

2024年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会 プログラムNo.9

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／ 次世代型太陽電池基盤技術開発事業／ 次世代型ペロブスカイト太陽電池の 実用化に資する共通基盤技術開発

発表日：2024年12月17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

村上 拓郎

(国研)産業技術総合研究所

<https://www.aist.go.jp>

1. 目的

ペロブスカイト太陽電池(PSC)の実用化に取り組む企業等が共通して利用可能な研究基盤の整備及び基盤技術の開発を行う。

2. 期間 2021年12月27日 ~ 2026年3月31日

3. 目標(最終)

量産可能な手法で作製したPSCで20%以上、耐熱・耐湿・耐光試験で1500h以上の耐久性(劣化率10%)が得られる技術を開発。

PSC自動作製システムの構築。計算科学手法による材料開発指針の提示。

PSCの効率低下因子の分析技術を開発。

面積1.2m²角以上のPSCモジュールの高精度性能評価技術を開発。第三者測定の実施体制構築。国際標準化への技術を提供。

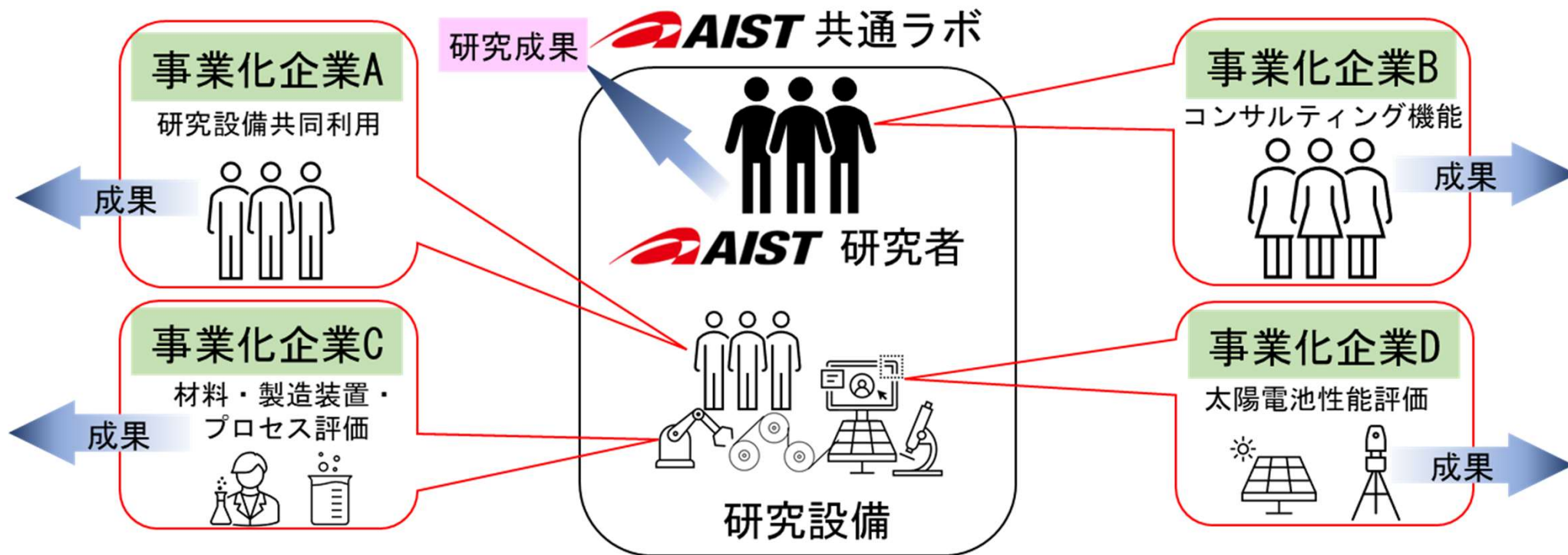
4. 成果・進捗概要

量産可能な手法にて20.7% (0.16 cm²)を達成。耐熱技術は85°C1500h後の効率15% (0.16 cm², 劣化率17%)を達成。耐光技術は連続光照射(1Sun, 30°C, 50%RH)1500h後の効率14% (0.16 cm², 劣化率23%)を達成。世界発の研究用PSC自動作製システムを開発。AI最適化による高効率化を実証。過渡電流応答計測法等の劣化評価技術を開発。面積0.4m²角以上のPSCモジュールの高精度性能測定技術を開発し第三者測定を実施。国際標準化を検討するためのデータ収集開始。

