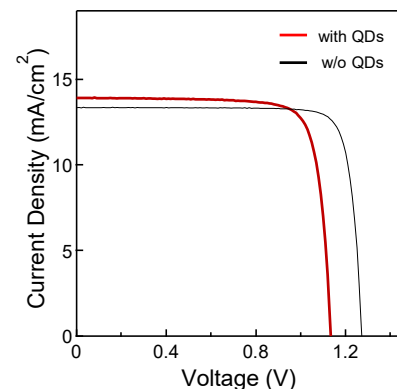
Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

公開資料

テーマ名	超高効率セル開発／量子ドット・マルチバンド
実施者	産業技術総合研究所
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:446.7百万円
目標	・量子ドット構造による低倍集光セルでの変換効率45%を目指す。
概要	・ワイドギャップホストを用いたバンド構造の最適化、タイプⅡ構造によるマルチバンドの長寿命化を実装したセルを作製し、マルチバンドセルの超高効率化を実現する。
ポイント	・InGaP系ワイドギャップ半導体中にタイプⅡ型InP量子ドットを作製し、長キャリア寿命(30ナノ秒以上)を達成。



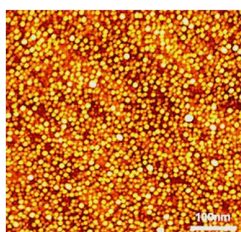
InGaPホストInP量子ドットのAFM像と発光強度時間変化特性



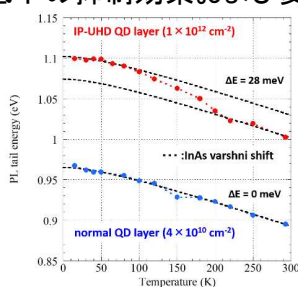
InGaPホストInP量子ドット太陽電池の電流電圧曲線

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

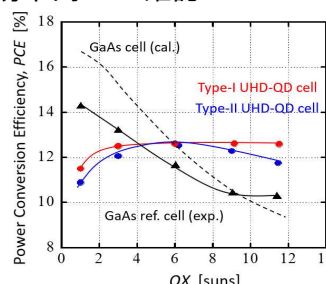
テーマ名	超高効率セル開発／量子ドット・マルチバンド(高密度量子ドット成長技術)
実施者	国立大学法人 電気通信大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:106.4百万
目標	東大グループとの共同により集光下での変換効率45%以上を目指す。
概要	超高密度InAs量子ドット(QD)の成長技術を確認し、中間バンド光物性の測定評価および理論計算によるQD太陽電池構造を設計する。その成果を基に超高密度QD太陽電池を試作し、その集光特性を調べ、高効率化についてまとめる。
ポイント	<ol style="list-style-type: none"> ① 世界最高の面内密度$1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$の超高密度InAs QDの成長技術の確立 ② 面内超高密度QDにおける3次元量子閉じ込め効果および面内ミニバンド化の検証 ③ Type-II型による蛍光寿命10 ns以上および熱処理による結晶性改善効果の確認 ④ ドリフト拡散モデル計算によるQDセル構造の最適設計 ⑤ 集光下におけるFF低下の抑制効果および変換効率向上の確認



① 面内超高密度InAs QDs



② 面内ミニバンド形成(赤)

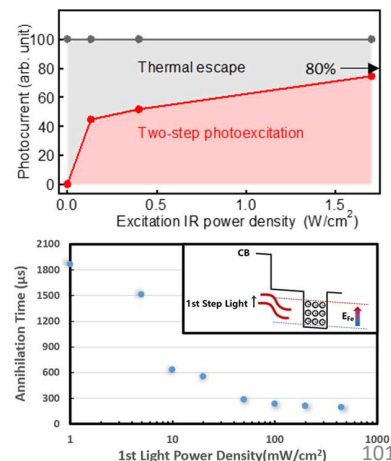


③ 変換効率の集光度依存性

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

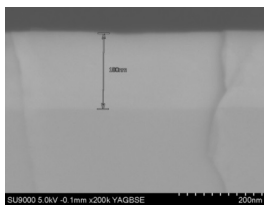
テーマ名	超高効率セル開発／量子ドット・マルチバンド(キャリア取り出し)
実施者	国立大学法人 神戸大学
期間・予算	2015年6月～2020年2月末 5年間、総額:93.6百万円
目標	<ol style="list-style-type: none"> ① 室温におけるキャリア寿命として100 nsを超える長寿命化。 ② キャリア取出し効率は80%以上まで引き上げ。
概要	ラチェット機構を量子ドットで実現し、100 nsを超えるキャリア寿命を実現するとともに、それによって2段階光励起過程で生成されたキャリアの80%の引き出しに成功した。
ポイント	

- 量子ドット超格子ミニバンド内のキャリア輸送を実現し、キャリア分離によるラチェット効果を確認。AlGaAs/GaAs/InAs Dot-in-Well (DWELL) 構造において電子の長寿命化を実現し、室温でサブバンドギャップ光励起強度によって約80%のキャリア引出効率を達成。
- 中間バンド電子寿命は中間バンド電子濃度に大きく依存することを明らかにした。特に、中間バンド電子濃度が低いとき(弱励起の時)1 msを大きく超える長い電子寿命を実現。
- 中間バンド動作(サブバンドギャップ光照射)によって電流増加と電圧増加(電圧維持性)を確認。
- サブバンドギャップ光照射で電圧・電流ともに上昇することを確認し、世界で初めてサブバンドギャップ光のみによる中間バンド型太陽電池発電の実証に成功。



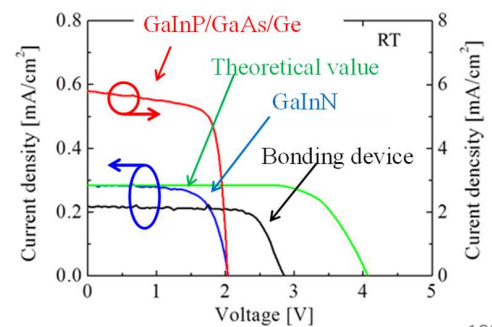
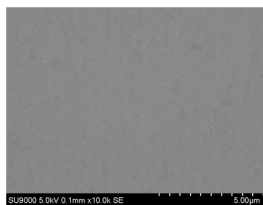
テーマ名	超高効率セル開発／窒化物セル
実施者	名古屋大学／名城大学
期間・予算	2015年6月～2018年3月末 3年間、総額:25.0百万円／22.0百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・各成長面に成長する厚膜InGaNを用いたセルの最適構造設計 ・窒化物半導体太陽電池の接合技術を確立し、4接合セルを作製する技術を確立
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・半極性面を用いた窒化物半導体太陽電池の高効率化 ・半極性面InGaN厚膜を用いた太陽電池の試作とウエハ接合4接合セルの試作
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> ・半極性面を用いて極性面の1桁以上の効率向上をシミュレーションによって予測 ・半極性面を用いることで、高品質InGaN厚膜の成膜に成功 ・ウエハ接合4接合太陽電池の試作とデバイス動作を確認

断面SEM



InGaN
(180 nm)
GaN

表面SEM



102

研究開発項目②

革新的新構造太陽電池の研究開発／

ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

- ・塗布製造技術の開発(パナソニック株式会社)
- ・超軽量太陽電池モジュール技術の開発(株式会社東芝)
- ・低コストR2R太陽電池製造技術の開発(積水化学株式会社)
- ・高性能・高信頼性確保製造技術の開発(アイシン精機株式会社)
- ・高性能材料合成技術の開発(富士フイルム株式会社)
- ・基盤材料技術と性能評価技術の開発(早稲田大学、物質・材料研究開発機構(再)、神奈川県立産業技術総合研究所(再))
- ・新素材と新構造による高性能化技術の開発(東京大学、産業技術総合研究所(再)、九州工業大学(再)、東京工業大学(再)、京都大学(再)、兵庫県立大学(再)、熊本大学(再))

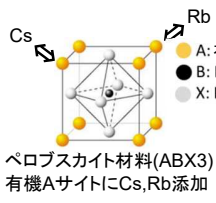
103

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

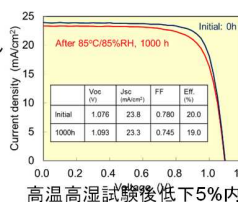
テーマ名	塗布法によるペロブスカイト太陽電池の開発
実施者	パナソニック株式会社
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額:520.0百万円
目標	①30cm角モジュールで効率20% ②高温高湿試験、光照射試験の要求事項の到達 ③製造コスト15円/Wの指針となる技術仕様の確定
概要	ペロブスカイト膜の組成制御技術および界面制御技術でセル高効率化と高温高湿、光照射安定の高耐久化を達成。インクジェットによる大面積均一塗布法で30cm角で世界最高の効率を達成し、製造コスト15円/W実現の見通しを得た。

ポイント

- ペロブスカイト膜へのCs, Rb添加で高温高湿(85°C, 85%RH)試験1000時間で効率低下5%内の合格基準達成
- インクジェットによる大面積均一塗布とコンタクト抵抗低減のモジュール設計で30cm角モジュールで世界最高の効率17.9%(AIST測定)達成

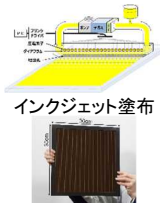


ペロブスカイト材料(ABX3)
有機AサイトにCs,Rb添加

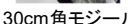


高温高湿試験後 効率低下5%内

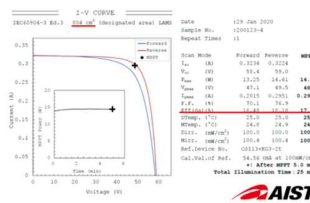
	Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	Eff. (%)
Initial	1.078	23.8	0.780	20.0
1000h	1.053	23.3	0.745	19.0



インクジェット塗布



30cm角モジュール



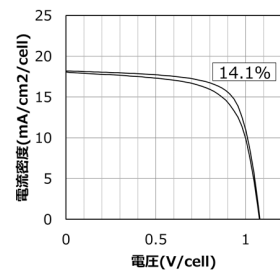
世界最高のモジュール効率

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義


テーマ名	ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発(超軽量太陽電池モジュール技術の開発)
実施者	株式会社東芝、東芝エネルギーシステムズ株式会社
期間・予算	2015年7月～2020年2月 5年間・総額507.8百万円
目標	・30cm角程度の超軽量モジュールで変換効率15% ・耐熱試験1000時間、光照射試験500時間で、5cm角程度の超軽量モジュールの相対低下率10%以下
概要	塗布成膜プロセス、スクライププロセス、及び低抵抗透明電極を開発して、ポリマー製フィルム基板に約24×27cmサイズの軽量・フレキシブルなペロブスカイト太陽電池モジュールを作製し、エネルギー変換効率は14.1%を達成した。また、軽量・フレキシブルな5cm角モジュールの耐久性では、光照射で400時間における相対変換効率低下10%、耐熱試験で550時間における相対効率低下10%を達成した。

ポイント

- 30cm角程度のフィルムモジュールは、目標15%に対して14.1%で達成度94%であった。劣化現象は試験時間の対数に対する現象のため、10%減となる試験時間の対数での達成度は、光照射は96%、耐熱試験は92%となった。
- 2025年度の実用化を目指し、新たに「太陽光発電主力電源化推進技術開発」プロジェクトに参画することとなった。



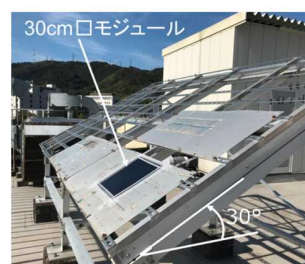
30cm角モジュールのI-V特性



超軽量モジュール写真

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

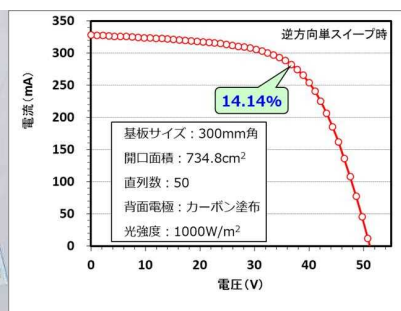
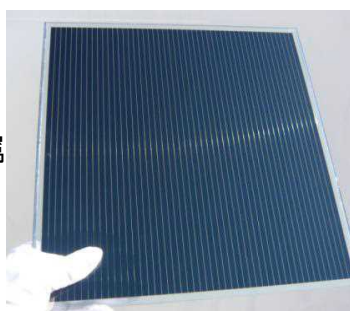
テーマ名	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発/革新的新構造太陽電池の研究開発/ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発(低コストR2R太陽電池製造技術の開発)
実施者	積水化学工業株式会社
期間・予算	2015年8月～2020年2月末 5年間、総額:429.2百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・超軽量基板小面積セルで変換効率18.8%(2mm角)を達成する。 ・30cm角程度の超軽量モジュールで15%を達成する。 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目について、相対低下率10%以下を達成する。
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・超軽量基板小面積セルで変換効率18.8%(2mm角)を達成 ・30cm角程度の超軽量モジュールで11.4%を達成 ・変換効率13%(受光面積3cm角)の超軽量太陽電池モジュールを用いて、耐久性試験5項目について相対低下率10%以下を達成 ・屋外暴露試験開始(1.5年程度性能維持継続中)
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> ・低温成膜プロセス開発 ・R2R製造技術構築 ・高耐久ペロブスカイト、ホール輸送層の開発 ・屋外実証暴露試験スタート



106

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	高性能・高信頼性確保製造技術の開発
実施者	アイシン精機株式会社 (再委託先:株式会社アイシン・コスモス研究所)
期間・予算	2015年7月～2020年2月 5年間、総額:229.3百万円
目標	<ol style="list-style-type: none"> ①同じ膜構造を持つ小面積セルに対し、その80%以上の変換効率を有する300mm角のペロブスカイト太陽電池モジュールの材料技術ならびに製造技術の確立 ②発電コスト7円/kWh,モジュール製造コスト15円/Wが可能となる具体的方策を提示
概要	低コスト・大面積化両立可能な構成材料と塗工技術を提案し、精錬化を進めることで 高い性能を有する300mm角のペロブスカイト太陽電池モジュール を実現する。併せて、発電コスト低減に向けた、 電池長寿命化 の方策を明らかにする。
ポイント	<ol style="list-style-type: none"> ①スプレー塗布工法による大面積モジュール製造技術の開発 ②塗布型カーボン電極適用による貴金属(Au等)蒸着膜の削減 ③低コスト・ホール輸送材料の開発 ④電池長寿命化に向けた検討



300mm角モジュールと発電性能

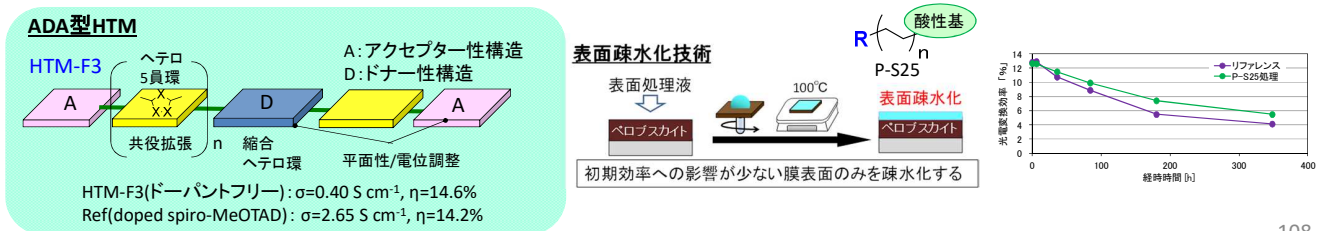
107

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	E.高性能材料合成技術の開発
実施者	富士フイルム株式会社
期間・予算	2015年7月末～2018年3月末 3年間、総額:92.3百万円
目標	①spiro-MeOTAD同等以上の効率および耐湿性が可能な正孔輸送材料設計を導出する。 ②CH ₃ NH ₃ PbI ₃ 同等以上の効率および耐湿性が可能なペロブスカイト材料設計を導出する。 ③モジュール効率20%以上、またはセル効率25%以上
概要	耐湿性低下の原因となるドーパントを必要としない正孔輸送材料骨格を見出し、新規正孔輸送材料を用いたセルでspiro-MeOTADを用いたセル(14.2%)と同等以上の変換効率(14.6%)に到達した。また、変換効率を低下させることなくペロブスカイト膜の耐湿性を向上させるペロブスカイト表面処理技術を見出した。これらの成果は自社15%台のセルによるものであり、高効率セル、モジュールへの適応が今後の課題となる。

ポイント

- ・平面性の高い骨格の開発およびエネルギーレベル制御による正孔輸送材料の電荷輸送性向上
- ・ペロブスカイト膜にダメージを与えることなく耐湿性向上が可能な表面処理材料技術の開発

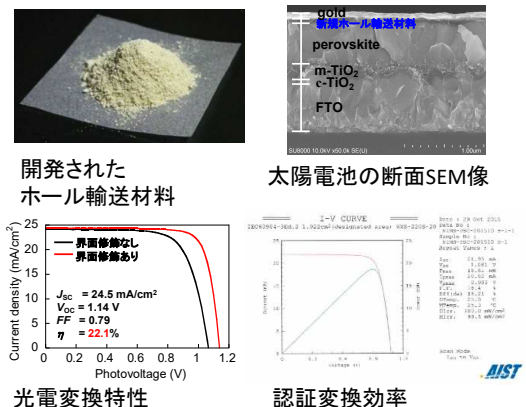


Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	基盤材料技術と性能評価技術の開発
実施者	早稲田大学(再委託先:物質材料研究機構、神奈川県立産業技術総合研究所)
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額: 514百万円
目標	7円/kWhを実現するペロブスカイト太陽電池の基盤材料・計測技術の確立
概要	高効率で80円/m ² 以下のホール輸送材料と簡便なセル塗布工程(150円/m ² 以下)を開発した。小面積セルで変換効率22%、認証値19.2%を実現するとともに、性能計測・評価技術を提示した。

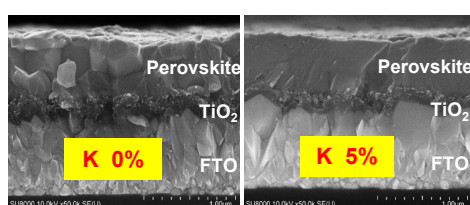
ポイント

- (コスト低減)
 - ・安価でロバスタなホール輸送材料を量合成
 - ・簡便な塗布工程などの開発
- (変換効率向上)
 - ・ペロブスカイト界面の修飾により実現
 - ・逆型構造セル開発での世界認証値
- (計測技術)
 - ・各種セルでの最適計測モードの提示

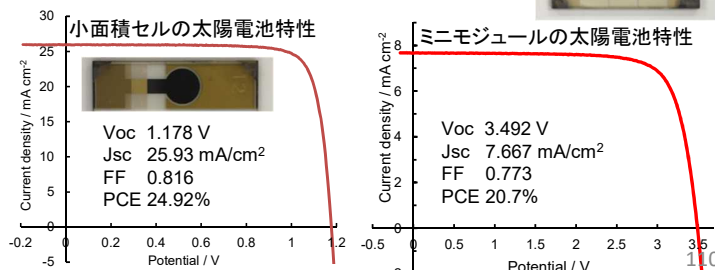


Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発／革新的新構造太陽電池の研究開発 ／ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発(新素材と新構造による高性能化技術の開発)
実施者	(国)東京大学、(国研)産業技術総合研究所、(国)九州工業大学、(国)電気通信大学、 (国)東京工業大学、(公)兵庫県立大学、(国)京都大学、(国)熊本大学、(学)立命館
期間・予算	2015年5月～2020年2月 (5年) 1,938百万円
目標	ペロブスカイト太陽電池小面積セルで変換効率25%、モジュールで変換効率20%
概要	新規ペロブスカイト材料を用いた小面積セルで変換効率24.9%、 3直列ミニモジュール(面積2.76cm ²)で変換効率20.7%を達成。
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> ・カリウム添加ペロブスカイト、臭素系ペロブスカイト、Sn系ペロブスカイト、MAフリーペロブスカイト等、バンドギャップの異なる、高電圧型や高電流型の多様な材料を開発 ・CIGS、CdTe等の化合物薄膜系や多結晶Siを上回るセル変換効率を達成 ・世界に先駆けてモジュール変換効率で20%を突破 ・高電流セルでJsc 33mA/cm²超の世界最高レベル達成 ・無機正孔輸送材料や高分子ドーパント等、耐久性向上に資する材料も開発 ・界面制御やデバイスシミュレーションにより、更なる性能向上に資する知見も蓄積 ・グループ各社に高性能デバイス作製技術を直接伝授し、事業化に貢献



