NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025　（分野：太陽光発電）
発表No.：1-5-3

太陽光発電主力電源化推進技術開発/太陽光発電の新市場創造技術開発/フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）

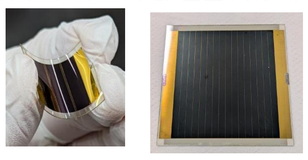
超軽量ペロブスカイト系太陽電池の研究開発

団体名：東京大学、電気通信大学、東京都市大学

■事業目的：強度等の制約で重量のあるパネルを設置できない屋根に市場を拡大するため、従来の太陽電池に匹敵する発電性能を有し、軽量かつ屋根の形状に適合して設置可能な、超軽量太陽電池を開発する。ペロブスカイト太陽電池の潜在力は極めて高いが、大面積モジュールでのさらなる耐久性向上と高効率化が必須である。本事業では、フィルム基板を用いたペロブスカイト太陽電池の変換効率向上と耐久性向上に向けた研究開発を実施するとともに、プロジェクトの後半ではタンデム型ペロブスカイト太陽電池の技術開発に注力した。

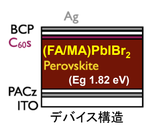
■目標：中間目標はフィルム基板小面積セル(単接合)で変換効率23%等、最終目標はペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池小面積セルで変換効率30%、フレキシブルな超軽量ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池小面積セルで変換効率35%。事業期間前半と後半の実施項目および目標の対応関係は右表の通り。

プロジェクト中間目標と最終目標

開発項目A 材料技術と製造技術の開発	中間目標 (2022年度末)	開発項目B タンデム太陽電池の開発	最終目標 (2024年度末)
①デバイス性能向上に向けた新規ペロブスカイト材料開発	フィルム基板小面積セル効率23%を与える材料の開発	（単セルの開発はグリーンイノベーション基金事業へ移行） 	
②低温プロセスPSC効率向上に向けた材料開発	140℃以下プロセスのガラス基板小面積セル効率23%		
③逆構造型PSCの性能向上	逆構造ガラス基板小面積セル効率23%		
④大面積フィルムに適用可能な製膜技術開発	フィルム基板小面積セル効率23%与える製膜技術確立		
⑤トップセル用ワイドギャップペロブスカイト材料開発	透明対極トップセル用デバイスでVoc 1.4V	①ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池の高性能化	
⑥低温プロセスによるトップセルの性能向上	材料Eg 1.8-1.9eVのガラス基板デバイスでVoc 1.4V効率15%	(1)ワイドギャップペロブスカイト逆構造トップセルの高性能化	材料Eg 1.8-1.9eVの超軽量小面積セルで、Voc 1.4V、効率15%
⑦ボトムセル用ナローギャップペロブスカイト材料の開発	ボトムセルでのバンドギャップ制御方法確立、Vocロス0.35V以下	(2)中間層上に作製するボトムセルの材料・プロセスの開発	タンデム太陽電池小面積セル効率30%
⑧蒸着法による製膜技術の開発	傾斜構造導入した太陽電池作製		
⑨ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池の開発	新規開発材料を用いタンデム小面積セル作製	(3)ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池ミニモジュールの作製	ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池ミニモジュール効率24%
		②貼り合わせ法によるタンデム太陽電池プロセス開発	貼り合わせペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム効率24%
⑩新規トンネル接合層と軽量フレキシブル結晶系太陽電池の研究開発	5cm角グラフェントンネル接合層で透過率85%、シート抵抗300Ω/□。 薄型フレキシブル結晶Siセル効率20%	③超軽量高効率ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池の開発	フレキシブル超軽量ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池セル効率35%