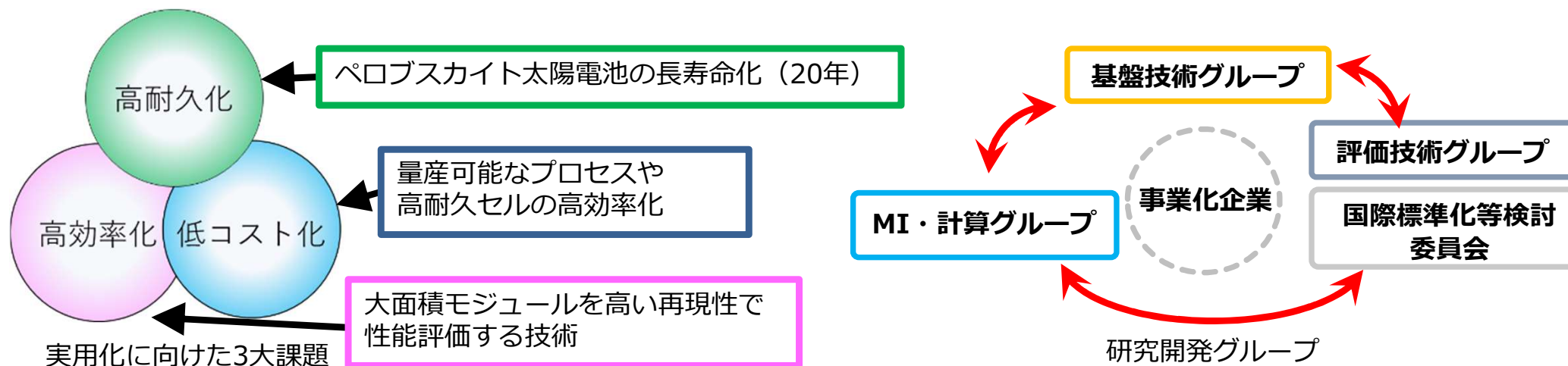


本事業における目標と産総研の役割

- 発電コスト20円/kWh（FY2025）というアウトプット目標を達成する。
- ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けて解決すべき技術課題を解決するため、企業が実施困難な製造から分析評価までの**共通基盤技術開発を一貫**で取組む。
- 実用化に取り組む企業の基礎的な技術課題解決に活用できる**場所、設備、知見**を提供する。
- 研究設備として大型ドライルーム、ロール試験装置等の製造試験設備、電子顕微鏡等の大型分析装置を導入。材料・プロセス評価用自動セル作製装置を構築。