カリウム添加による膜質改善



Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

研究開発項目③

太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

【結晶シリコン】

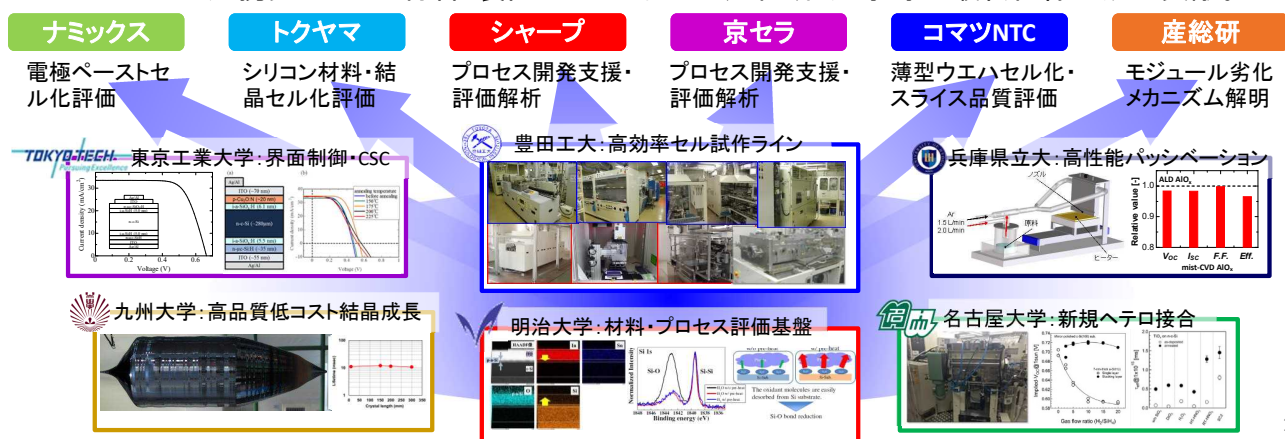
- ・先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発
(豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学)
- ・薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発(産業技術総合研究所)
- ・Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発
(北陸先端科学技術大学院大学)
- ・高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発(産業技術総合研究所)

【CIS】

- ・CIS太陽電池高性能化技術の研究開発(産業技術総合研究所、東京工業大学、
学校法人立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学)

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

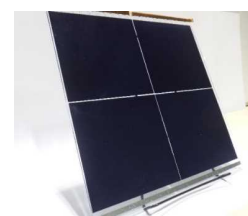
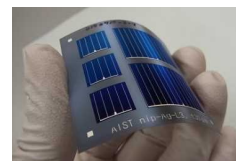
テーマ名	先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発
実施者	豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学
期間・予算	2015年5月～2020年2月末(5年間)、総額:1,756.4百万円
目標	セル変換効率25%の太陽電池標準プロセスを確立し、その試作ラインを構築する。その基盤技術をもとに各研究機関ならびに各企業の目標達成に貢献する。
概要	六大学で コンソーシアム を構成。各々の学識経験・ノウハウ・リソースを最大限に有効活用して 結晶シリコン太陽電池共通基盤技術 を網羅的に研究開発。その成果を 連携先企業群・研究機関 等に提供して、これらの研究開発を支援する。
ポイント	・大学内に拡散系およびヘテロ系結晶Siセル試作ラインを構築。P-PERCセル η 20.0% 、N-PERTセル η 21.0% 、SHJセル η 23.2% 、p-Eff. 24.3% を達成。 η 25%の目途付け完了。 ・連携先のセル・材料・装置メーカーおよび産総研・大学等の最終目標達成に貢献。



112

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発
実施者	国立研究開発法人 産業技術総合研究所
期間・予算	2015年5月22日～2020年2月29日 予算額 1,184百万円
目標	① 極薄ウエハ(50 μ m)の品質指針及び高効率セルプロセス技術開発指針の明確化 ② 長寿命(35年)のための高信頼性モジュール化技術開発指針を得る。 ③ BCセル(厚さ80 μ m)でセル効率25%及びモジュール効率22%の達成
概要	連携先企業がマルチワイヤー装置及び高信頼性・高効率モジュールを実用化するために、本事業で得られた技術開発指針を共有化し各企業での量産化に貢献する。また、開発する共通基盤技術に関連する企業に提案し、事業化に貢献する。
ポイント	① 平均厚さ56.5 μ mのSHJ太陽電池で世界トップレベルの効率22.7%を達成し技術指針を確立した。連携先企業(ワイヤソーメーカー)の薄型スライス技術開発に貢献した。 ② 連携先企業のUV+湿熱ストレスに基づいたモジュールの寿命予測手法の確立に貢献し、長寿命(35年)のための高信頼性モジュール化技術指針を得た。湿熱劣化の評価手法から劣化メカニズムとその対策までを明確化した。 ③ 低コスト量産プロセス(スクリーン印刷電極など)を用いて作製した両面受光型のBCセルで効率22.3%、開発したセルを用いた4セルモジュールで効率19.4%を達成した。 ④ 従来よりも拡散層の細線パターンの形成が可能なイオン注入用ステンシルマスクを新規に開発し、装置メーカーに提案した。

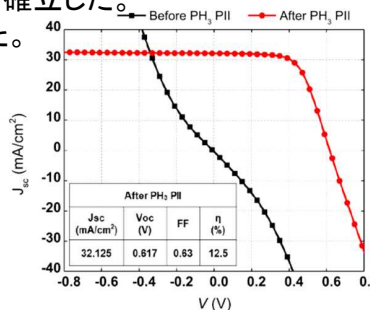
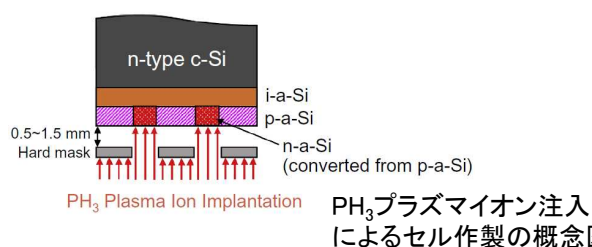


113

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発
実施者	国立大学法人 北陸先端科学技術大学院大学
期間・予算	2015年5月～2020年2月 5年間、総額:396.0百万円
目標	触媒化学気相堆積(Cat-CVD)およびその派生技術であるCatドーピングに関し、高性能裏面電極型および両面型Siヘテロ接合セル製造の基盤技術を確立する。
概要	①70 μm厚結晶Siに適用できる テクスチャ化技術 , ②窒化Siの 化学耐性 (5%HFで <5 nm/min), ③安価な 裏面電極形成技術 , ④Catドーピングでの両面型Siヘテロ接合セルの 開放電圧 >750 mVの基盤技術, ⑤60日の 触媒体連続使用 を可能とする技術を開発する。
ポイント	

- ・ガラス微粒子添加アルカリ溶液での、薄板Siに適用できる~1 μmの微小凹凸形成技術を確立した。
- ・化学耐性とパッシベーション性能を兼備する窒化Si膜を開発した。
- ・量産サイズの両面型Siヘテロ接合セルで、P Catドーピングによる開放電圧向上効果を実証した。
- ・PH₃プラズマイオン注入でp型からn型に反転した非晶質Siを有する両面型Siヘテロ接合セルの動作を確認し、裏面電極型セル製造のための基盤技術を確立した。
- ・事前炭化によるTa触媒体の変性抑止技術を確立した。



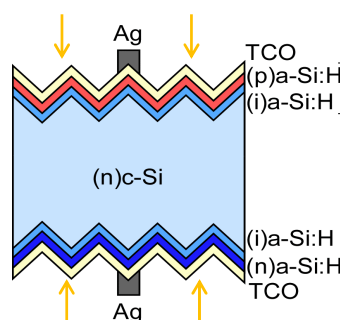
PH₃プラズマイオン注入でn型化した非晶質Si膜を用いたセルのJ-V特性 114

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	高性能キャリア選択性パッシベーションコンタクトの開発
実施者	国立研究開発法人産業技術総合研究所
期間・予算	2018年6月～2020年2月末 2年間、総額:76.6百万円
目標	①シリコン系: J _{sc} を2%向上、V _{oc} ・FF維持、効率向上 (変換効率>22%) ②非シリコン系: J _{sc} を3%向上、ライムタイム評価によるiV _{oc} > 700 mV
概要	従来のヘテロ接合結晶系(SHJ)太陽電池に用いるアモルファスシリコンに比べ透明性に優れた新規キャリア選択性パッシベーションコンタクトを実現する。これによりSHJ太陽電池の変換効率を向上させ、発電コスト低減に貢献する。
ポイント	

①シリコン系: 従来のSHJ太陽電池の効率を改善するp型ナノ結晶シリコン((p)nc-Si:H)を開発し、目標を達成した。開発した(p)nc-Si:Hは現在のSHJ太陽電池と同じ製膜手法で作製できることから事業化の障壁は比較的低いものと考えられる。

②非シリコン系: シリコン系材料に替わる透明な新規パッシベーションコンタクト(TiO_x)を開発し、目標を上回るJ_{sc}やパッシベーション性能を実証することができた。更なる高性能化・耐久性実証を行うことで、高効率・低コストセルの実用化に繋がることが期待される。



従来のアモルファスシリコンに代わる新規パッシベーションコンタクトを開発

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	CIS太陽電池高性能化技術の研究開発	
実施者	サブテーマI, デバイス技術の研究開発 ・産業技術総合研究所 光吸収層の高品質化によるCIS太陽電池の高効率化 ・東京工業大学 界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化 ・立命館大学 バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発 ・東京理科大学 エピタキシャル成長を利用したCIS太陽電池の高効率化指針の解明 サブテーマII, 評価技術の研究開発 ・筑波大学 結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援 ・鹿児島大学 積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発 ・龍谷大学 理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究	
期間・予算	2015年度～2019年度 5年間、総額：1,030.2百万円	
目標	CIS太陽電池を用いた発電コストで、2020年に14円/kWh, 2030年に7円/kWhを達成するために必要な、共通基盤技術の開発を行う。(各個別テーマごとに目標設定)	
概要	高効率化技術開発および評価・分析による高性能化指針を総合し、変換効率22.2%を達成した。	
ポイント	① 出光興産/SFとの密接な連携により、出光興産のCdフリーCIS太陽電池における変換効率23.4%の達成に貢献 ② Ag添加, アルカリ処理, 表面 Δ Ev形成, ZnMgOバッファ層などの高効率化技術開発 ③ CISの欠陥評価, バッファ層から裏面Moまでのバンド接続解明, CIGSSeの電子構造解析による高性能化指針の導出	

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

研究開発項目④

共通基盤技術の開発(太陽光発電システムの信頼性評価技術等)

- ・太陽電池性能高度評価技術の開発(産業技術総合研究所、電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、東京理科大学、学校法人立命館)
- ・太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(産業技術総合研究所、デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社、東レ株式会社、石川県工業試験場、岐阜大学、東京農工大学、北陸先端科学技術大学院大学、電力中央研究所)
- ・太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発(産業技術総合研究所、日本気象協会、東京理科大学、佐賀大学)
- ・ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発(株式会社カネカ)
- ・レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発(日清紡メカトロニクス株式会社、奈良先端科学技術大学院大学)

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発
実施者	国立研究開発法人 産業技術総合研究所
期間・予算	2015年度～2019年度・555百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・新たに開発される新型太陽電池の性能評価再現性$\pm 0.5\%$(1σ)以内を達成する ・WPVS根幹ラボ以外との間で国際比較校正実施。国際的不整合解決 ・薄膜系を含む市販太陽電池モジュールの屋外測定再現性$\pm 1.0\%$(1σ)以内を実証
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・(新型太陽電池評価技術の開発)NEDO開発品等の性能評価測定を実施してデバイス特有の性質を考慮した測定手順を開発し、最終目標である新型太陽電池の性能評価再現性$\pm 0.5\%$(1σ)以内を達成した。また、国際比較測定や標準化への貢献を行った。開発した性能評価技術を共通基盤として、より広く普及・実施可能な太陽電池性能評価手順を明確化した。 ・(一次基準太陽電池セル校正技術)超高温定点黒体炉を標準光源として利用するための技術、並びに分光放射計高精度化技術開発により、一次基準太陽電池の最高校正能力を向上できた。WPVS基幹ラボ及びアジアの校正機関を対象とした比較校正を実施し、開発技術に基づく一次校正値の妥当性検証と国際的な不整合の是正ができた。 ・(屋外高精度評価技術の開発)PVMSによる日射計測や高精度モジュール温度測定、新温度補正式の技術開発により、高精度な屋外性能評価が様々な照度・温度条件下で実現可能であることを実証し、測定再現性$\pm 1\%$の最終目標を達成した。開発成果のO&M等への実用化に重要な新STC補正技術を開発した。更に業界ガイドライン採用やIEC規格に提案等、開発技術実用化を推進した。

118

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	屋外実性能高度評価技術の開発 (屋外実性能高能率測定技術の開発)
実施者	一般財団法人 電気安全環境研究所
期間・予算	2015年度～2019年度・181百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・オンサイトで測定再現性精度$\pm 2\%$(1σ)以内を確認するとともに、それを実現する装置仕様並びに測定解析手順を明確化する。 ・得られた結果をもとに、測定手順のガイドライン案を産総研と共同で策定する。
概要	



(オンサイドでの測定再現性精度確認)

・AISTにて開発された技術を、JET屋上(横浜)、岡山実験サイト、実フィールド(千葉)で実証、測定再現性精度 $\pm 2\%$ (1σ)以内の達成を確認。
 ・本技術の適用により、屋外測定の照度適用条件を「300W/m²以上」変更でき、測定可能時間が倍増し高能率化が図れることを確認。

(測定手順のガイドライン化)

・手順書「PVMSを用いた屋外環境下における高能率I-V特性測定方法」を作成。
 ・本手順書のO&Mガイドラインへの適用を今後検討する予定。

	1	2	3	4
モジュール温度 (°C)	26.5 ± 0.2	28.8 ± 0.2	37.2 ± 0.2	42.0 ± 0.2
照度 (W/m ²)	314 ± 1	460 ± 1.5	660 ± 2.0	946 ± 3
N数	11	8	12	10
Isc (A) (平均)	2.72	3.96	5.69	8.19
Isc偏差	0.27%	0.32%	0.36%	0.08%
Voc (V) (平均)	34.60	34.94	34.60	34.67
Voc偏差	0.11%	0.05%	0.09%	0.02%
Pma (W) (平均)	73.22	105.6	147.9	206.9
Pmax偏差	0.52%	0.43%	0.32%	0.10%

同一照度－モジュール温度の測定値の抽出結果(岡山実測)

119

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	日射変動解析技術の開発
実施者	国立大学法人 東海国立大学機構 岐阜大学
期間・予算	2015年度～2019年度・39.4百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・気象状態, 特に雲の形態などから, 屋外太陽電池性能評価実施者が入手しやすい気象情報で実施可否判断が可能な手法を確立する. ・屋外太陽電池性能評価において, 高速IV計測で$\pm 1.0\%$ (1σ) 以内の計測精度を保証しうる気象条件を提示する. ・観測データおよび数値モデルを用いて日射強度急変時の日射スペクトル強度変化を推定し, 性能評価制度に及ぼす影響を示す.
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・複数のPVMSによる秒スケール以下の日射強度変化の計測と上空カメラによる雲の動的観測をもとに, 雲の形態・動態と日射強度とその変動との関係を求め, 日射強度およびその変動を3種類に分類した. そして雲の形態・動態から屋外太陽電池性能評価の評価精度に係る日射強度変動を推定するための関係を示した. ・日射強度の時間変動と空間不均一性の関係を定量的に求め, 計測に複数のPVMSを必要とする空間不均一性を単一のPVMSによる時間変動の計測で評価することを可能にした. これを用いて, 屋外太陽電池性能評価に不適切な計測中の日射強度時間変動や空間不均一性を排除する手法として, 単一のPVMSで日射強度時間変動をモニタリングのみで日射強度の空間不均一性も規定値外の状態を検出・排除するフィルター法を開発した. ・日射スペクトル強度の観測値, および局地気象予報モデルと大気放射モデルによる日射スペクトル強度推定値から, 日射強度急変時のスペクトルミスマッチを評価した. その結果, ミスマッチ変化率は1%以下と小さい値であった.

120

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽電池温度の高精度測定技術開発
実施者	国立大学法人 宮崎大学
期間・予算	2015年度～2019年度・39.0百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・開放端電圧と測定温度を整合させる. ・太陽電池モジュールの実温度測定精度$\pm 1^\circ\text{C}$以内を達成する.
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・EVAやバックシートの熱抵抗を考慮した熱流束計算により, 簡便に得ることのできるバックシート温度からモジュール内部のセル温度を精度$\pm 0.5^\circ\text{C}$程度の高精度で導出することに成功した(最終目標達成). ・モジュールやシステムの中央位置における温度は屋外環境において常に平均温度に近い値となることが定量的に明らかとなった.

