

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026
プログラムNo. A1-2-07

フィルム型ペロブスカイト太陽電池実用化に向けた 材料デバイス設計・製造プロセス技術開発

契約件名 グリーンイノベーション基金事業／次世代型太陽電池の開発

発表：2026年7月22日

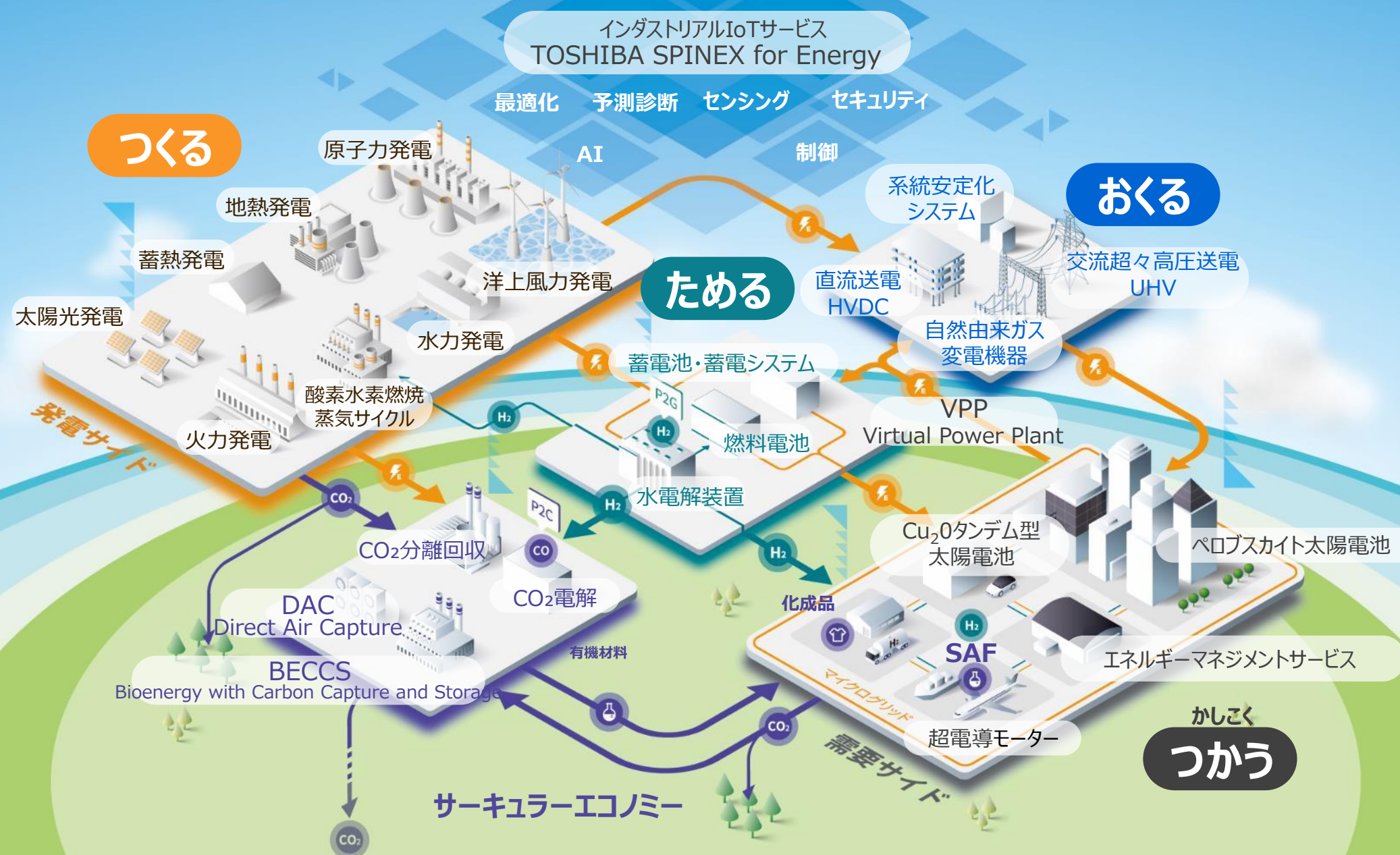
国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 高須 勲

(株)東芝、(国)東京大学、立命館大学

問い合わせ先 株式会社東芝 高須 勲 E-mail:isao.takasu.d66@toshiba.co.jp

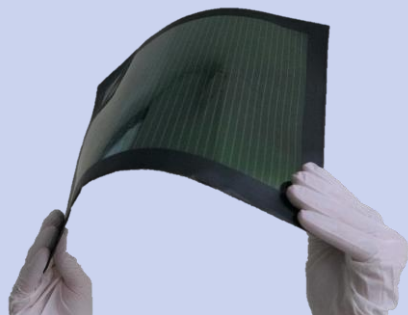
東芝のカーボンニュートラル実現に向けた取り組みの全体像



東芝の次世代太陽電池開発のビジョン

フィルム型ペロブスカイトで「再エネ主力電源化」、 Cu_2O タンデムで「運輸の電動化」の実現を目指し、PVを重要分野として開発に注力、積極的な社外発信を実施中

フィルム型ペロブスカイト太陽電池



軽量性により、太陽電池の置けないところにおく

大・中規模発電



ZEB(窓、壁 等)



工場・体育館

低荷重建造物(屋根 等)

Cu_2O (亜酸化銅)タンデム型太陽電池



少ない面積で大電力

電動モビリティ等

グリーンモビリティ



ソーラーカー



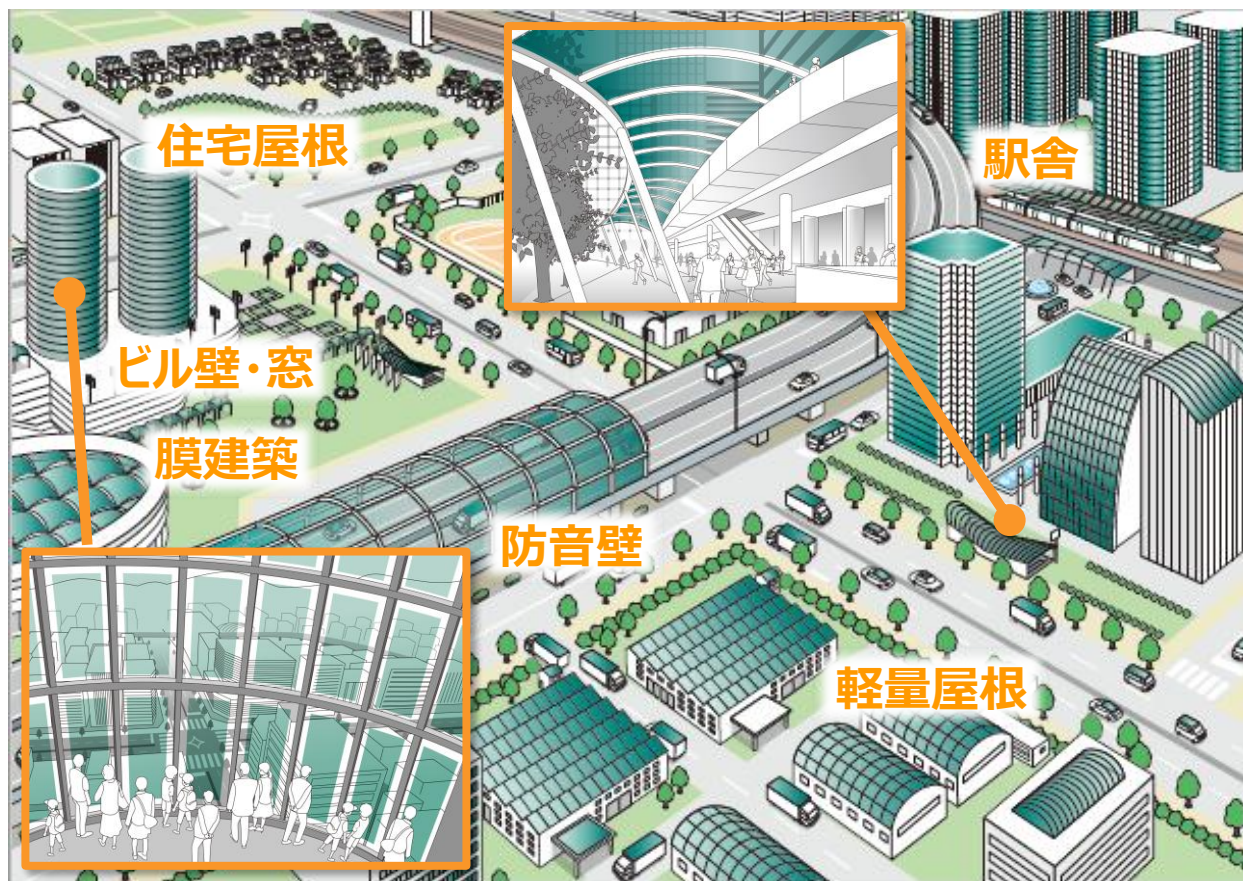
電車



HAPS
(High Altitude Platform Station)