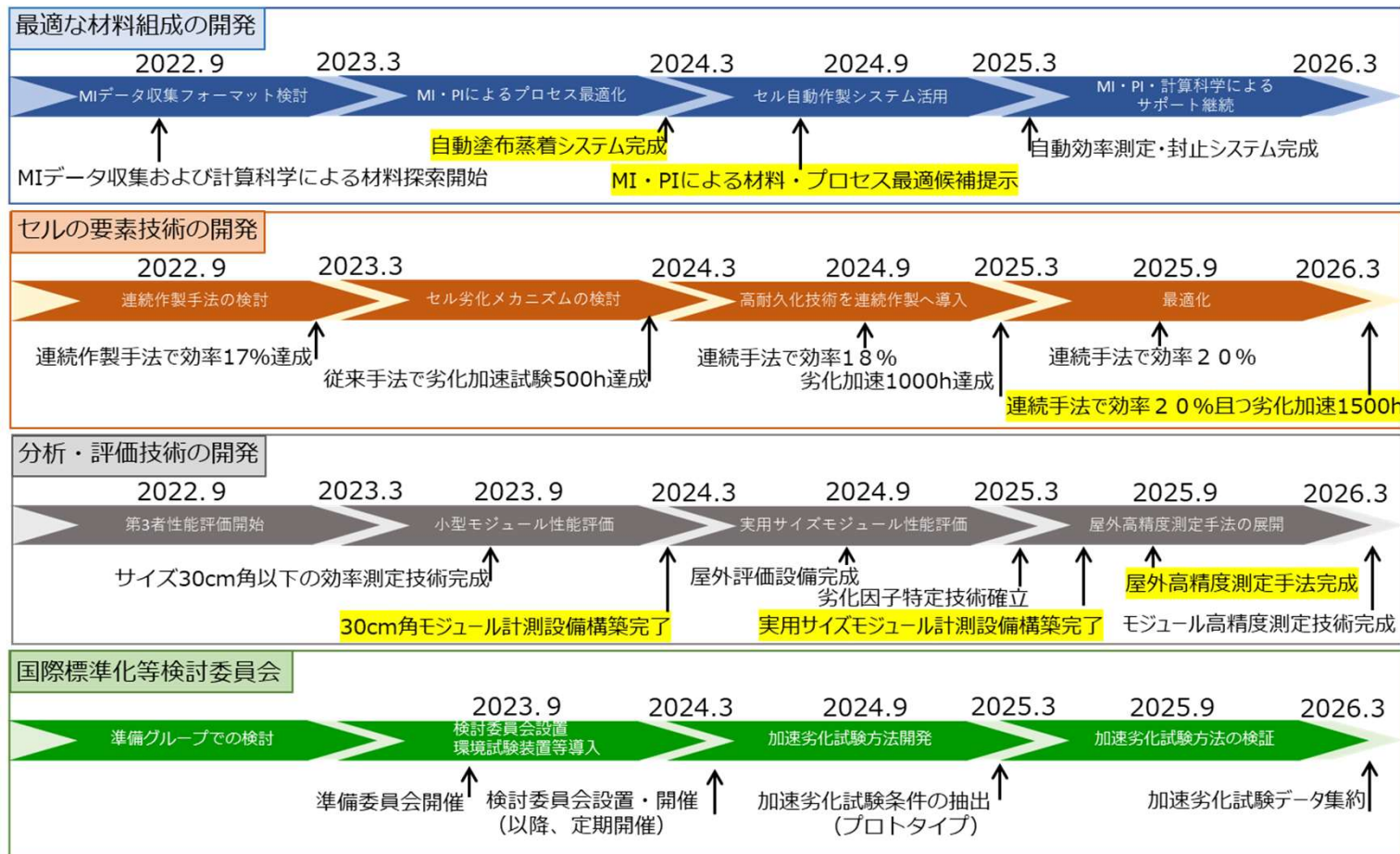


- 実用化の技術課題は「高耐久化」「低コスト化」「高効率化（性能評価技術）」
- 「基盤技術グループ」「MI・計算グループ」「評価技術グループ」「国際標準化等検討委員会」の4グループ体制にて実施。
- **MI・計算グループ**は、AIを活用した材料・プロセスの最適化技術開発、また高い再現性で評価するための太陽電池自動作製システムの開発を行う。
- **基盤技術グループ**は、耐久性を向上させる材料・プロセス技術開発、量産可能な材料塗布積層技術開発を行う。
- **評価技術グループ**は、劣化状態等を調べる分析技術の開発、発電性能評価技術の開発、国際標準化にも資する耐久性・信頼性評価試験技術の開発を行う。
- **国際標準化等検討委員会**は、実用化に必要な標準等を検討し、国内外との合意形成を図る。



研究開発スケジュール

- アウトプット目標を達成するモジュール性能（初期変換効率17%・寿命20年・劣化率 1%/年）を想定し超軽量太陽電池小面積セルで**初期変換効率20%以上**且つ、耐熱・耐湿・耐光（IEC TS 62876-2-1準拠）による劣化加速試験**1500時間**後の性能維持率**90%以上**の達成に向けて進捗させる。
- 実用化に取り組む企業に対しセル製造技術・劣化解析技術・モジュール性能評価技術は適宜協力する。

