

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

事後評価報告書（案）概要

目 次

分科会委員名簿	1
評価概要（案）	2
評点結果	4

はじめに

本書は、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条に基づき研究評価委員会において設置された「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」（事後評価）の研究評価委員会分科会（2020年11月27日）において策定した評価報告書（案）の概要であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、第64回研究評価委員会（2021年3月1日）にて、その評価結果について報告するものである。

2021年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」分科会
（事後評価）

分科会長 平本 昌宏

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 研究評価委員会

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

(事後評価)

分科会委員名簿

(2020年11月現在)

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

敬称略、五十音順

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」

(事後評価)

評価概要 (案)

1. 総合評価

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

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

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

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

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

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

2. 2 研究開発マネジメントについて

2020 年までに 14 円/kWh、急激な市場価格低下に追従して 2025 年まで 5 年前倒しされた 7 円/kWh の目標は適切であり、中間評価の提言等を踏まえた有望なテーマへの財源集中や体

制見直し等が最終的に優れた成果を生み出す原動力になったと考える。

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

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

今後

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

2. 3 研究開発成果について

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

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

2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

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

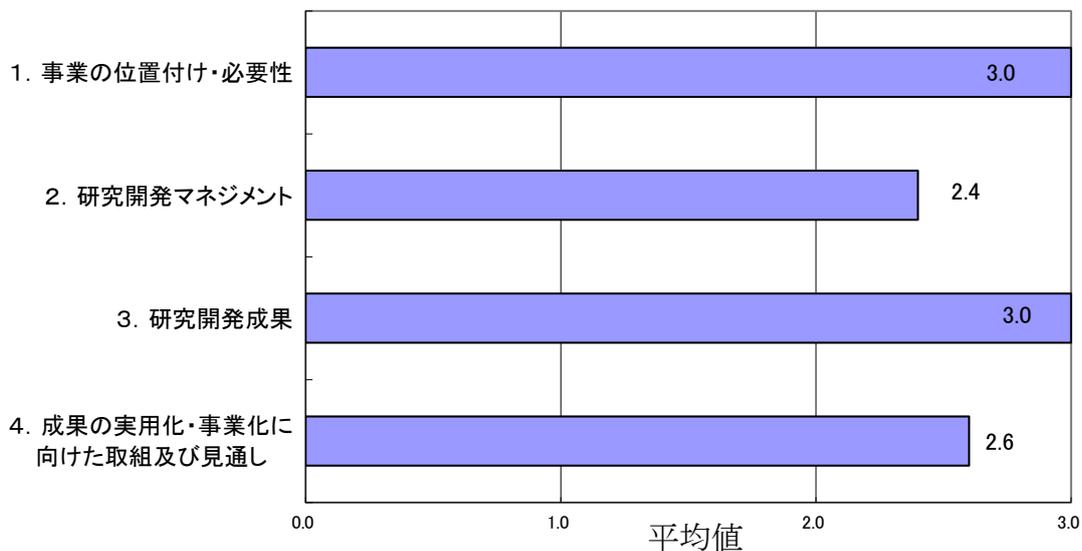
結晶シリコンとCISについては住宅用、ビル一体型、車載といった実物ができている事から実用化については十分に可能性が高く、報告された大面積セル、モジュール技術から、量産化直前に達しており、事業化戦略も明確である。経済効果のみならず、自律分散型エネルギーシステム実現への貢献が期待される。

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

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

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

評点結果〔プロジェクト全体〕



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

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

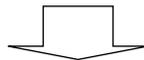
〈判定基準〉

- | | |
|--|--|
| <p>1. 事業の位置付け・必要性について</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非常に重要 →A ・重要 →B ・概ね妥当 →C ・妥当性がない、又は失われた →D | <p>3. 研究開発成果について</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非常によい →A ・よい →B ・概ね妥当 →C ・妥当とはいえない →D |
| <p>2. 研究開発マネジメントについて</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非常によい →A ・よい →B ・概ね適切 →C ・適切とはいえない →D | <p>4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて</p> <ul style="list-style-type: none"> ・明確 →A ・妥当 →B ・概ね妥当 →C ・見通しが不明 →D |

◆事業実施の背景と事業の目的

【社会的背景】(2014年当時)

- 2009年の太陽光発電ロードマップ(PV2030+)策定から5年が経過。この間、太陽光発電をめぐる環境も大きく変化した。
- 国内においては、固定価格買取制度の効果で大量導入社会の実現は目前となり、従来の「普及させるための戦略」から、「**普及後の社会を支える戦略**」の検討が必要となってきた。
- 世界に目を向ければ、「太陽電池」の価格競争は激化し、産業構造も変化しつつあった。



- 太陽光発電の大量導入社会における、**1)太陽光発電の安定的拡大、2)産業基盤の強化、3)新たな価値創造の実現**の3つの視点から、現状分析、課題抽出を包括的に行い、その課題解決の方策を検討。そこから今後の技術開発の指針を得ることを目的として、2014年に「**太陽光発電開発戦略**」を策定。この開発戦略を実現するための新しいプロジェクトが必要となった。

0

◆事業実施の背景と事業の目的

【事業の目的】

2030年までに公的支援に頼らず自立して普及する「普通のエネルギー」にするための発電コスト目標を設定(2014年当時)。

- (1)2020年には、すでに拡大した住宅用、メガソーラーだけでなく、ポテンシャルの大きい業務部門、産業部門で自家消費向けに、系統電力に代わって選択される発電コストを実現し、エネルギー消費を支える。

業務用電力価格並の発電コスト14円/kWh を目指す。(グリッドパリティ)

- (2)2030年までには、発電事業あるいは自家発電向け電源として、選択される発電コストを実現し、エネルギー供給を支える。

従来型火力発電並の発電コスト 7円/kWh を目指す。

(ジェネレーションパリティ)

