

太陽光発電主力電源化推進技術開発事業／壁面設置太陽光発電システム技術開発
開口部向けペロブスカイトBIPVモジュールの開発

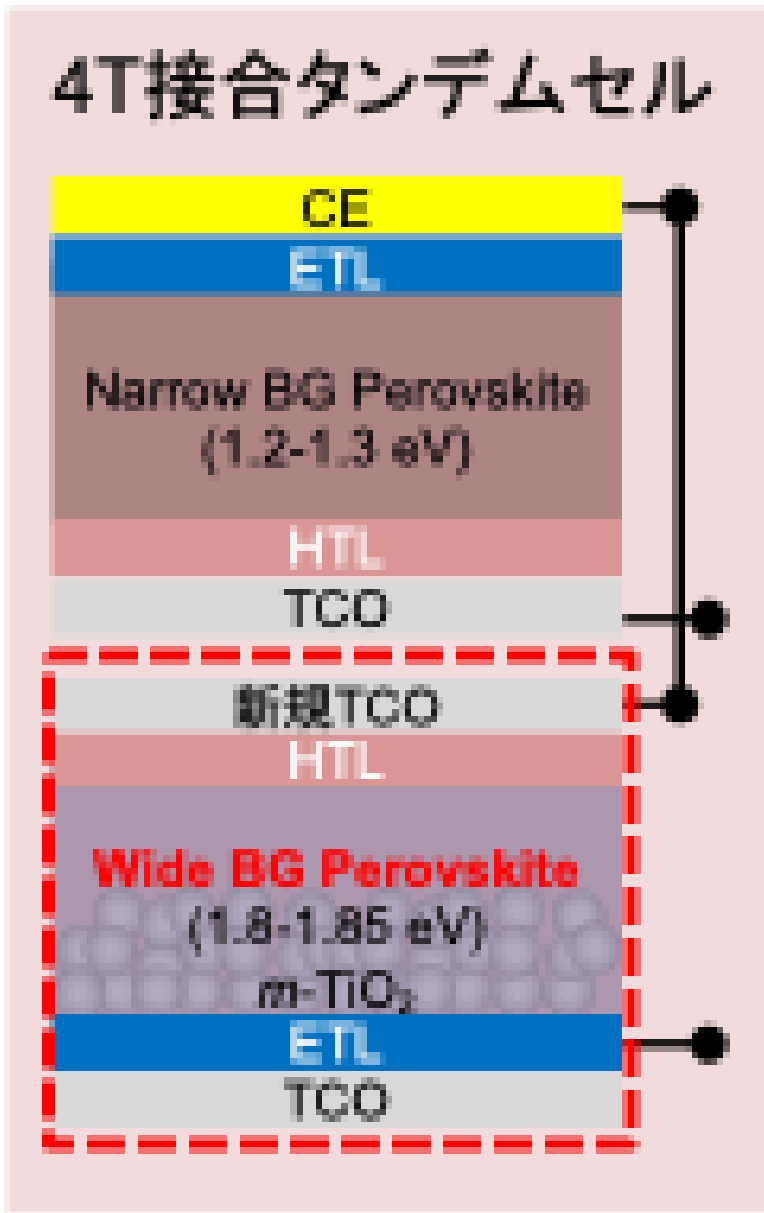
団体名：学校法人 早稲田大学

■事業の目的・目標

【目的】 ペロブスカイト太陽電池の建材一体形（BIPV）モジュールを中核とした、建築物として受け入れられる外観、経済性を加味した発電コスト、建築材料として要求される性能を満たす「開口部向け」の壁面設置太陽光発電システムの開発