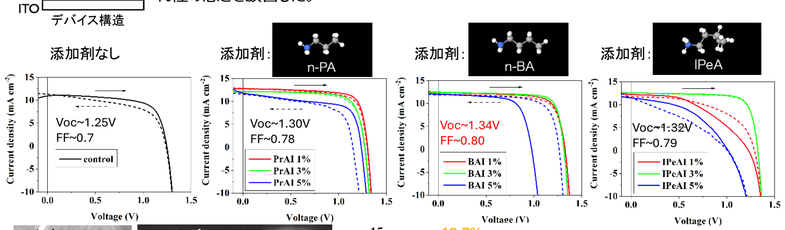
①ペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池の高性能化

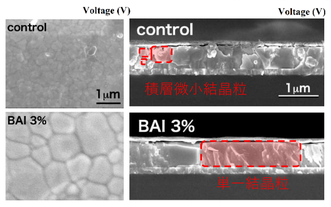
ワイドギャップペロブスカイト添加剤最適化と塗布法改良

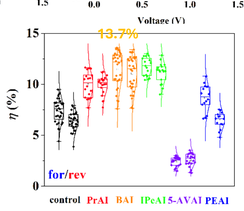


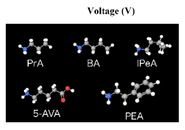
デバイス構造

逆構造セルの正孔輸送層として有望なPACz系SAM層は疎水性で、ペロブスカイト前駆体溶液を弾いてしまうため、歩留まり、再現性が低い。これを回避するため、PACzと添加剤をペロブスカイト溶液と纏めて調製し、正孔輸送層とペロブスカイト層を同時に製膜することで、濡れ性の悪さを改善した。