ポイント

バックシート温度からセル温度 (T_{in}) を精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ で予測可能に
 低日射強度時にシステム中央位置においてシステム平均温度に最も近い温度が計測可能 (ΔT : 平均温度との差)

屋外におけるPVモジュールおよびシステムの高精度温度測定技術として, モジュールやシステムの中央位置における温度を計測し, さらに, その位置のバックシート温度を計測することにより内部のセル温度を高精度に計測することが可能となった。PV評価には温度を正確に把握する必要があり, 簡便に太陽電池温度を高精度測定できる本成果はその実用化・事業化に資するものとなる。

121

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	PV日射計測によるシステム性能測定手法開発
実施者	学校法人 東京理科大学
期間・予算	2015年度～2019年度・5,865千円
目標	小規模なPVアレイまたはシステムにおけるオンサイト屋外高精度測定を実施し、アレイ面内照度ムラ、アレイ面内温度分布把握、スペクトル補正等を行い、必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法および測定精度を検証することで、市販タイプ結晶Si太陽電池モジュールを用いた太陽電池アレイの屋外測定精度 $\pm 1.0\%$ (1σ)を達成する。
概要	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池モジュールの屋外高精度測定を共通基盤技術として普及実用化するために必要不可欠な技術の開発として、太陽電池が直並列に接続されたシステムに対し、屋外において太陽電池アレイ面内に照度ムラ、温度ムラがある場合の発電性能を高精度に測定するための環境条件および電流-電圧(I-V)特性の測定条件を明らかにするとともに、システムのアレイ構成・ストリング構成を考慮して高精度に発電性能を測定・評価する手法として、日射測定機器にPVモジュール日射センサ(PVMS)を用いた発電性能測定手法を開発し、そのシステムへの適用可能性を実証した。 1ダイオードモデルと銘板値から算出したSTCおよびダークI-Vカーブにより、照度方向を線形補間によって、温度方向をAIST提案手法によって補正する手法を開発し、各種屋外測定データを用いて精度評価を行った。 開発した銘板値を基準とした屋外測定条件における参照基準I-Vカーブの作成と発電性能測定・評価において、$\pm 3.0\%$以内(中間目標にて達成)の誤差で、$\pm 1.0\%$(1σ)以内の再現性を得たことにより、最終目標を達成した。 本技術を用いることで、屋外における性能評価を高精度に行うことが可能となった。

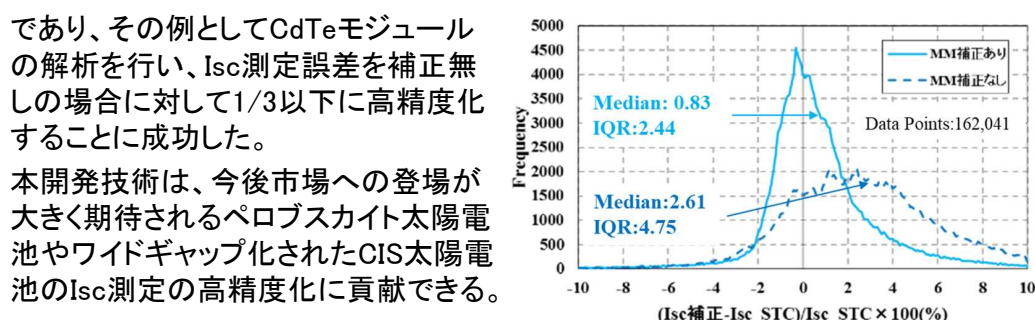
122

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発
実施者	学校法人立命館 立命館大学
期間・予算	2015年度～2019年度・¥42.0百万円
目標	屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の3分の1に高精度化

概要

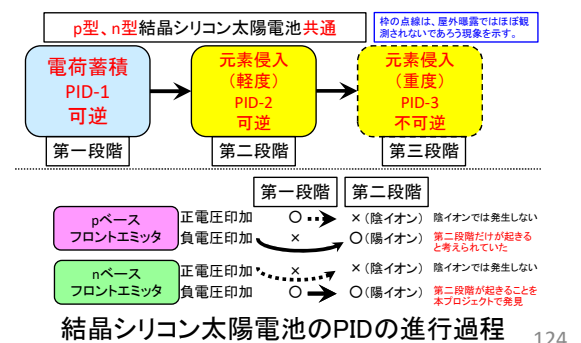
スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術の開発を行った。太陽光スペクトル指標であるAverage Photon Energy (APE)を用いて統計的な数値解析を行った。PVモジュールの屋外で測定された短絡電流(I_{sc})を基準状態(STC)へ補正する際の照度補正に、AISTが開発した太陽電池モジュール日射センサー(PVMS)を用いた。補正対象のPVモジュールがPVMSと類似する分光感度を有する結晶Si系の場合には、大きなスペクトルミスマッチが生じないために、PVMSによる照度補正のみで高精度に I_{sc} 補正が可能であることを統計的に明示した。一方、PVMSと分光感度が大きく異なるワイドギャップ太陽電池の場合には、スペクトルミスマッチ(MM)補性が必



123

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

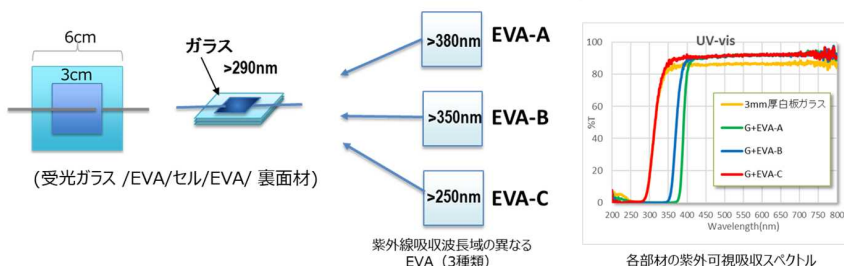
テーマ名	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(太陽電池モジュールの劣化現象の解明、加速試験法の開発)
実施者	国立研究開発法人産業技術総合研究所 国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学(再委託先)
期間・予算	2015年5月～2020年2月 5年間、総額：188.2百万円
目標	・モジュール寿命30年(出力低下率20%以内)を実証する。 ・新規開発加速試験法において、屋外曝露に対して100倍以上の加速係数を実現する。
概要	・p型和n型の結晶シリコン太陽電池の電圧誘起劣化(PID)メカニズムを統一的に説明した。この知見をもとに、反射防止膜にかかる電界を遮蔽するセル構造を用いることでPIDをほぼ完全に抑止できることを実証し、モジュール寿命30年の実現可能性を示した。 ・セルを酢酸蒸気に曝露する新規加速試験法を開発し、屋外曝露に対して目標値の100倍を大幅に上回る4500倍以上の加速係数を有することを明らかにした。この手法は、セル電極の酢酸耐性評価法にも適用でき、国際標準SEMI PV79-0817として発行された。
ポイント	セルを含めた改善がモジュールの信頼性向上に結び付くとの指針を得ることで、セル・モジュールを一体として研究を推進することの重要性を明確化するとともに、信頼性向上のための各種対策をメーカーに提示した。さらに、国際ワークショップ開催、国際標準発行、IEA PVPS Task13のレポート発行を通じて、当該分野の国際連携に貢献した。



Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析と屋外曝露劣化との相関性検証)
実施者	デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社
期間・予算	2015年5月～2018年3月末 3年間、総額：33.2百万円
目標	加速係数が70倍以上の試験法の開発
概要	紫外線透過率の異なる封止材EVAを用いたモジュール構造サンプルを用い、高温高湿ストレス(DH)単独試験、紫外線照射(UV)単独試験、UV+DH複合試験を実施した結果、DHとUVストレスで異なるメカニズムで封止材EVAを劣化させる可能性を見出した。紫外線吸収剤を含まない高透過率封止材EVAは、実曝露環境では紫外線による劣化が進み、酢酸発生による出力劣化を加速させる可能性を示唆する結果を得た。
ポイント	出力劣化の加速因子として紫外線による材料劣化の因子が極めて重要であることを実証し、酢酸発生量の観点において加速係数が70倍以上の試験法の開発に貢献した。

紫外線透過率の異なるEVAを用いたモジュールを作製し、単独/複合加速試験を実施

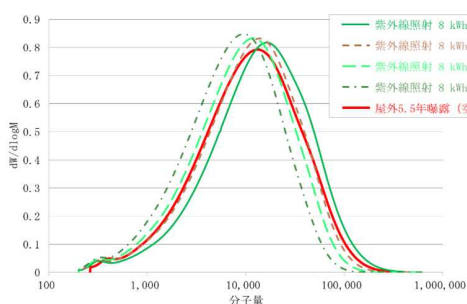


酢酸発生量の観点より：

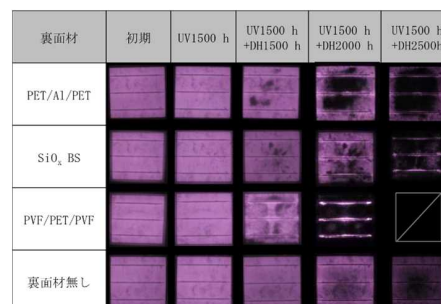
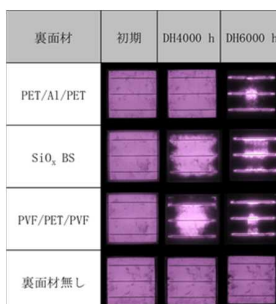
- DH(単独)試験：実曝露環境を再現せず
- UV(単独)試験：出力劣化を起こさず、実曝露環境も再現せず
- UV→DH連続(複合)試験：実曝露環境を再現

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(屋外曝露モジュールの分析による加速試験法の開発)
実施者	東レ株式会社
期間・予算	2015年5月～2018年3月末 3年間、総額28.8百万円
目標	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発
概要	①曝露環境の検討 ②屋外曝露モジュールの分析 ③複合加速試験の開発 ④国際標準化への取り組み
ポイント	①裏面材の劣化要因となった環境ストレスを定量化 ②環境ストレスにより劣化した裏面材パラメータ特定 ③25年の耐久性を判断できる加速試験法の開発 ④得られた知見、成果を基礎とした国際標準化会議等で意見・提案



加速試験サンプルおよび屋外曝露モジュール裏面材(空側)の分子量分布DH試験のみを行った際のEL画像



UV試験後にDH試験を行った際のEL画像

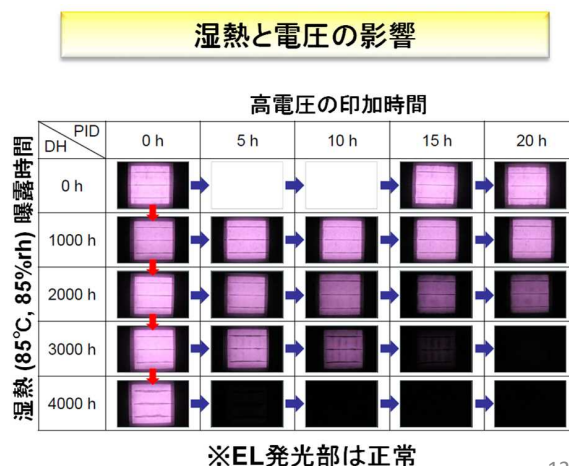
126

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(屋外での電圧誘起劣化の実証研究)
実施者	石川県工業試験場
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額:40.9百万円
目標	電圧誘起劣化の挙動を1件以上見出し、耐性が2倍になる対策条件を導出する。
概要	高システム電圧で稼働する太陽電池モジュールの屋外性能を観測するとともに、電圧誘起劣化(PID)の屋内実証試験を実施した。シミュレーションを用いてPID耐性の高いモジュール内部の電界および電流分布を可視化し、PID対策の妥当性を明らかにした。

ポイント

- ①屋外PID実証試験
1,000 VでのPID耐性が示された。
- ②屋内PID加速試験
1,500 Vの太陽電池モジュールのPID挙動は、湿熱環境で加速する。
- ③太陽電池のPID対策条件の解析
耐性が2倍以上となるPID対策案に対して解析を実施し、対策案の妥当性を明らかにした。

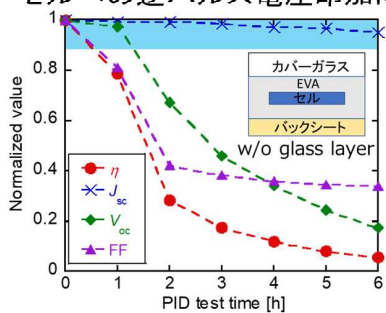


127

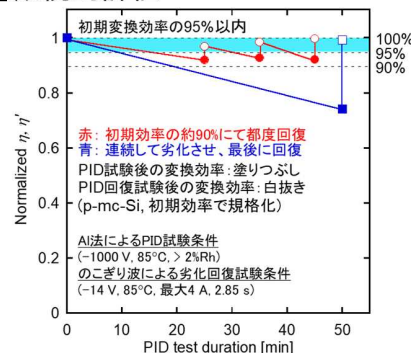
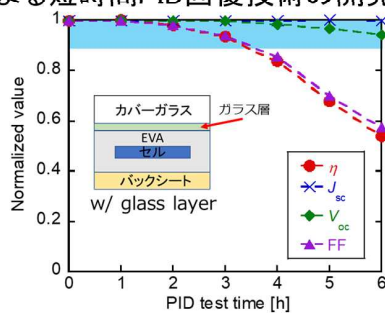
Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(電圧誘起劣化が発生した箇所の特定方法、微視的評価手法の開発)
実施者	国立大学法人岐阜大学
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額:48.1百万円
目標	PID抑止および回復技術により初期変換効率の90%以内に維持
概要	半導体に用いられる微小領域の評価技術を用いて、PIDの発生メカニズムを解明 PID抑止および回復技術を開発し、初期変換効率の90%以内に劣化を抑える手法を提案
ポイント	

- ・フィンガー電極、テクスチャー形状に依存したNa析出分布の特定と微視的評価
- ・ガラス層を形成したカバーガラスによるPID抑止技術の開発
- ・セルへの逆パルス電圧印加による短時間PID回復技術の開発



ガラス層形成によるPID抑止技術



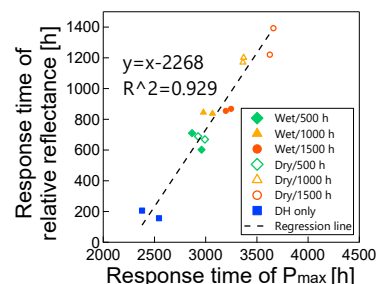
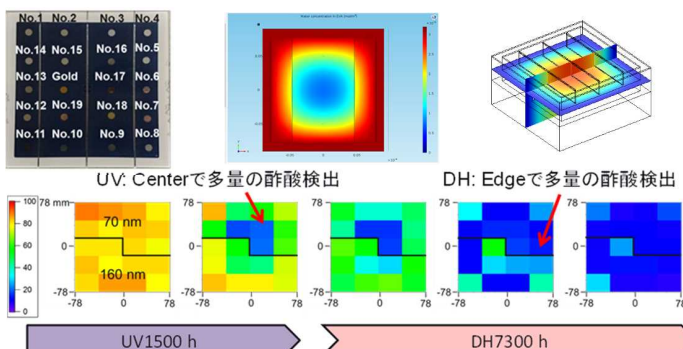
劣化率を初期変換効率の90%以内に抑えるPID回復技術

128

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(太陽電池モジュールの湿熱劣化の実時間観測手法の開発)
実施者	国立大学法人東京農工大学
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額:36.5百万円
目標	小型非接触な酢酸センサを開発し加速試験中の太陽電池モジュール内の酢酸分布を経時計測するとともに酢酸侵入経路を明らかにする。
概要	・過酷試験環境に長時間耐える光学式非接触酢酸センサの開発 ・各種試験条件におけるセンサ応答の測定と酢酸生成メカニズムの理解
ポイント	

- ①直径8 mmの錫薄膜センサをモジュール内に20個配置し酢酸分布を計測
- ②長時間の各種加速試験に耐える錫薄膜センサにより酢酸分布の経時検出を達成
- ③試験条件の違いによる酢酸生成・拡散機構を明確化
- ④試験早期のセンサ応答が各種試験における性能劣化時間と強く相関することを発見

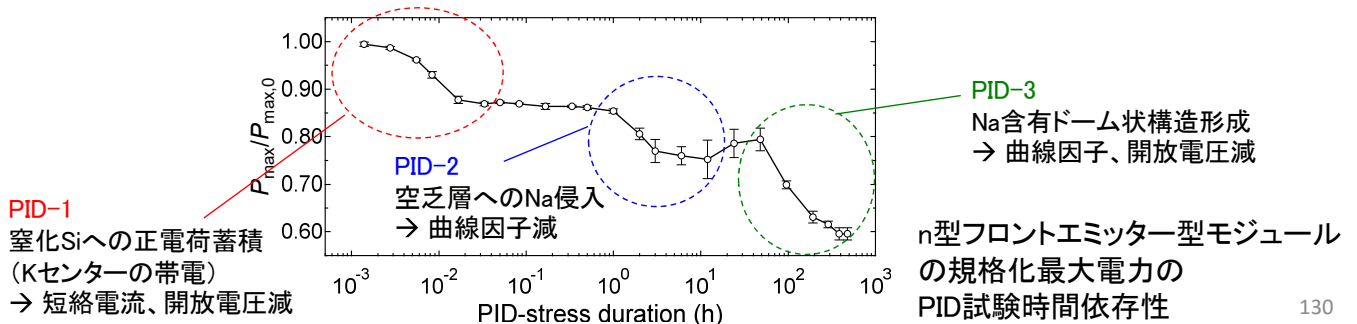


129

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発 (n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化)
実施者	国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学
期間・予算	2015年5月～2020年2月 5年間、総額:40.5百万円
目標	各種n型結晶シリコン太陽電池モジュールの電圧誘起劣化(PID)による劣化率を30年で20%以下に抑える条件の明確化
概要	リアエミッター型、フロントエミッター型、Siヘテロ接合型、裏面電極型の4種の太陽電池を用いたモジュールにおいて、PIDの挙動、機構を明らかにし、目標の劣化率以内に性能低下を抑制する条件を明らかにした。
ポイント	

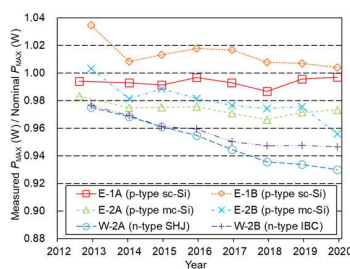
- ・一つのセル構造においても、機構の異なるPIDが異なる時定数で発現することを見出した。
- ・屋外での劣化環境を模した光照射下でのPID挙動も明らかにした。
- ・各種モジュールにおいて、劣化機構および抑制法を明確化し、最終目標を達成した。
- ・n型モジュールのPIDに関して、セル・モジュールメーカーにとって有益な知見を示した。



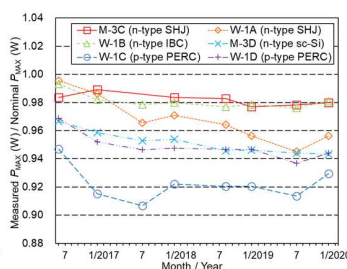
130

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

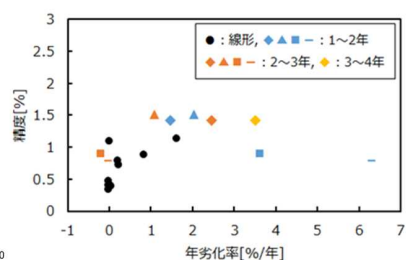
テーマ名	太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発/メガソーラーの発電量及び信頼性評価技術の開発)
実施者	一般財団法人電力中央研究所 (目標①は産業技術総合研究所と共同で実施)
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額:41.7百万円
目標	①5つの日射気候区における各種太陽電池の経年劣化を考慮した生涯発電量(25年)を算出する。②メガソーラーの発電性能の経年劣化を1%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。③IEC61853シリーズを国際規格(IS)として成立させる。
概要	新型を含む実使用下の結晶シリコン太陽電池の年劣化率を高精度に算出し、それらの値を用いて経年劣化を考慮した30年間の発電量を算出した。複数年運用されているメガソーラーのシステム出力の年劣化率を高精度に算出した。日本の気象データが採用された国際規格(発電量定格)の成立に貢献した。



2012年に導入した結晶シリコン太陽電池出力の推移




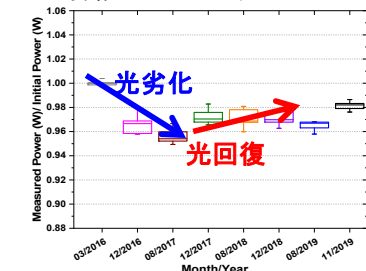
2016年に導入した新型結晶シリコン太陽電池出力の推移



メガソーラーの年劣化率と発電性能の推定精度の関係

131

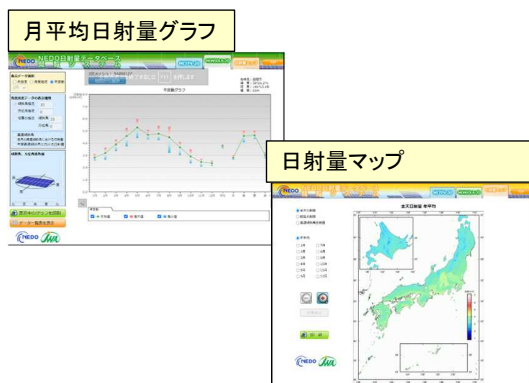
Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発	
実施者	国立研究開発法人産業技術総合研究所	
期間・予算	2015年5月から2020年2月末まで 5年間、総額:104.0百万円	
目標	ヘテロ接合系等の新型結晶シリコン系太陽電池アレイならびに薄膜系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、±5%の精度で発電量を推定する技術を開発する。Webサイトに掲載可能な発電量データベースを開発する。	
概要	<p>屋外サイトで曝露中の太陽電池モジュールを定期的に取り外し、標準条件で室内測定を実施した。最長9年間の屋外曝露による発電性能の変化を纏めた。多くの種類の太陽電池において、発電量評価の上で考慮すべき初期劣化は飽和傾向を示し、初期劣化の程度や飽和に要する時間等の諸特性を把握することができた。これらの屋外劣化特性を踏まえて発電量を推定したところ、結晶シリコン系、ヘテロ接合系、薄膜シリコン系のいずれにおいても、±5%以内の精度との最終目標を十分に上回る精度で発電量推定が可能なることを実証した。本技術を用いて精緻に生涯発電量を算出することにより、太陽光発電所のバンカビリティ(投資回収性・融資可能性)を高精度に判断することが可能となる。</p>	 <p>発電量推定のためのデータを取得した屋外曝露サイトの外観</p>  <p>屋外曝露にともなうp型単結晶シリコンPERC太陽電池の出力の推移</p>

