

NEDO先導研究プログラムの技術課題検討に係る調査の ワークショップ (VIP) (2024.5.20)

革新的量産型タンデム太陽電池の研究開発

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
再生可能エネルギー研究センター
松井 卓矢

1. 太陽電池(デバイス)の現状と課題
2. 産総研におけるタンデムセル開発
3. オリジナル技術
4. 取組むべき研究開発課題と想定されるアウトカム

結晶シリコン太陽電池の現状と課題

- PV はカーボンニュートラルに向けて欠かせないアイテム
- 結晶シリコン は>95% の市場を独占 (~240 GW @ 2022)
- 世界で~1.2 TW (総発電量の6%) の太陽光発電が導入済み
- 2050年までに75 TWの導入期待も *N.M. Haegel, Science 380, 39 (2023).*



utility scale

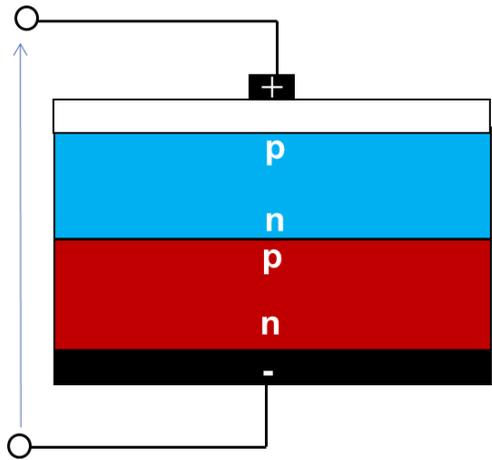


課題

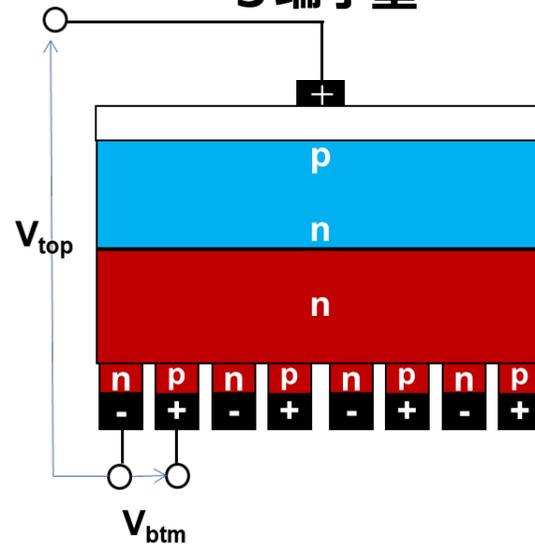
- 効率25%超の高効率セル量産技術
- 新市場開拓 (BIPV, VIPV, Agri-PV)
- 既存PV (住宅、メガソーラー) のリパワーリング・高エネルギー密度化
- Siの限界を超えるタンデム技術 (>30%) とその量産技術
- 材料のサステナビリティ (In, Ag削減など)
- 製造時のCO₂排出削減 (Kerfless-Siなど)
- リサイクル技術