ペロブスカイト太陽電池事業のビジョン

都市部などへのフィルム型太陽電池の大量設置による再エネ発電の拡大



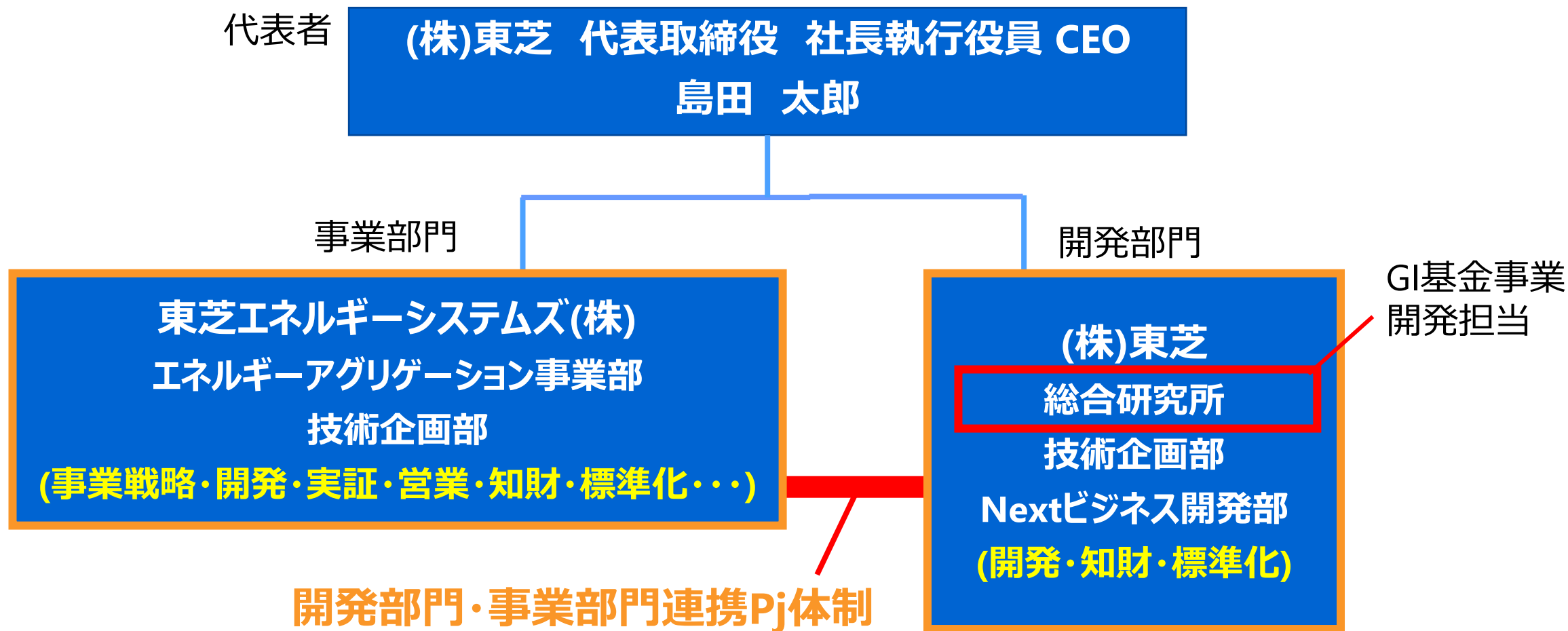
再エネを主力化するためには、**既存のSiメガソーラーでは設置場所が不足**

軽量の**フィルム型太陽電池**を都市部のビルの壁面や軽量屋根の工場等、**従来設置できなかったところに展開**
特に、RE100を目指す企業の採用などを起点にする

現在、事業部門において企業や地方自治体等からの**軽量屋根・ビル・膜建築、その他インフラ関連を中心**にヒアリングによる**ニーズ分析、実証に向けた協議**

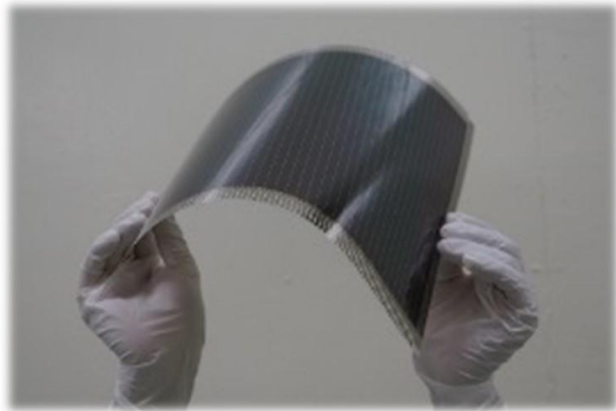
開発部門へのモジュール、システム、設置方法などの仕様、開発項目への**フィードバックを実施**

グリーンイノベーション基金事業の推進体制



開発部門・事業部門の連携Pj体制により実用化に向けた開発を推進

東芝のフィルム型ペロブスカイト太陽電池

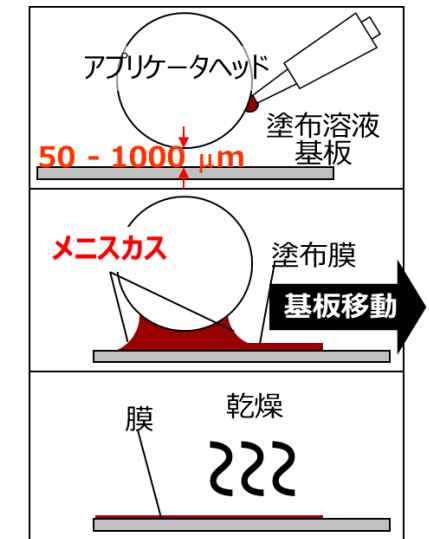
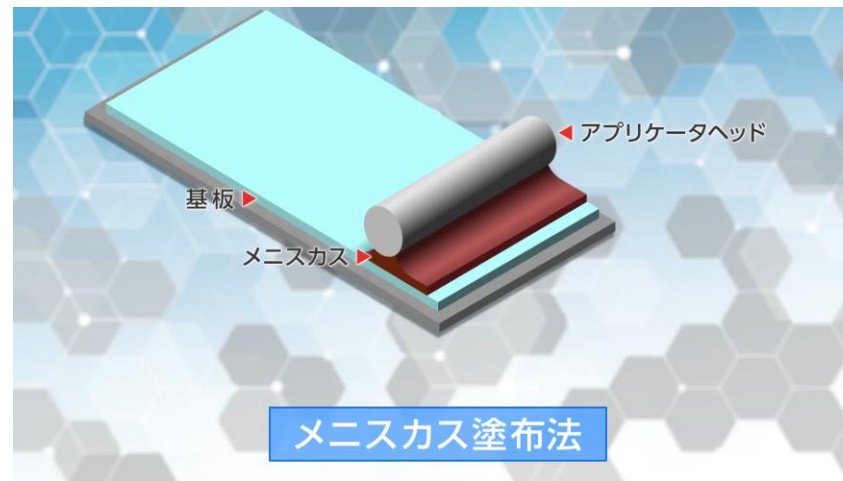


- 結晶型シリコンPVの**1/10程度の重さ**

- 曲げられる**

- 結晶シリコンを載せられない軽量屋根
 - ビルの壁面
 - 曲面物
- などへの設置が可能に

メニスカス塗布技術



大面積においても**高品質なペロブスカイト膜**を形成

従来 2 回塗布で行うことが一般的であったペロブスカイト層を
1 回塗布で行う**ワンステップメニスカス塗布法**により
大面積モジュールにおいて高い発電効率を実現

事業の進捗状況

開発目標 2025年度：**発電コスト20円/kWhを実現する要素技術の確立**

【課題と進捗】

■ 発電効率の向上

ワンステップメニスカス塗布法などのプロセス技術により、30cm角サイズモジュールで発電効率**16.6%**

■ 耐久性の向上

ペロブスカイト層の材料の組成改良などにより、**素子の耐光性、耐熱性を大幅改善**

■ 材料コストの低減

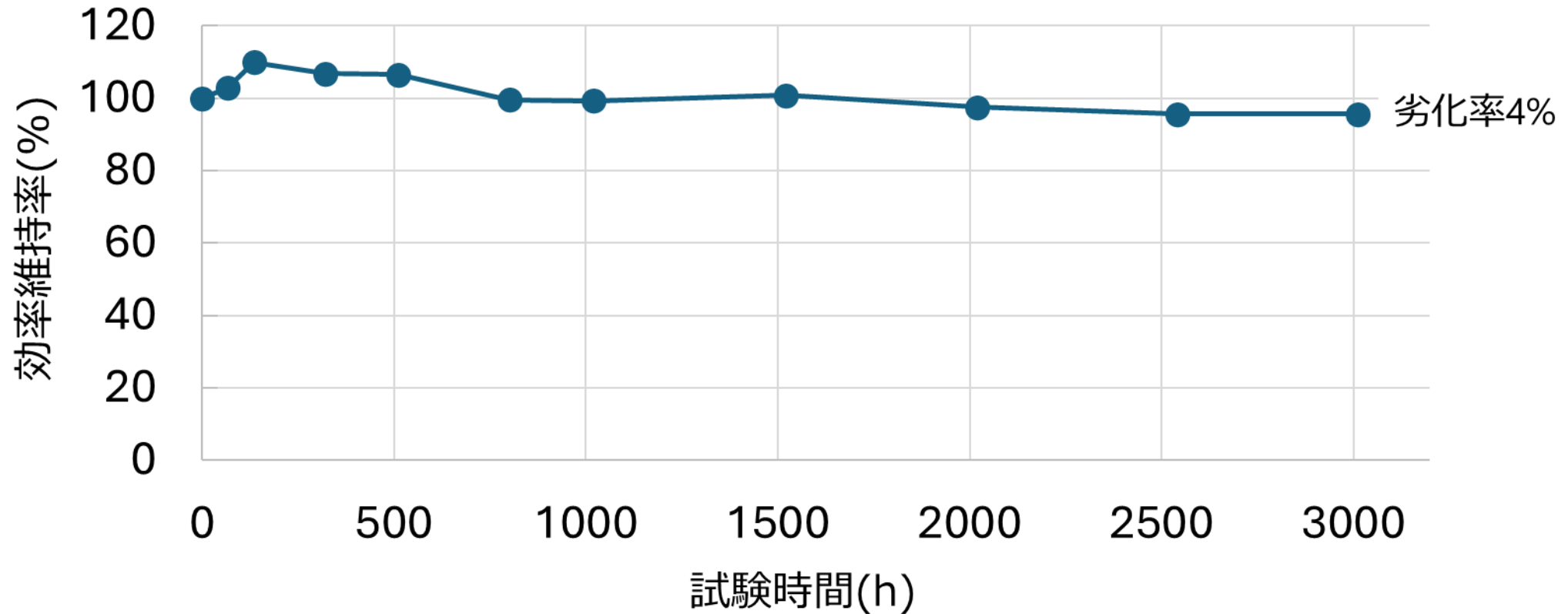
フィルム型モジュールの材料コストの最大要因となる封止材料について、
コンソーシアム内の**低コスト塗布型封止技術**の技術が進展