132

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	日射量データベースの高度化に関する研究	
実施者	一般財団法人 日本気象協会	
期間・予算	2015年5月から2020年2月末まで 5年間、総額 : 207. 8百万円	
目標	気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、利便性の高い日射量データベースを構築する。	
概要	(1)日射量データベース、(2)日射スペクトルデータベースの高度化を行う。	
ポイント	<p>(1) 日射量データベースの高度化</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 改良版日照一日射モデルを構築 ② ひまわり8号データを用いた日射量推定モデルを高度化 ③ 高密度・高精度な日射量データベースを整備 <p>(2) 日射量スペクトルデータベースの高度化</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 日射気候区ごとに日射スペクトルの長期観測を実施 ② 日射スペクトル推定モデルを構築 ③ スペクトルミスマッチの影響を定量的に評価 ④ 日射スペクトルデータベースを整備 	



日射量データベースの例

133

(1) 日射量データベースの高度化

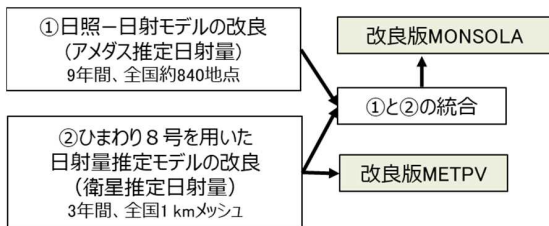
< 研究開発成果 >

- ① 改良版日照-日射モデルを構築
- ② ひまわり8号データを用いた日射量推定モデルを高度化
- ③ 高密度、高精度かつ近年の日射量の傾向を反映した日射量データベースを整備

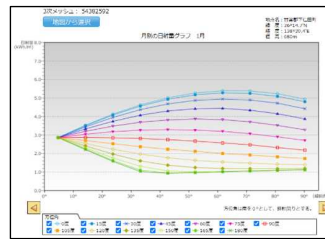
< 研究開発成果の意義 >

- 高密度日射量データベース整備により、未利用地域への太陽光発電の普及・利用が促進される。
- 高精度日射量データベース整備により、期待発電量を精度良く計算できるようになり、より最適な太陽光発電システム導入への投資、高精度な発電量診断等が行われるようになる。

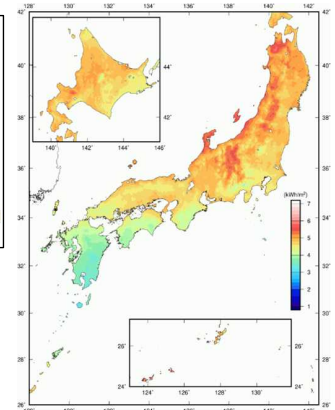
・高密度、高精度かつ近年の日射量の傾向を反映した日射量データベースの整備



< データベースの表示例 >



< 日射量マップの例(6月) >



(2) 日射量スペクトルデータベースの高度化

< 研究開発成果 >

- ① 日射スペクトルの長期観測を実施 (日射気候区ごとの全国5地点)
- ② 日射スペクトル推定モデルを構築
- ③ 太陽電池の種類別に、スペクトルミスマッチの影響を定量的に評価
- ④ 日射スペクトルデータベースを整備 (全国5地点の観測データと全国47地点の日射スペクトルデータを整備)

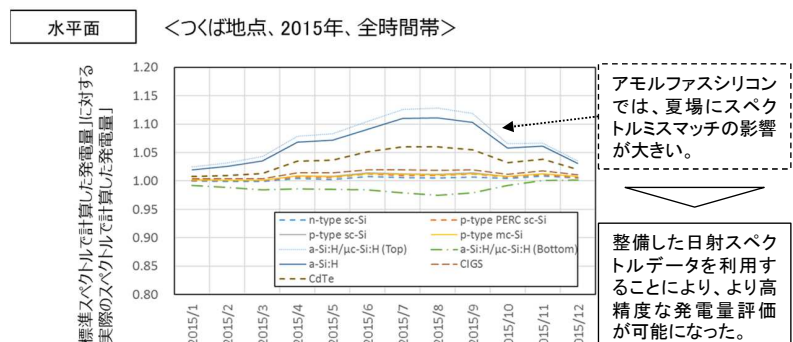
< 研究開発成果の意義 >

- 研究開発により、全国各地の日射スペクトルデータの利用が可能となったことで、以下の波及効果が期待される。
- 日射スペクトルの影響を考慮した、用途に応じた高効率な太陽電池の開発が促進される。
 - (新型太陽電池を含む) 日射スペクトルの影響が大きい太陽電池の、より高精度な評価が可能となり、その利用が促進される。

・日射スペクトルの長期観測の実施



・太陽電池の種類別のスペクトルミスマッチの評価例



Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価
実施者	学校法人東京理科大学
期間・予算	2015年5月から2020年2月末まで 5年間、総額:34.0百万円
目標	北杜サイトの発電特性分析から得られた劣化率等の知見を発電量の評価支援を行うツールにおいて利用可能とする。本研究において得られた信頼性・劣化に関する知見を発電電力量の算出方法に取り込むことにより、発電量の評価支援を行うツールを用いた北杜メガソーラーの設置後10年間の発電電力量の推定精度として±10%以内(平均)を実現する。
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外曝露モジュール・実運用システムでの劣化現象調査として、山梨県北杜市にて運用されている北杜メガソーラーの発電データを継続的に取得・分析することで、運転開始から10年以上経過したPVシステムにおける様々な発電特性の変化、不具合、劣化の高精度検出を実証するとともに、得られた知見を活かし、発電量の評価支援を行うツールを作成した。 ・開発した発電量の評価支援を行うツールを用いて北杜メガソーラーの設置後10年間の発電電力量を推定し、推定精度として誤差-0.45% (多結晶シリコン 10 kWシステム)を得たことにより、最終目標を達成した。 ・10年以上前に設置された結晶シリコン系の太陽電池モジュールおよびシステムの長期間にわたる劣化特性を明らかにし、開発したツールにより劣化特性を考慮した発電電力量の推定を可能としたことにより、多くの発電事業者が発電所の運用を効率的に行えるようになることが期待できる。

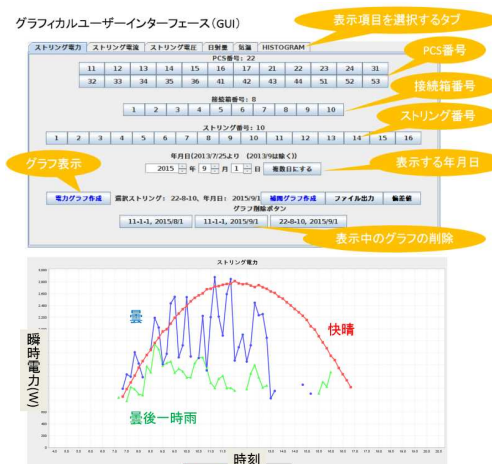
136

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	アクセシブルな太陽光発電データベース構築技術の開発
実施者	国立大学法人 佐賀大学
期間・予算	2015年5月から2019年3月20日まで 4年間、総額:29.3百万円
目標	様々な発電データをとりまとめ、アクセシブルな発電データベースを構築する技術を開発する。
概要	発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを開発した。

メガソーラー発電所の大規模な測定データを可視化、解析するソフトウェアである「大規模計測データ可視化システム」を開発

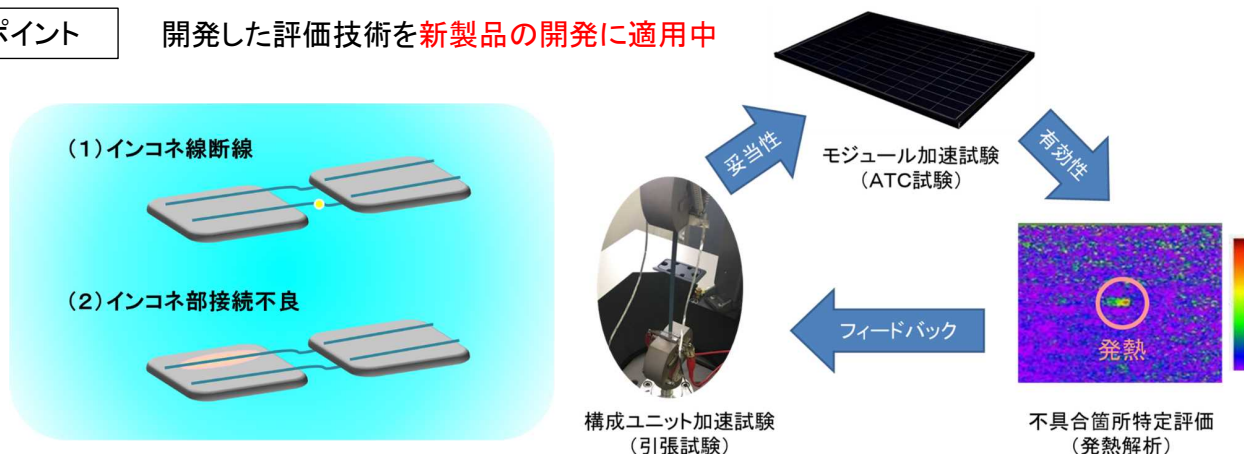
発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを開発



137

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術開発
実施者	株式会社 カネカ
期間・予算	2015年5月～2020年2月末、総額: 255.6百万円
目標	40年間以上の運転期間にわたる総発電量を推定する評価方法の開発
概要	電気接続および封止構造の40年以上の長期耐久性を評価する評価技術を開発 合わせガラス構造により、30年以上の耐用年数を有することを確認した。
ポイント	開発した評価技術を新製品の開発に適用中



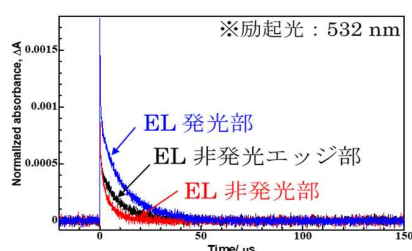
Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発 「ケーシング側から見た太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発」
実施者	日清紡メカトロニクス株式会社
期間・予算	2015年5月～2017年9月末 2年5ヶ月 総額121.29百万円
目標	①発電劣化メカニズムの解明 ②設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発 ③30年発電性能の寿命予測技術の確立
概要	発電劣化及びPIDメカニズムの解明を行い、レーザーを利用した検査方法による寿命予測方法を提案する。

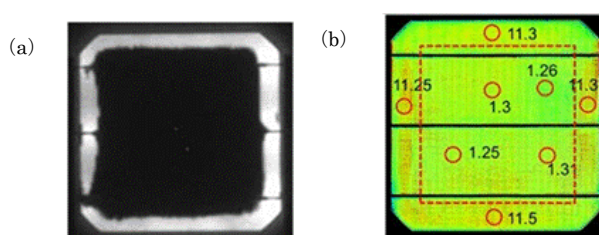
ポイント	目標	成果	達成度
	①	シリコンセルのPIDメカニズムを含めた発電劣化メカニズムを解明。	◎
	②	実フィールド環境を再現する加速試験法として、電圧を加えた状態で、温度と湿度を加える再現性良好なPID試験法を開発。	◎
	③	ラマン分光／蛍光強度比値と発電劣化率の関係から、25, 30年寿命予測できる技術を開発。	◎

実用化・事業化の見込み: O&Mビジネスの信頼性向上技術としての検査器

テーマ名	レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発 (標準化を目指した寿命予測検査技術の開発)
実施者	国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学
期間・予算	2015年5月～2018年3月末 3年間、総額: 60.28百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> 発電素子の寿命評価技術を確立し、P型、N型、PERC型Si太陽電池におけるモジュール劣化メカニズムモデルを構築 信頼性・寿命予測技術の開発し、評価試験法の特徴をテーマ全体で明らかにする
概要	レーザーを利用した検査方法により電圧誘起劣化現象により特性劣化したセルの検知を行い、その劣化メカニズムの構築、評価方法の確立を行う。
ポイント	<ul style="list-style-type: none"> 過渡吸収分光法による評価から、電圧誘起劣化現象による劣化メカニズム構築 マイクロ波光導電率減衰法で、より簡便に劣化部分の検知に成功 本評価方法が適用できるセル構造・モジュール構造を明確化



過渡吸収分光法による劣化部のスペクトル



マイクロ波光導電率減衰法による劣化部の検知

研究開発項目⑤

動向調査等

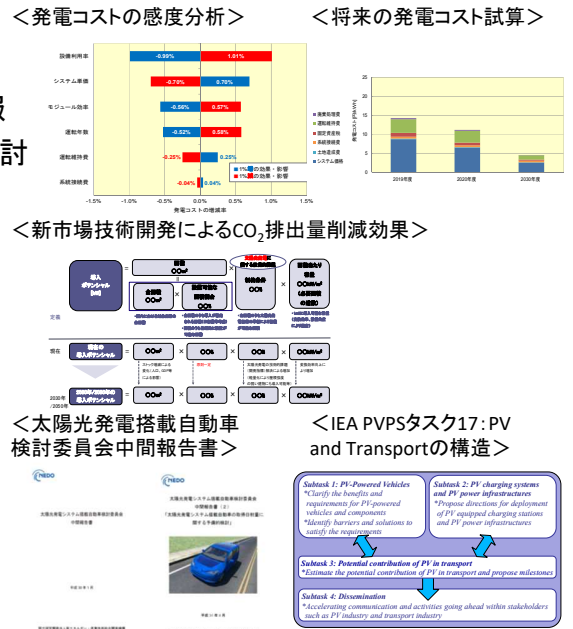
- ・太陽光発電開発戦略に関する動向調査(みずほ情報総研株式会社)
- ・発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査(株式会社資源総合システム)
- ・IEA PVPS国際協力事業(株式会社資源総合システム)

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	太陽光発電開発戦略に関する動向調査
実施者	みずほ情報総研株式会社
期間・予算	2015年度～2019年度、157.8百万円
目標	発電コスト7円/kWhの実現に向けた太陽光発電開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じて見直し案を作成する

- 概要
- ・太陽光発電の導入、生産動向の調査
 - ・太陽光発電の価格動向と発電コストの分析
 - ・太陽電池モジュール性能等に関する基礎情報
 - ・太陽光発電の将来ポテンシャル、導入量の検討
 - ・太陽光発電産業、市場に関するシナリオ分析

- ポイント
- 発電コストの現状分析および発電コストを検討。太陽光発電の新市場における将来導入ポテンシャルおよび導入量やCO₂排出量削減に向けて必要な技術開発分野を検討
 - 太陽光発電産業、市場に関するシナリオ分析を実施、太陽光発電の技術開発方向性を検討
 - 太陽光発電搭載自動車の普及推進に資するため、太陽光発電搭載自動車検討委員会を開催、IEA PVPSタスク17の立ち上げ、運営を支援

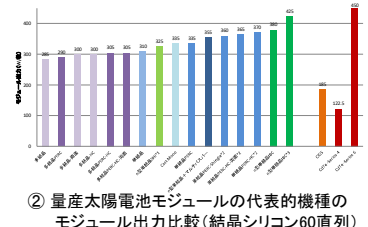
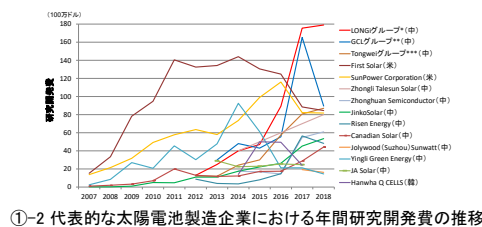
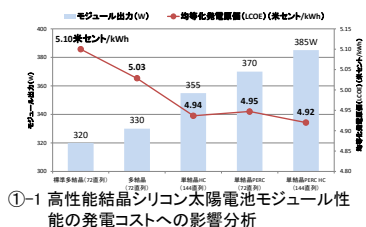


Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査
実施者	株式会社社資源総合システム
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額：55.7百万円
目標	太陽電池モジュールに関する技術動向及び産業への影響、コスト分析等を継続的に調査し、「太陽光発電開発戦略」へフィードバックする。

- 概要
- 諸外国における太陽電池モジュールの性能レベル、製造技術、製造コスト、研究開発等の各種動向、主要製造企業の産業競争力、今後の太陽電池市場と産業の可能性、諸外国における研究開発施策動向を調査し、情報の収集・整理・分析を行った。

- ポイント
- ① 太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性及び産業競争力に関する動向調査
 - ①-1 発電コスト分析(コスト内訳、モジュール性能のLCOEへの影響)
 - ①-2 太陽電池モジュールの現状技術及び産業競争力に関する調査
 - ①-3 太陽電池モジュールの長期信頼性調査(研究開発、国際標準化)
 - ② 太陽電池モジュールの製造技術開発と製造コストに関する調査・分析
 - ③ 太陽電池モジュールの利用動向と今後の市場と産業の可能性に関する調査・分析
 - ④ 各国の太陽電池研究開発動向(目標・枠組み・予算、対象国:米、欧、独、豪、中、韓、等)及び新たな太陽電池技術(ペロブスカイト等)に関する調査



テーマ名	IEA PVPS 国際協力事業
実施者	株式会社資源総合システム
期間・予算	2015年5月～2020年2月末 5年間、総額:77.0百万円
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・IEA PVPS活動の日本の産業界への発信 ・IEA PVPSの日本のプレゼンスの更なる向上とリーダーシップ
概要	IEA PVPSタスク1 専門家として各種活動に参加し国際協力活動への日本代表として貢献すると共に、活動成果を日本の太陽光発電の研究・開発へ活用及び太陽光発電ステークホルダーにフィードバックする。
ポイント	<ol style="list-style-type: none"> ①タスク1 専門家として専門家会議に参加して情報交換及び情報収集を行うと共に、我が国の太陽光発電動向の調査と報告書作成を実施した。日本からの報告は各国からの報告と共に、タスク1による世界の動向報告書(Trends Report)に反映された。 ②特別情報活動(国際会議におけるワークショップ・セミナー等)に関して、内容の企画、各国との事前調整及び国内調整を行った。要請に応じて、世界市場における応用の多様化、世界の産業動向等のプレゼンテーションを行った。 ③タスク1 定期刊行物編纂にあたり、各種レポートの作成およびPVPS 参加国・加盟機関の報告書の翻訳等を行った。 ④上記①～③の内容およびタスク定期刊行物から編集した統計データを含む成果報告書を年度毎に作成した。



③作成したIEA PVPSタスク1の定期刊行物(各種レポート)

研究開発項目⑥

高性能太陽電池製造技術実証

- ・低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証(株式会社カネカ)

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

テーマ名	低コストヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の小規模量産実証
実施者	株式会社カネカ
期間・予算	2018年6月～2020年2月末、交付総額約285百万円
目標	指標①: p領域、n領域、電極パターンを形成するための製造コストにおいて変動費5円/Wが実現可能であることを小規模量産レベルにおいて実証する。 指標②: セル変換効率において、モジュール変換効率22%に資するヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池セルを小規模量産レベルにおいて実現する。(セル変換効率24%相当。ただし、モジュール構造による。)
概要	海外メーカーに対し圧倒的に高効率なヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池の実現とその低コスト化に資する製造技術を小規模生産レベルで実証する
ポイント	<ul style="list-style-type: none">・p/n、電極パターン形成に用いる部材を安価材料で適用可能であることを確認。・既存材料の利用効率を大幅に改善可能な見込みを確認。・上記2つの成果によりパターン形成の変動費5円/Wの実現見込みを確認。・小規模量産実証ラインでの各プロセス改善により、再現性良くセル変換効率24%相当の特性を得た。・事業終了後、実用化にあたって、更なる競争力獲得に向けて研究開発を実施中。・IoT向け用途や、移動体向け用途など、新規のハイエンド用途への展開も開始。

参考資料 1 分科会議事録及び書面による質疑応答

研究評価委員会
「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」(事後評価)分科会
議事録及び書面による質疑応答

日 時：2020年11月27日(金)12:30~17:30

場 所：NEDO川崎本部2301・2302会議室(オンラインあり)

出席者(敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長 平本 昌宏 自然科学研究機構 分子科学研究所 物質分子科学研究領域
分子機能研究部門 教授

分科会長代理 廣瀬 文彦 山形大学 大学院理工学研究科 教授(リモート参加)

委員 尾坂 格 広島大学 大学院先進理工系科学研究科 応用化学プログラム 教授
(リモート参加)