タンデム太陽電池の形態

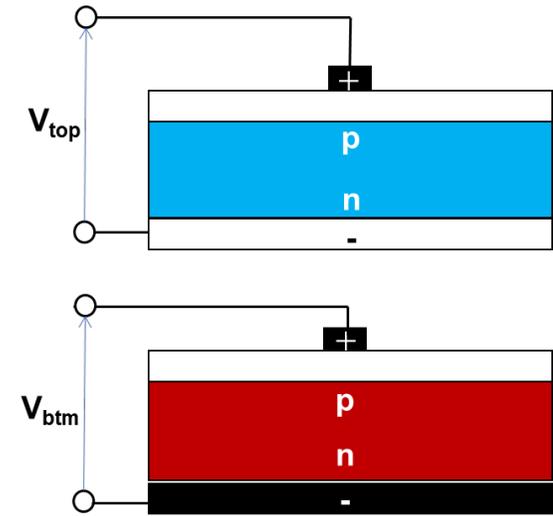
2端子型



3端子型



4端子型

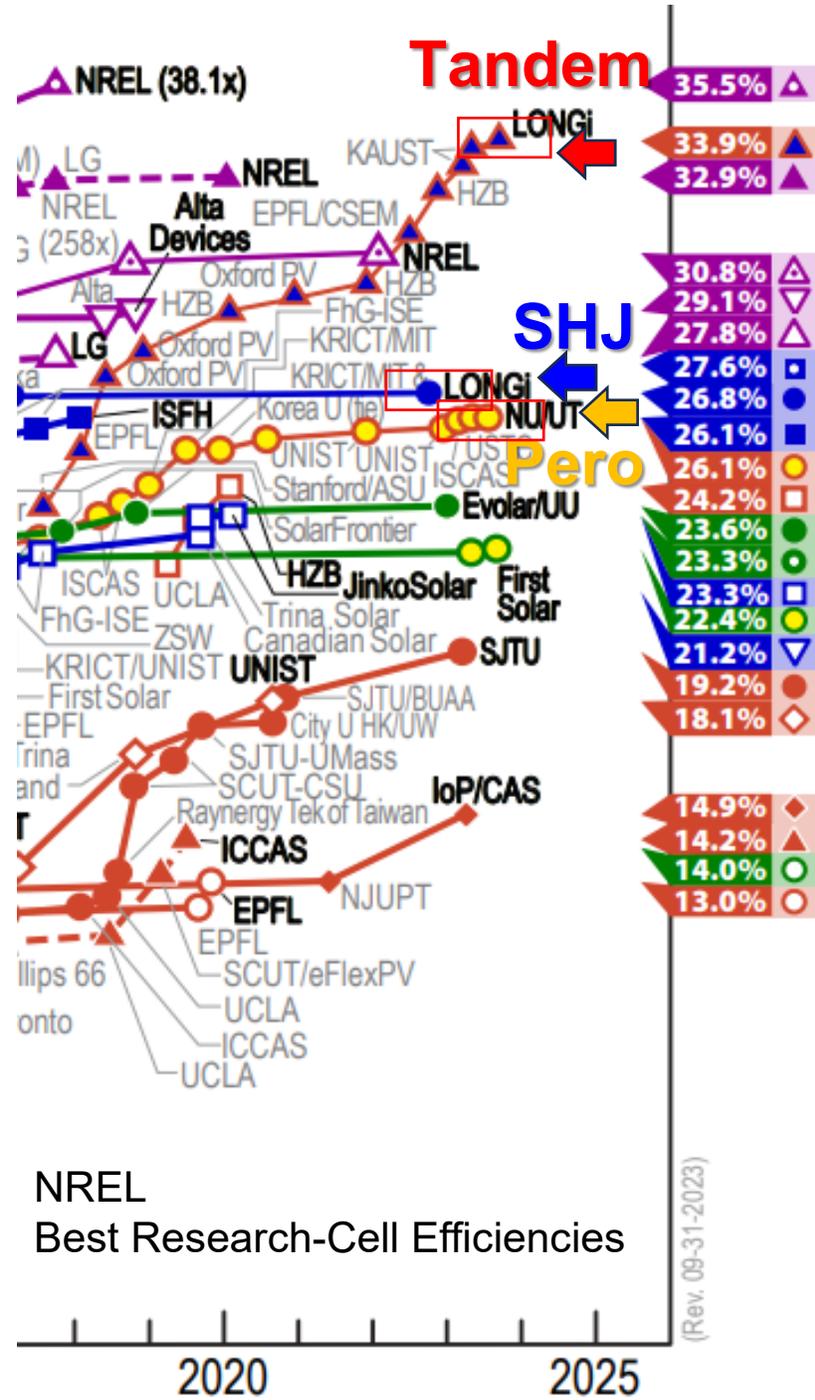


- ☺ シンプルで従来のセル・モジュール技術が使える
- ☹ 電流整合条件あり

- ☺ トップセルをボトムセルに直接形成しつつ、電流整合制約から解放される
- ☹ 2つの独立した回路が必要

- ☺ トップセルとボトムセルを個別に最適化可能
- ☹ 2つの独立した回路が必要
- ☹ 界面の光学調整層が必要

ペロブスカイト／結晶シリコン タンデム太陽電池の形態



- ペロブスカイトは最適なバンドギャップ (1.7 eV) を有するとともにSi上に直接堆積可能な希少なトップセル材料
- 既存のSi太陽電池セル・モジュール製造工程が使用できる付加技術
- 高効率 (~34%) が実証済みで、更なる高効率化のポテンシャル (III-V系2接合セルを凌ぐ高効率)
- 従来、平坦なSiの面にトップセルを形成することが一般的であったが、ペロブスカイトの製膜法によってはTEXの上に形成可能
- 電荷輸送層や界面パッシベーション技術の進展により、飛躍的な性能改善につながる
- ボトムセルにはa-Si:H/c-Siヘテロ接合 (SHJ) が一般的に用いられる

NREL Best Research-Cell Efficiencies

(Rev. 09-31-2023)

革新的環境イノベーション戦略（令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議）

ページ17：設置場所の制約を克服する柔軟・軽量・高効率な太陽光発電の実現「ペロブスカイト系、次世代タンデム型など要素技術開発フェーズにある革新的なデバイス・素材等について、2030年頃の社会実装開始を目指す」に該当

非化

I. エネルギー転換

再生可能エネルギーを主力電源に

① 設置場所の制約を克服する柔軟・軽量・高効率な太陽光発電の実現

【目標】

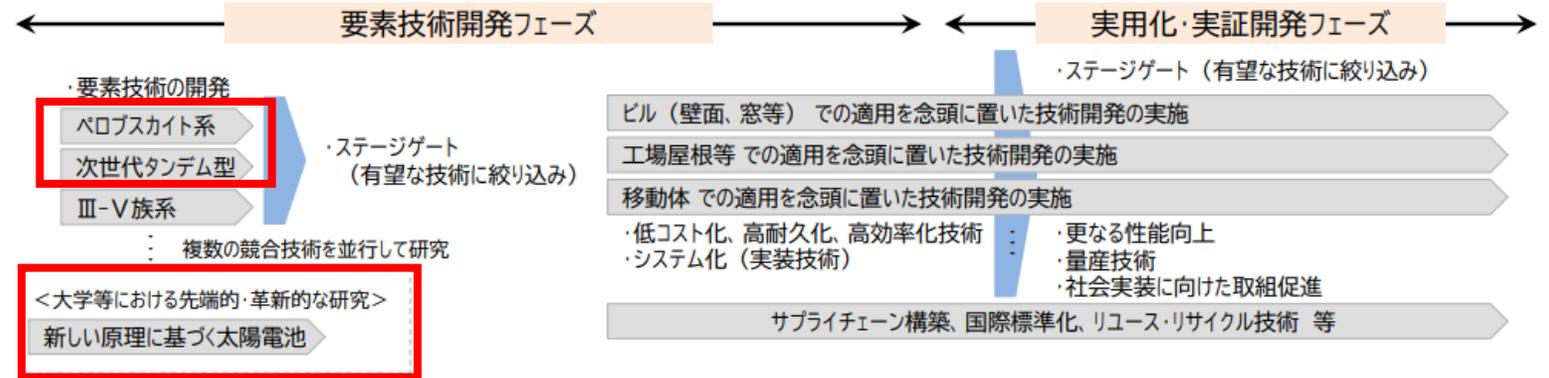
- 太陽光発電システム設置の適地が減少する中、従来技術では設置困難なビル壁面、工場屋根、自動車等への導入を可能とし、中長期的な導入可能量の大幅拡大に資するため、高効率化（現状の2倍、35%以上）、軽量化（現行の1/10）、曲面追従化等、立地制約を克服する革新的な技術を確立するとともに、そのコストをkWhあたり既存電源のコスト水準以下とし、2050年に向けて、2030年頃からの社会実装開始を可能とすることを旨とする。世界全体におけるCO₂削減量は約70億トン。¹⁾

【技術開発】

- ペロブスカイト系（軽量、曲面追従、鉛フリー等）、次世代タンデム型、Ⅲ-Ⅴ族系など、要素技術開発フェーズにある革新的なデバイス・素材等について、2030年頃の社会実装開始を目指し、産学官の連携の下で研究開発を進める。また、単なるデバイス開発に留まらず、将来のシステム化（装置構造、設置形態等）に念頭に置いた研究開発を推進する。