発電コストの支配的要因である「素子の耐久性」と「封止材料のコスト」における技術進展により
発電コスト20円/kWh以下のコスト算出を達成

フィルム基板モジュールの耐久性試験(高温高湿試験)

フィルム基板30cm角モジュールにおいて、高温高湿試験(85℃85%)を実施
2000時間以上の耐久性を確認



高温高湿試験3000時間後で出力維持 結晶Si-PV合格基準1000時間をクリア

フィルム基板モジュールの耐久性試験(屋外暴露試験)

最大出力Pmax 変化率推移



屋外暴露 積算日射量60kWh/m²で出力維持 結晶Si-PV合格基準をクリア

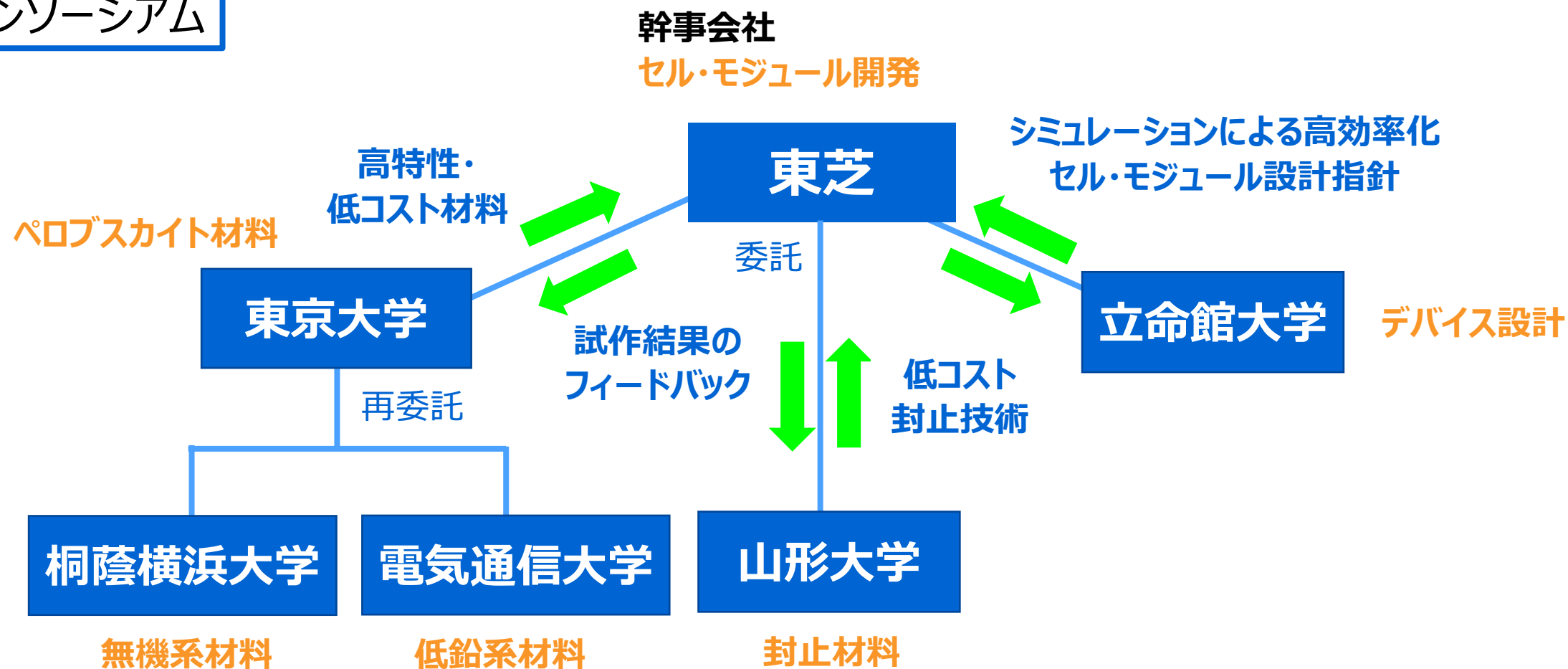
社会実装にむけた実証実験

- 東京都港湾局による2024年8月28日からの臨海副都心における室内環境での有効性の検証事業に対し、フィルム型ペロブスカイト太陽電池を提供
- 飯田グループホールディングス株式会社へフィルム型ペロブスカイト太陽電池を提供
大阪・関西万博 飯田グループ×大阪公立大学 共同出展館にて展示
- 建材一体型太陽光発電内窓の実装検証（東京レポートセンター）実施。東京都港湾局、東芝エネルギーシステムズ(株)、YKK AP(株)、(株)関電工、(株)東京レポートセンター、連携

**建材メーカ、電気サブコン、事業者等と連携し複数試験を実施
屋内光での発電、壁面設置の有効性、施工性確認等を検証
従来、太陽電池を設置していない場所での技術確立を推進**

産学連携の推進体制

コンソーシアム



産学連携活用によるコスト低減、理論解析による開発の推進

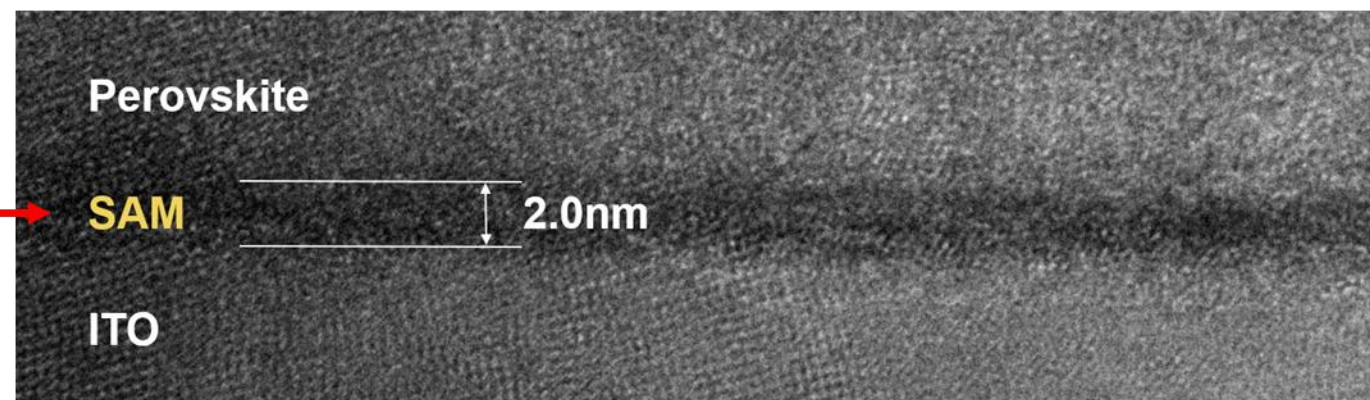
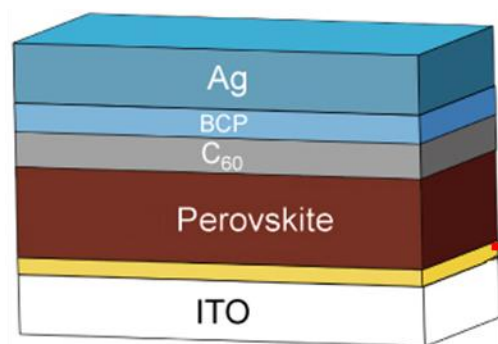
東京大学グループ：プロジェクト目標に対する状況