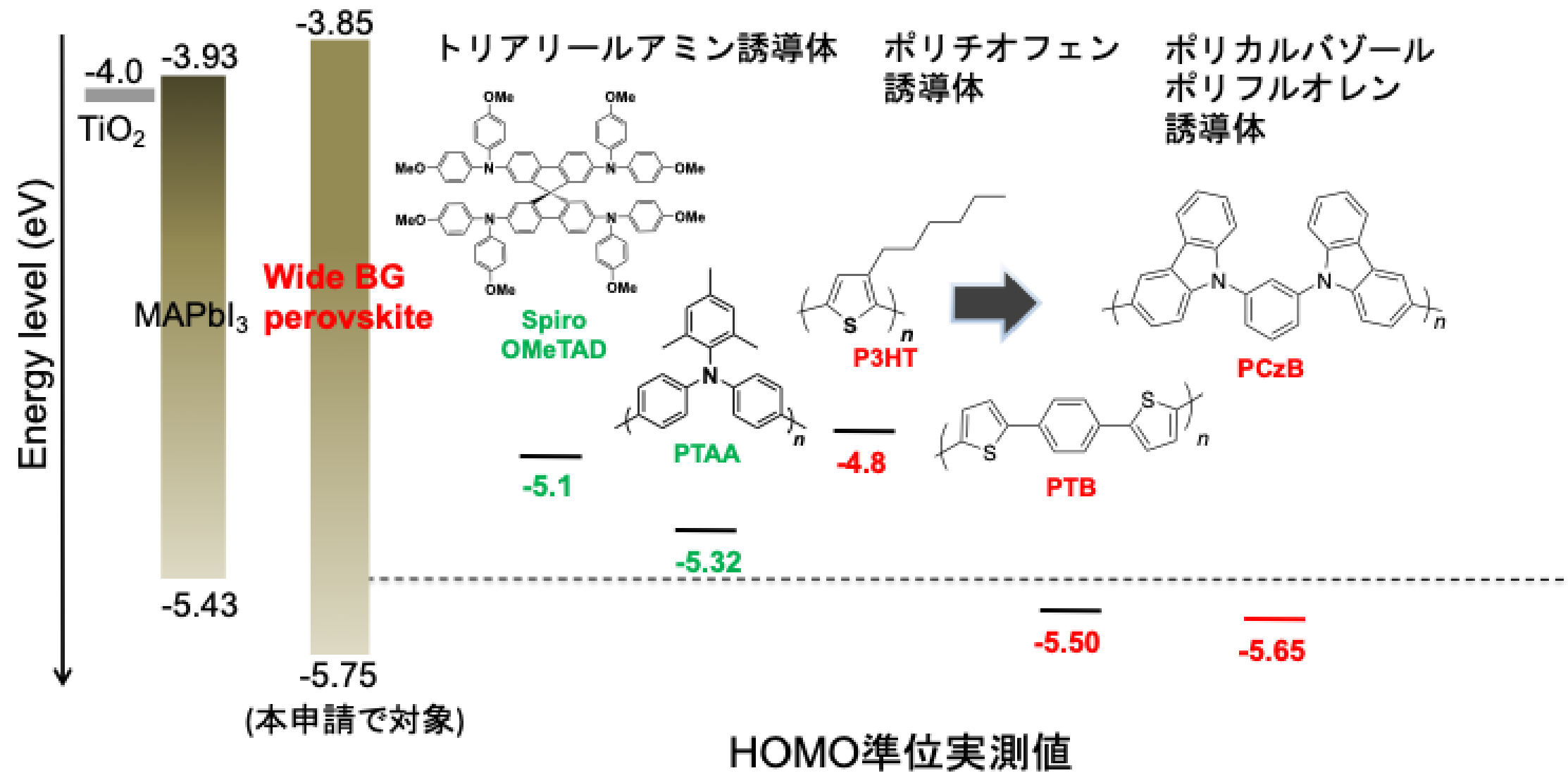
【開発概要と目標】

高効率ペロブスカイト・タンデムセルの開発



タンデムセル構成部材(HTM, TCO)と塗布法を最適化し、タンデム・ミニモジュール効率25%実現に向けたセルでの変換効率30%を実証し得る要素技術の開発

①ワイドバンドギャップ・ペロブスカイト適合ホール輸送材料(HTM)の開発

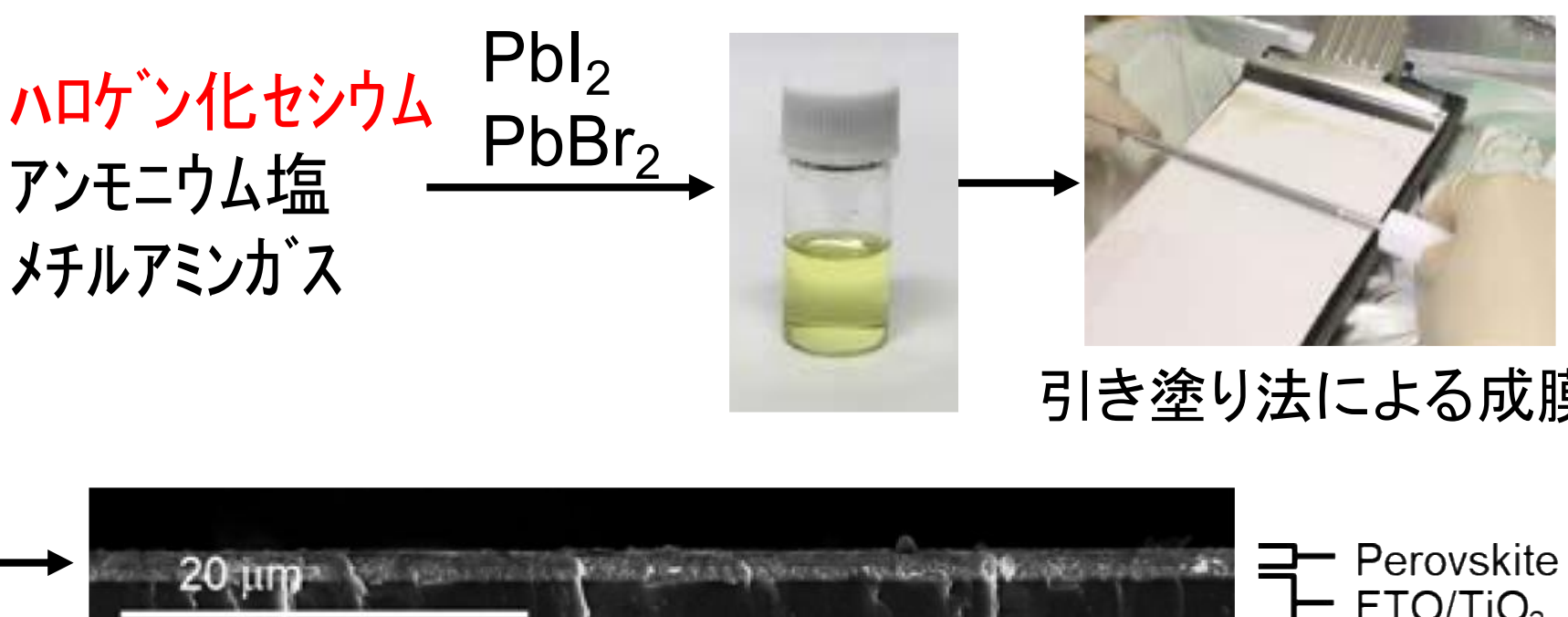


【取り組み】

- ・無ドープ・ロバストHTMの開発と適用
- ・量合成技術の確立と提供

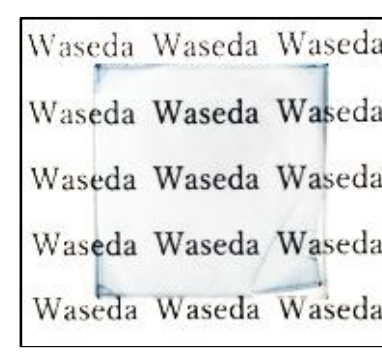
【目標】 単独トップセルで変換効率20%, 低コスト80円/m², パナソニック(株)でモジュール評価

②簡便製造プロセスの適用と実証



【目標】 ・トップセル用CsPbI₂Br, CsPb(I_{0.8}Br_{0.2})₃ 2種を対象に、短時間(<10分)で質高く700-1000 nm厚で形成できるインキ組成と塗布法を開発。