- (3)これらを実現する「信頼性」も確保。



目標を達成するため、**高性能・高信頼性・低コストをあわせもつ太陽電池及び共通基盤技術を開発**

◆政策的位置付け

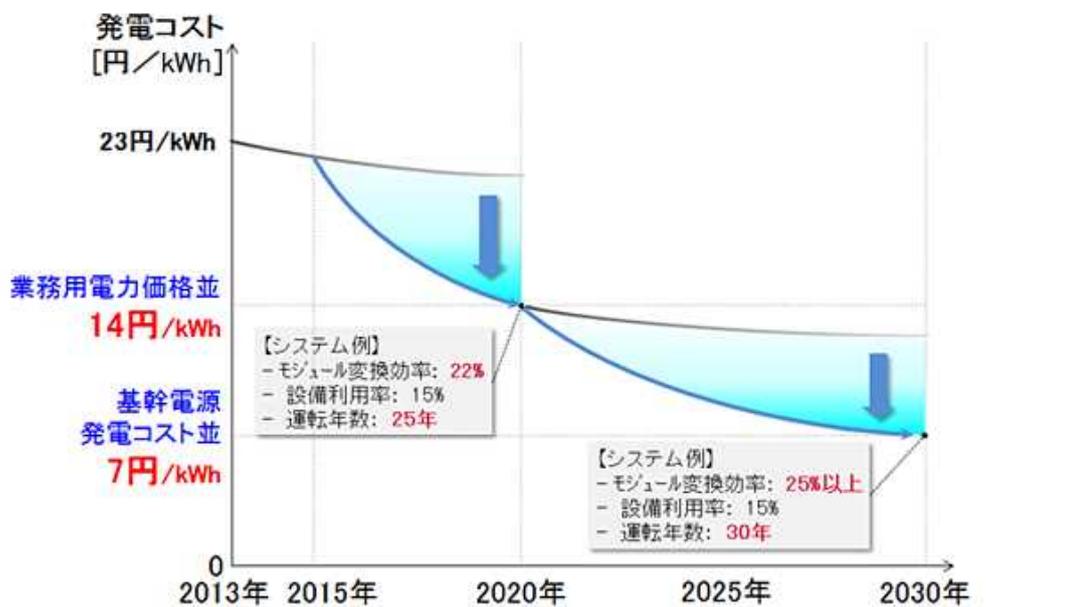
■第4次エネルギー基本計画(2014年4月)

再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。

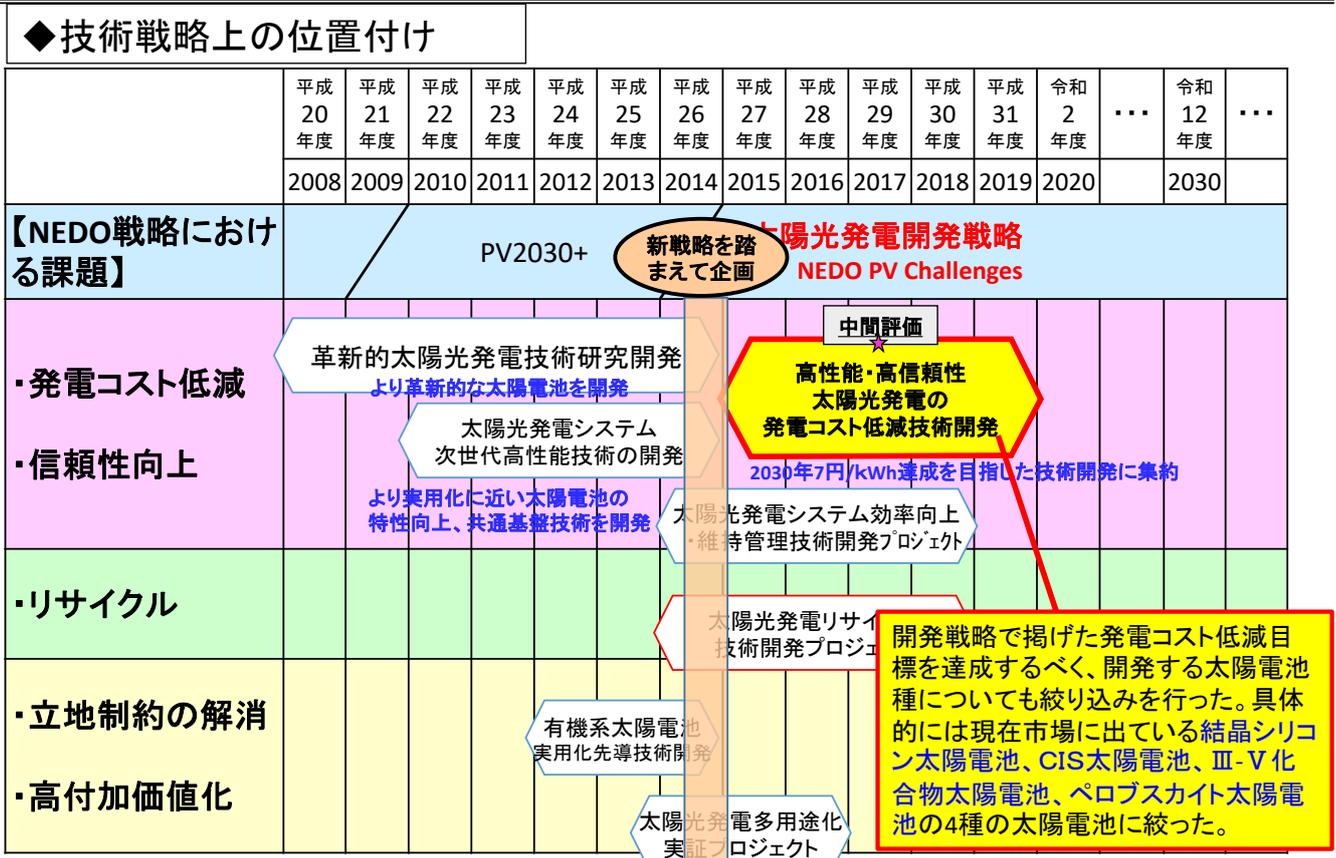
■「2017年度以降の調達価格等に関する意見(2016年12月、調達価格等算定委員会)」において、非住宅用太陽光発電の価格目標を(発電コストで)2020年に14円/kWh、2030年に7円/kWhとの方向で設定すべきとされており、また、「科学技術イノベーション総合戦略2016(2016年5月閣議決定)」においても、2020年までを目途に太陽光発電の発電コスト14円/kWhを達成、2030年に発電コスト7円/kWhを達成、とされている。