実施項目	目標	進捗	達成度
①フィルム基板逆構造型セルの高効率化・高耐久化に向けた材料開発	耐久性を有するミニセルで変換効率18%（2023年度末）、21%（2025年度末）	低温プロセスガラス基板逆構造型ミニセルの正孔輸送層（SAM）の改良に加え、CsFAMA系ペロブスカイト層と電子輸送層の間の接合層の改良で外部機関評価効率26.5%。	◎
②フィルム基板逆構造型セルの低コスト製造に向けたペロブスカイトナノ粒子開発	ペロブスカイトナノ粒子プロセスのミニセルで変換効率21%	逆構造型セルに向けたFAPbI ₃ ナノ粒子を作成し、高分解能TEM観察でα相であることを確認。	◎
③鉛比率低減ペロブスカイトの高性能化（電通大）	SnPbペロブスカイトを用いたガラス基板セルで、変換効率25%、85℃1000時間で効率5%減の耐久性	SnPbペロブスカイトにGeドーピングし高効率・高耐久化、ALD SnOx層導入し高耐久化、N ₂ 下85℃1000時間で効率5%減の耐久性達成。ETLやSAMの改良、パッシベーションで効率23.3%、イオン拡散ブロッキング層導入で耐熱性向上。カルバゾールフリーSAMを用い耐光性向上。	◎
④フィルム型太陽電池用の低温省エネ製造可能な無機材料の開発（桐蔭横浜大）	フィルム型無機ペロブスカイト太陽電池における高性能化と高信頼性化	無機ペロブスカイトCsPbI _{2.25} Br _{0.75} 結晶の配向条件を決定。無機ペロブスカイトを低温作製できる原料・条件を特定。NiOxナノ粒子を再現よく合成し、これとSAMを用いセル効率23.6%。	◎

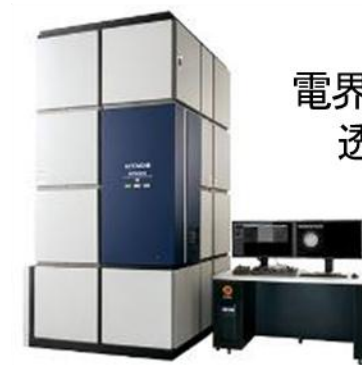
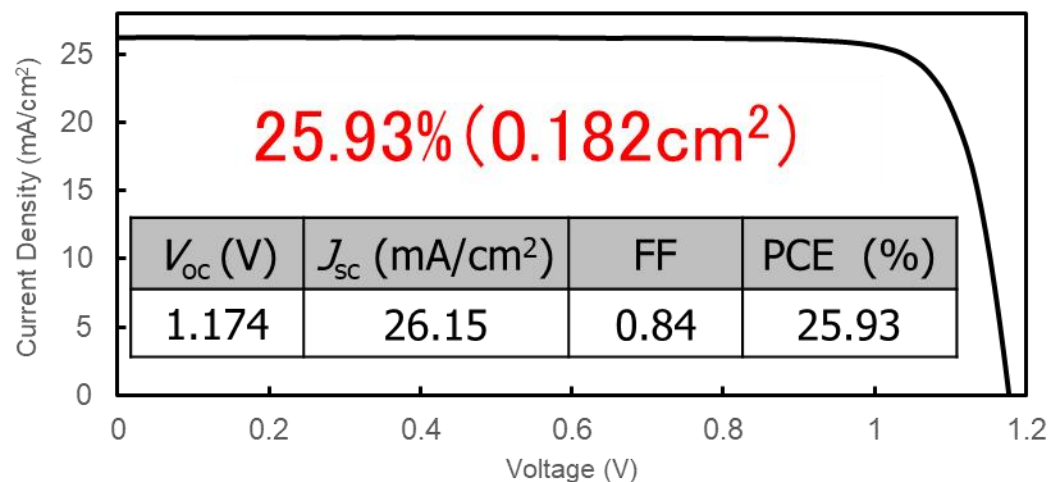
①逆構造型セルの高効率化・高耐久化に向けた材料開発

正孔輸送層にSAMを用いた逆構造デバイス（ガラス基板、ミニセル）の最適化

均一な超薄膜SAM構造の形成をTEM測定で直接確認（世界初）

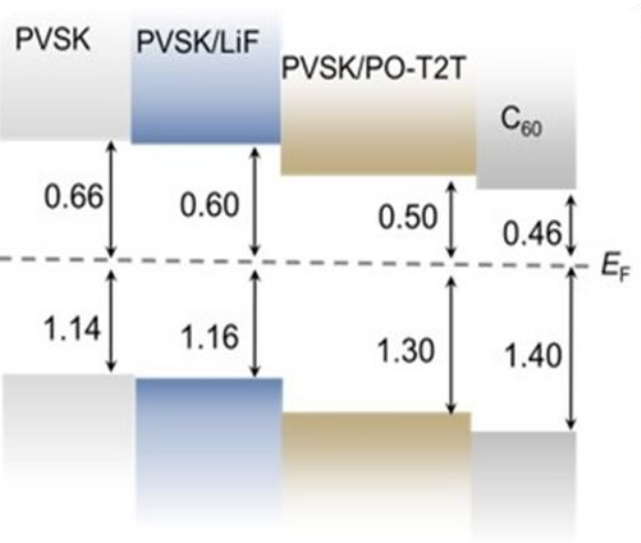
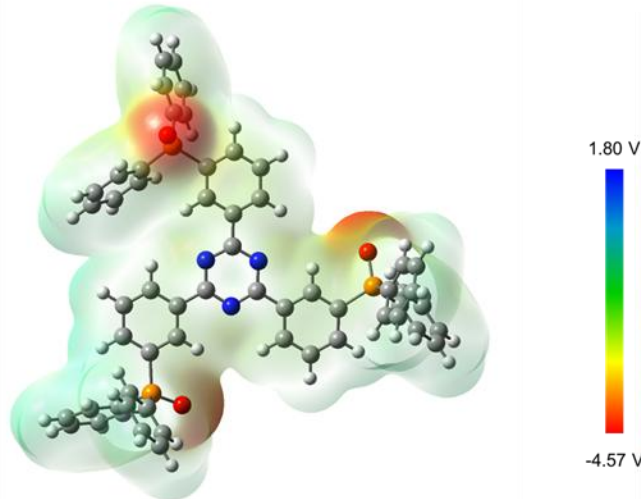


均一な超薄膜SAM構造の形成で、23.5%から25.93%に変換効率向上



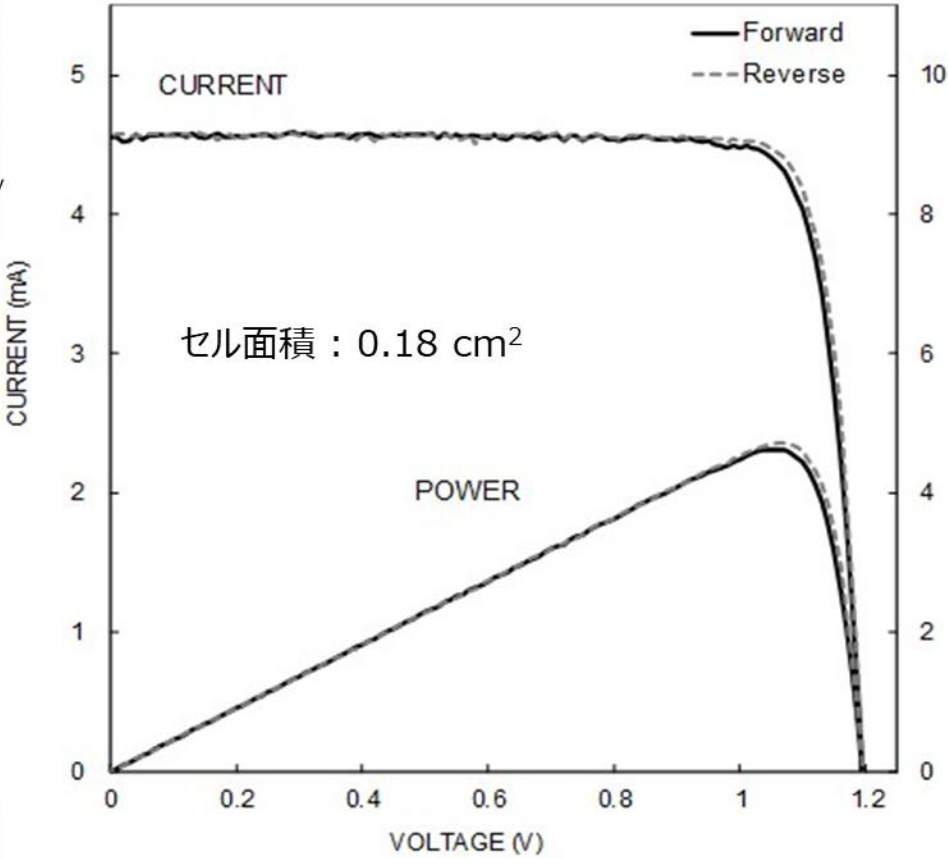
電界放出型
透過電子顕微鏡
(リース)

①逆構造型セルの高効率化・高耐久化に向けた材料開発 変換効率26.5%達成



$\text{Cs}_{0.05}\text{FA}_{0.85}\text{MA}_{0.10}\text{PbI}_3$
I-V CURVE

IEC60904-1Ed.3.0 YSS-200AA
0.1784 cm² (Designated area)
Scan rate: 0.2V/sec, Type: Inverted perovskite solar cell



Date : Nov 13, 2025
Device type : Perovskite Solar Cell
ペロブスカイト太陽電池
Manufacturer : Segawa-Lab/RCAST/The University of Tokyo
東京大学 先端科学技術研究センター
瀬川研究室
Sample No. : 11-1
Repeat Times. : 1