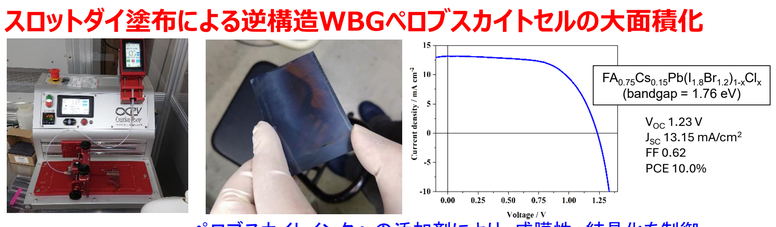


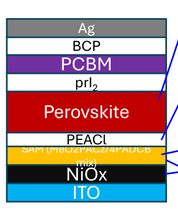




添加剤の構造と添加量の最適化により、変換効率が13.7%まで向上した。

スロットダイ塗布による逆構造WBGペロブスカイトセルの大面積化

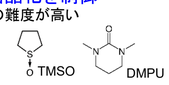




ペロブスカイトインクへの添加剤により、成膜性、結晶化を制御

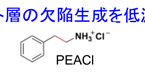
溶解度の低いWBGペロブスカイトは、乾燥時の結晶化制御の難度が高い

⇨インクの粘性や蒸発速度を制御するために、DMPUやTMSOなど高沸点、配位性溶媒を微量添加し、結晶化速度を制御することで、高品質ペロブスカイト膜を作成



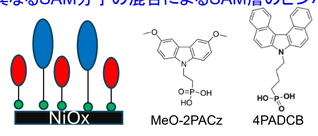
PEAIによる濡れ性の改善により、ペロブスカイト層の欠陥生成を低減

SAM表面は疎水性のため、そのままではペロブスカイトインクが弾かれやすい

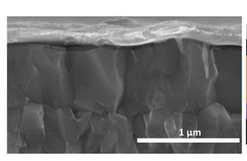


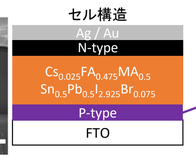
サイズの異なるSAM分子の混合によるSAM層のピンホールの低減

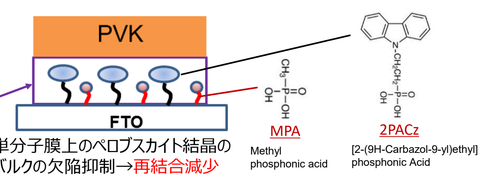
NiOx/SAMの2層構造によるHTLのピンホールの低減



正孔輸送層改良によるナローギャップペロブスカイトセルの性能向上

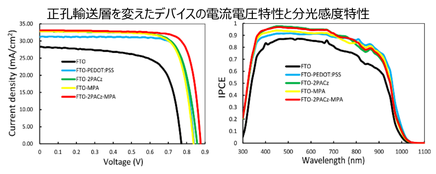






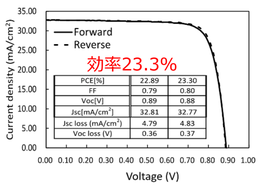
単分子膜上のペロブスカイト結晶のバルクの欠陥抑制→再結合減少

正孔輸送層を変えたデバイスの電流電圧特性と分光感度特性

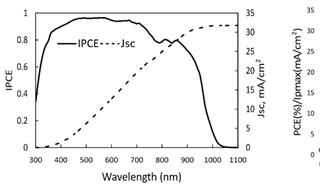


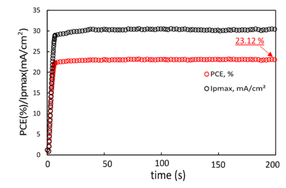
正孔輸送層を変えたデバイスの性能

	FTO	FTO-PEDOT:PSS	FTO-2PACz	FTO-MPA	FTO-2PACz-MPA
PCE [%]	15.11	21.37	21.39	21.08	23.23
FF	0.69	0.79	0.76	0.77	0.80
V_{oc} [V]	0.77	0.84	0.86	0.84	0.88
J_{sc} [mA/cm^2]	28.30	32.12	32.83	32.75	33.13

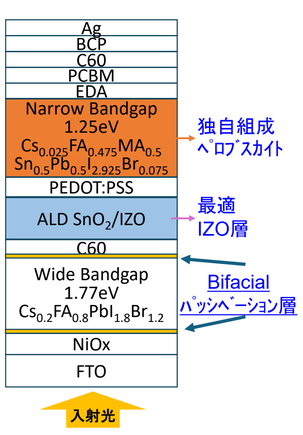


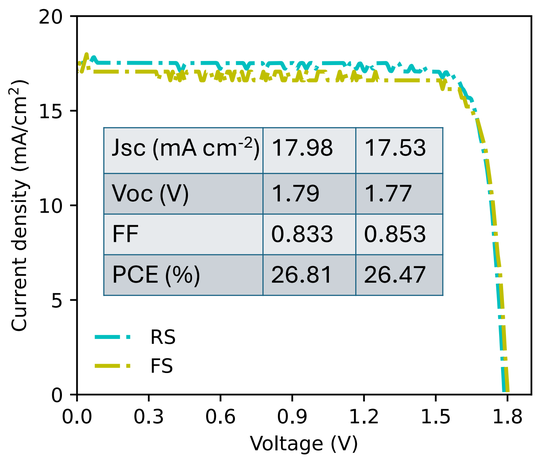
PCE[%]	22.89	23.30
FF	0.79	0.80
Voc[V]	0.89	0.88
Jsc[mA/cm^2]	32.81	32.77
Jsc loss (mA/cm^2)	4.79	4.83
Voc loss (V)	0.36	0.37





作製したペロブスカイト/ペロブスカイトタンデム太陽電池の特性





	RS	FS
Jsc (mA cm^{-2})	17.98	17.53
Voc (V)	1.79	1.77
FF	0.833	0.853
PCE (%)	26.81	26.47

これまでに開発したボトムセル用ナローギャップペロブスカイト材料を用い、トップセル側のペロブスカイト層上下にパッシベーション層を設けることにより、２接合２端子タンデム太陽電池を試作、効率26.8%