③透明導電膜作製用塗布材料の開発



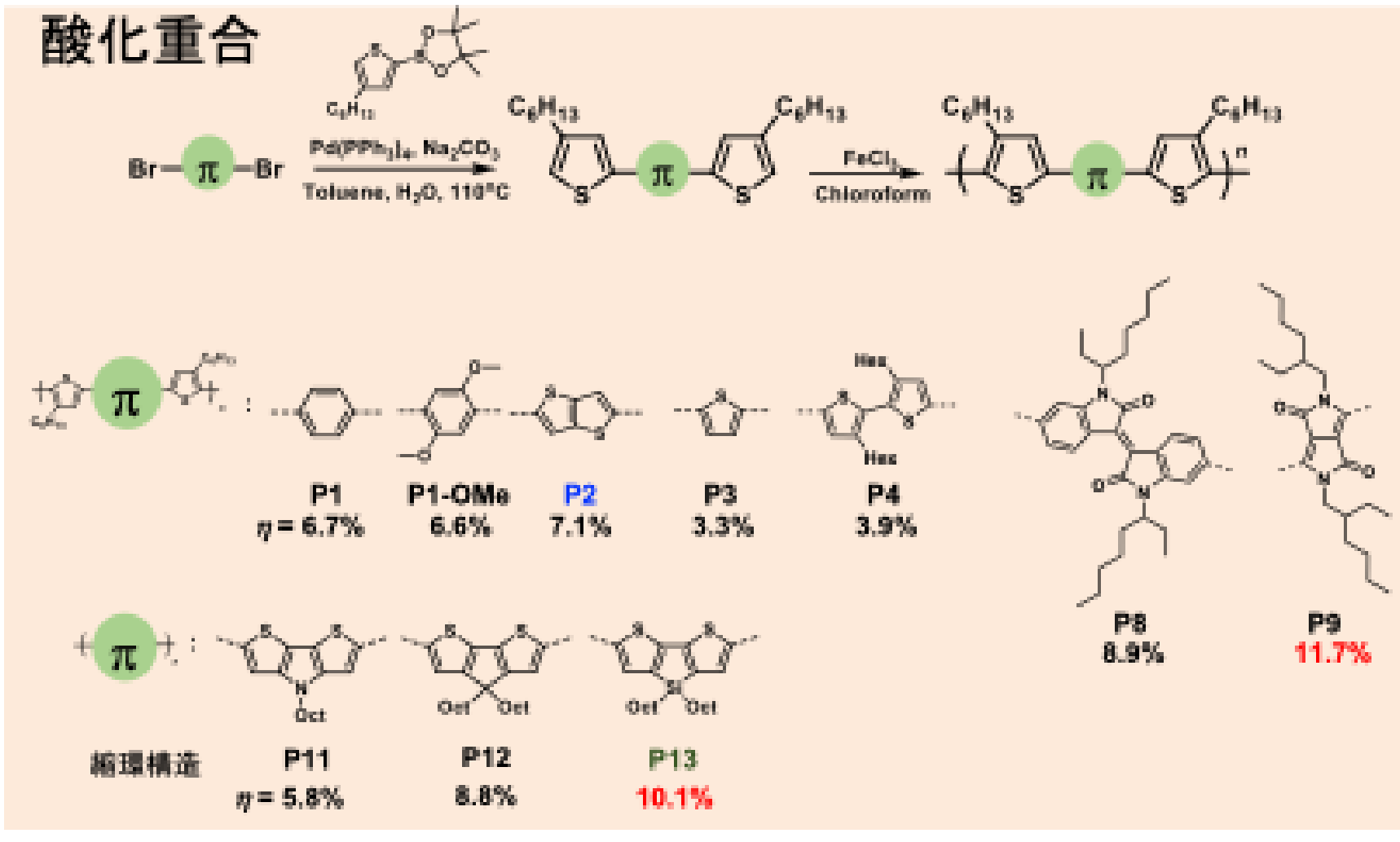
【目標】 4Tタンデムに対応し、ウェットプロセスに特化して透過率80%以上と50Ω/Sq以下を満たす材料選定と塗布法の開発。