	Forward	Reverse	
Isc	4.550	4.560	[mA]
Voc	1.194	1.196	[V]
Pmax	4.624	4.720	[mW]
Ipmax	4.404	4.411	[mA]
Vpmax	1.050	1.070	[V]
F.F.	85.1	86.5	[%]
Eff.(Da)	25.9	26.5	[%]
M.Temp	25.0	25.0	[°C]
D Irr.	100.0	100.0	[mW/cm²]
M Irr.	100.0	100.0	[mW/cm²]

Ref. Device No. JETp-A01W 1102-5
Cal. Val. of Ref. 44.94
[mA at 100mW/cm²]

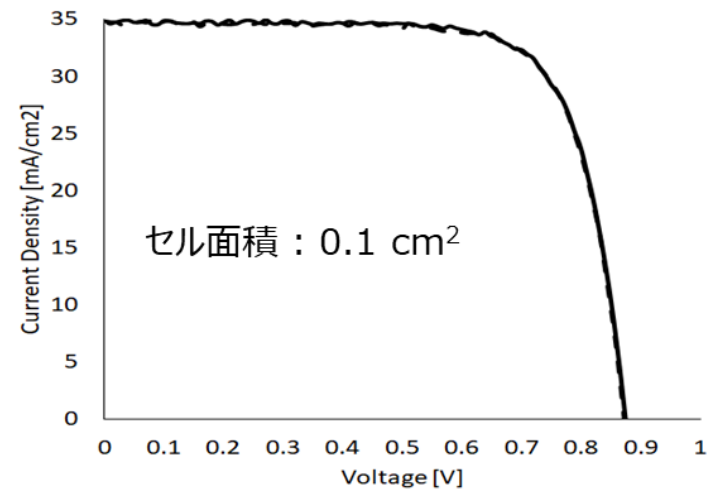
2. 研究開発計画／（2）研究開発内容（これまでの取組）の詳細

③鉛比率低減ペロブスカイトの高性能化
高耐久性ALDSnOx層を有するSnPbペロブスカイト太陽電池で世界最高レベルの効率

Ag	Ag
BCP	BCP
C60	C60
ALD SnOx	ALD SnOx
PCBM	PCBM : Y6
EDA	EDA
Ge doped Cs _{0.025} MA _{0.5} FA _{0.475} Sn _{0.5} Pb _{0.5} I _{2.975} Br _{0.025}	Ge doped Cs _{0.025} MA _{0.5} FA _{0.475} Sn _{0.5} Pb _{0.5} I _{2.975} Br _{0.025}
MeO2PACz	MeO2PACz
FTO	FTO
Glass	Glass



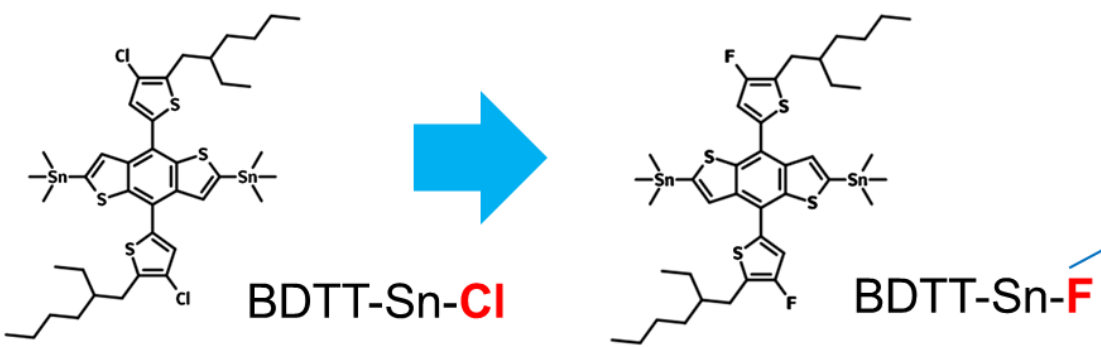
Ag
BCP
ETL: C60 (20 nm)
ALD SnOx (20 nm)
Passivation: PCBM
EDA
GeI ₂ doped Rb _{0.04} Cs _{0.025} FA _{0.5} MA _{0.435} Sn _{0.5} Pb _{0.5} I _{2.975} Br _{0.025}
HTL: MeO2PACz + 2PACz
FTO
Glass



【前回】ETL改良で耐熱性向上、効率21.0%

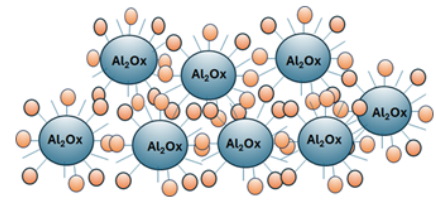
【今回】ETL側パッシベーションとAサイト最適化、および混合SAM HTL で効率 **22.7%**

パッシベーションによる耐熱性向上



EDA
Ge doped Cs _{0.025} FA _{0.475} MA _{0.5} Sn _{0.5} Pb _{0.5} I _{2.975} Br _{0.025}
BDTT-Sn-F
HTL
FTO
Glass

【今回】SnPb-PVK層のパッシベーション化合物をCl化物からF化物に変え、Al₂O₃/SAM 混合膜にすることで高温耐久性が大幅に向上



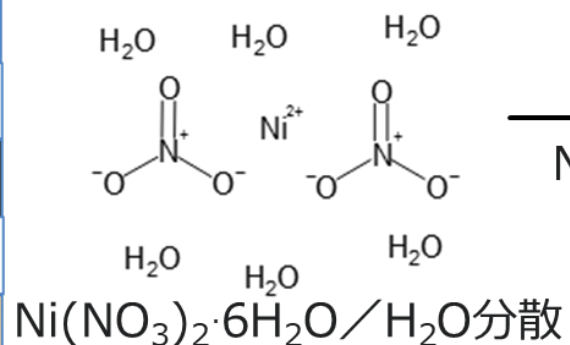
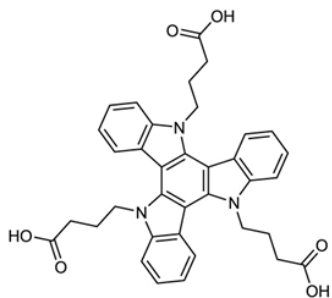
Sn⁴⁺
1.5%
↓ 85°C **150h**
3.8%

2. 研究開発計画／（2）研究開発内容（これまでの取組）の詳細

④フィルム型太陽電池用の低温省エネ製造可能な無機材料の開発 p型半導体ナノ粒子(NiOx)の合成とその応用

Ag
BCP(wet)
PCBM(wet)
PEAI(wet)
Cs _{0.1} FA _{0.85} MA _{0.05} Pb(I _{0.9} Br _{0.1}) ₃
NiO(wet)/SAM
ITO