○コスト低減については以下の「太陽光発電開発戦略(2014年)」のロードマップの下で実施。

<非住宅用システムの発電コスト目標と低減シナリオ>



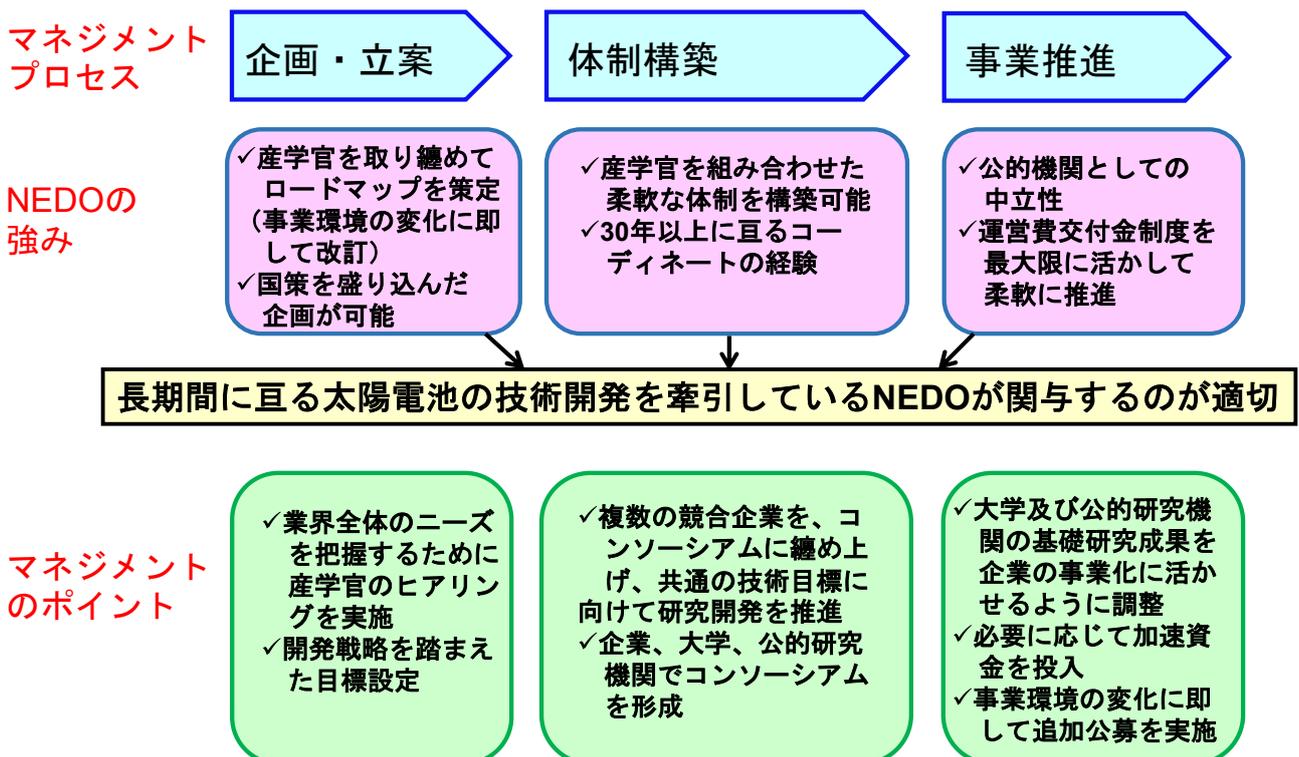
1. 事業の位置付け・必要性 (2)NEDOの事業としての妥当性



➤ 太陽光発電設備導入に係る支援事業は都道府県等が実施しているが、太陽光発電セル、モジュール関連に特化した技術開発については、本事業のみである。

1. 事業の位置付け・必要性 (2)NEDOの事業としての妥当性

—NEDO関与の意義—



2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆事業の目標

開発項目	ねらい	主な目標									
結晶Si / CIS 太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> ・発電コスト低減を着実に実現 ・日本で7円/kWh実現の性能で競争力を確保 ・実用化が進んでいる結晶Si/CIS太陽電池で、高性能化、低コスト化を追求 	2025年7円/kWh 2020年14円/kWh									
高効率太陽電池 低コスト太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶Si/CISと異なるアプローチで7円/kWh実現 ・圧倒的な特性の違いで差別化 ・特性を生かして新市場を創出 ・30%超Ⅲ-V族太陽電池を低コスト化 ・低製造コストのペロブスカイト太陽電池を開発 	2030年7円/kWh 【差別化の指標】 <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>モジュール効率</th> <th>モジュール製造コスト</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>高効率</td> <td>30%</td> <td>システム価格125円/Wを実現するコスト</td> </tr> <tr> <td>低コスト</td> <td>20%</td> <td>15円/W</td> </tr> </tbody> </table>		モジュール効率	モジュール製造コスト	高効率	30%	システム価格125円/Wを実現するコスト	低コスト	20%	15円/W
	モジュール効率	モジュール製造コスト									
高効率	30%	システム価格125円/Wを実現するコスト									
低コスト	20%	15円/W									
高信頼性評価技術等	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽光発電の信頼性を高め、確実に社会定着を実現 ・「長期信頼性」を実現、評価する技術を開発 	劣化機構解明、新たな加速試験方法の開発等									
動向調査	・情勢変化を把握し、マネージメントに反映	開発戦略の見直しの要否検討 必要に応じ見直し案作成									