独自開発した透明導電薄膜の例。

■2024年の主な成果

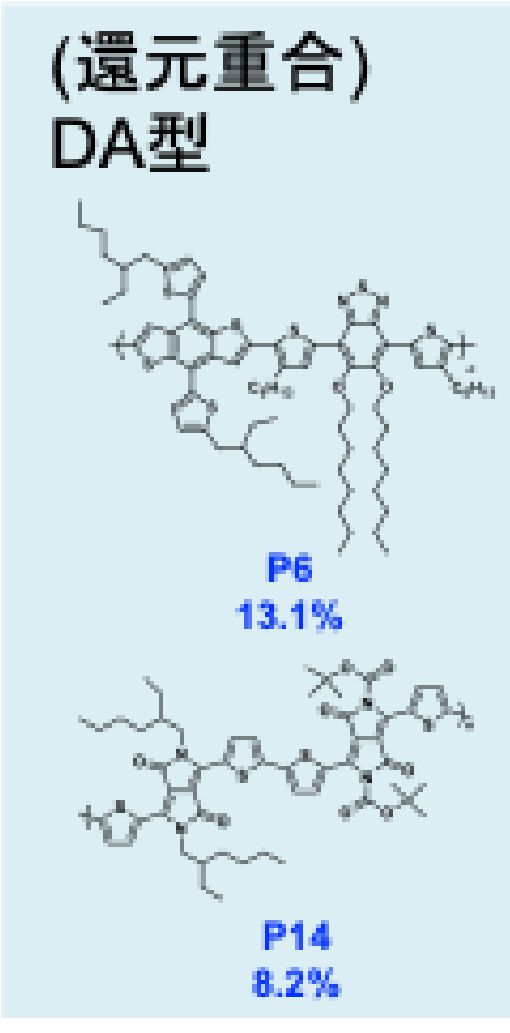
①ワイドバンドギャップ・ペロブスカイト適合ホール輸送材料(HTM)の開発

酸化重合



η = 6.7%, 6.6%, 7.1%, 3.3%, 3.9%, 5.8%, 8.8%, 10.1%

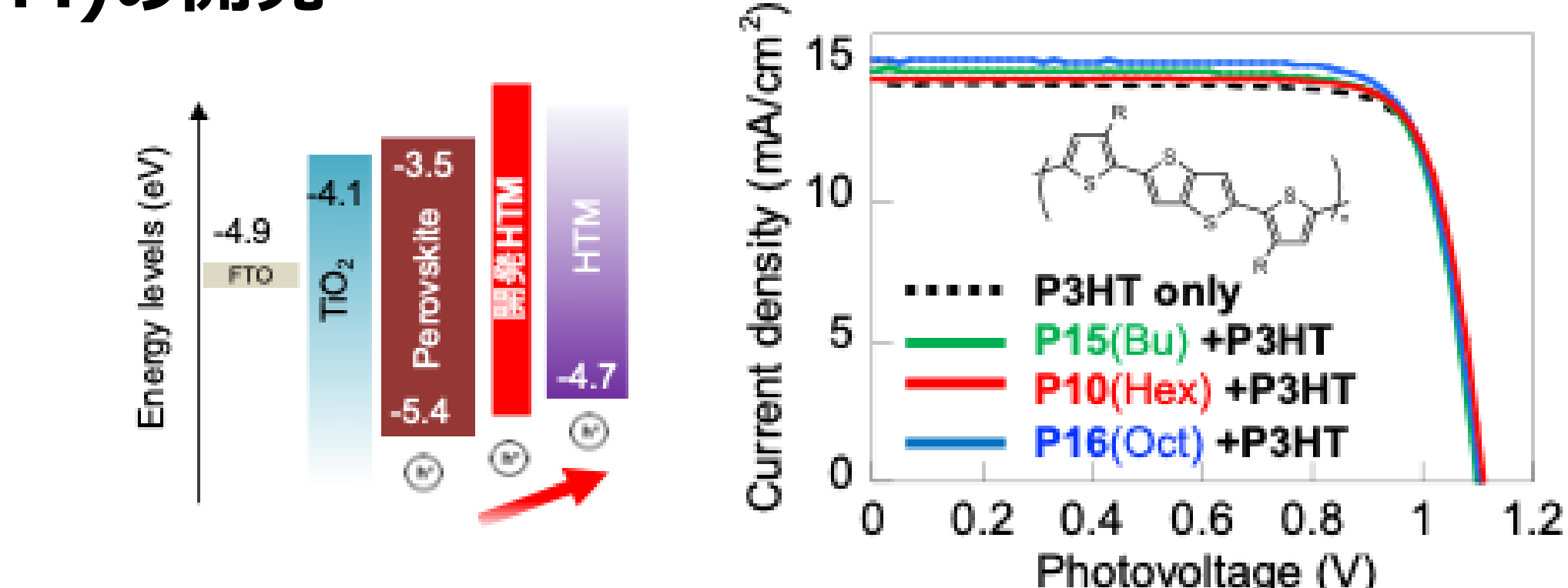
(還元重合) DA型



P6 13.1%, P14 8.2%

【成果】

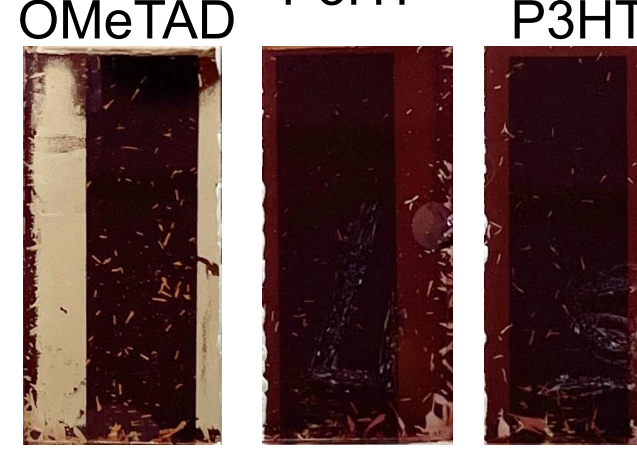
- ・低コストな酸化重合によりHTMを製造可能(80円/m²達成)。
- ・無ドープHTMを順にマッチング層として順型トップセルの効率14%超。



HTL	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF (-)	η _{Max} (%)	η _{Ave} (%)	HOMO (-eV)	LUMO (-eV)	E _g (eV)
P3HT	14.2	1.11	0.80	12.5	12.3	4.7 ₂	2.8 ₂	1.9 ₀
P15(Bu) +P3HT	14.7	1.10	0.79	12.7	12.6	4.9 ₅	2.8 ₂	2.1 ₃
P10(Hex) +P3HT	14.4	1.11	0.80	12.8	12.3	4.8 ₉	2.8 ₁	2.0 ₈
P16(Oct) +P3HT	15.1	1.10	0.78	13.1	12.9	5.0 ₀	3.1 ₃	1.8 ₇

ワイドBGペロブスカイト層(CsPbI₂Br VB = -5.4₀ eV, CB=-3.5₁ eV) (+ARコートで14.4%)

CsPbI₂Br, 未封止, 1日後のセル様子



【成果】

- ・汎用HTM(Spiro-OMeTAD, PTAA)に対し、**無ドープHTM**への代替による**長期安定性**の向上。

HTL	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF (-)	η _{Max} (%)	η _{Ave} (%)	未封止効率保持率 (%)
Spiro-OMeTAD	16.2	1.01	0.76	12.4	11.1	60
PTAA	15.4	0.91	0.65	9.2	8.1	63
P3HT	15.7	1.10	0.79	13.7	12.9	92
P10+P3HT	14.7	1.11	0.81	13.3	12.9	90