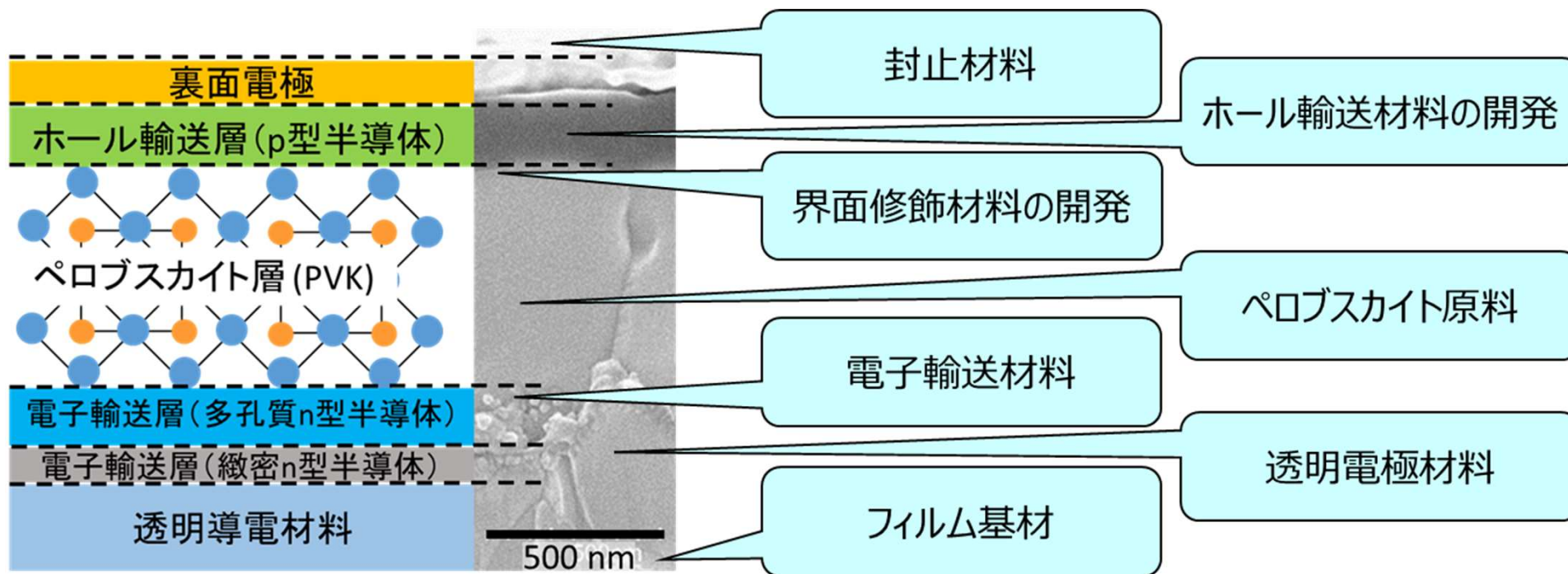


ペロブスカイト太陽電池の課題～耐久性の向上～

背景と課題

- ペロブスカイトは食塩と同じイオン結晶であり、水分で分解されてしまう
- 光照射で有機材料が酸化されてしまう。

目標：耐熱・耐湿試験および耐光試験（IEC TS 62876-2-1準拠）において初期効率の90%以上を維持し1500h以上の耐久性が得られる技術を開発する。

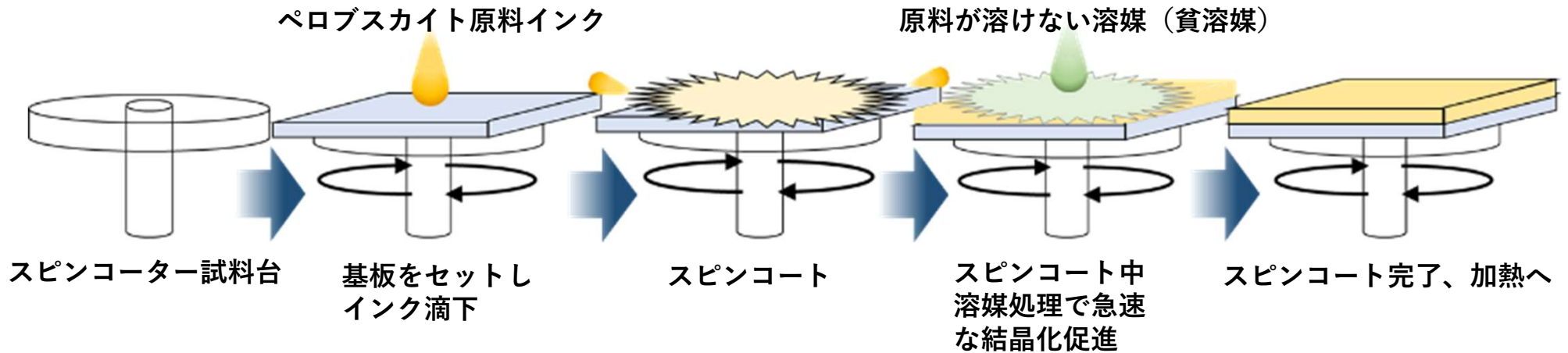


- 水分をブロックする表面処理等・材料等の開発
- 酸化を抑制する材料等（抗酸化材料等）の開発

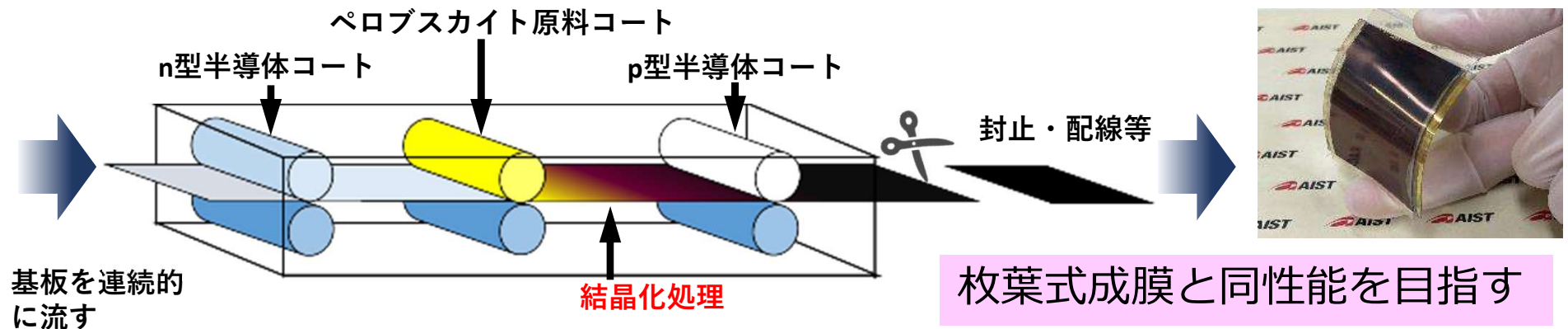
実用15年～20年相当の耐久性を目指す

ペロブスカイト太陽電池の課題～量産化に適した成膜技術の確立～