SAM構成分子

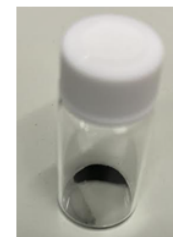


NaOH
沈殿

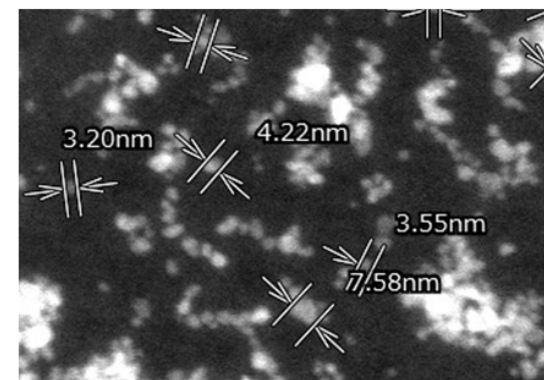


Ni(OH)₂

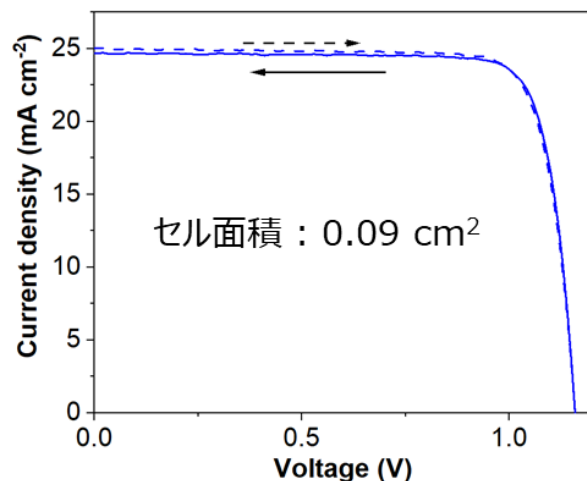
加熱
250℃



NiOx粒子



pH調整により沈殿法によりNi(OH)₂の粒形を調整し、粒子径の分布が小さい5~10 nm程度の大きさを持つNiOx粒子を合成した。

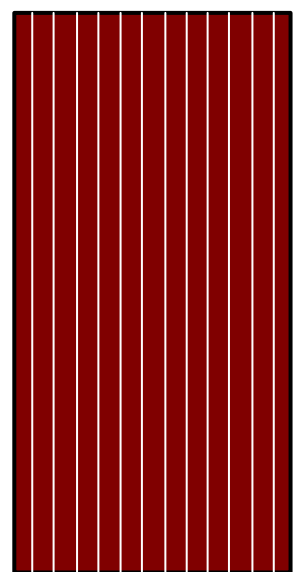


ITO上にNiOxナノ粒子、SAM(3-CATAT-C3)を塗布し、フィルム基材に対応する温度で逆構造型PVKを作製。変換効率23.6%を得た。

【背景・前提】

塗布により、集積型モジュール^{*}の面内に、セル特性分布が発生

^{*}細長のセル（ストライプセル）の多段の直列接続。



ストライプセル
（この例では縦長）

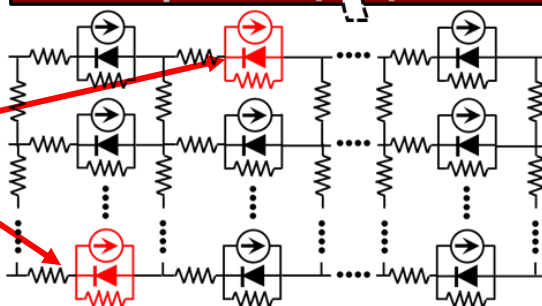
【課題】

- (1) ピンホール分布の影響
- (2) 膜厚分布の影響
- (3) P2接触抵抗分布の影響

直列接続パターンニング

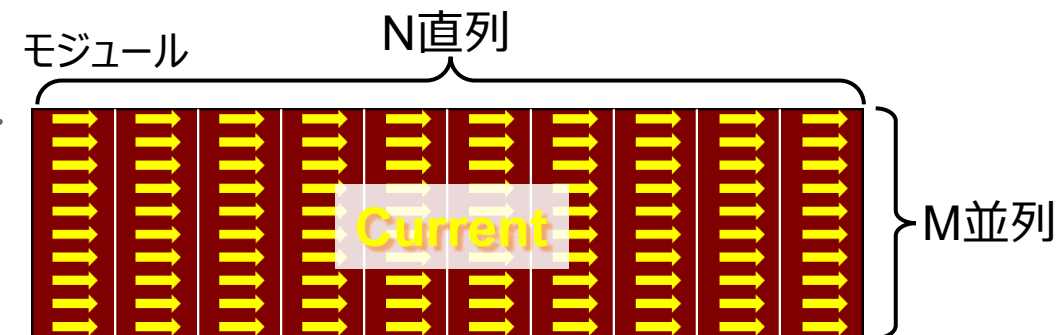


特性が異なる箇所

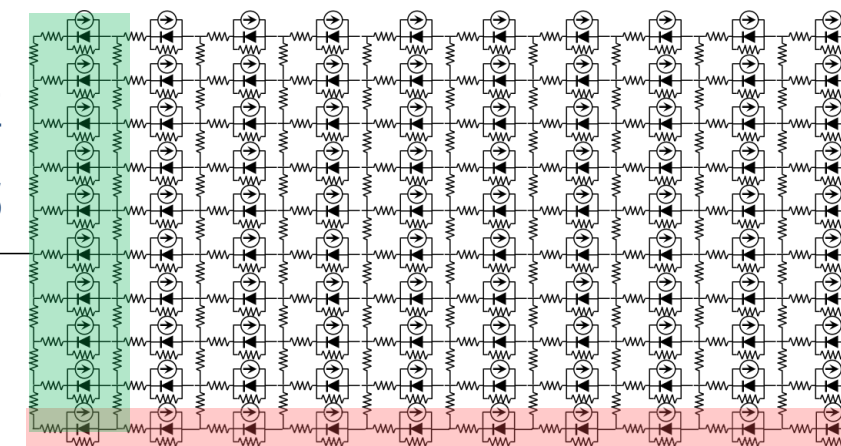


【等価回路モデル】

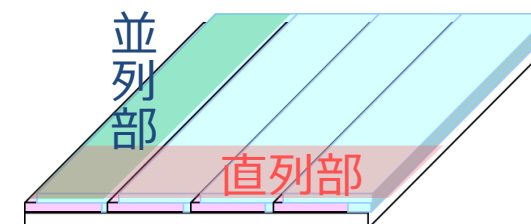
- 微小セルを並列と直列に接続し等価回路を構成
- N直列×M並列の等価回路シミュレータを開発



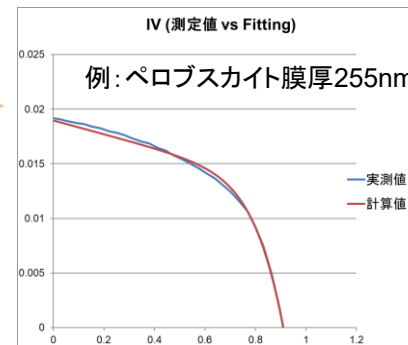
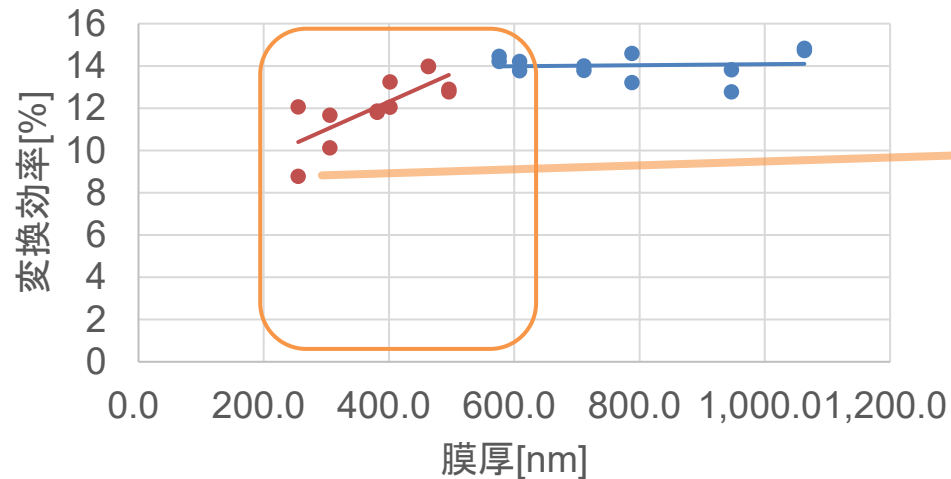
並列部



直列部



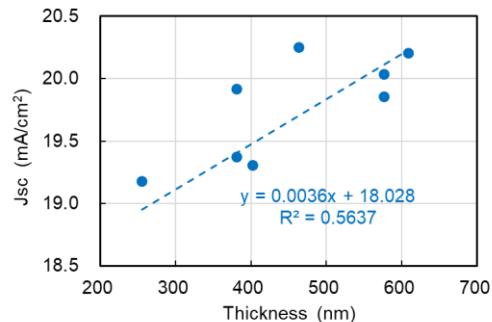
- 膜厚の異なるセルのI-V特性からダイオードパラメータを抽出
- 膜厚に対する近似式を導出し、膜厚分布におけるセル・パラメータを設定



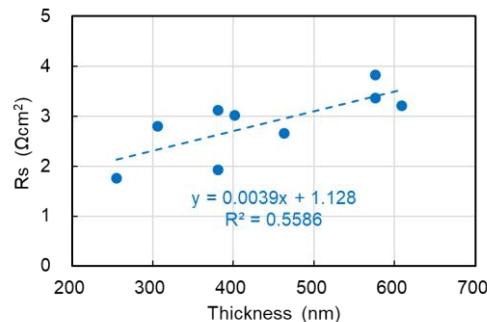
太陽電池セルの等価回路

$$J = J_{sc} - J_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + R_s J)}{nkT} \right\} - 1 \right] - \frac{V + R_s J}{R_{sh}}$$