CsPbI₂Br, 未封止, 1日後

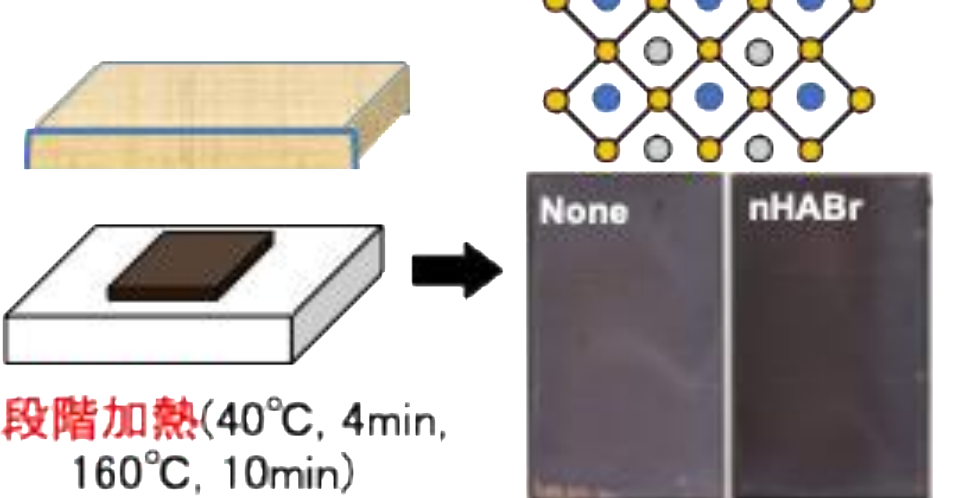
②簡便製造プロセスの適用と実証

全無機ペロブスカイトインキの調製 + バークコート塗布法

インキ添加剤

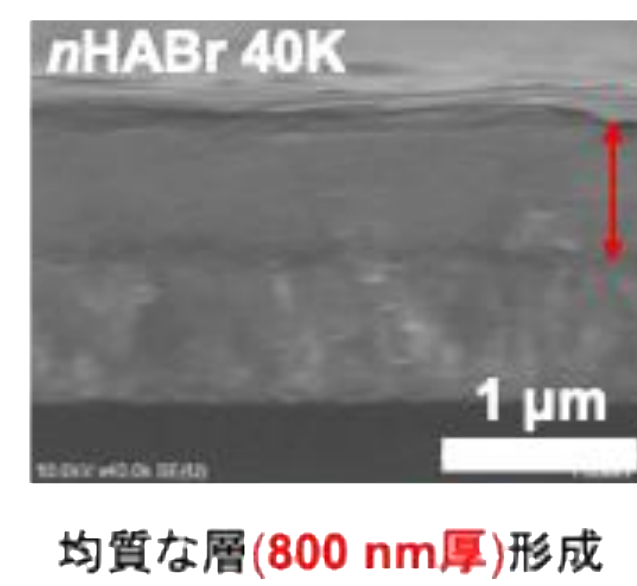
- ・表面バッシェーション剤
- ・界面活性剤

nHABr



前駆体インキ (DMF/DMSO溶液)

2段階加熱(40°C, 4min, 160°C, 10min)