委員 加藤 丈佳 名古屋大学 未来材料・システム研究所 システム創生部門 教授
(リモート参加)

委員 高島 由布子 株式会社三菱総合研究所 サステナビリティ本部
気候変動ソリューショングループリーダー 兼 海外事業本部

委員 野崎 洋介 株式会社エネット 取締役(リモート参加)

委員 野瀬 嘉太郎 京都大学 大学院工学研究科 材料工学専攻 准教授

<推進部署>

大木 雅文 NEDO 新エネルギー部 部長

山崎 光浩(PM) NEDO 新エネルギー部 主任研究員

宮川 康陽 NEDO 新エネルギー部 専門調査員

<実施者>

山本 憲治 株式会社カネカ 太陽電池薄膜研究所 常務理事 所長

加藤 拓也 出光興産株式会社 次世代技術研究所 薄膜デバイス研究室 主任研究員

菱川 善博 産業技術総合研究所(AIST) 再生可能エネルギー研究センター
太陽光評価・標準チーム 招聘研究員

岡田 至崇 東京大学 先端科学技術研究センター 教授

高本 達也 シヤープ株式会社 ビジネスソリューション事業本部 化合物事業推進部 部長

森田 健晴 積水化学工業株式会社 R&D センター 先進技術研究所 次世代技術開発センター
センター長 兼 創エネルギーグループ長

<評価事務局>

森嶋 誠治 NEDO 評価部 部長

武田 浩一 NEDO 評価部 主査

塩入 さやか NEDO 評価部 主査

議事次第

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法
5. プロジェクトの概要説明
 - 5.1 「事業の位置付け・必要性」及び「研究開発マネジメント」
 - 5.2 「研究開発成果」及び「事業化・実用化に向けた取り組み及び見通し」
 - 5.3 質疑

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
 - 6.1 研究開発項目① 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発
 - (1) 結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発
 - (2) CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発
 - 6.2 研究開発項目④ 共通基盤技術の開発 (太陽光発電システムの信頼性評価技術等)
 - (1) 太陽電池性能高度評価技術の開発
(新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発)
 - 6.3 研究開発項目② 革新的新構造太陽電池の研究開発
 - (1) 超高効率・低コストⅢ-V化合物太陽電池モジュールの研究開発
 - (2) 低コストペロブスカイト太陽電池の開発
7. プロジェクトの補足説明
8. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

9. まとめ・講評
10. 今後の予定、その他
11. 閉会

議事内容

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認

- ・開会宣言（評価事務局）
- ・配布資料確認（評価事務局）

2. 分科会の設置について

- ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1 に基づき事務局より説明。
- ・出席者の紹介（評価事務局、推進部署）

3. 分科会の公開について

評価事務局より、既に資料 2 及び 3 に基づき各委員に事前説明を実施し、委員からの質問にも回答済みであるとの説明があった。議題 6.「プロジェクトの詳細説明」、議題 7.「プロジェクトの補足説明」、議題 8.「全体を通しての質疑」を非公開とした。

4. 評価の実施方法

評価事務局より、既に資料 4-1～4-5 に基づき各委員に事前説明を実施し、委員からの質問にも回答済みであるとの説明があった。

5. プロジェクトの概要説明

5.1 「事業の位置付け・必要性」及び「研究開発マネジメント」

5.2 「研究開発成果」及び「事業化・実用化に向けた取り組み及び見通し」

評価事務局より、既に資料 5 に基づき各委員に事前説明を実施し、委員からの質問にも回答済みであるとの説明があった。

推進部署より補足説明があり、実施済みの事前説明と併せて、その内容について質疑応答が行われた。

【山崎 PM】 プロジェクトの概要につきましては、事前に送付しておりますので、簡単にプロジェクトの事業の位置付けとマネジメントについて、補足説明をします。

本事業の背景と事業の目的でございますが、これは事業の立ち上げの2014年当時でございます。NEDOでは、おおよそ5年ごとに太陽光発電ロードマップを策定しております。2009年のロードマップから5年が経過して、国内では太陽光をめぐる環境が大きく変化したということです。特に2012年のFIT制度（固定価格買取制度：Feed in Tariff）の導入が大きな一つの転機となっております。2014年当時で、大量導入社会が始まりつつあり、その中でのこのような三つの視点から、新しい開発戦略を策定いたしました。

背景と事業の目的でございます。事業の目的としては、2030年までに公的支援に頼らず、太陽光発電が自立して普及する普通のエネルギーにするための発電コスト目標を設定いたしました。2020年時点で、業務用電力価格の発電コスト、グリッドパリティとして14円/kWh、さらに2030年で従来型火力発電の7円/kWhを目指すという目的を立てています。目標としては低コストですが、発電コストの達成については、高効率・長寿命・高信頼性、さらに大量生産技術ということで、いろいろと複合的な技術があります。こういった幅広い観点で、太陽光発電の技術開発を行いました。

政策的位置付けでございます。2014年第4次エネルギー基本計画で再生可能エネルギーについては、低炭素の国産エネルギー源であるというところです。あとは、このプロジェクトの最中でございますけれども、2018年の第5次エネルギー基本計画では太陽光、風力発電については、将来の主力電源化を目指すという位置付けがなされております。

調達価格算定委員会、2016年当時でございますが、2020年に14円/kWh、2030年に7円/kWhという数値が示されております。こうしたことから、本目標を設定しております。

国内外の研究開発動向です。1974年のサンシャイン計画以降、1980年、NEDOが設立されて以降、NEDOが太陽光発電の技術開発を行ってきました。2014年当時でございますが、欧州、米国、中国、さらに韓国と各地域において、シリコン、さらに次世代型太陽電池技術開発が公的資金を投じて行われております。現状においても、こちらについては変わりません。最近では、欧州ではグリーンリカバリーということで、さらに再エネに対して注力を行っているということで、引き続き、次世代型の太陽電池の技術開発の必要性というのは当時と同等、さらに増しているという認識でございます。

市場動向でございます。こちらは国内の市場動向でございますが、FIT制度が開始された2012年から太陽光発電の国内導入量は急増しております。累積導入量は、2018年には50GWになっております。直近では約55GWという形になっております。右側のシェアでございますけれども、地上シェアについては平均で見ると残念ながら、国内企業、日系企業の比率は徐々に落ちていきます。平均値で見ると、7割から5割強に落ちていきます。依然として日系企業のシェアは住宅用などで高い部分があります。こちらについては、用途を見極めた上で、高効率、低コストモジュールの開発を支援する意義があるという認識でございます。

技術戦略上の位置付けでございますが、これは先ほどのとおり1980年の設立以降、太陽光発電の技術開発を続けてきておりまして、併せてロードマップを改定してきております。

2014年当時の開発戦略の課題認識ということで、五つ、課題を挙げております。国民負担の増大、長期に安定した電源量の確保、廃棄物の発生、立地制約、グローバル競争の激化というものがああります。こうした課題の下で、主に発電コストの低減、信頼性の向上といった課題を受けて、セル、モジュールの開発を2015年から2019年の期間で5年間、プロジェクトを立ち上げました。従前でもセル、モジュール開発を行ってきておりますが、新戦略を踏まえて新設いたしまして、電池種についてはシリコン、CIS、III-V、ペロブスカイトという将来的に発電コストの低減に資するとNEDOで判断した四つに絞って開発を行いました。補足でございますが、NEDOではリサイクルやシステム系の技術開発も引き続き、行っております。

こちらはコスト低減についてのロードマップです。2013年当時、発電コストはkWh当たり23円で、それを大きく下げることが必要で、2020年に業務用電力価格並、さらに2030年に基幹電源発電コスト並の7円となっております。ただし、FIT制度の導入によって大量生産が進みまして、コスト低減が当初の想定以上に進んでいるということで、途中段階で5年の前倒しを行っております。

NEDO関与の意義でございます。大きくこのように企画、体制構築、事業推進とあります。NEDOの強みとしては、これまで実施してきた技術開発の蓄積、産官学を中心としたコンソーシアムの形成、さらに一番右側にありますが、市場動向に応じた加速資金の導入、追加公募等を柔軟に実施し

てまいりました。

実施の効果でございます。インプット、プロジェクト費用については210億円です。費用の効果を算出するのはなかなか難しいですけれども、例えばFIT賦課金は毎年2兆円を超えているということと、次世代電池の市場規模はかなり大きいということがございます。

そうしたことから、事業の目標についてはこのように設定をさせていただいております。低コストが主軸となっておりますが、それを達成するための幅広い技術開発を行っております。この辺は割愛をさせていただきます。

研究開発項目は1番から6番になります。6番は中間目標以降に追加をいたしました。

プロジェクトの費用については、211億円ということでございます。

進捗管理については、技術推進委員会を行いまして、特に中間評価以降、回数を増やしました。特に出口や新規用途、横の連携といった指摘をいただきました。

動向・情勢の把握と対応ということで、発電コスト低減に応じて、新規テーマを追加、新規分野への対応、導入可能性の検討を中心に途中段階で対応の変更を行いました。こちらについては、加速資金の投入実績ということで、割愛させていただきます。

最後に補足ですけれども、25ページ目のプロジェクトの達成状況、成果の意義については、少し修正をさせていただきました。この表については、あくまで効率という観点での評価になっておりますが、NEDOで行ってきたのは効率だけの技術開発ではありません。効率を達成するとともに、低コスト化につながる量産技術、信頼性の向上も幅広く実施をしております。こちらについては、後ほど非公開のセッションの中で、代表的な事業者から発表させていただく予定でございます。また、現時点での世界最高かどうかについても言及をさせていただいております。このスライドだけ修正をさせていただきました。

【平本分科会長】 どうもありがとうございました。全部覚えておられるか分かりませんが、事前にやり取りをした質疑分を踏まえて、ご意見、ご質問等をお願いします。オンラインで参加の方は、質問、発言の際はミュートを解除してから、お名前とご所属、質疑の対象とする資料番号やページ数を特定してから、質問をお願いいたします。

3ページと10ページに14円/kWh、2030年の7円/kWhと書いてあります。それは、どういう原理によって決められていますか。

【山崎 PM】 こちらのロードマップについては、2014年当時のヒアリング等を踏まえて、業務用電力価格、当時としての基幹電源コストをまずはターゲットにしました。そのためには寿命がどの程度なのか、システム化コストがどの程度なのかといった観点から、大きな目標を策定いたしました。皆さんがおっしゃるとおり、次世代型の太陽電池は大きくフェーズが異なっておりますので、この目標については主にシリコンとCISを対象としたものという認識でございます。世の中の状況としても、コストが現実でも下がってきているという状況でございます。

【平本分科会長】 12ページで、私はきちんと分かっていないかもしれませんが、FITの賦課金が毎年2兆円を超えているというのは、国庫から支出されているということでしょうか。

【山崎 PM】 賦課金については、国民の電力料金から負担するという形です。

【平本分科会長】 電力料金に上乗せされているということですか。

【山崎 PM】 そうです。今、手元に資料はありませんけれども、家の電力料金に平均すると毎月700円

前後が再エネ賦課金として加算されています。そういった形で FIT 賦課金が少しずつ上がってきている状態なので、国民負担を抑えていかなければいけないということも背景になります。

【平本分科会長】 賦課金を 0 にするためには、何円/kWh になればいいのでしょうか。

【山崎 PM】 これは非常に難しいです。賦課金については、FIT 価格と連動して決まっています。太陽光発電の買い取り価格が 2012 年、2013 年は 40 円/kWh など、非常に高かったのが、賦課金が高くなりました。太陽光発電の買い取り価格が非常に安くなっても、FIT の買い取りについては 2012 年から 20 年間続くので、賦課金の増加をいかに抑制していくかということが、非常に大きな観点です。

【平本分科会長】 買い取り価格で最初は 40 何円/kWh、最近では 23 円/kWh などといった感じですか。もっと低くなっているのでしょうか。それとの関係はどのようになっていますか。

【山崎 PM】 手元に資料はありませんけれども、買い取り価格は 2012 年当初は 40 円/kWh 程度です。直近では 13~14 円/kWh 程度だと思います。買い取り価格は大きく下がってきています。太陽光のモジュールの大量生産に伴って、価格も下がってきているという点も含めて、そのようになっています。

【平本分科会長】 買い取り価格が下がってきているのに、賦課金がまだ 2 兆円あるということについて、本当はよく理解できていません。

【山崎 PM】 FIT の買い取りについては 20 年続くため、最初に 40 円/kWh、価格低下が進む前の 2012 年当時に設定した買い取り価格はそのまま 20 年間続きます。

【平本分科会長】 以前のものがまだ残っているから、高くなっているということですか。

【山崎 PM】 そういうことです。

【野崎委員】 事前質問で、7 円/kWh の目標に関する質問をさせていただきました。技術的な開発によらない、例えばメガソーラーを作るときの用地の確保や電力系統の対応等の価格が高くなっていることもあって、事業を行う上での発電コストが本当に 7 円/kWh になっているのかどうかというご質問をさせていただきました。ご回答としては、系統影響等の費用は含まれていない状況ですので、それは今後の課題といたしますといったご回答がありました。かつ次のプロジェクトでも、そういうものを扱っていくというご回答をいただいております。もう少し具体的に、今後、技術によらない部分の費用を考えていくのか、もしくは新たなプロジェクトで考えていくのかをお答えいただければと思います。

【山崎 PM】 事前の質疑応答でやり取りさせていただいたように、まさにおっしゃられた観点のとおりです。試算において、目標設定値にも一定のシステム価格は設定しております。ただし、当時は FIT での買い取りはメガソーラーや住宅屋根がメインでしたので、そちらの前提で系統影響という観点はございませんでした。今後、コスト的な観点では、そういった点も考慮していかなければなりません。蓄電池のコストをどうするのかということは、なかなか難しい問題かと思っております。本年度から立ち上がったプロジェクトについては、後ほど補足をさせていただきますけれども、より次世代電池の開発ということで、新規分野として建物の壁面や車載といった新しい用途への展開を考えております。そこに導入される価格の検討を行っております。おっしゃるとおり、系統影響でのコストは蓄電池も含めてですけれども、なかなか難しい問題でもありますので、今後の課題とさせていただきたいと思っております。

【加藤委員】 私も同じ質問をさせていただきました。その意味では、今回のものは 10 円/kWh、7 円/kWh と円を書いてあるので、日本でのターゲットではないかと認識しています。この程度の価格設定で、いろいろなバランスコストを差し引いたときに、海外に新しい市場を打っていきけるだけの目標になっているのかという疑問をもちました。どういうふうに設定したのか、今になってきたときに設定が妥当だったか、どう考えていますか。それから、新しい市場が 12 ページの資料でも書かれています、なかなかイメージがわかりません。大きなシステムに大きな市場があるというふうに思ってしまいます。現時点で、どのようにお考えになっていますか。よろしくお願いします。

【山崎 PM】 事前の質問で回答させていただいていたとおり、現在例えば中東では、非常に安いメガソーラー設備ができております。それは本当に大規模な設備で、最新のデータでは 2 円/kWh 程度のプロジェクトもあるということです。これは年間日射量と大規模なシステムということからです。発電コストについては、日本の日照条件を含めて、各国の状況を踏まえて検討すべきではないかと思っています。われわれの認識としては、買い取り価格の現状価格、国内での非住宅と住宅の発電コストの状況から、この目標については妥当だったと考えております。例えば、地上のメガソーラーについては、今、14 円/kWh を若干切るぐらいの所もありますが、正確な数字ではありませんけれども、住宅向けでは 16 ～18 円/kWh となっています。したがって、用途に応じて、高性能の発電モジュールを市場として提供していくということがポイントかと思えます。海外の大きなメガソーラーに対抗して海外市場を求めめるのではなくて、より高信頼性が必要な住宅の屋根、建物の用途といったところに市場を求めていくべきではないかとわれわれは考えております。この辺については、各モジュールメーカーとも議論した結果でございます。

【高島委員】 資料 5 の 13 ページです。今、加藤委員からのご質問とほぼ同じことを質問したかったので、その点は解決しました。さらに確認ですが、今のご説明は、「日本で 7 円/kWh なら日射が良い中東に持っていけば 2 円/kWh の世界で戦える」という意味でしょうか。それとも、そもそもそういう所で戦う前提ではないということでしょうか。どちらのイメージでしょうか。

【山崎 PM】 正直なところ、なかなか難しい問題です。NEDO というよりは、各モジュールメーカーがどう判断していくかという部分だと思っています。どちらの市場を目指すかというのは、なかなか難しいですけれども、今までモジュールメーカーなどに話を聞いている限りでは、全面的に海外の大規模なメガソーラーにというよりは、住宅向けのほうが多いと感じております。この辺について、詳細はもう少し非公開の部分でも議論させていただければと思います。

【高島委員】 当初、2030 年 7 円/kWh だったのを 2025 年に前倒したということは、途中に見直しを行っていると思います。この期間に、何回程度、見直しを行っていますか。毎年行っていますか。

【山崎 PM】 大きな見直しについては 1 回でございます。プロジェクトは 5 年間ありまして、3 年目に中間評価を行いまして、それを踏まえた形です。世の中の状況を見て、FIT の買い取り価格がわれわれの想定以上に下がってきたので、前倒しをさせていただきました。ただし、個別の事業者の目標については、毎年、見直しを必要に応じて行っております。

【野瀬委員】 資料 5 の 9 ページ辺りについてです。高性能ということに関しては、発電効率を上げてコスト低減に寄与するという事だと思えます。高信頼性ということに関しては、どの辺りに着目すればよろしいですか。

【山崎 PM】 主に長寿命化です。モジュール構造、セル構造を含めて、より耐久性を持たせるというこ

とです。将来的に 7 円/kWh を目指すには、現在のメーカー保証がモジュールの寿命を 20 年に設定しておりますが、30 年にしていけないということがあります。長寿命化の観点での高信頼性、さらに補足として劣化抑制といったことも含めてテーマを実施いたしました。

【野瀬委員】 資料 5 の 8 ページです。今回の課題もこの五つの課題に基づいて、テーマ設定等を行っていると思います。課題に対するコントリビューションや達成度はどこかにまとめられていますか。例えば、テーマがどの課題にコントリビューションしていて、現在、どの段階にあるのかといった部分です。

【山崎 PM】 基本的には発電コストの低減と信頼性の向上という二つの課題について、対応いたしました。ただ、国民負担増大と発電量の確保ですけれども、副次的にはグローバル競争の激化のような点で日本のシェア回復という部分もあります。新しい分野への展開ということは、立地制約の顕在化もあり、なかなか複合的にいろいろな要素が混ざっていて、定量的な分析は難しいです。FIT 賦課金との関係についても、技術開発だけで何%という寄与は難しいものという方針でございます。

【野瀬委員】 例えば、途中で新たなテーマを設定されていると思います。それがどの辺りに寄与するのかといった図のようなもの、あるいはコスト低減技術開発以外にリサイクルのテーマがあるので、それも含めて、NEDO としてこの課題に対して、どのような取組を行っているかということをもう少し示していただくと太陽光発電の研究全体として少し分かりやすくなって、広く周知できるのではないかという気がしています。

【山崎 PM】 いただいた意見については、今後の課題検討で対応させていただきたいと思います。新規市場については、例えば立地制約の顕在化、さらにそれを海外に展開する場合はグローバル競争の激化ですけれども、野瀬委員がおっしゃるとおり、分かりやすく俯瞰することの訴求が重要だと思います。いただいた意見については、ぜひ今後、検討させていただきます。

【廣瀬分科会長代理】 目標として発電コストを掲げられています。ただ、このケースで市場規模との相関がよく分かりませんでした。間違いなく、多くの市場が出てくるのではないかと思います。市場の拡大イメージでいうと、半導体の歴史を見ても市場が拡大すると、強い市場からの要求があって、開発あるいは研究がポジティブに帰還がかかって加速するということが見えてくると思います。国主導の開発からプロモートしていく体制から、市場が主導して引っ張るのはどの辺なのかということを知りたいです。