6

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆研究開発目標と根拠

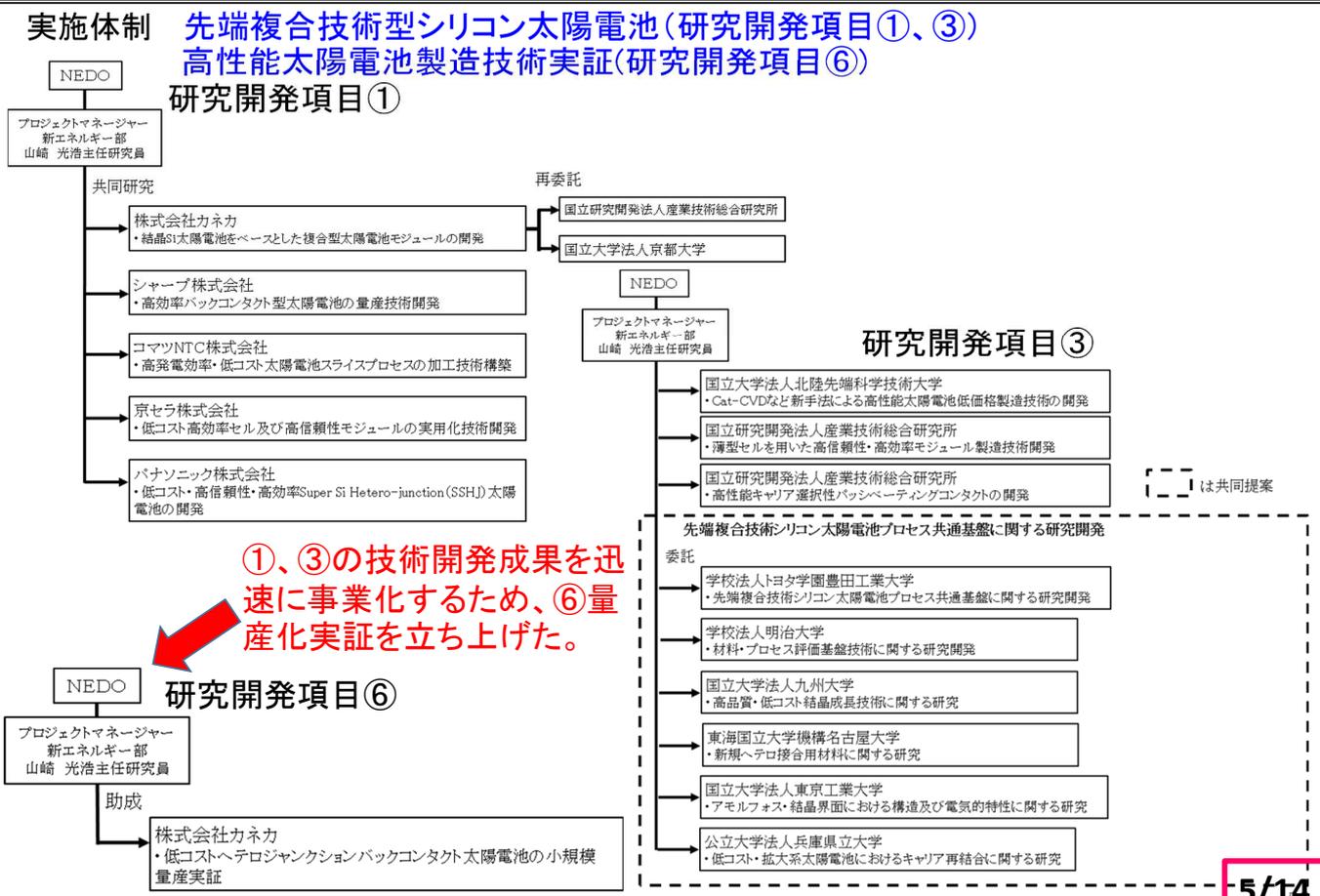
研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	根拠
研究開発項目① 「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」	(1) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。 (2) 2025年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示する。	<ul style="list-style-type: none"> ・発電コスト低減を着実に実現。 ・日本で7円/kWh実現の性能で競争力を確保。 ・実用化が進んでいる結晶Si/CIS太陽電池で、高性能化、低コスト化を追求。
研究開発項目② 「革新的新構造太陽電池の研究開発」	(1) 30%超Ⅲ-V族太陽電池を低コスト化。モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するセルモジュール構造と達成手段を明確化する。 (2) 低製造コストのペロブスカイト太陽電池を開発。量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術の開発。実験室レベルの小型太陽電池モジュールでの変換効率20%達成。	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶Si/CISと異なるアプローチで7円/kWh実現。 ・圧倒的な特性の違いで差別化。 ・特性を生かして新市場を創出。
研究開発項目③ 「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」	a) 先端複合技術型シリコン太陽電池 (1) p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。 (2)、各要素技術(成膜、電極、パッシベーション等)がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。 b) 高性能CIS太陽電池の開発 ① 小面積セル(1cm角程度)で変換効率23%以上。 ② 欠陥密度の低減化技術の開発。 ③ CIS太陽電池の理想的な材料設計技術の提案。	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶シリコン太陽電池セルにおけるキャリアライフタイム及び各要素技術、CIS太陽電池におけるセル高効率化のための共通基盤技術を開発することで14円/kWh達成に貢献。 ・研究開発項目①に対し、大学、研究機関において基盤技術を開発(①の2/3NEDO負担に対し負担率100%)。

2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

◆ 研究開発目標と根拠		
研究開発項目	研究開発目標(最終目標)	根拠
研究開発項目④ 「共通基盤技術の開発」	a) 出力測定技術の開発 ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、 室内測定においては精度±0.5%(1σ)以内 を目指す。 ・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの 屋外での測定においては精度±1.0%(1σ)以内 を目指す。 b) 発電量評価技術 ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって 利便性の高い日射量データベースを構築 し、NEDOホームページ等のWebサイトに掲載する。 c) 信頼性・寿命評価技術の開発 ・ 低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証 する。 ・太陽電池モジュールの性能 30年を予測できる加速試験方法を開発 する。	・太陽電池の高効率化、信頼性向上のためには 精度の高い評価方法や、劣化機構等の解明が必要 。 ・ 30年の加速試験についても、低コスト化達成のための方策の一つ 。
研究開発項目⑤ 「動向調査等」	a) 動向調査 ・発電コスト7円/kWh実現に向け、 開発戦略の見直しの要否を検討 するとともに、必要に応じ、 見直し案を作成 する。 b) IEA国際協力事業 PVPSの動向及び展開を踏まえた、 定期的な情報発信を行う 。	・ 情勢変化に対応するためには動向調査が不可欠 。
研究開発項目⑥ 「高性能太陽電池製造技術実証」	ヘテロジャンクションバックコンタクト太陽電池セルを用い2025年に 発電コスト7円/kWh を達成するための製造技術を試作レベルで実証する。	高効率太陽電池の 低コスト化に資する製造技術の実証が必要