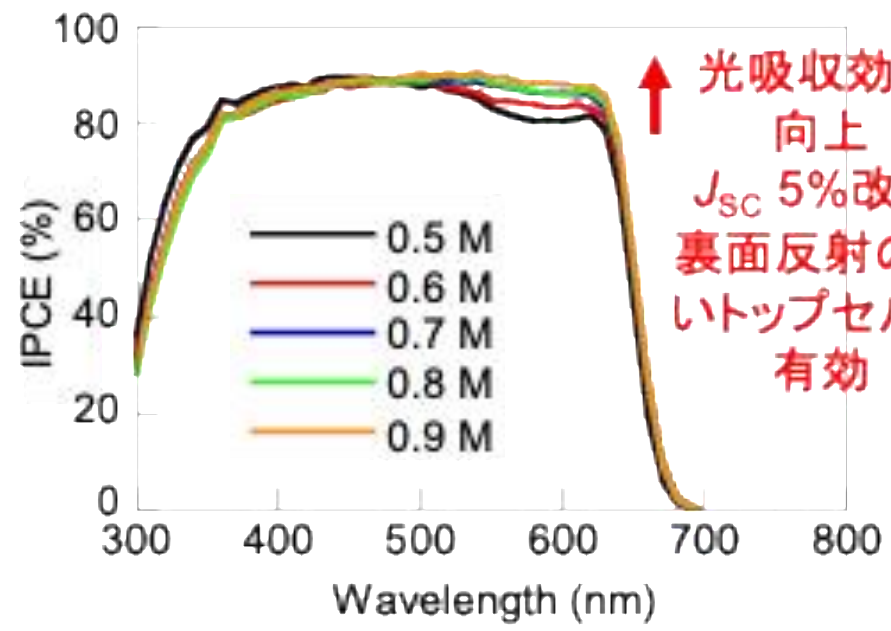


nHABr 40K

均質な層(800 nm厚)形成

平滑性の向上

Additive	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	FF (-)	η _{Max} (%)	η _{Ave} (%)	film thickness (nm)
-	15.5	1.06	0.76	12.4	11.4	790
nHABr (0.02 mg/mL)	15.3	1.06	0.79	12.9	12.2	720
nHABr (0.1 mg/mL)	14.9	1.06	0.78	12.3	11.4	720



IPCE (%)

Wavelength (nm)

光吸収効率向上

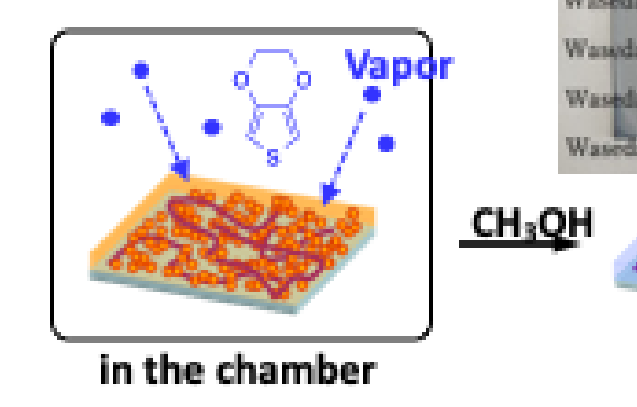
J_{sc} 5%改善

裏面反射のないトップセルで有効

ペロブスカイト層の質、平滑性を保ち溶媒蒸散・結晶形成の**高速化(<15 min)**、効率向上インキ調製法、塗布法についてノウハウをパナソニックホールディングスに開示・共有

③透明導電膜作製用塗布材料の開発

気相重合PEDOT



in the chamber

CH₃OH

CNT分散液



SWCNT分散液(ポリアクリル酸添加)

エタノール:IPA = 1:4

sample	Condition	Dopant	Sheet resistance Ω/Sq	Thickness nm	Conductivity S/cm	%T at 750 nm
市販PEDOT (Hereaus)	H ₂ SO ₄ 処理	PSS /H ₂ SO ₄	90	30	3,200	72
気相重合 PEDOT	-	OTs	45	145	1,600	82
有機分散 PEDOT (Orgacon®)	エチレンジオール処理	PSS	1.9 × 10 ³	30	130	93
SWCNT	転写	-	30	90	3,700	53
	転写	-	280	40	900	74
	スピノコート	-	37	120	2,250	41
	スピノコート(前回)	-	82	20	6,100	88
	スピノコート(今回)	-	42	20	12,000	86

ソニケーション分散条件最適化 微量AuCl₃ドーピング

AuCl ₃ (mg/mL)	%T 750 nm	Sheet resistance (Ω/Sq)
-	88	1042
4	94	310
8	93	193
16	92	129
16 x 2	86	42

透過率>80%, <50Ω/Sqを達成

気相重合PEDOTで100Ω/Sq, 透過率80%を達成

分散時間延長及びAuCl₃微量ドープによりCNTスピノコート膜で**42Ω/Sqで透過率86%に向上**

■課題と今後の取組

・技術面では、①V_{OC}の改善はHTMの準位設計のみでの達成は難しい。ペロブスカイト層界面、n型層の改良を含めセルとして最適化する。②パナソニックホールディングスで進めるインクジェット塗布法の開発に向けて、乾燥工程における残存溶媒の蒸散過程などインキ調製法の基礎的知見をノウハウとして提供。③窓・建材を想定したプロセスコストの安い塗布型TCO代替材料の開発継続。

■実用化・事業化の見通し

パナソニックホールディングスで進めるシングルセルの高効率な半透明モジュールを用いた建材ガラスへの太陽光発電導入、その後の市場拡大として、高効率なタンデムセル技術の要素技術として、本プロジェクトのホール輸送材料、簡便製造プロセス、塗布型TCO代替材料を改良する。