【山崎 PM】 12 ページの下半分にあるように、将来の市場規模というのは、なかなか難しい問題です。シリコン太陽電池、CIS 太陽電池（銅（Cu）、インジウム（In）、セレン（Se）の 3 つの元素を主原料とする化合物半導体系太陽電池）については、市場規模は現状も含めて、ある程度、出されています。ペロブスカイトやヒ化ガリウムのような次世代型電池について、まだ事業化されておられません。この市場規模が将来、シリコンや CIS といった既存の太陽電池で導入できないような部分に展開して、棲み分けていく場合に、どの程度の市場規模になるかは、NEDO で非公開ですが、ある程度の導入効果については試算を行っております。こちらについては、非公開セッションで紹介をさせていただきたいと思います。ただ、一律でこの程度というのは、なかなか難しい分野でございます。参考までに、IEA が出している統計を質疑応答の回答に記載をさせていただきました。IEA（国際エネルギー機関：International Energy Agency）の World Energy Outlook 2020 だと、

世界全体で 2040 年に 5800GW、5.8TW の太陽光が導入されているということが、最も持続可能なシナリオとして存在しています。IEA のこういった予測の中でも、太陽光はかなり大きなウエイトを占めていくということは、こういった国際機関の中でも予測されています。市場については、拡大はしていきますが、それが日本でどの程度なのか、新型電池でどの程度なのかということは、なかなか難しい課題です。

【加藤委員】 今のお話に関連して、国内市場は昨年から住宅用 FIT 切れが始まって、あと 10 年すると事業用も FIT 切れが始まります。その時点で、いろいろと動きがあるのではないかと思います。今回の開発は、そこに間に合うのか、どのようにお考えでしょうか。

【山崎 PM】 FIP 制度（市場連動型の売電制度：Feed-in Premium）が始まるのは来年、再来年とすぐということになります。このプロジェクトの成果については、モジュールメーカーで例えばシリコンや CIS については事業化を展開されていくとわれわれは認識しております。例えばペロブスカイト、III-V 属といった次世代電池については、現在、技術開発の段階です。どういう用途に展開していくのか、シリコンと CIS とどう棲み分けていくのか、といった観点が重要です。今年から始まっているプロジェクトの中でも、企業から事業化の時期や方向性については、資料もいただいてディスカッションさせていただいております。ただ、全体的な太陽光を取り巻く状況というのは、いろいろと変革しております。事業者とよく議論をした上で、どのように技術開発を行っていくかというのは引き続きの課題になっております。シリコン、CIS 系と次世代型と、大きく分かれるということです。既存市場と新規市場、この資料にもありますけれども、建物の壁など、そういった軸があるかと思えます。もちろん、FIT が切れる 2032 年、大量導入のシリコンの例えばリプレイス時期に新型太陽電池をわれわれとしても出していきたいという思いで、技術開発を行っています。それをさらに前倒ししていきたいということで、技術開発を続けております。

【平本分科会長】 それでは、時間になりましたので、他に意見があるかもしれませんが、次の議題に行きたいと思えます。

（非公開セッション）

6. プロジェクトの詳細説明

省略

7. プロジェクトの補足説明疑

省略

8. 全体を通しての質疑

省略

（公開セッション）

9. まとめ・講評

【平本分科会長】 議題 9 です。まとめ・講評です。野瀬委員から始めて、逆に行ってください。講評は 2 分程度です。すぐいけそうですか。少し時間があつたほうがよいですか。皆さん、急に言われてもということかもしれません。1、2 分、時間をとらせていただきます。

【野瀬委員】 この5年間のプロジェクトで、各テーマにおける達成度は非常に素晴らしいものがあると思っています。そのテーマを最終的にどういった目的に対して、どのようにコントリビューションしたかということをし少し明確にさせていただけるのではないかと思います。先ほどのお話にもありましたけれども、NEDOとしてどういった太陽電池を目的にして、そこに対するコントリビューションがどうなっているかを報告書に書いていただくと非常に良いのではないかと思います。特に直近で言うと、日本市場への日本企業のモジュール出荷率比率が落ちていることが問題なのか、その辺を解決するためにどうコントリビューションしたかを明確にさせていただければと思います。

【野崎委員】 太陽光に関する開発は、NEDO発足以来、ずっとNEDOがリードして開発を進めてきました。当初はセルや材料、モジュールの性能を上げる手段として開発が行われていました。今回の結果を見ると、シーズ的な研究開発から新しい付加価値、もしくはニーズに基づく研究開発に変わってきています。その分野で、日本が今も世界トップレベルになっているのは、NEDOのこの理論のおかげではないかと思っています。

ここからはお願いになります。これは中間評価のときにも少し申し上げたことですが、対外発表の件数に対して特許の件数が、これで足りているのかどうかという点が少し不安です。これから付加価値分野の中で勝負をしていく中でも、先ほどから中国など外国に対する競争優位性の確保の話が出ていました。最終的にそういう部分を守るのが、知的財産権の確保になると思います。引き続き、そちらにも留意しながら、研究開発をリードしていただければと思います。

【高島委員】 3点、申し上げたいと思います。

1点目は、革新的新構造太陽電池についてです。III-Vとペロブスカイトにつきましては、後発で入ってくるものになりますので、どういう道筋で入っていくかという事業戦略をNEDOも一緒に考えていただく姿勢が必要なのではないかと思いましたが。既に行っていたいただいていますけれども、アプリケーションの部分とマッチング等も期待しています。だいぶ事業化が先の分野になりますので、ぜひ事業者の皆さんをエンカレッジするように導いていただく必要があるのではないかと思います。

2点目は、シリコンとCISについての話になるかもしれません。私どもの業界でも菅首相による「2050年に実質ゼロ」宣言以降、非常に問い合わせが増えております。80%なら、残りは20%とカウントされると思っていた人たちの逃げ場がなくなって、すぐ何かしなければという意識がとて高くなっております。こうした社会背景の中、あまりハイパーな品質でなくても、今あるものでよいので、すぐに市場に投入してほしいというニーズもあるのではないかと思います。その辺も意識していただけるとよいと思いました。

3点目は、共通基盤技術についてです。今日、ご説明いただいたような測定や評価については、どうしても学術機関の皆さま主体になっており、社会実装の担い手ではありません。成果発表後、社会実装が本当に進んでいるかというフォローをしていただく必要があるのではないかと思います。

【加藤委員】 今回、いろいろな技術を横並びで目標を立てて、開発されたということです。そういう意味では、課題がより明確になったと思います。そういった意味では、非常に良い目標になっていると思っています。どこまで太陽光に頼るかということが、最後のほうの議論でありました。太陽光

を検討したときに、300GWといった数字を置きながら検討しています。そこまでして太陽光に頼らなければいけないのかという気がしなくもありません。太陽光自身にも、発電することだけではなくて、出力調整という機能を持たさなければいけないでしょう。そうしたときに、大きなものでどこまでやるのかということがあります。新市場で、どこまでそれをもたせるのかということは先ほども見ましたけれども、もっと上のところから議論しなければいけないと思います。そういった点からも、どのように太陽光を増やしていけばいいかということをおNEDOで、さらにご検討いただければと思っております。

【尾坂委員】 今日、成果を拝聴いたしまして、どの企業やグループも目標に対して、研究開発が非常に進んでいて、素晴らしいと思えました。特に、新しい技術の部分において、私も有機薄膜太陽電池に取り組んでいる立場の人間として、このペロブスカイト太陽電池の進展は素晴らしいと思っています。耐久性もかなり良いものができているということで、非常に将来性が見えてきたのではないかと考えています。ですので、このような新しい太陽電池に対する支援を、国としても継続して行っていただけたらよいのではないかと考えています。

今、日本として新しい高付加価値の太陽電池に勝負をかけるということかもしれません。他国も恐らく同じような考えを持っているはずですので、他国の状況も比較しながら、うまく戦略を立ててNEDOが先導していければよいとも思いました。

私は個人的には太陽電池は性能も重要ですが、先ほども申し上げましたようにデザイン性は非常に重要だと思っています。景観を損ねないような、導入したくなるような形の製品が必要だと思っています。そういった観点からも、研究開発を進めていけるような戦略を立てていただければよいのではないかと考えています。

【廣瀬分科会長代理】 本日、技術を見せていただきまして、各プロジェクトが非常に高い目標を立てていながら、緻密に実行したということで、非常に高く評価しております。私も太陽電池の研究分野におりますけれども、どうしても効率のほうに進みがちで、コストはなおざりになりがちな面があります。初めから、コストと効率の両方の目標を立てて、しっかりと開発に取り組んだという部分に、今回のプロジェクトの素晴らしさがあるのではないかと考えています。

あとは私からのお願いになります。このように素晴らしい成果を出された各プロジェクトに対して、それぞれが国際的なベンチマークとして、どの位置にいるかという評価をしていただけると一般的には分かりやすいのではないかと考えました。それから、太陽電池の市場だけではなくて、この技術が作られたことによって、産業に新しい分野がどう芽生えるかという可能性についても考察いただけるとありがたいと思えました。私個人としては、この技術がどう雇用の醸成につながるのかということも興味を持っています。参考にいただければと思います。

【平本分科会長】 最初のシリコンを見ると、効率は理論限界に達しています。世界トップレベルに達しているということで、非常に感銘を受けました。それから、CISもかなりそれを追って、良いところまでいっていると感じました。III-Vとペロブスカイトはまだ基礎的ではありますが、こちらも大事なので、きちんと伸ばしていってほしいという印象をもちました。

菅首相の話が出ましたが、施政方針演説で、再生可能エネルギーを基幹エネルギーにすると言っているのは、太陽光発電にもかなり風が吹いているということです。今はチャンスだと思います。基幹エネルギーとして進めると言われたので、全体のシステムとしてどのように進めていくか、先

ほど言った蓄電の問題などが入ってきて、いろいろな問題が考え方としては出てくると思います。トータルシステムとして、日本にどのように基幹電力として入れていくかということを将来的に考えていただきたいと思います。

また、国際競争力について、何人もの方が指摘されました。NEDOの説明を受けたときにも、それについてディスカッションを行いました。会社がここまでコストが下げられるという試算までは進みますが、そこから先は会社の経営の問題が関係してきます。会社が投資できなければ、大量に作れずに中国に負けるなどしています。その辺はNEDOの仕事ではないかもしれませんが、菅さんが言われたのなら国策として取り組んでもよいのではないかと考えています。

今お話しした2点が大きいことかと思いました。非常に感銘を受けました。中間報告も聞いていましたけれども、そのときに比べて、かなり目標が明確化して、きちんと成果を出されたということが正直な感想です。結果をレポートにまとめなさいということが出てきます。各論を書きなさいなど、いろいろ書いてあると思います。今日の全体的な感じを見て、ある程度、評価点を高く付けてあげてもよいのではないかと考えております。

ここまで来たということで、次のプロジェクトとしてどう走らせるかを考えたほうが良いと思います。フィードバックをかけて、次にNEDOとして何を行っていくかということです。太陽電池だけの問題ではなくなってくるような気がします。風力、蓄電、電送、車も蓄電池になるわけです。その辺も全部関わってきますけれども、システムとしてきちんと実施できると示すようなことも必要ではないかと感じました。それから付け加えると、原理的にはタンデム化すると、かなり効率は上がるのではないかと思います。どこまで行えるのかということがあります。熱力学的な問題がありますが、50%を超えるようなことは、原理的にどうでしょうか。アメリカでそういうことを行っていると聞いた気もします。もっと高効率をねらう、原理的なブレークスルーのようなことを考えてもよいのではないかと感じました。

【大木部長】 本日は本当にありがとうございます。私の部は、皆さんにご審議いただきました太陽光に加えて、風力やバイオマス、地熱など、いろいろと取り組んでおります。今日、私は全く発言しませんでした。非常に意義のあるお話をたくさんいただきました。正直なところ、非常に感銘を受けたというのは今回が初めてだと思います。私も部長として、いろいろとこの事業の進捗について報告を受けますが、各委員の質問が非常に上手で、本日初めて、そういうことになっているのかという話もたくさんありました。非常にポイントをついて、噛み合った議論が進んでいたと思いました。また、非常に良い指摘を受けました。今回、事務局から、新市場の新しい事業の話もさせていただいております。皆さん、ご案内のとおり、メーカーのほうにシェアを落としている中で、一つずつ、こういう実績を積み上げて、自信をもってきている段階で、次の展開となります。今日のお話、質問、コメントや意見は今後に十分生かされるものをいただきました。今日は評価を受けるといってももちろんですけれども、今後の事業に有効活用させていただきます。コメントは最後の総括にあった社会システムの話ですとか、まさに議論が始まっているものでもあり、本当に意味のあるコメントをいただけたと思っています。細かい話をすると長くなってしまいますけれども、全体のシステムにおいて、この規模の導入量、今後、EV（電気自動車）も入ってきますし、最適化という意味のマネジメントでAI（人工知能）も入ってくるかもしれません。上から

下への流れが違ってくる中で、どこにどういう機能を持たせると全体最適になるかということがあります。今、われわれは部分最適の話をしているかもしれませんが、グリッドオペレーターといえいいのか、法律上の契約関係の義務になるのか、いろいろな方法があると思います。今後、そういった議論が本格的になると思います。そのときに、今日お話いただいた太陽光が現場のフィールドの中で、非常にうまく使われているような形になってくることに期待したいとあらためて思いました。繰り返しになりますけれども、今日はありがとうございました。本当に良い評価をいただけたと思っております。繰り返しになりますけれども、ありがとうございました。今後ともよろしく願いいたします。

【平本分科会長】 どうもありがとうございました。

10. 今後の予定、その他

11. 閉会

配布資料

- 資料 1 研究評価委員会分科会の設置について
- 資料 2 研究評価委員会分科会の公開について
- 資料 3 研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
- 資料 4-1 NEDO における研究評価について
- 資料 4-2 評価項目・評価基準
- 資料 4-3 評点法の実施について
- 資料 4-4 評価コメント及び評点票
- 資料 4-5 評価報告書の構成について
- 資料 5 プロジェクト／事業の概要説明資料（公開）
- 資料 6 プロジェクト／事業の詳細説明資料（非公開）
- 資料 7-1 事業原簿（公開）第一分冊
- 資料 7-2 事業原簿（公開）第二分冊
- 資料 8 評価スケジュール

以上

以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する。

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」（事後評価）プロジェクト評価分科会

ご質問への回答（公開分）

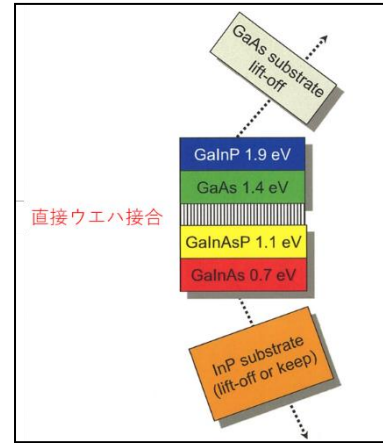
資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	回答	委員名 (敬称略)
資料 5・ p. 12-13	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2020 年までに 14 円/kWh, 2025 年までに 7 円/kWh の開発目標は, 国際市場を考えたときに妥当か? 各国の日射条件, モジュール以外のコストを考慮して競争力のある価格目標になっているか? ・ 国内市場のみを考えれば妥当と言えるが, その場合にはプロジェクトの費用対効果の妥当性はあるか? ・ 7 円/kWh が実現するような状況では非常に大量の導入が期待される一方で, 余剰電力の増加, 必要な調整力の増加などが懸念されるため, 各種系統対策コスト (バランスコスト, グリッドコスト, プロファイルコスト) を考慮した場合に 7 円/kWh の発電コストで十分か? 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現在、中東では 2 円/kWh 程度のプロジェクトも出てきておりますが、これは年間日射量や大規模な発電所であるためです。このため、発電コストは各国の状況を踏まえて検討すべきと思います。 ・ まずは国内市場を対象にした場合、買い取り価格算定委員会での価格下落を踏まえると目標値は妥当と考えています。また、14 円/kWh、7 円/kWh はあくまで地上設置を前提とした目標であり、これより高コストの住宅屋根向けではさらに競争力を持てるという認識です。 ・ ご指摘の通り、システムコストの低減も課題です。システムに組み込んだ時のコストで試算をしていますが、系統対策コストは含めていません。システムコスト側も低コストを目指さないといけないかもかもしれませんが、システムコストについては 2014～2018 年でシステムコストの低減を目指すプロジェクトを実施しました。引き続き、システム全体での対応は検討していきたいと思います。 	加藤委員

	<p>発電コストの構成要素（モジュール、BOS、工事費など）について、それぞれの目標値をどのように設定したか？（モジュールの性能向上によるコスト削減分をどのように想定したか？）</p>	<p>また、今年度からの事業で太陽光発電の調整力の開発等の取り組みを始めております。</p>	
<p>資料 5・ p. 15</p>	<p>・「圧倒的な特性の違い」とは？どのような新市場を想定しているか？</p> <p>・一般的に言われるカーポート等への適用については、CIS、Ⅲ-V族とも競合するが、どのようなすみ分けを想定しているか？</p>	<p>・圧倒的な特性の違いに関しては、資料 5 p. 14 を参照願います。Ⅲ-V 属は高効率、ペロブスカイトは低コストが差別化の指標です。新たな市場として、Ⅲ-V 属は資料 5 p. 35 に示す電動車、ペロブスカイトは重量制限のある屋根やフィルム基板の利点を活かしたフレキシブルな曲面への導入を想定しています。</p> <p>・ご指摘の通り、カーポート等への適用についてはペロブスカイトと CIS・Ⅲ-V 族とは競合するところがあります。上記の通り、フレキシブルな曲面への導入、意匠性（例えば、インクジェットを用いることによりオン・デマンドでパターン形成が可能）によるすみ分けを想定しています。</p>	<p>加藤委員</p>
<p>資料 5・ p. 16 研究開発項目④</p>	<p>・記載の a)-c)のうち、a)については資料 6-3 で事業化・実用化状況を確認、b)は NEDO ウェブサイト掲載予定の旨確認できたが、c)の事業化・実用化状況は如何か？</p>	<p>・研究開発成果のサマリとして資料 5 p. 40 を参照願います。</p> <p>・資料 7-2 Ⅲ-2-(ホ)-B[17]に記載の通り、太陽電池モジュールの劣化要因（PID 現象等）の究明を通して、PID をほぼ完全に抑止可能な手法を考案し、その有効性を実証しました。また、劣化抑止の指導原理を提示し、複数の選択肢を示すことにより、太</p>	<p>高島委員</p>

		<p>陽電池メーカー個々の事情に応じて複数の解決策から最適解を選択し、指導原理に基づいた劣化抑止法をメーカー自らが個々の製品に最適化して開発することを可能としました。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・資料 7-2 III-2-(ホ)-B[17]に記載の通り、確立された加速試験法は SEMI PV79-0817 として標準化が成立しており、既にメーカーでの太陽電池用電極開発に適用されています。 ・資料 7-2 III-2-(ホ)-D[10]に記載の通り、研究開発成果は開口部設置用シースルー太陽電池モジュールの開発へ適用されており、建材と同等の寿命をもつ ZEB 適用型高信頼性太陽電池製品を出来る限り速やかに上市していくことに寄与していくと考えています。事業化の見通しとして、2020 年度中には本事業で得られた評価技術を適用して開発した太陽電池モジュールが実建築案件に設置されます。202 年度には新製品の量産化ならびに保証年数の拡張を判断し、他に先駆けて ZEB 市場をターゲットとした競争力のある製品の提供を実施していく計画です。 	
<p>資料 5・ p. 33</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・有機金属基板とは何でしょうか？ ・Pd ナノ粒子を用いた場合のコスト高は将来的に問題にならないでしょうか？ 	<ul style="list-style-type: none"> ・正しくは GaAs 基板です。お詫びし訂正させていただきます。 ・量が少ないので用途（要求価格）に応じては適用可能です。更なる低コスト化のために Cu を検討し、現状、同様にスタックできることを確認していま 	<p>野瀬委員</p>