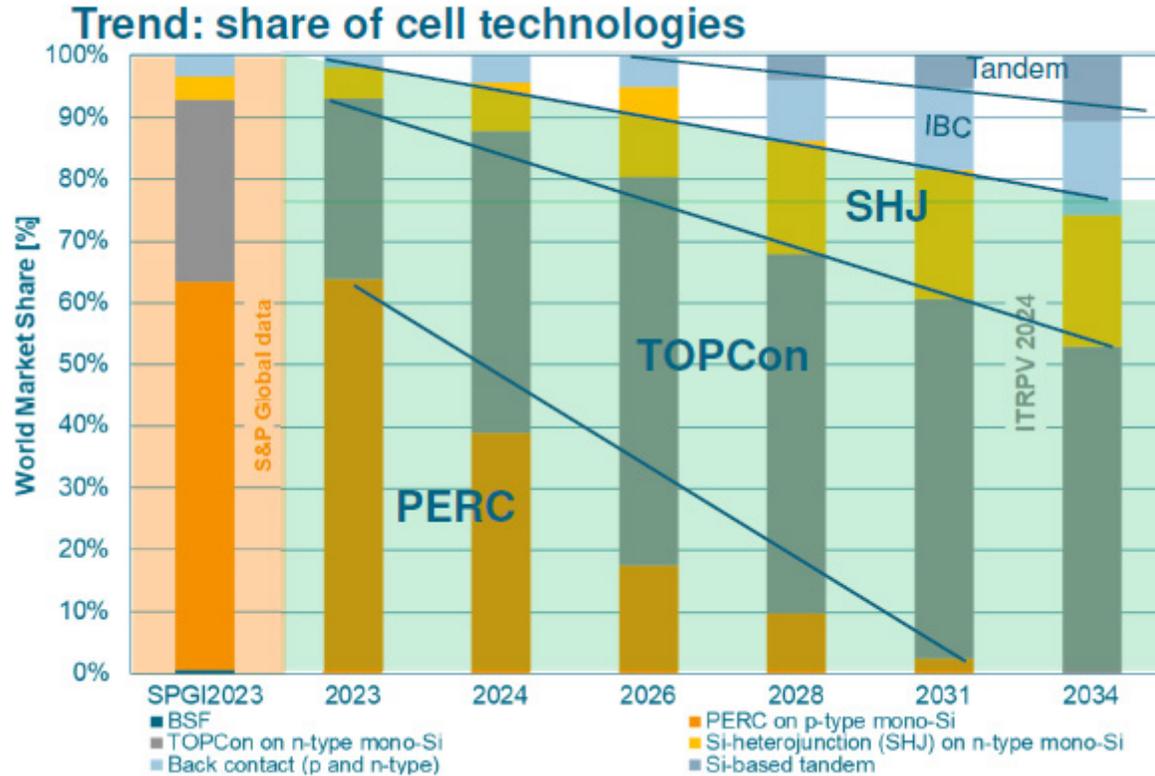
【実施体制】

- 要素技術開発フェーズでは、大学等を中心に原理の確立や性能の向上等を行う。今後は、産学官及び国際的な連携により実用化に近付いた技術については、ステージゲートによって有望な技術を絞り込んだうえでユーザー事業者における設備投資を含めた社会実装に向けた取組を促すため、パネル製造事業者、ユーザー企業（建設、自動車等）なども含めた実用化を担う事業者を中心としたコンソーシアム体制による研究開発体制に移行する。



1) IEA ETP2017等を基に、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター（以下、「NEDO TSC」という。）で試算。

結晶シリコン太陽電池の技術動向



ITRPV 15th edition
Verbandes Deutsches
Maschinenbau Anlage (VDMA)

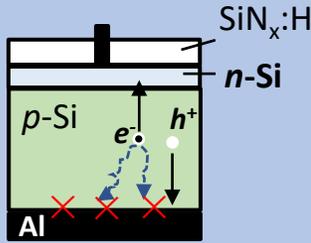
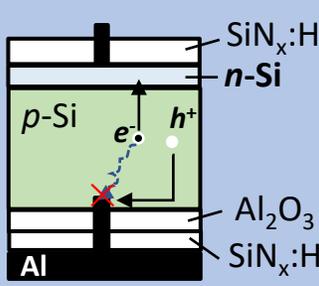
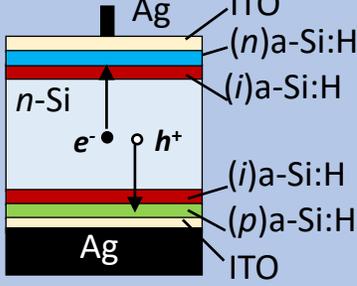
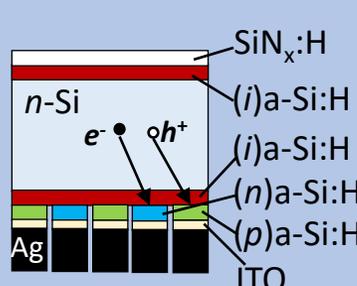
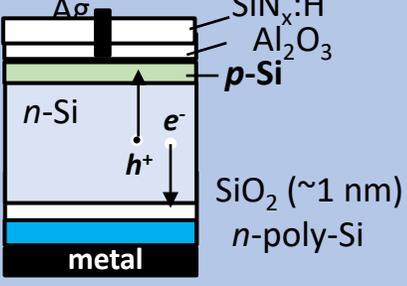
- 現状、PERCとTOPConが支配
- 2030年以降はTOPConのシェアが大きくなる予想
- a-Si:H/c-Siヘテロ接合 (SHJ)も増加の見込み
- 間もなくSi系タンデムが市場に出てくる予想

現状、市場の大多数をPERC、TOPConが締める。SHJの増産はコスト競争の結果次第



タンデム太陽電池の市場拡大には量産型結晶Si太陽電池の使用が重要になる

結晶Si太陽電池の各種デバイス構造

種類	AI-BSF	PERC	ヘテロ接合 (表面裏面電極型)	ヘテロ接合 (裏面電極型)	TOPCon
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ■ 旧式 ■ 最も単純な製造プロセス ■ 裏面が金属で覆われており、再結合ロスが大きい 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 現在の主流 ■ 旧式に比べて裏面の再結合ロスを抑制 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 今後のシェア拡大が予想 ■ 両面受光タイプあり ■ 高出力（特に高温時） ■ 低温焼成Agペーストを使用（高コスト） ■ 透明電極に希少金属（In）を使用 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 表面電極による遮光ロスなし ■ 高い短絡電流密度 ■ 裏面電極の配線が複雑 ■ 3端子タンデムに利用 	<ul style="list-style-type: none"> ■ PERCセルの裏面電極とシリコンの接触を完全排除し、高いパッシベーション性能を実現 ■ PERCセルの製造ラインのアップグレードで生産可能 ■ 今後のシェア拡大が予想
効率	<20 %	24.0%	26.8%	27.1%	26.9%
基本素子構造					
タンデム化	<p>×</p> <p>現時点ではPERCに置換済み</p>	<p>△</p> <p>表面・裏面が絶縁物で覆われているため、タンデム化が困難</p>	<p>◎</p> <p>最も高い効率を実証</p>	<p>△</p> <p>三端子構造</p>	<p>○</p> <p>今後の主力候補</p>