これまで枚葉式でペロブスカイトを成膜し高性能化していた。



ペロブスカイトを連続成膜する手法の技術開発が重要。



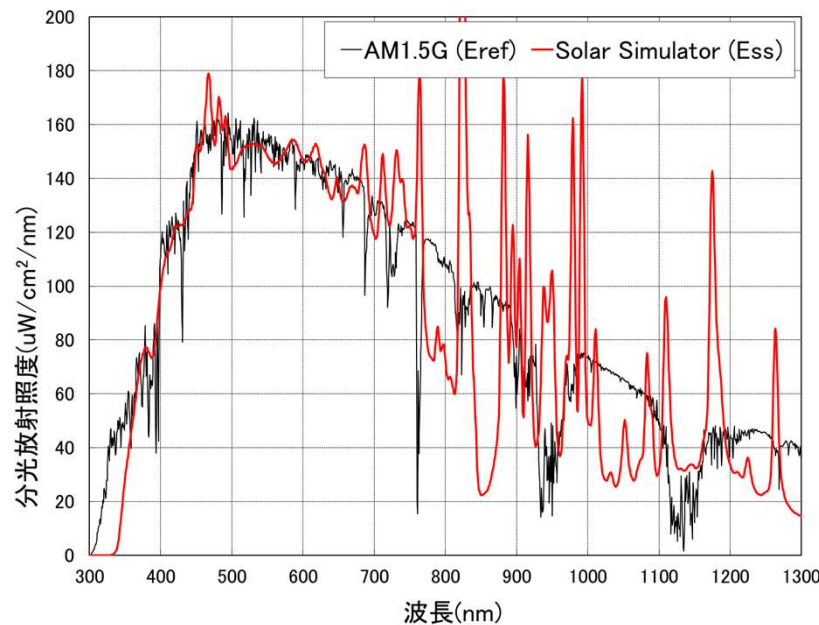
枚葉式成膜と同性能を目指す

目標：量産可能な作製手法により受光面積 1cm^2 以上の小面積セルで20%以上の初期効率を達成

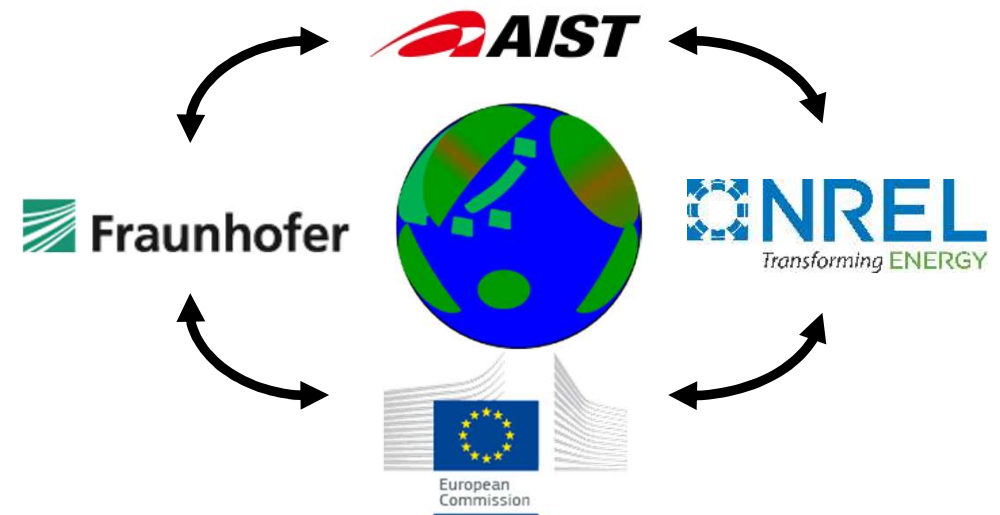
背景と課題

- ペロブスカイト太陽電池は、電流時間応答が従来太陽電池よりも遅く、従来型測定（パルス光）は困難。新しい測定手法を確立を目指す。
- 産総研は世界主要機関と性能評価技術の国際整合性を検証。ペロブスカイト太陽電池においても国際的に認知された性能評価第三者機関としての地位を確立する。