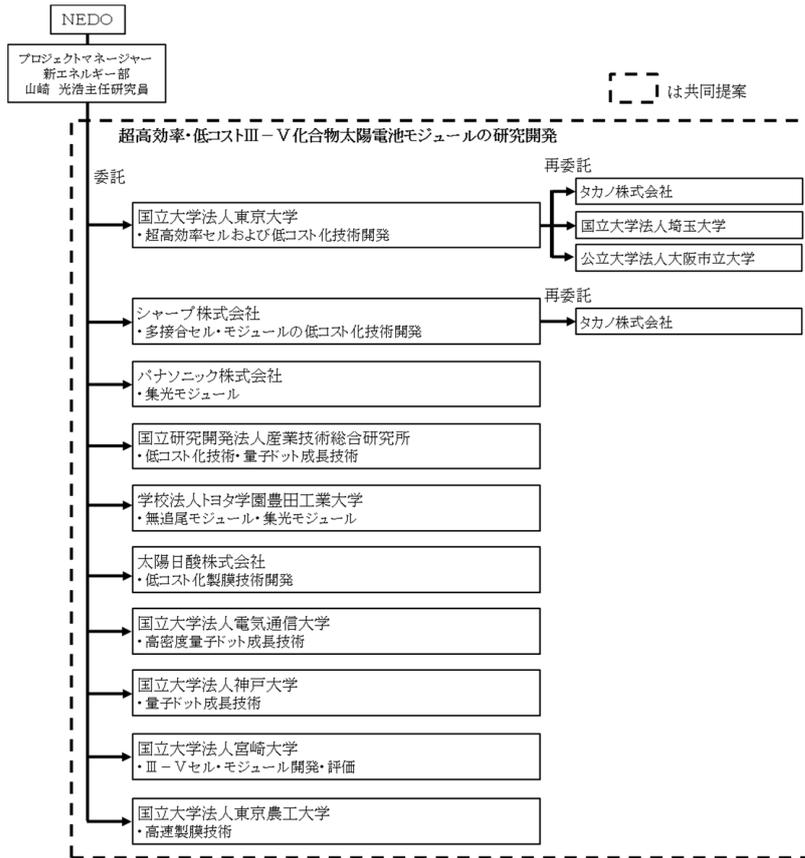
8

2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性



2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

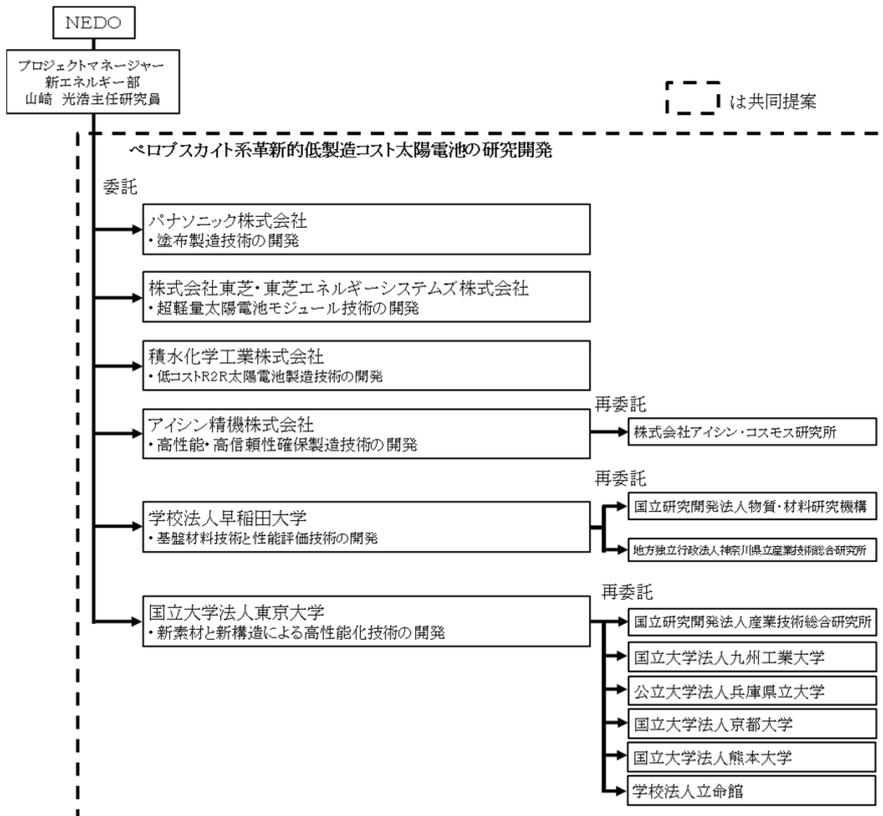
実施体制 III-V 族化合物太陽電池(研究開発項目②: 革新的高効率太陽電池)



途中段階で、高コストな III-V 太陽電池の低コスト、量産技術の開発のために体制を変更した。

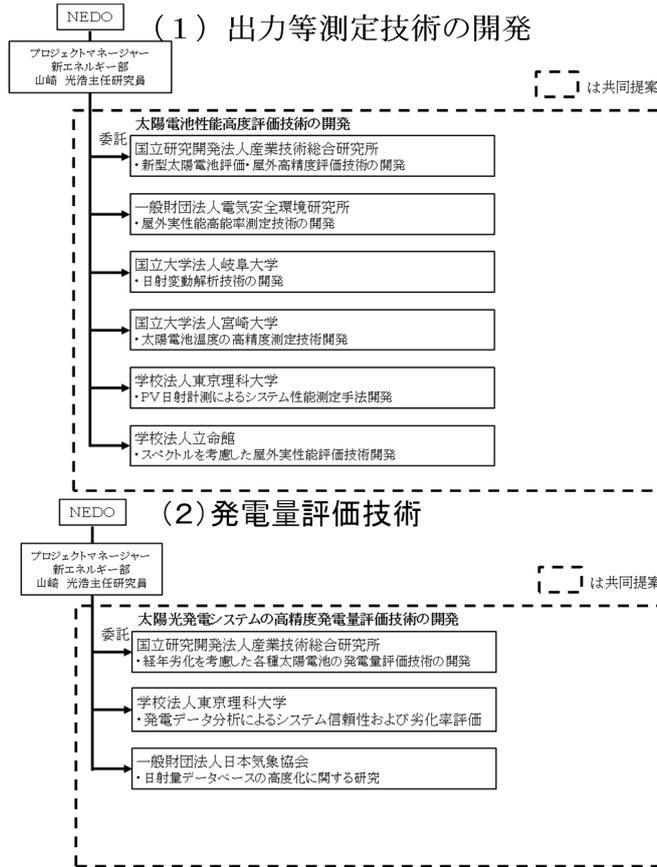
2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性

実施体制 ペロブスカイト太陽電池(研究開発項目②: 革新的低コスト太陽電池)



大学の基盤研究と用途毎のモジュール開発を連携し、一体的な開発体制にて実施。

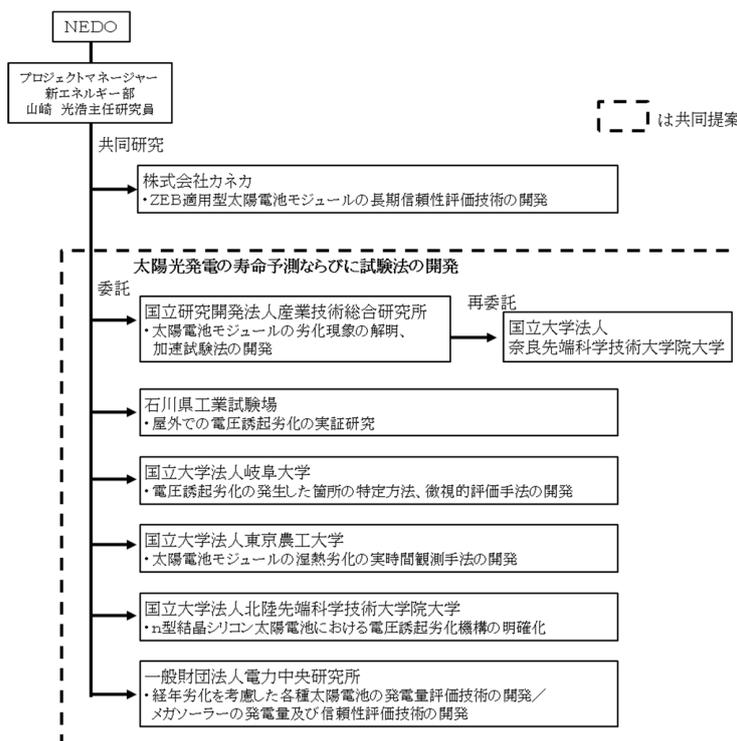
実施体制 共通基盤技術の開発(研究開発項目④)



産総研を中核とし
つ、各大学が強み
を持つ技術開発と連携。

実施体制 共通基盤技術の開発(研究開発項目④)