ペロブスカイト／結晶Siタンデム太陽電池の課題

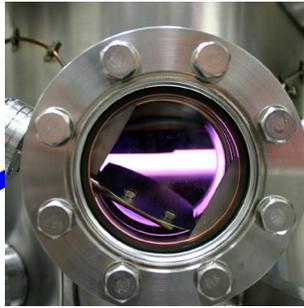
- タンデムセルは多層かつ複雑な構造をもち、プロセスコストが嵩む問題があるため、相応の効率向上が必要（費用対効果の問題）
- ボトムセルに使用されるSHJはプレミアム用途（車載等）に適している一方、コストや量産性の観点でメガソーラーには不向き？
- PERCやTOPConは表面・裏面が絶縁物（パッシベーション層）で覆われているため、自在にタンデム化を行うことが困難
- 従来のSiテクスチャ表面に塗布プロセスでペロブスカイトを形成することは困難
- タンデムセルの表面、中間層、裏面にはインジウム系透明電極（ITO, IZOなど）が使用される。インジウムの消費削減・代替は、持続可能なタンデム太陽電池の生産において重要な課題



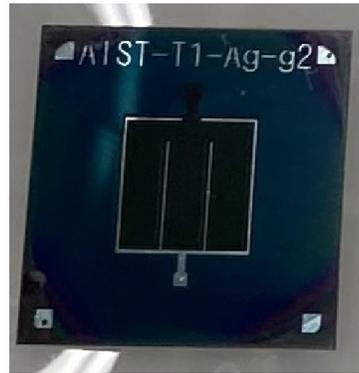
本提案では、PERCなどの量産結晶Si太陽電池とペロブスカイト太陽電池をTCOフリーで接合する技術や、ペロブスカイトを塗布プロセスで製膜可能なSiテクスチャ制御技術、Inなどの希少金属を用いない表面電極など、タンデム太陽電池の量産化に向けた革新的低コスト化技術を開発する

産総研におけるタンデムセル開発 (ベースライン技術)

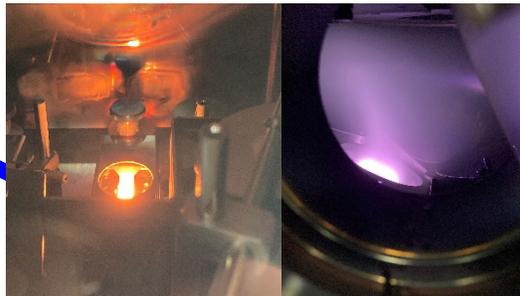
plasma-CVD
SHJ process



perovskite



ALD
SnO₂



PVD (long-throw TCO sputtering, MgF₂)



perovskite
top-cell

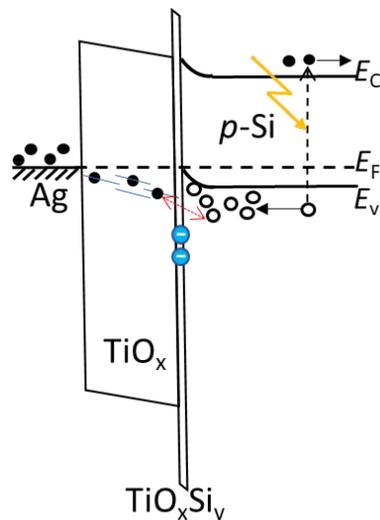
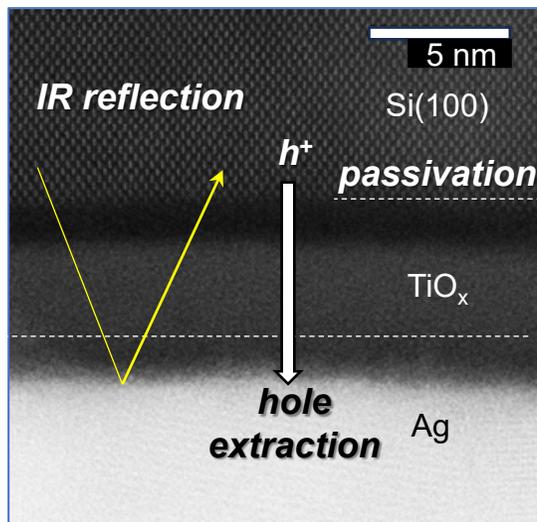
SHJ bottom
cell

C. McDonald et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **14**, 33505, (2022).

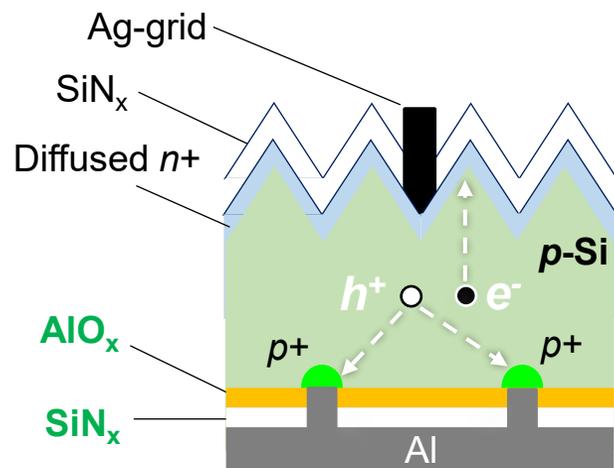
オリジナル技術 (1)

ALD酸化チタン薄膜 (TiO_x)を介したトップ/ボトムセル接合技術*

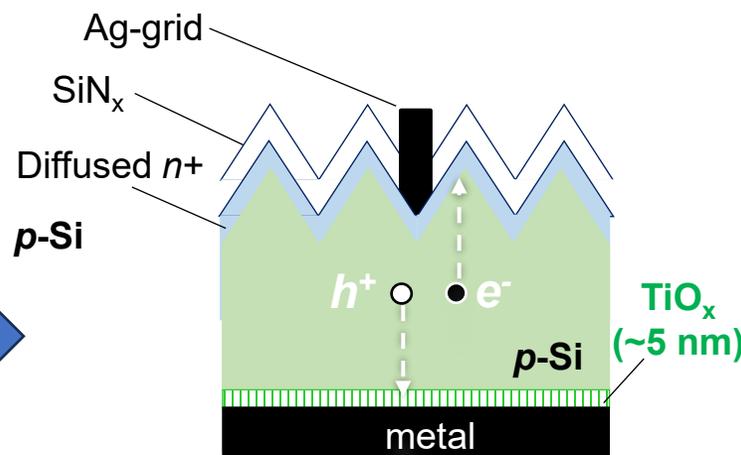
*NEDOクリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業で開発