		す。	
資料 5・ p. 34	・効率は目標達成、価格は未達との理解でよいか？そうであれば主な要因は何か？	・効率に関して、高効率セルを実現することが目標であったため未達と考えます。それぞれの要素技術により見込みは得られておりますが、実証に至っておりません。価格に関して、目標コストの見込みを得ることが目標であったため、ほぼ達成と考えています。要素技術の組み合わせで、目標を達成するシナリオ（課題を含む）が描けました。（価格の達成には量産が不可欠であるため、今後、量産技術の開発に移行していく予定です）	加藤委員
資料 5・ p. 35	・何を解決することで車載の実証試験ができたのか？ ・10年、10万 km の使用を想定した時、車載における技術的な課題は何か？ ・屋根荷重の増加は自動車の動力性能への影響が大きいと考えられるが、1kW 程度であれば問題ないレベルか？	・本プロジェクトでは、EV に対する太陽電池搭載の価値を見出すことを目標としました。 ・ご指摘の内容（技術課題や信頼性等）は今後の課題であり、自動車メーカーと協力し、実証車のデータ取りと検証、車載モジュールの開発を継続して実施する予定です。	加藤委員
資料 5・ p. 38	屋外における「高精度」な性能評価の意義は？ 発電事業者の収益に対してどのように貢献することが期待されるか？ リユース市場における性能保証等に活用できるか？	・設置時のオンサイト測定、O&M 等で経年劣化等による性能低下の有無を正確に行い、パネル交換等の判断を迅速正確に行うことが可能になることで収益に貢献すると考えております。リユース市場等のオンサイト測定に非常に有効な技術と考えております。性能保証等に広く普及させるためのステップとして、開発技術の標準化にも取り組みました（進行中）。開発技術の JET(電気安全環境研究	加藤委員

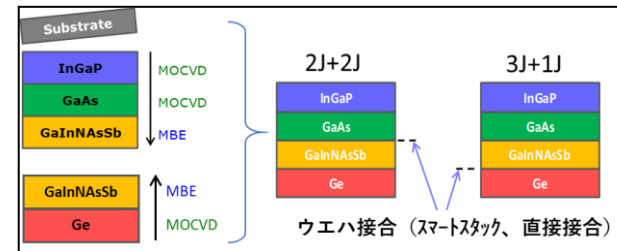
		所)の O&M 認証への展開も、普及にむけた取り組みの一環です。	
資料 5・ p. 77	・ 125 円/W 達成のシナリオでは、6 インチの GaAs 基板, HVPE を使って (セルではなく) モジュール効率 30%が必要, という理解でよろしいでしょうか。	・ これらの条件 (モジュール効率 30%) で達成可能なシナリオが描けている、ということで、より大面積の基板、より高いモジュール効率は、目標の達成には有利な方向です。	野瀬委員
資料 5・ p. 80 ~ 82, 84	・ 3つのグループでそれぞれリフトオフ技術の開発が行われていますが、比較した場合にそれぞれ優位な点, 不利な点を明確にすることで今後の開発と考えますが、いかがでしょうか?	・ 結晶の品質 (特性) に大きな影響が懸念される点で、豊田工大方式 (GaAs、および Si 基板上に層状化合物 GaSe/In ₂ Se ₃ をバッファ層で挿入して GaAs 層をエピ成長し、GaAs エピ層を基板から高速リフトオフする) は断念することとしました。 シャープ・東大方式は、比較的大面積のリフトオフに実績があるため、今後は量産技術・装置開発をメインに進めこととしました。産総研方式は、スマートスタックを含む一連のプロセスに低コスト化の可能性があるので、リフトオフの大面積化をテーマとして開発を継続する予定です。	野瀬委員
資料 5・ p. 91~96	超高効率セル開発においては、4 接合、集光下で効率 50%という目標に対して、現状、少し遠い状況かと思えます。主な要因としては何があげられますでしょうか?	・ 1) ウエハ接合による 4 接合セル: フラウンホーファー研のアプローチ (左図: 46.0% (580 倍集光) を報告) を参考に、4 接合セルの構造及びウエハ接合条件の最適化を行いました。	野瀬委員



シャープが高効率のトップ 2 接合 GaInP/GaAs セルを製作し、東大はボトム 2 接合 GaInAsP/GaInAs セルの開発、及びウエハ接合を担当しました。ボトム 2 接合セルの V_{oc} 向上の目標が未達であり(更なる結晶成長条件の追い込み

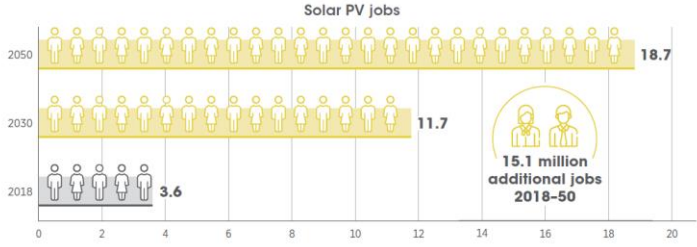
が必要)、またウエハ接合技術の最適化(表面の平坦生、接合界面抵抗の最小化の改善)が当初計画より遅れ、本事業期間中に高効率 4 接合セルを実証するまでに至りませんでした。

2) 希釈窒化物による多接合セル:



東大では、「逆積み」格子整合 GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb 3 接合セル (ILM-3J: 上図左) で、効率 30.3% (非集光) を達成しました。また、GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4 接合セルを試作したところ、シャープとの「順積み」ウエハシャト

		ル (MBE で GaInNAs:Sb/Ge ボトム 2 接合セル作製後 →MOCVD で GaInP/GaAs トップ 2 接合セルを作製) において、GaInNAs セルへの水素混入がセル特性を劣化させることが明らかになりました。熱処理により GaInNAs 膜中の水素を脱離させることで GaInNAs 単セルの特性は回復しましたが、一方で 4 接合セルでは Ge セル特性を劣化させてしまうことが分かりました。そのため開発の優先度を ILM3J+Ge 構造の「ウエハ接合」セルにシフトし、国内初となる GaInP/GaAs/GaInNAs:Sb//Ge 4 接合セルの開発に成功しました。	
資料 7-1・viii	<ul style="list-style-type: none"> ・2025 年に前倒しをした 7 円 /kWh の目標に関し、用地確保や系統連系対応の開発費用や工事費用等本プロジェクトの内容に直接関係しない要因で実現を危ぶむ報道等もなされているが、目標設定の再修正等に関する議論があればご回答願います。 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電コスト 7 円/kWh には、算出が困難であるため系統連系対応の費用は含めておりません (システム価格は一定の仮定の上で試算しています)。本プロジェクトはモジュールのコスト低減に注力したのですが、ご指摘の点は今後の課題とさせていただきます。 (ご参考として、2020 年度からのプロジェクトでは従来の地上設置ではなく、新規用途を目指しております) 	野崎委員
資料 7-1・II-1[4]	<ul style="list-style-type: none"> ・アウトカム目標について、現時点の太陽光発電を取り巻く状況において、本ページ記載の貢献以外に新たな貢献項目が想定されればご回答願います。 	<ul style="list-style-type: none"> ・資料 5 には記載しましたが、資料 7-1 に記載されていない内容として、建物壁面、車載等の新市場への展開可能性が挙げられます。 ・また、定量的な算出は難しいものの、導入量拡大による CO₂削減効果、太陽光発電産業の雇用 (IRENA の予測は以下の通り) 等の波及効果も期待できる 	野崎委員

		<p>と考えております。</p> <p>世界における太陽光発電産業における将来の雇用人数</p>  <p>Sources: IRENA (2019a, 2019).</p> <p>出典：IRENA: Future of Solar Photovoltaic (2019年11月)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・太陽光の将来の導入規模としては、IEA World Energy Outlook 2020 のシナリオの一つでは、2040年の世界全体の導入容量は太陽光 5,891GW (太陽光の年間平均追加容量は、2030年に280GW、2040年に320GWに達する) になると予測されています。このように市場が大きく拡大する中で日本企業がシェアを獲得できれば、産業競争力の強化に繋がると考えております。 	
<p>資料 7-1・ Ⅲ-1[1]</p>	<p>・建材一体型として 14 円/kWh を実現することは当初からの前提か？建材一体型でなければ目標達成できないという理解でよいか？</p>	<p>・発電コストの目標は建材一体型を前提としたものではありません。当該の事業会社の主力製品である建材一体型で 2020 年発電コスト 14 円/kWh の見通しを得た、とご理解ください。なお、建材一体型に注力したのは中間評価以降になります。建材一体を指向したのは実施企業の方針によります。</p>	<p>加藤委員</p>
<p>資料 7-1・</p>	<p>・「14 円/kWh 実現の見通しを得た」ことと、「14</p>	<p>・大量生産時の試算として 14 円/kWh を達成できる</p>	<p>加藤委員</p>

<p>III-1[1]</p>	<p>円/kWh 実現のためのプロセス開発を完了した」ことは、「14 円/kWh の実現が可能であることを確認した」と比較して、どのように解釈すればよいか？</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発」, 「赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発」, 「高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築」, 「太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御」は、それぞれ 14 円/kWh の達成に対してどのように寄与するか？ 14 円/kWh の実現はこれらの成果が考慮された値か？ 	<p>技術開発を行ったと認識しております。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本PJで2020年発電コスト14円/kWhの目標を設定した時点(2015年度)では、ご指定の研究開発成果は考慮されていません。また、本PJ終了時点で、太陽電池事業会社の発電コストの低減に貢献する項目として、ご指定の研究開発成果は挙げられておりません。今後、一層の発電コスト低減に向け各要素技術の導入を検討する計画について、太陽電池事業会社から聴取を行う計画です。 	
<p>資料 7-1、7-2 全般</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・登録済み特許がある場合には当該特許の実施もしくは他者への実施許諾の状況。 ・外国出願の考え方。 ・研究発表・講演の件数に比較して特許出願件数が極端に少ない場合はその理由。 ・併せて研究発表・講演を実施する場合に当該発表・講演の内容における出願すべき知的財産の有無を確認し、技術の公開前に特許出願を促す仕組みの有無等を差し支えない範囲でご回答願います。 (プロジェクト全体としてのご回答でも結構です) 	<ul style="list-style-type: none"> ・知的財産権に関しては、NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針に則ってマネジメントを行っております。 URL:https://www.nedo.go.jp/jyouhoukukai/other_CA_00002.html <p>以下、マネジメントの骨子を記します。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・NEDO は、フォアグラウンド I P (プロジェクト参加者が、プロジェクトの実施により得た知的財産権) について、研究開発の受託者が産業技術力強化法第 17 条第 1 項各号に定める事項を遵守することを条件として、受託者から譲り受けない(日本版バイ・ドール規定)ものとしております。 ・成果の有効利用を図るため、NEDO は受託者に対 	<p>野崎委員</p>

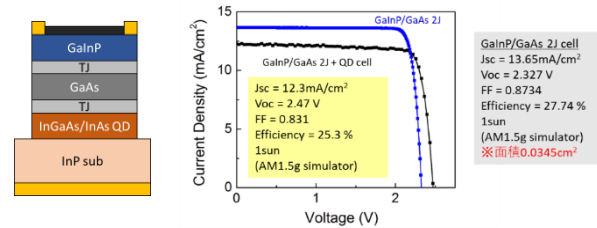
		<p>して、知的財産権の利用状況調査（バイ・ドール調査）を実施し、知的財産権の利用実態を把握しております。</p> <p>・知的財産マネジメントを適切に実施するため、知財運営委員会を設置しております。知財運営委員会は、研究開発の成果についての権利化、秘匿化、公表等の方針決定、実施許諾に関する調整等を行います。知財運営委員会は、プロジェクトリーダー、個別のテーマリーダー、プロジェクト参加者の代表者、知的財産の専門家等から構成します。知財運営委員会の審議内容、議決方法、構成員その他知財運営委員会の運営に関する事項を定めるため、知財運営委員会運営規則を作成します。</p>	
<p>資料 7-1・ Ⅲ-2-(ロ)- B[29]～[37] (産業技術 総合研究所、 他)</p>	<p>・詳細な熱力学計算をされていますが、具体的にどのように装置設計などに生かされていますでしょうか？</p>	<p>・熱力学解析により、結晶成長の駆動力および析出組成と成長条件の関係を明らかにしています。また、アルミ系に置きましては、上記に加えて石英と塩化アルミニウムとの反応を考察した計算により安全な成長条件を明らかにしています。</p> <p>具体的な装置設計への寄与ですが、</p> <p>(A) 熱力学解析で算出された必要な原料濃度から、原料ポート容量などを決定した。</p> <p>(B) 期待する成長速度および成長組成から算出される成長条件(原料濃度および原料供給流量)を熱力学計算から算出し、気相成長装置の重要な部分である流量を制御する「マスフローコントローラ」</p>	<p>野瀬委員</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ・少し細かいですが、第一原理計算を用いて有限温度のギブズエネルギーを計算されている、という理解でよろしいでしょうか？ ・また、結晶ではなくガラスの石英のエネルギーを計算されているのでしょうか？ 	<p>の選定を行った。</p> <p>(C) 各Ⅲ族原料、具体的には Ga, In, Al の最適な原料部温度を熱力学解析により算出し、それに対応可能な電気炉の設計を行った。特に、アルミニウム原料ガスの場合には、原料部の温度範囲が装置安全上重要であり、そのような温度範囲に設定可能になるように設計された。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・その通りです。実際には、第一原理計算＋統計力学を用いています。 ・熱力学解析に用いています SiO₂ のエネルギーは石英ガラスの値です。 	
<p>資料 7-1 ・ Ⅲ-2-(ロ)- B[44]～[45] (産業技術 総合研究所、 他)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・MOCVD と HVPE の 2 つの製膜技術が検討されましたが、今後はどちらかに絞るべきだと考えます。私見では、本プロジェクトで成果のあった HVPE を中心とした展開が望ましいと考えますが、いかがでしょうか？ ・6 インチへの大型化における問題点と技術確立までの期間についてはいかがでしょうか？ 	<ul style="list-style-type: none"> ・頂いたご意見の通り、2020 年度開始のプロジェクトでは、HVPE を中心に 6 インチへの大型化、量産技術の確立を目指します。 ・大型化の課題としては、金属原料外部供給技術の開発や 6 インチの広範囲で高い反応効率を得られるガス供給ノズルの開発などがあります。 	<p>野瀬委員</p>
<p>資料 7-1 ・ Ⅲ-2-(ロ)- C[12] (宮崎大学、</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・全国の 800 を超える地点で作業を行い、発電量予測マップを作成されたのは素晴らしいと思います。一方で、昨今のデータ科学手法を使えば、数十点のデータから全国の発電量が予測 	<ul style="list-style-type: none"> ・日射量に関しては、衛星画像による全世界の予測ができつつあります。いくつかの地上観測データを用いると、その精度を大幅に向上させることが可能になります。 	<p>野瀬委員</p>

<p>他)</p>	<p>できそうな気もするのですが、いかがでしょうか。もしそうであれば、世界のいくつかの地点のデータから全世界での予測を行うことも可能になりますか？</p>	<p>上記のためにはデータ科学手法が必須であり、全世界の高精度発電量予測マップの実現を可能にすると考えます。</p> <p>さらに、発電量予測にはスペクトルが重要ですが、スペクトルに関しても、地球温暖化対策のための観測網から得られた大気パラメータ（スペクトルに影響するエアロゾルや水分）の観測値を用いることにより、地球レベルの高精度予測が可能になると考えております。</p>	
<p>資料 7-1・III-2-(ロ)-D[40] (東京大学、他)</p>	<p>・低電流・高電圧型のセルに関して、現状 32.1%まで効率が向上していますが、さらなる向上のシナリオとして、反射防止膜の最適化だけで目標である 45%を達成できるということでしょうか？</p>	<p>・量子ドット等を利用した中間バンド型太陽電池の場合、効率を最大化させるために、中間バンド→伝導帯への光励起レートを増大させる必要があります。その光生成レートは、中間バンドのキャリア占有率とセル内のフォトン密度に関係し、短絡電流、開放電圧とも中間バンド(IB)のキャリア密度(QDの密度に比例)と集光倍率に大きく依存します。</p> $G_{CB} = \int_{E_{CB}}^{E_{IV}} \underbrace{\alpha_{CB}}_{\text{IB 占有率}} \underbrace{f_I(x)}_{\text{フォトン密度}} F_0(E) \exp(-\alpha_{CB} x_{CB}) dE$ <p>中間バンド→伝導帯への光吸収を高めるために、 1) 十分な数の QD 埋込と光閉じ込め技術 (フォトン密度の増大)、2) 中間バンド内のキャリアの長寿命化、が不可欠な開発要素になります。したがって、集光は photo-filling 効果により上記 1) の条件を実質的に満たすと捉えることができ、本事業で効率 45%を実証するために集光動作が有効かつ</p>	<p>野瀬委員</p>

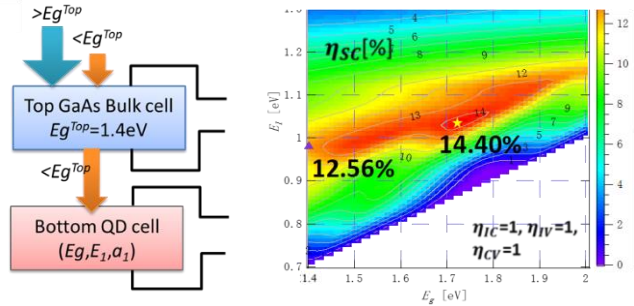
必要であると考えました（特に低電流・高電圧型の場合）。

一方、開発した低電流・高電圧型セルでは、225倍集光で32.1%の高効率を達成できましたが、I-V特性から（下図：非集光で測定）、QDセルの光吸収、電流が十分でなく、ワイドギャップトップセルとの電流整合が取れていないことが分かりました。

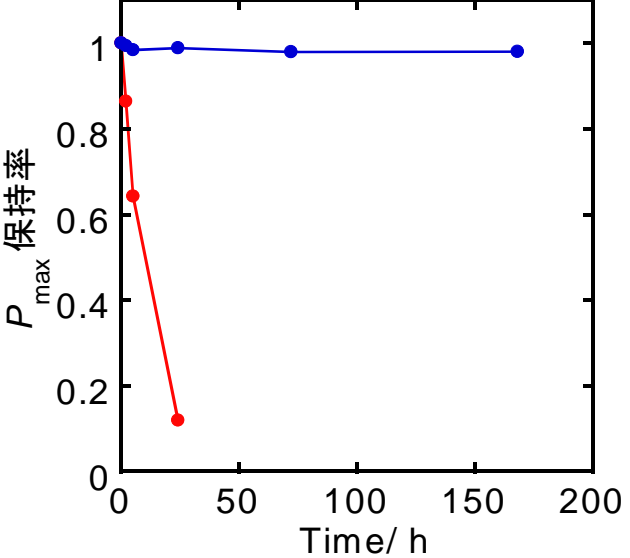


効率45%を達成するために、ご指摘の反射防止膜を最適化することに加え、上記1)の(1)現状よりさらにQDの数を増大する（面内高密度化×多層積層成長）、(2)裏面側に光閉じ込め構造を作りつけQD層における近赤外光の吸収を増やす、(3)500倍以上で集光する、ことで高効率化が見込めると考えています。

もう一つのアプローチとして、電流整合条件から解放される4端子タンデムセルを検討しました。

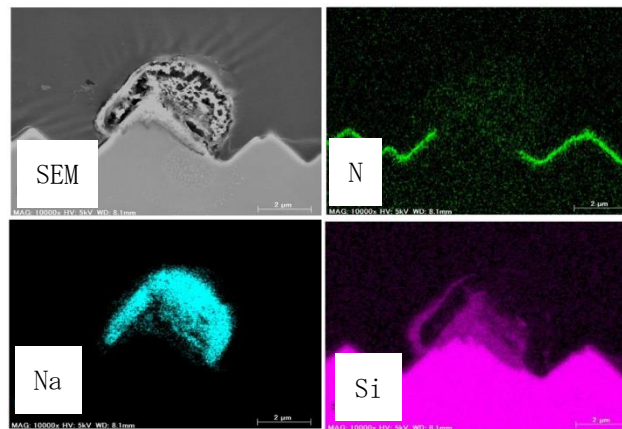
		<p>GaAs をベースとしたボトム QD セルで 12%以上が達成可能で、現状のシャープの 2 接合セル(上図：測定結果 27.7%)を合わせると、非集光でも 40%前後が狙えることを示しました。</p> 	
<p>資料 7-2・ Ⅲ-2-(ハ)- A[6] (パナソニック)</p>	<p>・ミックスカチオン (最大 4 つ?) のペロブスカイト層をインクジェット法で作製した際の再現性, 歩留まりについてはいかがでしょうか?</p>	<p>・同一条件で作製した 17 枚の 30cm 角モジュール (変換効率 17.93%を達成) で効率分布がほぼ ±10%内に収まることを確認しました。 (ホール輸送層はスピコートで形成)</p> <p>・インクジェットでホール輸送層を塗布することで、さらに歩留まり向上の可能性ありと考えております。</p>	<p>野瀬委員</p>
<p>資料 7-2・ Ⅲ-2- (ホ)- B[1]</p>	<p>・PID の抑止は, 発電コストの目標 (14 円/kWh, 7 円/kWh) に対してどの程度貢献するか?</p>	<p>・今回の NEDO 事業の基本計画には, 発電コスト 14 円/kWh を実現するためにはモジュールの出力劣化が 25 年で 20%相当であると定められています。p 型結晶シリコン太陽電池においては, PID により数年で出力が半減以下になることも報告されていますが, 今回の NEDO 事業を実施することにより, PID を完全抑止できる技術を開発できたため, 少なくとも PID による出力低下は起きなくなり, 発電コス</p>	<p>加藤委員</p>