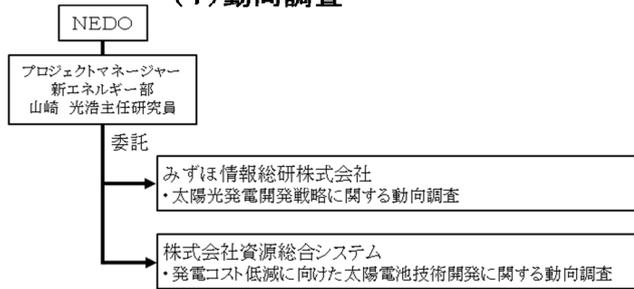
(3) 信頼性・寿命評価技術の開発



産総研を中核とした
劣化、加速試験の開
発と壁面設置のモ
ジュールの長期信頼
性評価を連携。

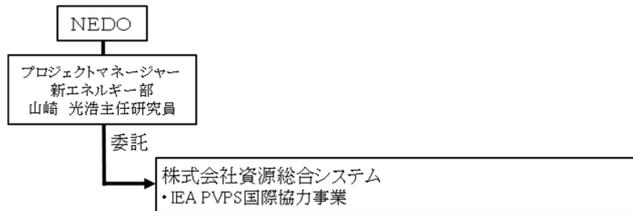
実施体制 動向調査等(研究開発項目⑤)

(1) 動向調査



途中段階で、動向調査において、車載太陽光の項目を追加。

(2) IEA国際協力事業



2. 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

◆ 研究開発のスケジュール

	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度
研究開発項目① 「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発」	結晶シリコン、CISモジュール製造技術	14円/kWh達成技術	中間評価で開発内容絞り込み	14円、7円/kWh達成技術	7円/kWh開発計画提示
研究開発項目③ 「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」	結晶シリコン、CISセル、モジュール高性能化技術	結晶シリコン、CIS基盤技術開発	▲	開発継続、高効率低コスト化技術	最終目標
研究開発項目② 「革新的新構造太陽電池の研究開発」	III-V化合物太陽電池低コスト化技術開発	適宜各太陽電池開発に反映	▲	開発継続、車載への適用検討	
	ペロブスカイト太陽電池基礎技術開発		▲	開発継続、大型モジュール実証	
研究開発項目④ 「共通基盤技術の開発」	評価方法、発電量評価、寿命評価技術開発		▲	開発継続、標準化への展開	
研究開発項目⑤ 「動向調査等」	調査	プロジェクトの運営、開発戦略等へ反映	▲	調査継続	
			▲	次期開発戦略へ反映	
研究開発項目⑥ 「高性能太陽電池製造技術実証」				高効率低コスト化製造技術の実証	研究開発項目①の成果を受け

◆プロジェクト費用

- 当初公募(2015年度)
 - ✓ 30件の応募に対し、22件のテーマを採択。
 - 追加公募(2018年度)
 - ✓ 研究開発項目①③で各1件、新たに実証事業(研究開発項目⑥)で1件採択
- － 研究開発予算の推移(単位:億円)－

年度	2015	2016	2017	2018	2019	総額
研究開発項目①(結晶Si)	7.5	8.7	7.4	7.1	2.3	33.1
〃 (CIS)	2.0	2.4	3.0	3.1	1.1	11.2
研究開発項目②(Ⅲ-V)	9.7	11.4	10.6	11.7	9.2	52.5
〃 (ペロブスカイト)	9.0	8.4	9.9	7.9	7.2	42.3
研究開発項目③(結晶Si)	8.9	8.7	5.3	6.9	4.3	34.1
〃 (CIS)	3.3	2.4	1.8	1.8	1.0	10.3
研究開発項目④(共通基盤)	4.8	6.1	4.8	3.2	2.4	21.3
研究開発項目⑤(動向調査)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	2.9
研究開発項目⑥(実証)	—	—	—	1.9	1.0	2.9
計 特別会計(需給勘定)	45.7	48.5	43.5	44.3	29.1	211.1

16

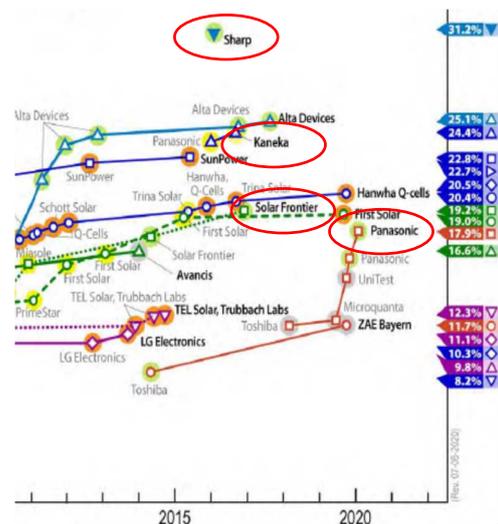
◆研究開発項目毎の目標と達成状況

変換効率向上: 各太陽電池で世界最高効率を達成するなど、大きな成果をあげた。

低コスト化: 高い変換効率を維持しながらコストを低減させる技術を開発しており、各太陽電池において発電コスト目標を達成できるコスト試算を行いながら、最終目標として研究開発項目①、③は14円/kWh相当を達成した。

研究開発項目②(Ⅲ-V系、ペロブスカイト)は量産化につながる要素技術の確立を行った。

NRELのモジュールチャートにはシャープ(Ⅲ-V)、カネカ(シリコン)、ソーラーフロンティア(CIS)、パナソニック(ペロブスカイト)が記載されている。(出展: NREL)

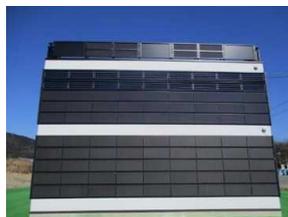


◆研究開発項目毎の目標と達成状況

耐久性向上: 材料、製造プロセスなど太陽電池セル／モジュール開発のアプローチに加え、共通基盤技術として**太陽電池特性評価、発電量評価や劣化要因解析、寿命試験方法**の開発など、耐久性向上につなげる技術についても大きな進展があった。

新市場への展開: 開発を行ったモジュールは**太陽光発電の新分野(建物壁面、重量制限のある屋根、車載等)**への展開可能性が見えてきた。

動向調査: 調達価格等算定委員会の議論から、発電コスト算定方法を最新のものに見直すとともに、最新の発電コストの分析を行うとともに**車載太陽光**の可能性についても調査を行った。