目標：受光面積900 cm²以上のセル・モジュールの屋内測定において測定再現性±0.5%(1σ)以内, 受光面積1.2m角以上の場合は±1.0%(1σ)以内の測定精度を達成する。年間30件以上の第三者測定を実施可能な評価体制を整える。



基準太陽光 (AM1.5G) と
疑似太陽光スペクトル



世界主要機関との国際比較測定（ラウンドロビン測定）による性能評価技術の国際整合性の検証

国際標準化等検討委員会の設立と運営

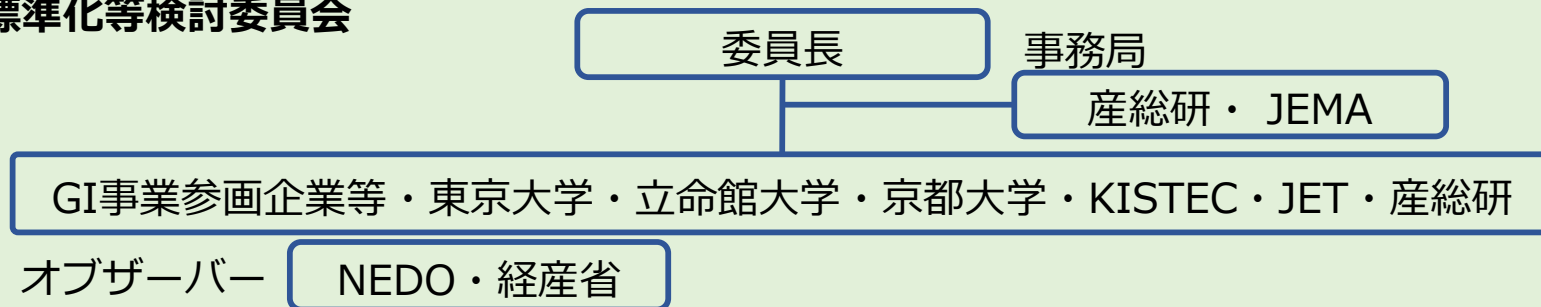
背景と課題

- ペロブスカイト太陽電池の社会実装に向けて国際標準の検討が必要。

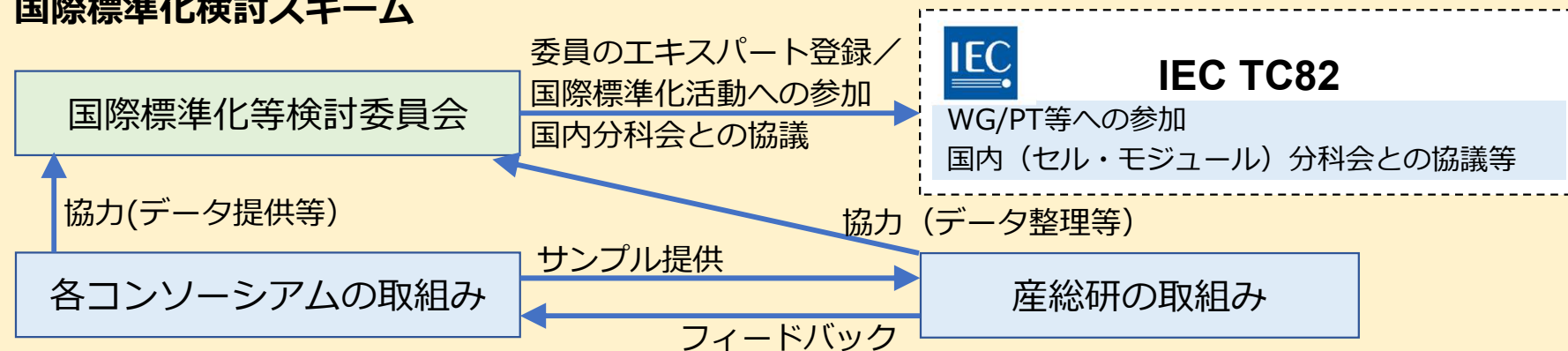
目標：委員会を開催し検討事項の整理取りまとめに加えて、標準に必要なセル・モジュールの試験項目策定に必要な加速劣化試験等の検討を行う。

- ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けてGI実施事業者を中心に関係機関が連携する体制「**国際標準化等検討委員会**」を2024年3月に設置。12月に第3回委員会を開催した。性能評価試験方法と信頼性評価試験方法について検討中。

国際標準化等検討委員会



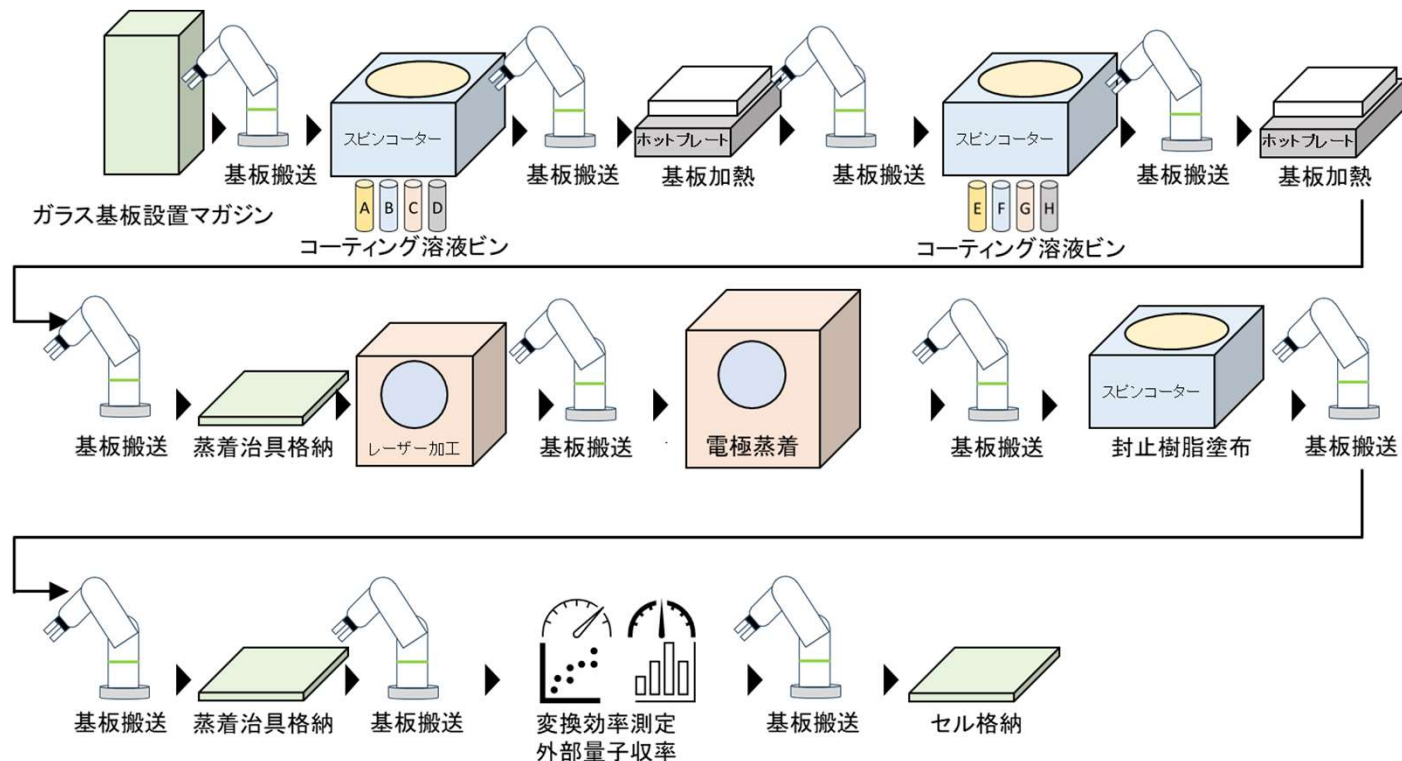
国際標準化検討スキーム



背景と課題

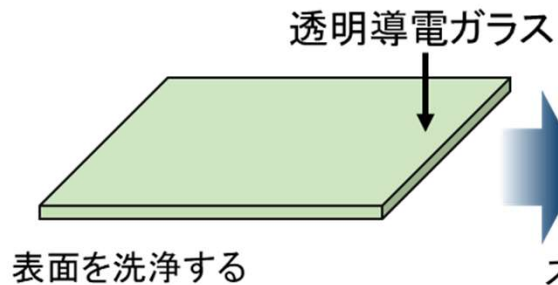
- ペロブスカイト太陽電池はデータのばらつきが大きく、開発リードタイムの短縮には再現性向上が重要。
- 部材メーカーなどセル作製のノウハウが無い企業がセル性能を容易に評価できるシステムが必要。