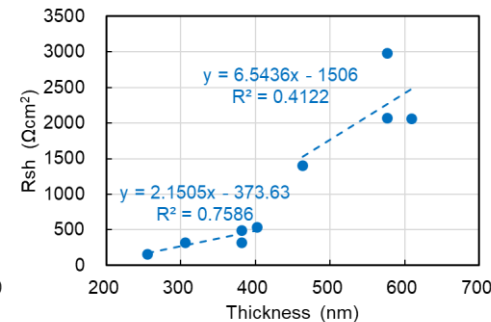
J_{sc}



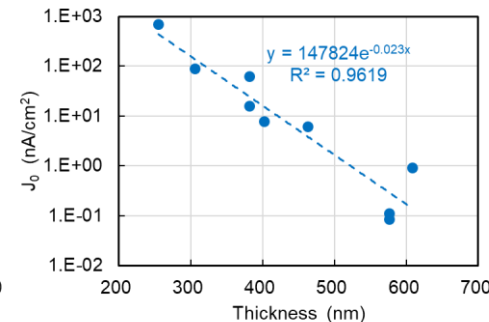
R_s



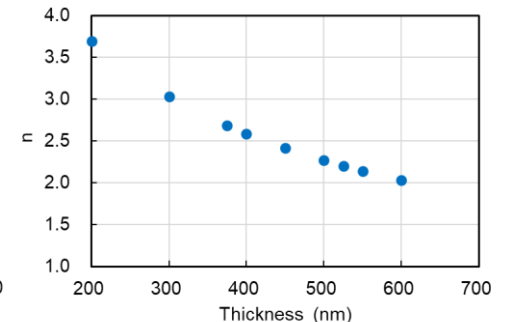
R_{sh}



J₀



n

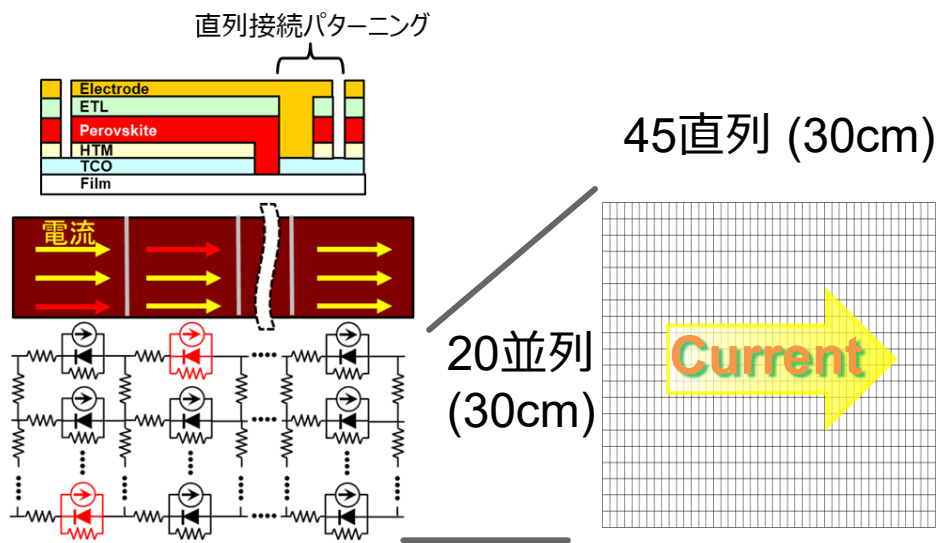


n値は、V_{oc}, J_{sc}, J₀から算出

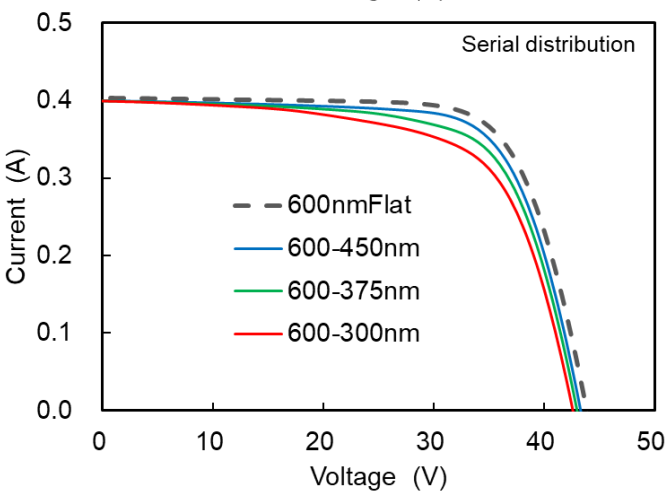
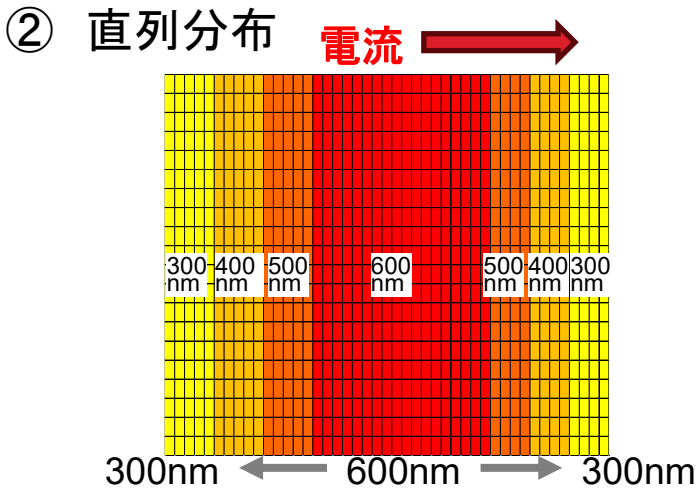
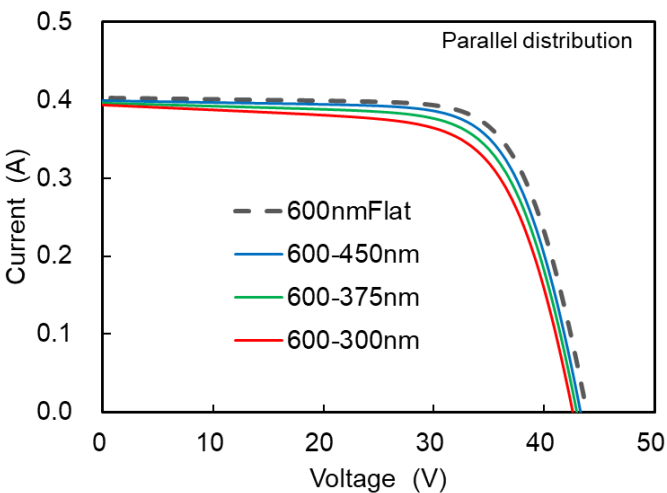
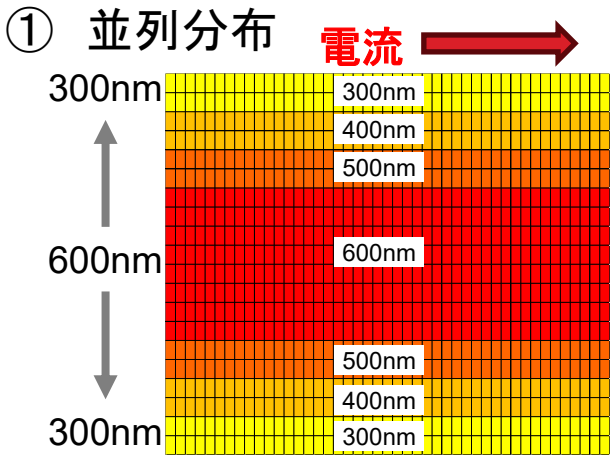
近似式を用いて各膜厚におけるセル・パラメータを設定

ペロブスカイト膜厚分布の影響

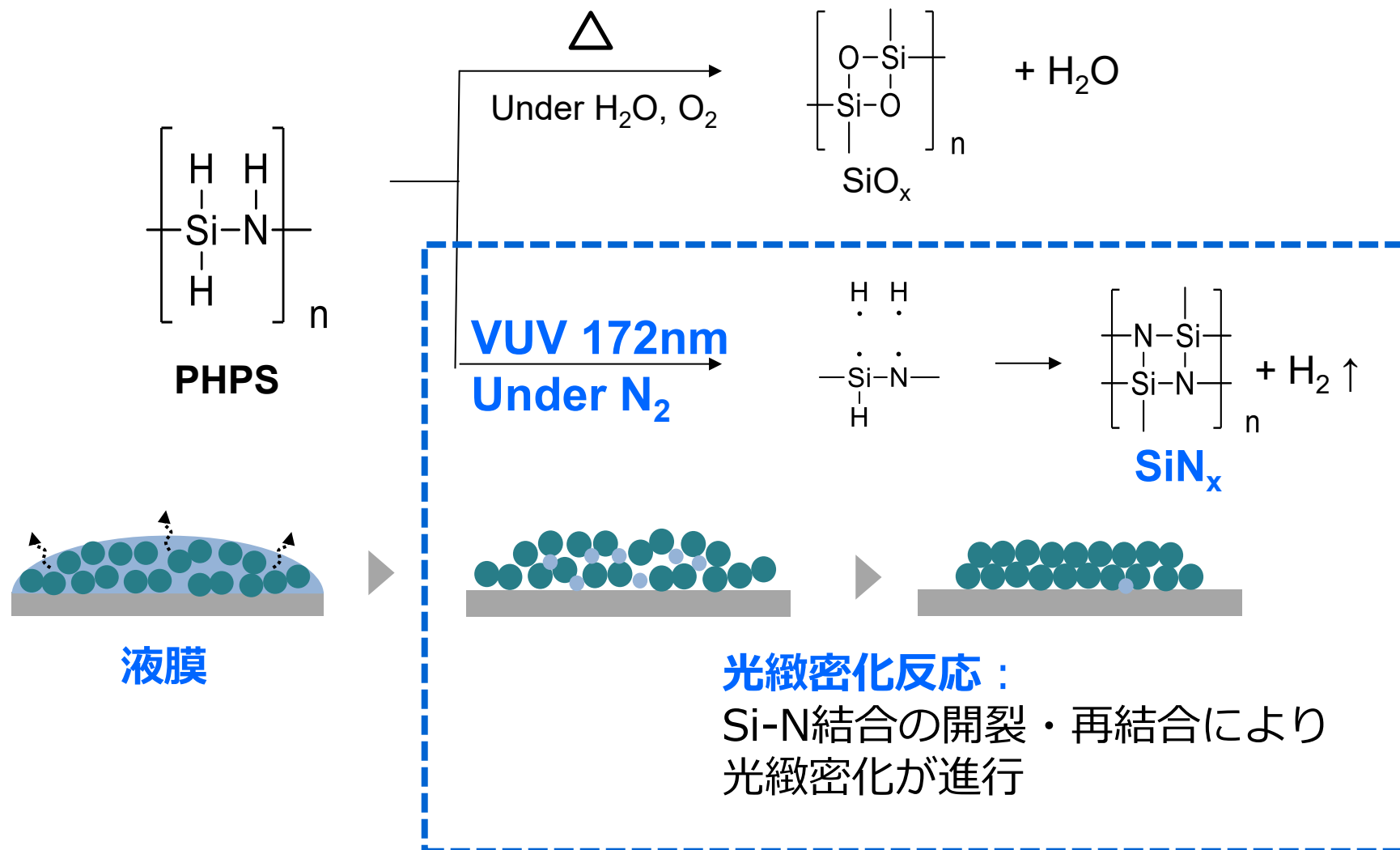
- 塗布工程に特徴的な中央から端に膜厚分布するケースで、①セルの並列方向に膜厚が分布したモデルと、②直列方向に膜厚が分布したモデルを計算【膜厚が逆分布(端が膜厚大)でも分布頻度が同じならI-V特性は変化なし】
- 600nm均一に対し、600~450, 600~375, 600~300nmに分布したモデルのモジュール特性を比較
- 並列分布の方が直列分布より影響が小さいが、両分布ともに膜厚分布600~375nmで均一膜厚に対して90%以上の効率