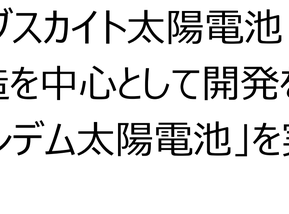
②貼り合わせ法によるタンデム太陽電池プロセス開発

トンネル接合層としてのグラフェン膜の性能向上

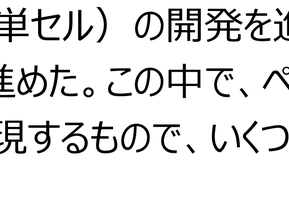
P型半導体のMoOxにｸﾞﾗﾌｪﾝから電子が移動することでｸﾞﾗﾌｪﾝは正孔ﾄﾞｰﾌﾟされキャリア濃度が増加しシート抵抗値が低下。MoOxを非晶質から結晶に変化させて仕事関数差を調整することで、ｸﾞﾗﾌｪﾝからの電子移動量を制御し、ﾄﾞｰﾌﾟ量の最適化が可能

MoOx/グラフェン界面でキャリア移動

	透過率(%) @950nm	シート抵抗 (Ω/□)
転写直後	86.2	116.0
正孔ﾄﾞｰﾌﾟ	84.2	30.7
正孔ﾄﾞｰﾌﾟ +350°C加熱	86.2	41.4

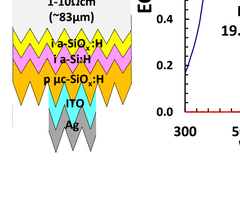


MoOx(350nm)のXRD回折ﾋﾟｰｸ

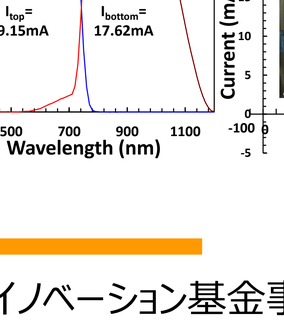


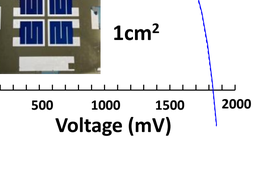
アニール温度とグラフェンのキャリア密度、シート抵抗値の相関

順構造トップセルと逆構造ボトムセルの分光タンデム評価

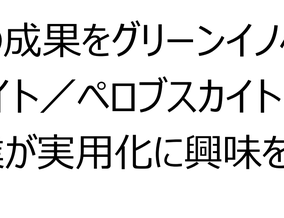


ナローギャップペロブスカイトで実績のある逆構造デバイス

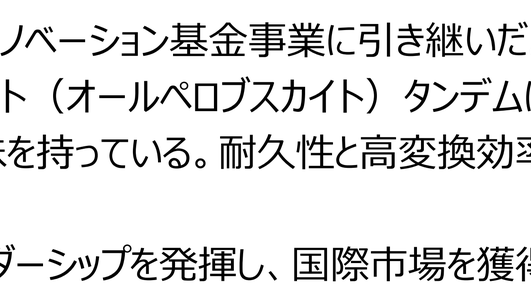




ワイドギャップペロブスカイトで実績のある順構造デバイス

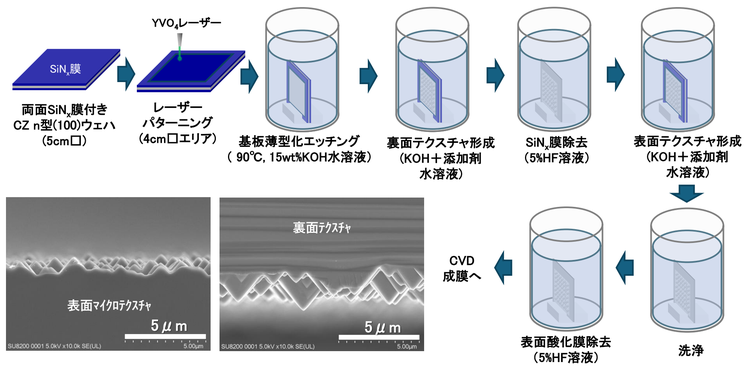


分光タンデムPCE 27.02%



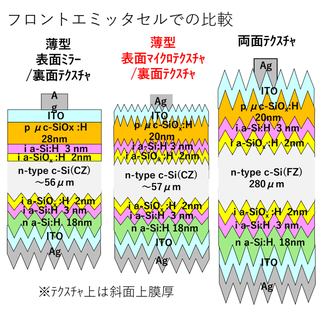
③超軽量高効率ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池の開発