		<p>ト目標の達成に大きく貢献します。n型に関しても、リアエミッター型、フロントエミッター型、シリコンヘテロ接合型、裏面電極型の主要な4種のSiセル構造において、30年間の出力劣化を20%以下に抑止可能な条件を見出しており、少なくとも14円/kWh以下の発電コスト目標達成に貢献します。</p>	
<p>資料 7-2・ Ⅲ-2-(ホ)- B[1], [2], [11] (産業技術 総合研究所、 他)</p>	<p>・PID現象の遅延メカニズムについて、教えてください。紫外光照射によって、Kセンターの起源であるシリコンのダングリングボンドが減ることにより、伝導度が上がる。→電界が緩和。これと、Naイオンの還元とはどのように考えればよろしいですか？ (Ⅲ-2-(イ)-C[5]ページの図 III-2-(イ)-C-11では、反射防止膜内を拡散してきたNaが還元されることによってセル内に注入されるように見えます)</p> <p>・カバーガラスにも電界がかかることによってNaイオンは拡散してくると考えるのでしょうか？いわゆる、エレクトロマイグレーション??</p> <p>・反射防止膜にかかる電界を遮蔽するセル構造でPIDを完全に抑制できることを示すエビ</p>	<p>・紫外光照射によるPID現象(PID-2)の遅延は、反射防止膜として使用されているSiNx膜のバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射した場合しか観測されません。従いまして、光照射によるキャリア励起にともないSiNx膜の導電率が向上することで、SiNx膜に印加される電界が緩和されるためと考えています。</p> <p>なお、Kセンターは電荷蓄積型のPID現象(PID-1)の起源であり、本件とは関係ございません。</p> <p>また、「Naイオンの還元」は、「Naイオンによる透明導電膜の還元」のことかと存じますが、これはヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池に固有の現象であり、図Ⅲ-2-(ホ)-B-1に示す通常型の結晶シリコン太陽電池のPID現象とは異なるものです。</p> <p>・カバーガラスに電界が印加されることにより、Naイオンが移動し、封止材を介してセル表面に到達すると考えています。Naイオンの移動は拡散ではなく、ドリフトに起因すると考えています。</p> <p>・エビデンスとしては、今回のNEDO事業の研究成果で取得した特許：公開特許公報2020-123637の図11の(2)に示すデータが挙げられます。グラフ</p>	<p>野瀬委員</p>

	<p>デンスを示すことは可能でしょうか？</p>	<p>を以下に示します。</p>  <p>PID 試験条件 -2000 V・85°C・2%以下</p>	
<p>資料 7-2・ Ⅲ -2- (ホ)-B[11] (産業技術 総合研究所、 他)</p>	<p>・PID-3 におけるドーム状構造とは、どのようなものがどこにできるでしょうか？</p>	<p>・Na とエミッタ層の Si が反応することにより、SiNx 反射防止膜の一部が破断し、その部分に Si と Na の化合物から成るドーム状構造が形成されます。以下の図を参照願います。また、研究成果を論文として発表しております。資料 7-2 Ⅲ-2-(ホ)-B [25] No. 37 を参照ください。</p>	<p>野瀬委員</p>

・ In_2O_3 の還元はヘテロ接合型の場合のみに見られるのでしょうか？またその場合、還元剤は非晶質の Si でしょうか？

・ ヘテロ接合型の場合、劣化の進行が遅いのは、非晶質の Si が Na の拡散を抑制しているからでしょうか？



(480 h, -1000 V, 85 °C)

・ 一番目の回答とも関連しますが、 In_2O_3 の還元はヘテロ接合型の場合のみを観測されます（他の結晶シリコン系太陽電池では In_2O_3 透明導電膜を使用していないため、このような現象は観測されません）。還元剤は Na と考えています。

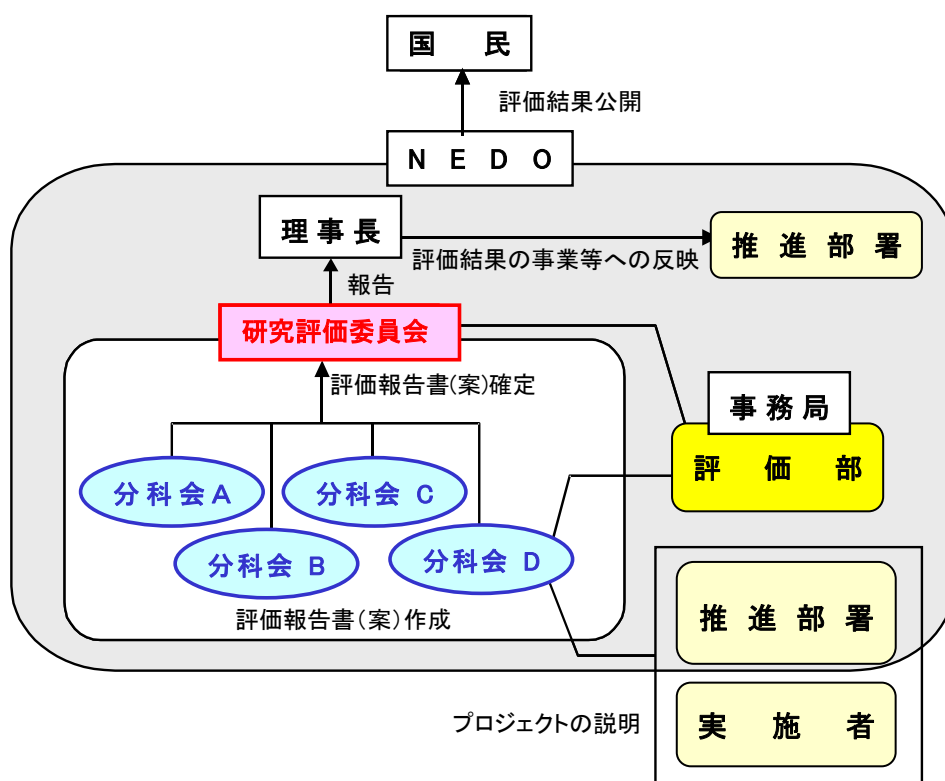
・ 透明導電膜に電界が印加されないため、Na のセル中へのドリフトが抑制されるためではないかと考えています。

参考資料 2 評価の実施方法

本評価は、「技術評価実施規程」（平成 15 年 10 月制定）に基づいて実施する。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)における研究評価では、以下のように被評価プロジェクトごとに分科会を設置し、同分科会にて研究評価を行い、評価報告書（案）を策定の上、研究評価委員会において確定している。

- 「NEDO 技術委員・技術委員会等規程」に基づき研究評価委員会を設置
- 研究評価委員会はその下に分科会を設置



1. 評価の目的

評価の目的は「技術評価実施規程」において

- 業務の高度化等の自己改革を促進する
 - 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む
 - 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する
- としている。

本評価においては、この趣旨を踏まえ、本事業の意義、研究開発目標・計画の妥当性、計画を比較した達成度、成果の意義、成果の実用化の可能性等について検討・評価した。

2. 評価者

技術評価実施規程に基づき、事業の目的や態様に即した外部の専門家、有識者からなる委員会方式により評価を行う。分科会委員は、以下のような観点から選定する。

- 科学技術全般に知見のある専門家、有識者
- 当該研究開発の分野の知見を有する専門家
- 研究開発マネジメントの専門家、経済学、環境問題、国際標準、その他社会的ニーズ関連の専門家、有識者
- 産業界の専門家、有識者

また、評価に対する中立性確保の観点から事業の推進側関係者を選任対象から除外し、また、事前評価の妥当性を判断するとの側面にかんがみ、事前評価に関与していない者を主体とする。

これらに基づき、委員を分科会委員名簿の通り選任した。

なお、本分科会の事務局については、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構評価部が担当した。

3. 評価対象

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」を評価対象とした。

なお、分科会においては、当該事業の推進部署から提出された事業原簿、プロジェクトの内容、成果に関する資料をもって評価した。

4. 評価方法

分科会においては、当該事業の推進部署及び実施者からのヒアリング及び実施者側等との議論を行った。それを踏まえた分科会委員による評価コメント作成、評点法による評価により評価作業を進めた。

なお、評価の透明性確保の観点から、知的財産保護の上で支障が生じると認められる場合等を除き、原則として分科会は公開とし、実施者と意見を交換する形で審議を行うこととした。

5. 評価項目・評価基準

分科会においては、次に掲げる「評価項目・評価基準」で評価を行った。これは、NEDOが定める「標準的評価項目・評価基準」をもとに、当該事業の特性を踏まえ、評価事務局がカスタマイズしたものである。

評価対象プロジェクトについて、主に事業の目的、計画、運営、達成度、成果の意義、実用化に向けての取組や見通し等を評価した。

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」に係る

評価項目・評価基準

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) 事業の目的の妥当性

- ・ 内外の技術動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献可能性等の観点から、事業の目的は妥当か。
- ・ 上位の施策・制度の目標達成のために寄与しているか。

(2) NEDOの事業としての妥当性

- ・ 民間活動のみでは改善できないものであること又は公共性が高いことにより、NEDOの関与が必要とされた事業か。
- ・ 当該事業を実施することによりもたらされると期待される効果は、投じた研究開発費との比較において十分であるか。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・ 内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、適切な目標であったか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・ 開発スケジュール（実績）及び研究開発費（研究開発項目の配分を含む）は妥当であったか。
- ・ 目標達成に必要な要素技術の開発は網羅されていたか。

(3) 研究開発の実施体制の妥当性

- ・ 実施者は技術力及び事業化能力を発揮したか。
- ・ 指揮命令系統及び責任体制は、有効に機能したか。
- ・ 目標達成及び効率的実施のために実施者間の連携が必要な場合、実施者間の連携は有効に機能したか。
- ・ 大学または公的研究機関が企業の開発を支援する体制となっている場合、その体制は企業の取組に貢献したか。

(4) 研究開発の進捗管理の妥当性

- ・ 研究開発の進捗状況を常に把握し、遅れが生じた場合に適切に対応したか。
- ・ 社会・経済の情勢変化、政策・技術の動向等を常に把握し、それらの影響を検討し、必要に応じて適切に対応したか。

(5) 知的財産等に関する戦略の妥当性

- ・ 知的財産に関する戦略は、明確かつ妥当か。
- ・ 知的財産や研究開発データに関する取扱についてのルールを整備し、かつ適切に運用したか。

3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

- ・ 成果は、最終目標を達成したか。
- ・ 最終目標未達成の場合、達成できなかった原因を明らかにして、最終目標達成までの課題及び課題解決の方針を明確にしている等、研究開発成果として肯定的に評価できるか。
- ・ 投入された研究開発費に見合った成果を得たか。
- ・ 成果は、競合技術と比較して優位性があるか。
- ・ 世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、汎用性等の顕著な成果がある場合、積極的に評価する。
- ・ 設定された目標以外の技術成果がある場合、積極的に評価する。
- ・ 成果が将来における市場の大幅な拡大又は市場の創造につながると期待できる場合、積極的に評価する。

(2) 成果の普及

- ・ 論文等の対外的な発表を、実用化・事業化の戦略に沿って適切に行ったか。
- ・ 成果の活用・実用化の担い手・ユーザーに向けて、成果を普及させる取組を実用化・事業化の戦略に沿って適切に行ったか。
- ・ 一般に向けて、情報を発信したか。

(3) 知的財産権等の確保に向けた取組

- ・ 知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化・事業化の戦略に沿って国内外で適切に行ったか。

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

「事業化・実用化」の考え方

本事業では以下を実用化・事業化と定義する。

【研究開発項目①、③】

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを言う。

【研究開発項目②】

Ⅲ-Vやペロブスカイト等の次世代太陽電池については、コスト低減、効率向上、量産技術の開発等を行い、将来の事業化計画に反映すること。

【研究開発項目④】

太陽電池の評価や日射量データベースについては、技術確立を行うとともに、それがユーザーに活用できる環境整備を行うこと。

(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

- ・ 成果の実用化・事業化の戦略は、明確かつ妥当か。
- ・ 想定する市場の規模・成長性等から、経済効果等を期待できるか。

(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

- ・ 実用化・事業化に取り組む者が明確か。
- ・ 実用化・事業化の計画及びマイルストーンは明確か。

(3) 成果の実用化・事業化の見通し

- ・ 産業技術としての適用可能性は明確か。
- ・ 実用化・事業化に向けての課題とその解決方針は明確か。
- ・ 想定する製品・サービス等は、市場ニーズ・ユーザーニーズに合致しているか。
- ・ 競合する製品・サービス等と比較して性能面・コスト面等で優位を確保する見通しはあるか。
- ・ 量産化技術を確立する見通しはあるか。
- ・ 顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

「プロジェクト」の事後評価に係る標準的評価項目・基準

「実用化・事業化」の定義を「プロジェクト」毎に定める。以下に例示する。

「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することをいう。

なお、「プロジェクト」が基礎的・基盤的研究開発に該当する場合は、以下のとおりとする。

- ・「実用化・事業化」を「実用化」に変更する。
- ・「4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて」は該当するものを選択する。
- ・「実用化」の定義を「プロジェクト」毎に定める。以下に例示する。

「実用化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることをいう。

1. 事業の位置付け・必要性について

(1) 事業の目的の妥当性

- ・内外の技術動向、国際競争力の状況、エネルギー需給動向、市場動向、政策動向、国際貢献可能性等の観点から、事業の目的は妥当か。
- ・上位の施策・制度の目標達成のために寄与しているか。

(2) NEDO の事業としての妥当性

- ・民間活動のみでは改善できないものであること又は公共性が高いことにより、NEDO の関与が必要とされた事業か。
- ・当該事業を実施することによりもたらされると期待される効果は、投じた研究開発費との比較において十分であるか。

2. 研究開発マネジメントについて

(1) 研究開発目標の妥当性

- ・内外の技術動向、市場動向等を踏まえて、適切な目標であったか。

(2) 研究開発計画の妥当性

- ・開発スケジュール(実績)及び研究開発費(研究開発項目の配分を含む)は妥当であったか。
- ・目標達成に必要な要素技術の開発は網羅されていたか。

(3) 研究開発の実施体制の妥当性

- ・実施者は技術力及び事業化能力を発揮したか。

- ・指揮命令系統及び責任体制は、有効に機能したか。
- ・目標達成及び効率的実施のために実施者間の連携が必要な場合、実施者間の連携は有効に機能したか。【該当しない場合、この条項を削除】
- ・目標達成及び効率的実施のために実施者間の競争が必要な場合、競争の仕組みは有効に機能したか。【該当しない場合、この条項を削除】
- ・大学または公的研究機関が企業の開発を支援する体制となっている場合、その体制は企業の取組に貢献したか。【該当しない場合、この条項を削除】

(4) 研究開発の進捗管理の妥当性

- ・研究開発の進捗状況を常に把握し、遅れが生じた場合に適切に対応したか。
- ・社会・経済の情勢変化、政策・技術の動向等を常に把握し、それらの影響を検討し、必要に応じて適切に対応したか。

(5) 知的財産等に関する戦略の妥当性

- ・知的財産に関する戦略は、明確かつ妥当か。
- ・知的財産に関する取扱(実施者間の情報管理、秘密保持及び出願・活用ルールを含む)を整備し、かつ適切に運用したか。
- ・国際標準化に関する事項を計画している場合、その戦略及び計画は妥当か。【該当しない場合、この条項を削除】

3. 研究開発成果について

(1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

- ・成果は、最終目標を達成したか。
- ・最終目標未達成の場合、達成できなかった原因を明らかにして、最終目標達成までの課題及び課題解決の方針を明確にしている等、研究開発成果として肯定的に評価できるか。
- ・投入された研究開発費に見合った成果を得たか。
- ・成果は、競合技術と比較して優位性があるか。
- ・世界初、世界最高水準、新たな技術領域の開拓、汎用性等の顕著な成果がある場合、積極的に評価する。
- ・設定された目標以外の技術成果がある場合、積極的に評価する。
- ・成果が将来における市場の大幅な拡大又は市場の創造につながると期待できる場合、積極的に評価する。

(2) 成果の普及

- ・論文等の対外的な発表を、実用化・事業化の戦略に沿って適切に行ったか。
- ・成果の活用・実用化の担い手・ユーザーに向けて、成果を普及させる取組を実用化・事業化の戦略に沿って適切に行ったか。
- ・一般に向けて、情報を発信したか。

(3) 知的財産権等の確保に向けた取組

- ・知的財産権の出願・審査請求・登録等を、実用化・事業化の戦略に沿って国内外に適切に行ったか。
- ・国際標準化に関する事項を計画している場合、国際標準化に向けた見通しはあるか。【該当しない場合、

この条項を削除】

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて【基礎的・基盤的研究開発の場合を除く】

(1) 成果の実用化・事業化に向けた戦略

- ・成果の実用化・事業化の戦略は、明確かつ妥当か。
- ・想定する市場の規模・成長性等から、経済効果等を期待できるか。

(2) 成果の実用化・事業化に向けた具体的取組

- ・実用化・事業化に取り組む者が明確か。
- ・実用化・事業化の計画及びマイルストーンは明確か。

(3) 成果の実用化・事業化の見通し

- ・産業技術として適用可能性は明確か。
- ・実用化・事業化に向けての課題とその解決方針は明確か。
- ・想定する製品・サービス等は、市場ニーズ・ユーザーニーズに合致しているか。
- ・競合する製品・サービス等と比較して性能面・コスト面等で優位を確保する見通しはあるか。
- ・量産化技術を確立する見通しはあるか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

4. 成果の実用化に向けた取組及び見通しについて【基礎的・基盤的研究開発の場合】

(1) 成果の実用化に向けた戦略

- ・成果の実用化の戦略は、明確かつ妥当か。

(2) 成果の実用化に向けた具体的取組

- ・実用化に向けて、引き続き、誰がどのように研究開発に取り組むのか明確にしているか。
- ・想定する製品・サービス等に基づき、課題及びマイルストーンを明確にしているか。

(3) 成果の実用化の見通し

- ・想定する製品・サービス等に基づき、市場・技術動向等を把握しているか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

【基礎的・基盤的研究開発の場合のうち、知的基盤・標準整備等を目標としている場合】

(1) 成果の実用化に向けた戦略

- ・整備した知的基盤・標準の維持管理・活用推進等の計画は、明確かつ妥当か。

(2) 成果の実用化に向けた具体的取組

- ・知的基盤・標準を供給・維持するための体制を整備しているか、又は、整備の見通しはあるか。
- ・実用化に向けて、引き続き研究開発が必要な場合、誰がどのように取り組むのか明確にしているか。

【該当しない場合、この条項を削除】

(3) 成果の実用化の見通し

- ・整備した知的基盤について、利用されているか。
- ・顕著な波及効果(技術的・経済的・社会的効果、人材育成等)を期待できる場合、積極的に評価する。

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部

部長 森嶋 誠治

担当 武田 浩一

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。

(https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミューザ川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5160 FAX 044-520-5162