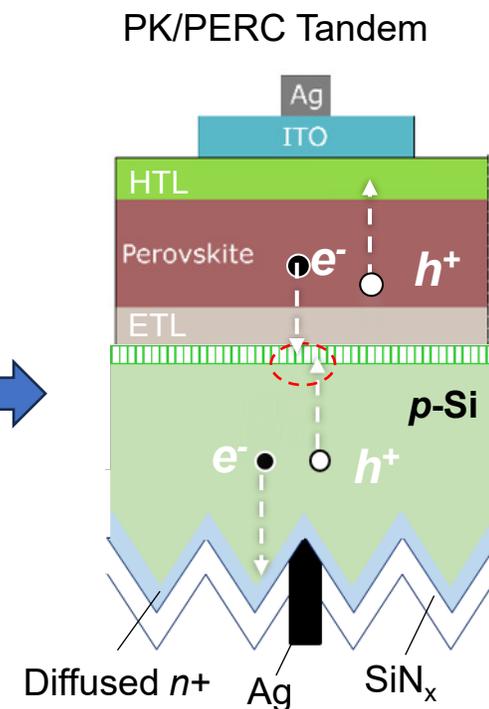
- TiO_x が結晶シリコンの表面をパッシベーションしつつ、正孔を選択的に取り出すオリジナル技術を開発
- AlO_x等の絶縁膜を半導体的なTiO_xに置換えることでセル構造のシンプル化が可能 (コンタクトホール形成不要)
- TiO_xを介して量産結晶Si太陽電池をペロブスカイトと接合することが可能に



PERC



PERC+TiO_x

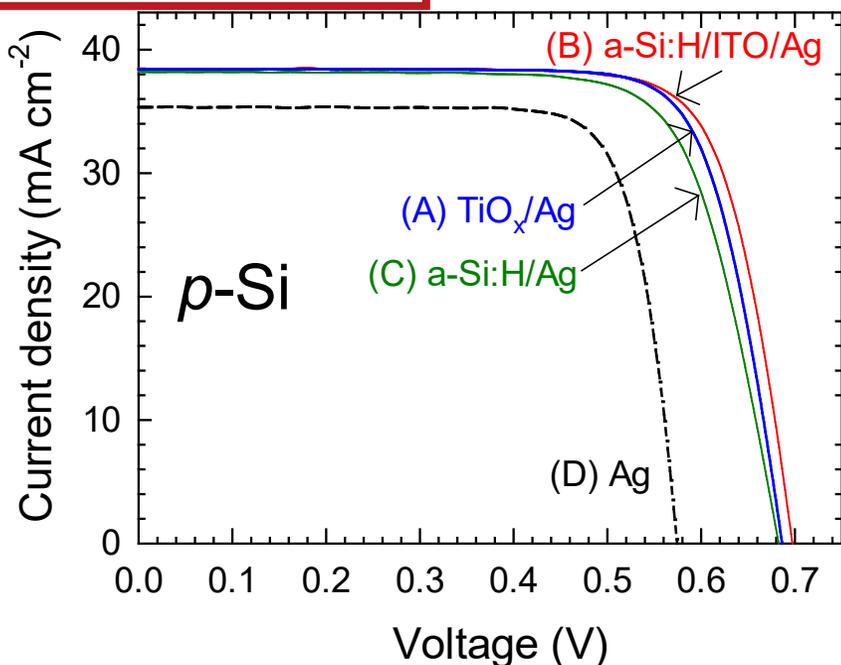
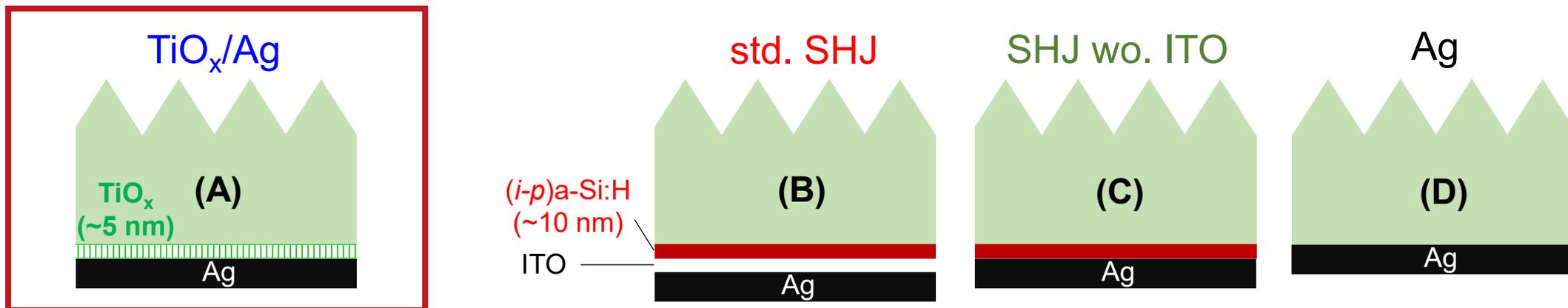