膜厚分布	並列分布 効率(%)	並列分布 相対値	直列分布 効率(%)	直列分布 相対値
600nmFlat	14.2	1	14.2	1
600-450nm	13.7	0.962	13.7	0.962
600-375nm	13.2	0.929	13.1	0.917
600-300nm	12.6	0.888	12.3	0.863

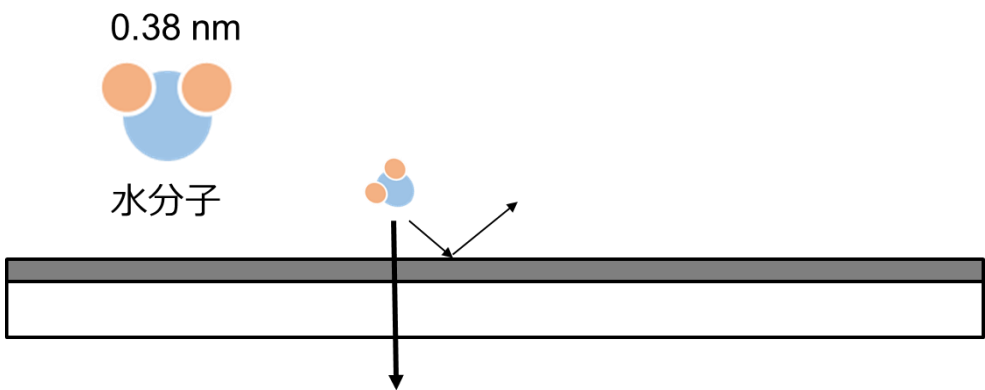


溶液プロセスによる緻密なSiN薄膜形成



封止膜の溶液プロセスと従来プロセスの比較

	塗布プロセス	従来プロセス
成膜プロセス	塗布＋光照射	真空プロセス(CVD等)
装置	安価	高価
成膜速度	速い	遅い
水蒸気の バリア性能 WVTR	開発中 10 ⁻⁴ ～10 ⁻⁵ オーダー	良い ～10 ⁻⁶ オーダー



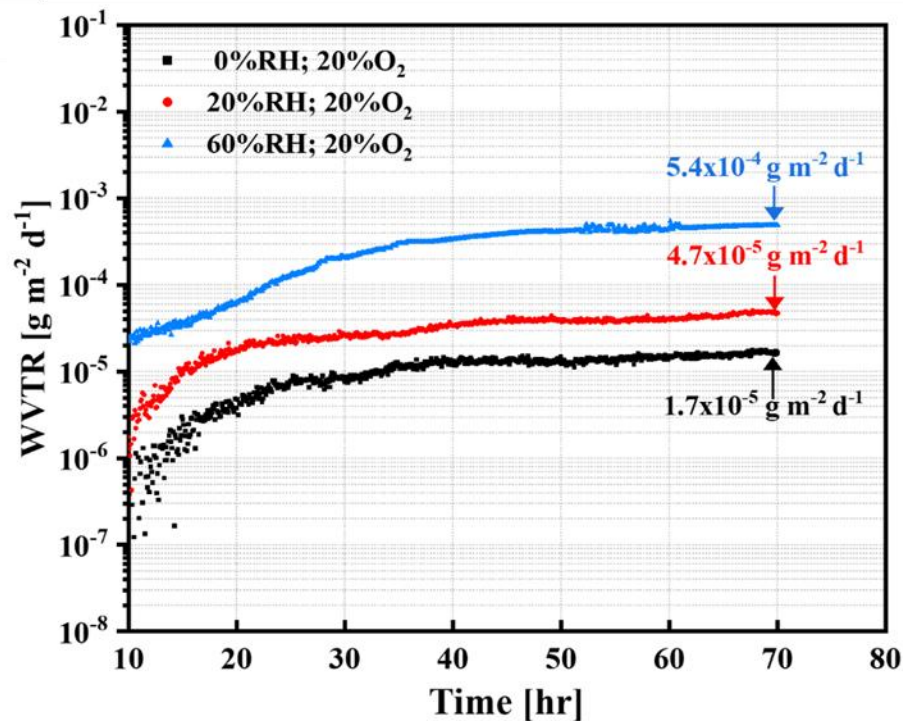
水蒸気透過率
WVTR : Water Vapor Transmission Rate
g/m²/day

- WVTR = 1.6 × 10⁻⁵g/m²/day
塗布プロセスによるバリア世界最高性能
- バリア膜形成の高速化技術も進展



PHPS膜の大気影響

スピンコートしたPHPS薄膜を各湿度条件（0,20,60%RH） 5分間暴露

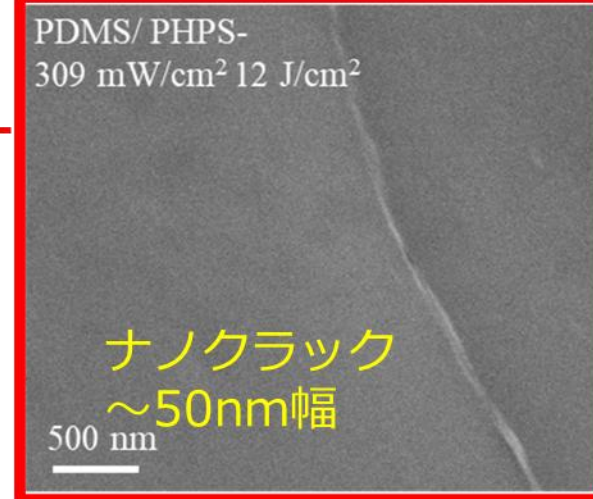
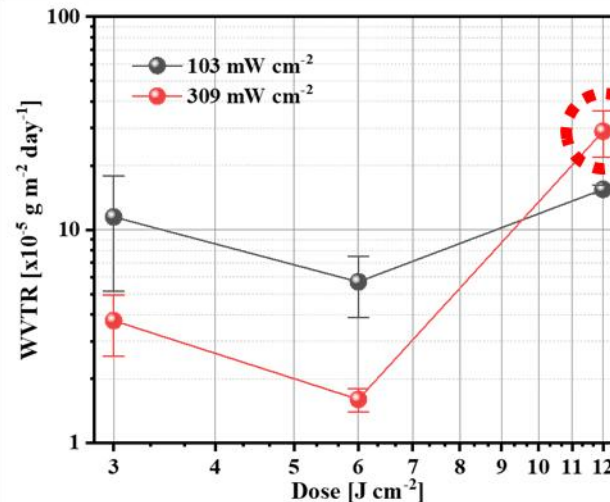
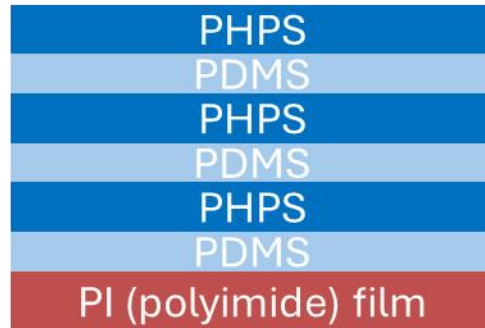


	0%RH; 20%O ₂		20%RH; 20%O ₂		60%RH; 20%O ₂	
	RI		RI		RI	
SiO ₂	1.46	(12.4)	1.46	(22.7)	1.46	(19.7)
Top	1.73	(30.0)	1.68	(30.0)	1.64	(30.0)
Mid	1.63	(70.3)	1.64	(87.4)	1.62	(75.5)
Bot	1.56	(113.6)	1.56	(66.0)	1.56	(67.4)
Sub.	Si		Si		Si	

光緻密化PHPS薄膜は塗布成膜時、湿度の影響を強く受ける

高照度ランプを用いたバリアフィルムの性能

Lamp power		3 J/cm ²	6 J/cm ²	12 J/cm ²
103 mW/cm ²	Refractive index	1.69	1.74	1.75
	WVTR (g/m ² /day)	1.2x10 ⁻⁴	5.7x10 ⁻⁵	1.6x10 ⁻⁴
	Irradiation time(s)	30	60	120
309 mW/cm ²	Refractive index	1.76	1.77	1.80
	WVTR (g/m ² /day)	3.8x10 ⁻⁵	1.6x10⁻⁵	2.9x10 ⁻⁴
	Irradiation time(s)	10	20	40



TOSHIBA

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業 の結果得られたものです。