◆プロジェクトとしての達成状況と成果の意義

—本プロジェクトにおける主な成果— 下記成果を達成し、更にコスト低減等の技術開発を進めた。

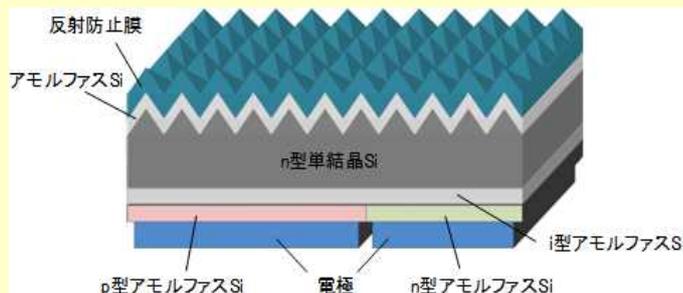
種別	委託者	成果
シリコン(ヘテロ接合バックコンタクト)太陽電池	カネカ	<ul style="list-style-type: none"> ・実用面積セル(180cm²)で変換効率26.6% 結晶シリコン太陽電池で世界最高(2020年11月時点) ・実用面積モジュール(1.3m²)で変換効率24.4% 結晶シリコン太陽電池で世界最高(2020年11月時点) ・製造技術実証等に加えて、更に車載、壁面へ展開を実施。
CIS系薄膜太陽電池	ソーラーフロンティア	<ul style="list-style-type: none"> ・小面積セル(約1cm角)で変換効率23.3% (2019年1月) ・30cm角サブモジュールで変換効率19.2%(その後19.8%) 薄膜系太陽電池では世界最高(2020年11月時点) ・軽量モジュールを含めて事業化に向けた開発を実施。
Ⅲ-V化合物太陽電池	シャープ	<ul style="list-style-type: none"> ・31cm角モジュールで変換効率31.17% 太陽電池モジュールの中で世界最高(2020年11月時点) ・低コスト化に向けた開発とともに、車載モジュールを試作。
ペロブスカイト太陽電池	東京大学 パナソニック	<ul style="list-style-type: none"> ・ミニセル(0.18cm²)で変換効率24.92%(2019年12月) ・30cm角モジュールで16.09%。世界最高(2020年1月) (その後、17.93%に記録を更新) ・大面積化や耐久性向上に向けた技術開発も実施。

先端複合技術型シリコン太陽電池(研究開発項目①、③)

2019年度最終目標

- (1) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。
14円/kWhの目安(モジュール変換効率22%、モジュール出力劣化25年で20%相当)
- (2) 2025年までに発電コスト7円/KWhを実現するための開発計画を提示する。

結晶シリコン太陽電池の原料メーカー、装置メーカー、セル・モジュールメーカーが大学等と連携し、ヘテロ接合バックコンタクト等、先端技術を複合した、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。



開発するヘテロ接合バックコンタクト型太陽電池の一例

- ① 太陽電池用ポリシリコンおよび単結晶の開発
トクヤマ NEDO負担2/3
- ② 高品質低コストシリコン単結晶の開発
クリスタルシステム
- ③ 薄型ウエハ用低ダメージスライス技術開発
コマツNTC
- ④ 結晶Si太陽電池用新規電極の開発
ナミックス
- ⑤ 高効率長寿命結晶Si太陽電池セル・モジュール開発
シャープ、京セラ、カネカ(産総研、京大、東工大)



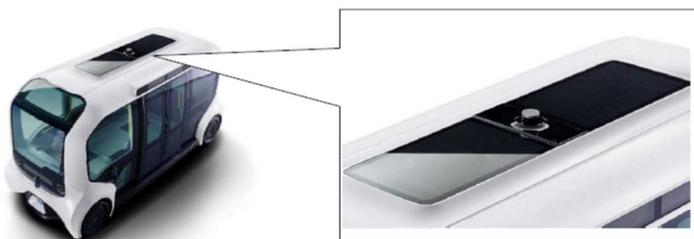
- ① 低ダメージ成膜技術開発
北陸先端科学技術大学院大学
- ② 薄型セルおよび高効率・高信頼性モジュール開発
産業技術総合研究所
- ③ 先端複合技術型シリコン太陽電池の共通基盤技術開発
豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学
東京工業大学、兵庫県立大学

開発成果 先端複合技術型シリコン太陽電池(研究開発項目①、③)

ヘテロ接合技術とバックコンタクト技術を組み合わせた新構造の結晶シリコン太陽電池で**世界最高記録(セル変換効率26.7%、モジュール変換効率24.5%)達成変換効率を達成**(2017年2月)、**屋根用途以外に壁面や車載への展開を目指す。**
(株式会社カネカ)



ヘテロ接合バックコンタクト太陽電池モジュール



トヨタの低速自動運転EV「e-Palette」
(トヨタ自動車株式会社提供)



導入イメージ
(中・小規模ビルの外装)



結晶シリコン太陽電池モジュールでも、**世界最高となる変換効率24.37%を達成**(モジュール面積※13,177cm²)

III-V族化合物太陽電池(研究開発項目②): 革新的高効率太陽電池

2019年度最終目標

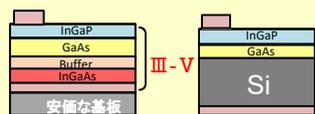
(1) モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するセルモジュール構造と達成手段を明確化する。

超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発

超高効率化技術、成膜速度の高速化技術、安価基板への成膜や接着技術、高価な基板の再利用技術等、従来の延長線上にない革新的高効率太陽電池をセル・モジュールメーカー、成膜装置メーカー、大学等が連携し開発を進める。

I. 低コスト化技術開発

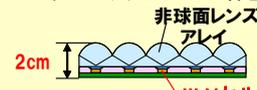
■ 薄膜III-Vセル, on-Siセル



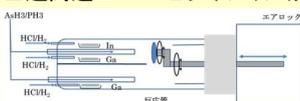
■ エピタキシャルリフトオフ(ELO)



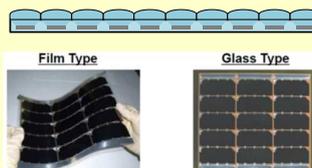
■ プラスチックレンズ一体型セル



■ 超高速III-Vエピタキシャル成長

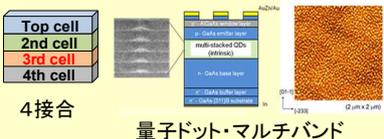


II. 低コストモジュール開発



2030年
LCOE
7円/kWh

III. 超高効率セル開発



- ① 超高効率セルおよび低コスト化技術開発
- ② 多接合セル・モジュールの低コスト化技術開発
- ③ プラスチックレンズ一体型セル・モジュール
- ④ 低コスト化技術・量子ドット成長技術
- ⑤ 高効率・低コストIII-V/Siタンデム
- ⑥ 低コスト化製膜技術開発
- ⑦ 高密度ドット成長技術
- ⑧ 量子ドットセル評価
- ⑨ 窒化物ハイブリッド
- ⑩ III-Vセル・モジュール開発・評価
- ⑪ メカニカルスタック

- ※ 括弧内は再委託先
- 東京大学(埼玉大、タカノ)
 - シャープ(株)
 - パナソニック(株)
 - 産総研
 - 豊田工大(九州大、大阪市大)
 - 太陽日酸(株)
 - 電気通信大学
 - 神戸大学
 - 名古屋大学/名城大学
 - 宮崎大学
 - 東京農工大学

太陽光発電システム搭載自動車走行実証試験

トヨタ自動車、NEDO、シャープの3社は協力して太陽光発電システム搭載自動車を作製。2019年7月のRE展のNEDOブースで展示した。その後公道走行での実証試験を実施中。