T. Matsui, M. Bivor, M. Hermle, H. Sai, *ACS Appl. Mater. interfaces*, **12**, 494777 (2020).

T. Matsui, S. McNab, R. S. Bonilla, H. Sai, *ACS Appl. Energy Mater.*, **5**, 12782 (2022).

オリジナル技術 (1) ALD酸化チタン薄膜 (TiO_x)を介したトップ/ボトムセル接合技術*

*NEDOクリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業で開発

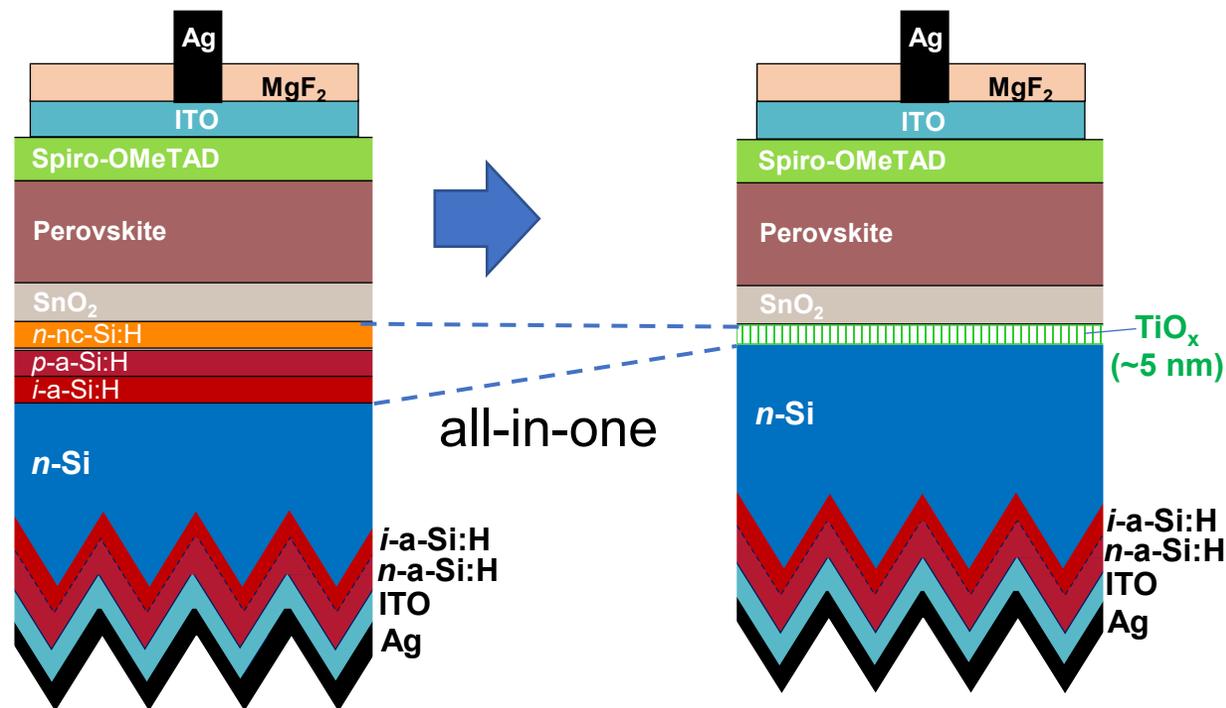


- セルの片側（裏面）をTiO_x/metal構造とした原理検証セルを作製し、ベンチマークとなるSHJ型と同等の性能（20.3%）を得た。
- 効率はセル表面の光学ロスで律則されており、PERCセルの表面構造を取り入れることで大幅な効率向上が期待される。

オリジナル技術 (1) ALD酸化チタン薄膜 (TiO_x)を介したトップ/ボトムセル接合技術*

*NEDOクリーンエネルギー分野における革新的技術の国際共同研究開発事業で開発

C. McDonald et al., ACS Appl. Mater. Interfaces 14, 33505, (2022).

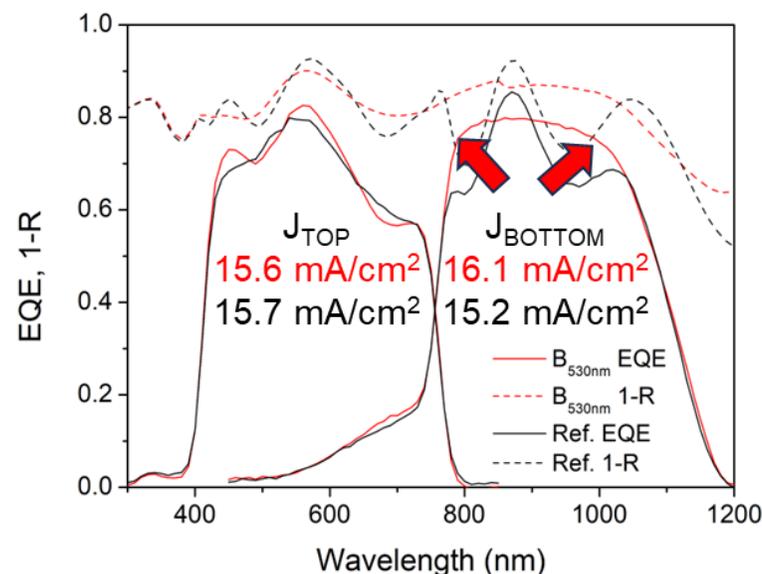
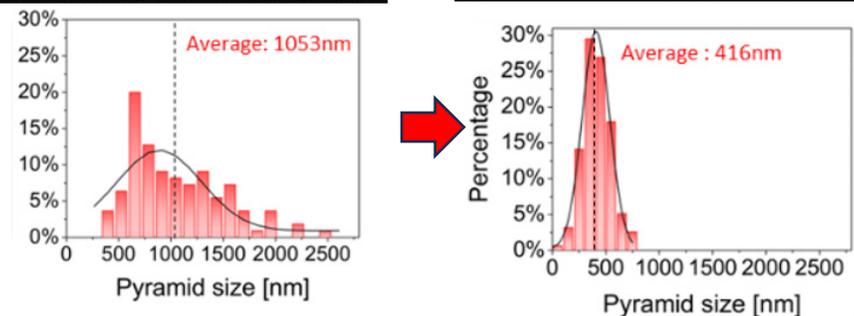
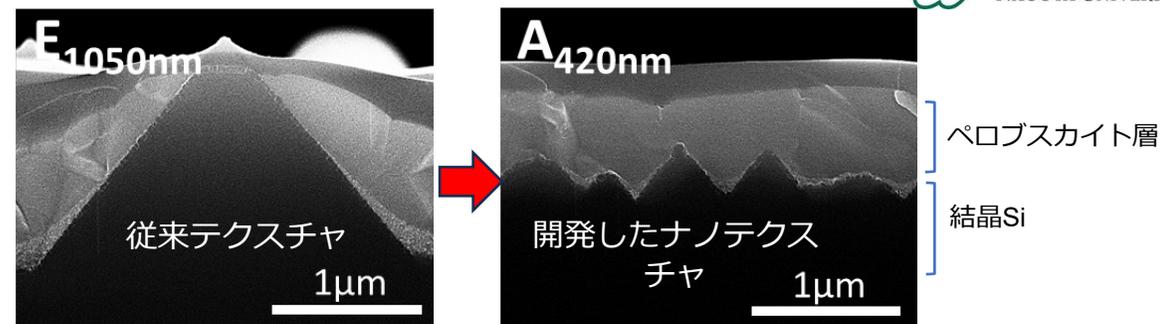


- TiO_xが (1) Siのパッシベーション層、(2) 正孔選択層、(3) トップ/ボトム界面の再結合層としてall-in-one機能を有することをデバイス実証済み

オリジナル技術（2）

ペロブスカイト塗布プロセスが可能な結晶Siテクスチャ形成技術の開発

- 一般的な結晶シリコン太陽電池には反射防止効果を得るために数ミクロンオーダーのピラミッド型テクスチャを表面に形成しているが、この上に塗布法でペロブスカイト層を均一に形成することは困難であった。
- 産総研と名古屋大学との共同研究でテクスチャサイズをナノスケール（400-500 nm）でサイズ制御するシリコンのエッチング技術を開発した。これにより均一なペロブスカイト層をテクスチャ面に直接塗布形成することが可能に。
- トップセル/ボトムセルの界面反射ロスを低減し、タンデムセルの電流改善・性能改善を実証