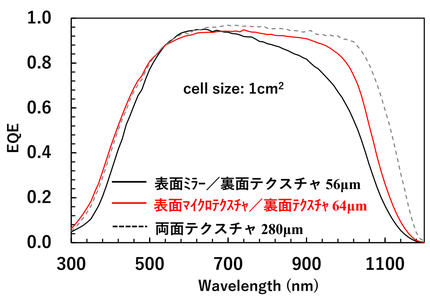
表面マイクロテクスチャ薄型Si基板の作製プロセス



光閉じ込めをしつつ、塗布ﾌﾟﾛｾｽによる積層製膜を可能とする表面マイクロテクスチャ薄型シリコン基板の作製に成功。

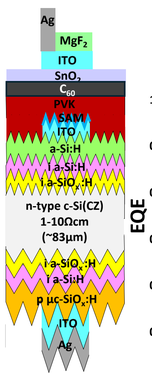
ペロブスカイト太陽電池の積層に対応した表面マイクロテクスチャ薄型Si太陽電池



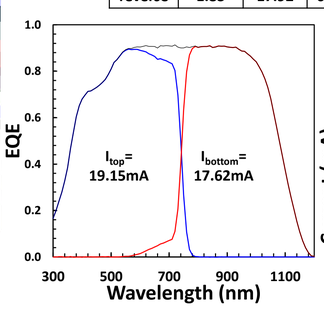


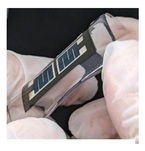
	厚み (μm)	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
薄型　表面ミラー／裏面テクスチャ	56	0.74	33.27	0.802	19.8
薄型　表面マイクロテクスチャ／裏面テクスチャ	57	0.74	35.94	0.794	21.1
両面テクスチャ	280	0.72	38.28	0.779	21.4

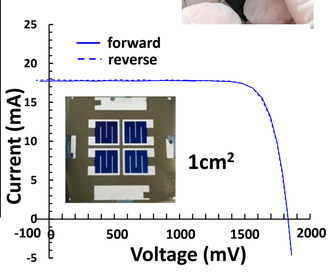
ペロブスカイト/薄型シリコンタンデム太陽電池で効率26.5%



	V_{oc} (V)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
forward	1.83	17.73	0.809	26.3
reverse	1.83	17.92	0.807	26.5







■実用化の見通し：本事業の前半では、主にフィルム基板ペロブスカイト太陽電池（単セル）の開発を進め、その成果をグリーンイノベーション基金事業に引き継いだ。本事業の後半では、より高い変換効率が期待されるタンデム構造を中心として開発を進めた。この中で、ペロブスカイト／ペロブスカイト（オールペロブスカイト）タンデムについては、これまで作られてこなかった「高効率軽量フレキシブルタンデム太陽電池」を実現するもので、いくつかの企業が実用化に興味を持っている。耐久性と高変換効率を両立できれば、事業化に進むことが期待される。

■課題と今後の取組：ペロブスカイト太陽電池の特性に適合するシステムを開発する必要がある。また、評価の国際標準などでリーダーシップを発揮し、国際市場を獲得していく努力が必要である。オールペロブスカイトタンデムについては、耐久性向上と変換効率向上にむけた研究開発が引き続き必要である。

連絡先：国立大学法人東京大学　　瀬川　浩司
MAIL：csegawa@g.ecc.u-Tokyo.ac.jp