太陽電池モジュールを搭載した「プリウスPHV」



(日産実証車)

ボンネット、ルーフ、リアゲートに太陽電池を搭載(発電量1,150W以上)



NEDO事業でシャープが開発した世界最高の変換効率31.17%のIII-V族化合物太陽電池モジュール製造技術を活用し、トヨタ自動車を実施する走行実証の仕様に基づき、新たにモジュール化した。自動車のフード(ボンネット)やルーフ、バックドア(リアハッチ)など、曲面部分に沿って搭載。「プリウスPHV」に搭載することにより、860Wの発電容量を実現、一日の充電で30km以上走行可能を実証できた。日産でも同様のモジュール(発電量1150kw)を組み込んだ実証車を作製し、実証走行を開始した。

表1 「プリウスPHV」の市販モデルと実証車の性能比較

性能項目	車両	「プリウスPHV」 (ソーラー充電システム装着車)	実証車
太陽電池セルの変換効率		22.5%	34%以上
定格発電電力		180W	約860W
駐車時の駆動用バッテリーへの最大充電電力量(日当たり) ^{※注}		EV航続距離6.1km相当	EV航続距離44.5km相当
走行時の駆動用・補機バッテリーシステムへの最大充電・給電電力量(日当たり) ^{※注}		カーナビなどに使用する補機バッテリーシステムにのみ電力を供給	EV航続距離56.3km相当

◆ 成果の普及

◆ 特許出願件数と学会発表等

(2020年8月末時点)

項 目	特許出願		論文 (査読付)	研究発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への掲載	受賞 実績	展示会 への出 展
	国内	外国					
研究開発項目①(結晶Si)	134	119	14	99	36	0	11
〃 (CIS)	18	9	6	41	488	1	7
研究開発項目②(Ⅲ-V)	11	4	248	1085	37	18	18
〃 (ペロブスカイト)	50	60	238	797	136	62	21
研究開発項目③(結晶Si)	15	3	155	778	14	14	13
〃 (CIS)	6	0	88	216	0	1	7
研究開発項目④	10	1	112	686	53	15	15
研究開発項目⑤	0	0	0	35	1	0	0
研究開発項目⑥	0	0	0	0	1	0	0
計	244	196	861	3,737	766	111	92

44

4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

◆ 実用化・事業化に向けた戦略と具体的取組み

- NEDOは実施期間中に各事業者を訪問し、幹部や研究開発のキーパーソンとディスカッションを行うことにより各機関の戦略、事業化の予定について議論を行い、マネジメント(体制変更や加速資金の配賦)に反映を行った。
- また、上記の議論や研究開発項目⑤(動向調査)を通して、研究開発項目⑥(高性能太陽電池製造技術実証)の追加や車載、ビル壁面等、これまで太陽光発電が導入されていなかった領域へ向けた検討を行い、例えば、車載については実証車の作製、実証走行を行った。

◆成果の実用化・事業化に対する課題と今後の方針

- 研究開発項目①、③については、シリコンとCISという既に海外企業との競争が激しい分野であり、競争優位性を出せるよう、企業の事業化状況を確認する。
- 研究開発項目②については、Ⅲ-V、ペロブスカイトの次世代電池については、コスト低減、効率のみならず、**量産技術、耐久性等の向上**が不可欠。また、シリコン、CIS等の既存太陽電池との棲み分けが可能な新規用途開拓が必要。
- 研究開発項目④については、電池の評価や日射量データベースといった共通基盤技術については、それが活用できる**環境整備**につなげる。



- 高性能高信頼性プロジェクトの成果については、企業が事業化への検討を進めるとともに、新市場等、今後の展開可能性については2020年度から開始した**「太陽光主力電源化推進技術開発」**において、事業化に向けた技術開発について引き続き支援を行う。

概要

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

II. 研究開発マネジメントについて

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

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

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

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

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

2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

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

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1) 革新的高効率太陽電池の研究開発 (III-V化合物)

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

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

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

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

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

2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発 (ペロブスカイト)

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

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

「低コストR2R太陽電池製造技術の開発」では、3cmフィルム基板セルで変換効率13%を達成し、JIS規格C8381準拠の耐久性試験5項目で相対低下率10%以下を達成した。また、オールR2Rプロセスで作成した30cm角フィルム基板モジュールで変換効率11.4%を達成した。量産時5円/W以下が達成可能な内製バリアフィルムにより耐湿熱試験(85°C85%)1000hで相対変換効率低下率10%未満を達成した。

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

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

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

「新素材と新構造による高性能化技術の開発」では、ペロブスカイト層へのカリウム添加によるI-Vヒステリシス低減効果が様々な組成に有効であることを見出した。また、1cm²セルで変換効率21.65%、3直列モジュール(2.76cm²)で20.7%を達成した。ペロブスカイト単結晶試料の構造と物性を検討し、励起子の特殊性を明らかにした。複数の結晶相が混在し、自発的に超格子を形成していることを見出した。劣化要因となるMAを含まないペロブスカイトでカリウムとセシウムを適切に添加し不純物を制御することにより、セル変換効率21.9%を達成した。高電流化を狙った錫/鉛混合ペロブスカイトでJ_{sc} 33.1mA/cm²、V_{oc} 0.8V、セル変換効率20.4%を達成した。100円/m²以下無機系ホール輸送材NiO_xを用いた逆構造型セルで効率19.6%を確認した。混合カチオン型(Cs_xMA_yFA_zPbI₃Br₆)用の前駆体材料FAPbI₃(dmf)₂を開発し、これを用いてV_{oc} 1.21V(電圧ロス0.38V)のセル、変換効率22.2%(J_{sc} 25.2 mA/cm²、V_{oc} 1.11 V、FF 0.793)のセルを得た。電圧ロスが小さい理由として、Agingにより正孔輸送層で

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

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2) 高性能CIS太陽電池の開発

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

研究開発項目⑤「動向調査等」

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

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

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

研究開発項目⑥「高性能太陽電池製造技術実証」

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

投稿論文	861 件
特許	「出願済」 440 件（うち海外出願 196 件）
研究発表・講演	3,737 件

IV. 実用化の見通しについて	本事業で確立した高性能・高信頼性太陽電池を具現化するための要素技術は、担当企業で実用化に向けた検討や実証が進んでいる。結晶シリコン太陽電池では、日本企業に強みがある住宅屋根に加え、新たな市場として建物の壁面や窓に向けた商品化が進められている。また、電気自動車に新たに採用された事例がある。CIS太陽電池では、実績がある住宅屋根に加え、重量制限のある屋根に向けた軽量モジュールの開発、電気自動車での実証試験が行われている。III-V化合物太陽電池では、従来の宇宙用途に加え、30%を超過する変換効率を活かした電気自動車での走行実証試験が開始されている。ペロブスカイト太陽電池では、本
-----------------	--

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