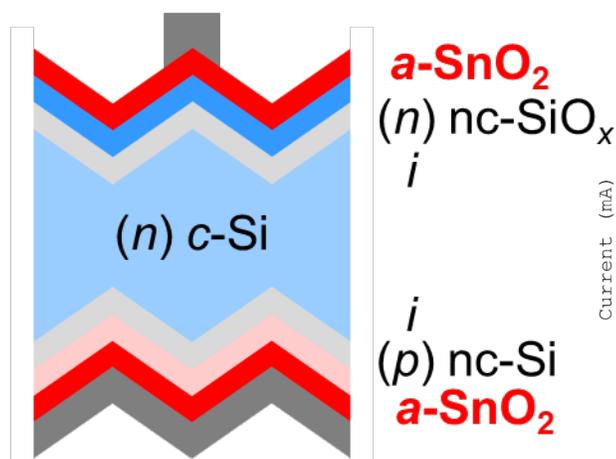
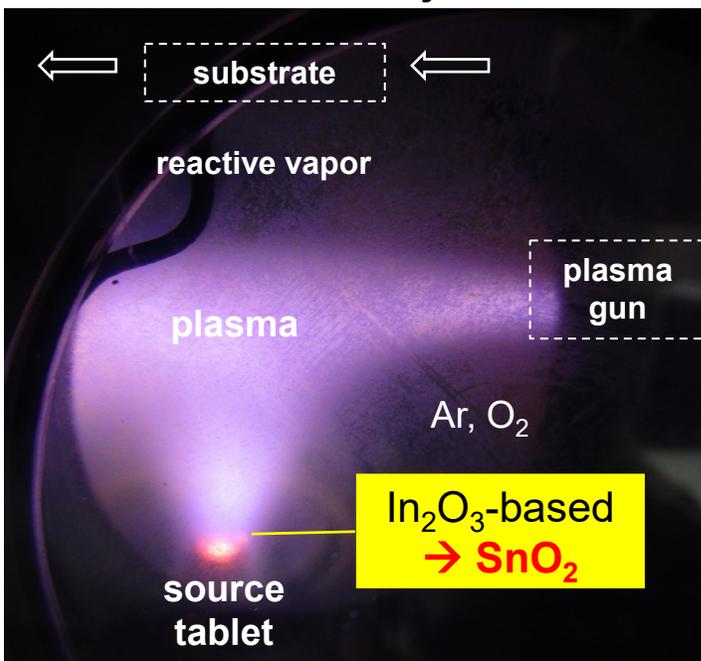
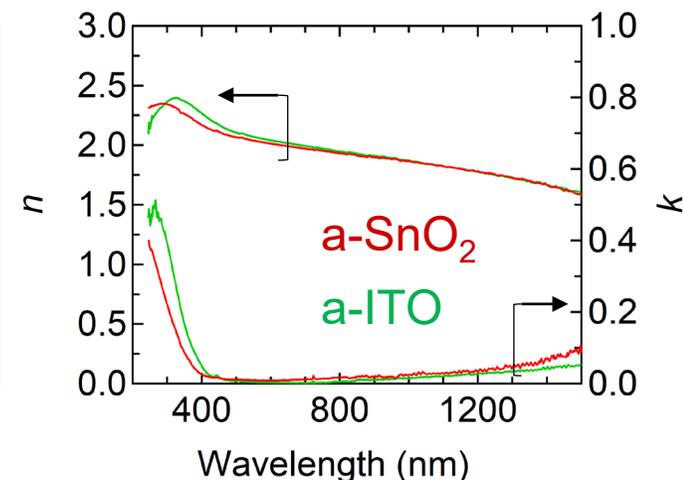


Y. Li, H. Sai, T. Matsui, Z. Xu, V. H. Nguyen,
Y. Kurokawa, N. Usami, *Sol. RRL*, 2200707 (2022).

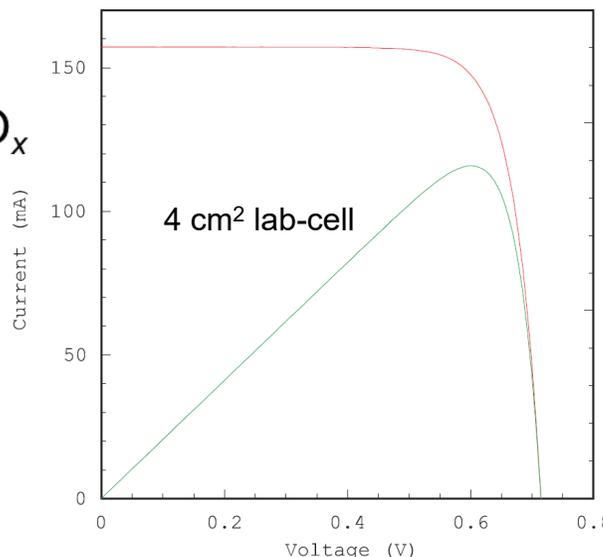
Y. Li, H. Sai, C. McDonald, Z. Xu, Y. Kurokawa, N. Usami, T. Matsui,
Adv. Mater. Interfaces 2300504 (2023).

オリジナル技術 (3) InフリーTCO製膜技術

- RPD法で製膜したアモルファスSnO₂の低抵抗率化に成功 ($\rho < 10^{-3} \Omega\text{cm}$)
- アモルファスIn₂O₃よりワイドギャップ ($E_g^{\text{opt}} \sim 3.0 \text{ eV}$)
- InフリーSHJ太陽電池で $\eta = 22.2\%$ (39.4 mAcm⁻², 0.714 V, 78.9%)を実証
- 希少金属を用いないタンデム太陽電池の実現が期待される
In-line RPD system



I-V CURVE
IEC60904-3:2019 3.993 cm² (designated area)
LACS



Date : 15 Nov 2022
Data No :D221028-3-1-1
Sample No :D221028-3-1
Repeat Times : 5

I _{sc}	157.2	mA
V _{oc}	0.714	V
P _{max}	88.6	mW
I _{pmax}	147.3	mA
V _{pmax}	0.601	V
F.F.	78.9	%
Eff (da)	22.18	%
DTemp.	25.0	°C
MTemp.	25.0	°C
DIrr.	100.0	mW/cm ²
MIrr.	99.9	mW/cm ²

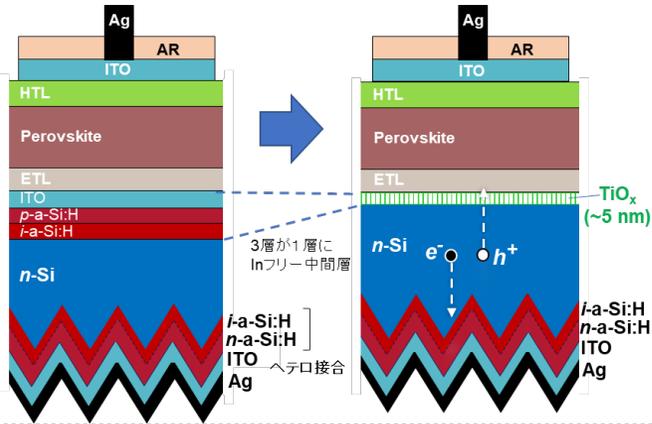
Ref. Device No
J-SY22
Cal. Val. of Ref.
130.10 [mA at 100 mW/cm²]

Scan Mode
I_{sc} to V_{oc}

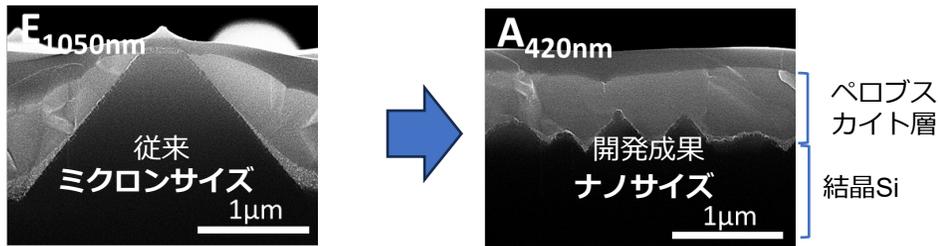
想定されるプロジェクトの概要

保有するオリジナル技術 (TRL2-3)

TiO_x all-in-one技術 (Siパッシベーション、正孔取出し、top/btm 電荷交換)



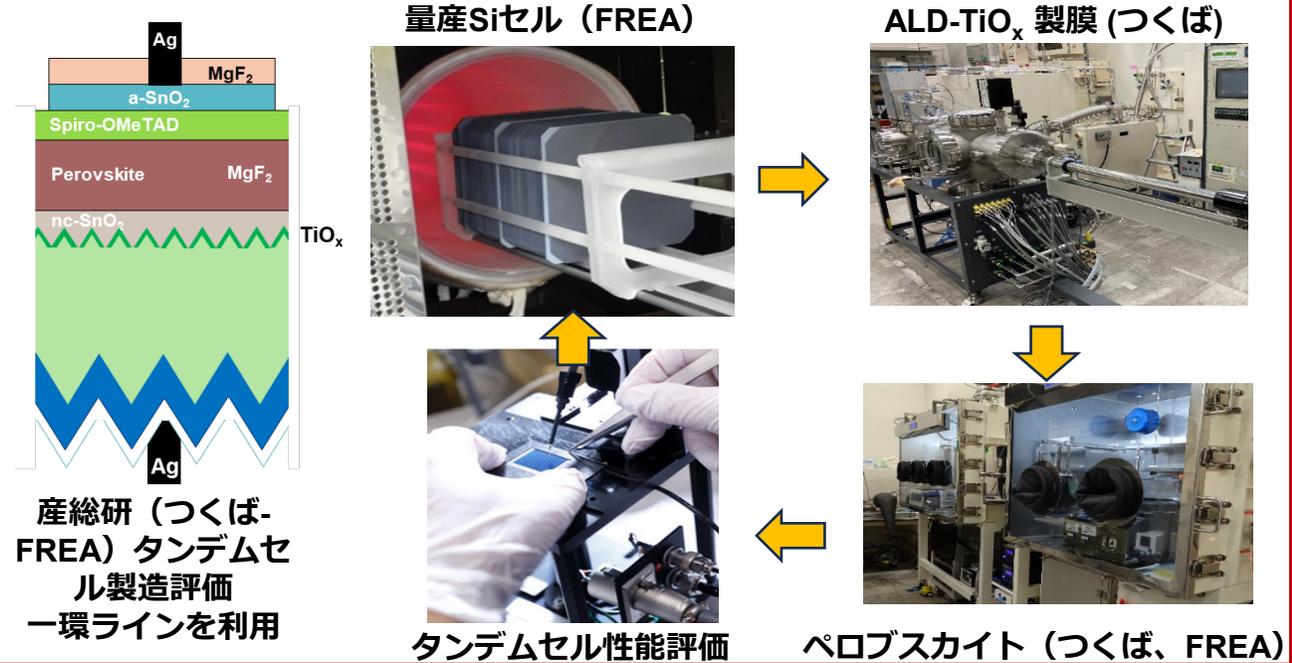
ペロブスカイト塗布可能なナノスケールSiテクスチャ形成技術



Inフリー透明電極 (a-SnO₂) 製膜技術



量産Siセルを用いた革新デバイス実証 (TRL3-4) (2025-2028)



他のNEDO-PJ

高安定化
高効率化
連続製膜技術

実用サイズ実証 (2028-2030)

モジュール信頼性試験、パイロット設備導入 (2030-2035)

社会実装 (2035-2040)

- PERCセル片側の誘電体膜を TiO_x に置換える新規プロセス技術開発
- トップ／ボトムセル界面におけるパワーロス低減 (V_{oc} 向上)
- ナノスケールTEXのサイズ制御・プロセス再現性の向上とPERCセルへの適用
- ペロブスカイトトップセルに非インジウムTCO ($a\text{-SnO}_2$) を形成する技術開発
- ペロブスカイト太陽電池の高性能化技術、寄生吸収ロス低減技術の開発

上記研究課題の解決に向け、産総研と民間企業、大学と連携して研究開発を実施する。

想定されるアウトカム

- 低コストなトップ、ボトムセルを利用しつつ最小限の工数で製造可能なタンデム太陽電池の実現につながり、タンデムのボトルネックとなるコスト低減（W/円）を図ることができる。
- 量産Si太陽電池の利用や脱In化により、資源制約・調達リスクを低減したタンデム太陽電池の製造が可能になる（脱In技術は一般的なPVSK/SHJタンデムにも展開可能）。さらに、タンデム太陽電池はSi太陽電池よりも電流が半減するため、Agの消費を減らせる可能性がある。
- 現在の住宅やメガソーラーで使用している既存PVパネルをより高効率なタンデム型PVパネルに置換えることができる。既存の設備を利用することで設置制約を受けないPVパネルの普及促進が可能になる。