目標：ヒューマンファクターを除去した太陽電池作製条件の探索や材料の性能評価を可能にする為、太陽電池を自動で作製するシステムを構築する

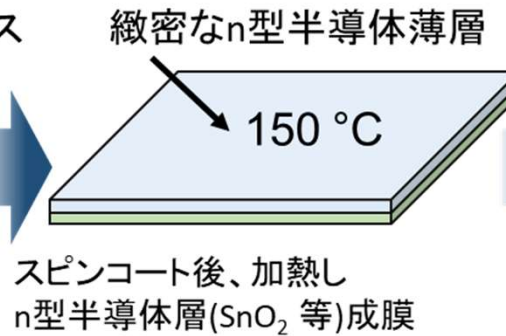


ペロブスカイト太陽電池の作製工程

1. 透明導電性基板の洗浄



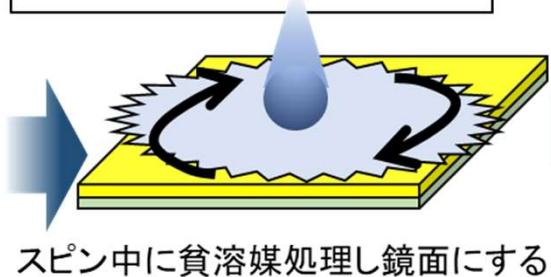
2. 電子輸送層成膜



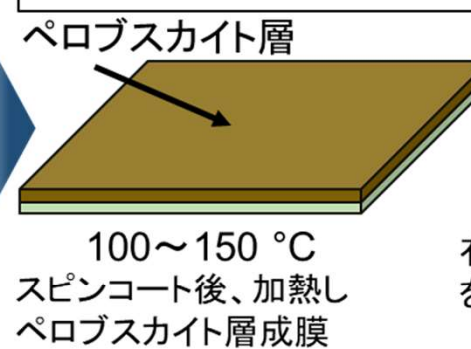
3. ペロブスカイト前駆体塗布



4. アンチソルベント処理



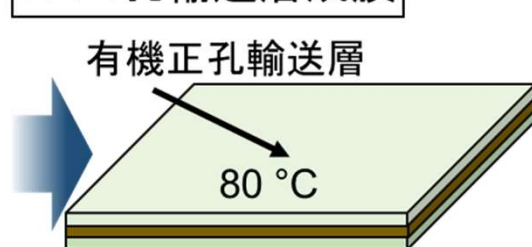
5. ペロブスカイト結晶化



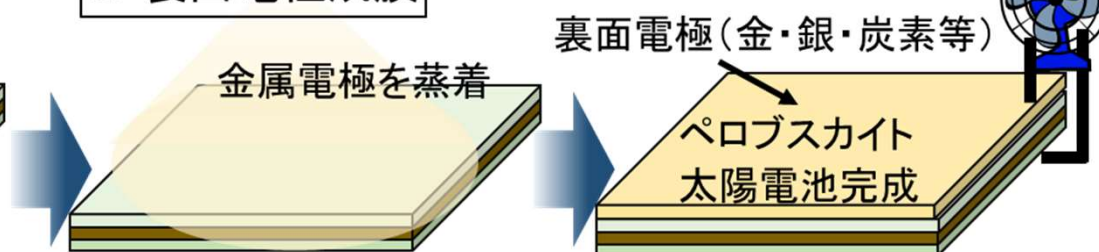
6. 正孔輸送材料塗布



7. 正孔輸送層成膜

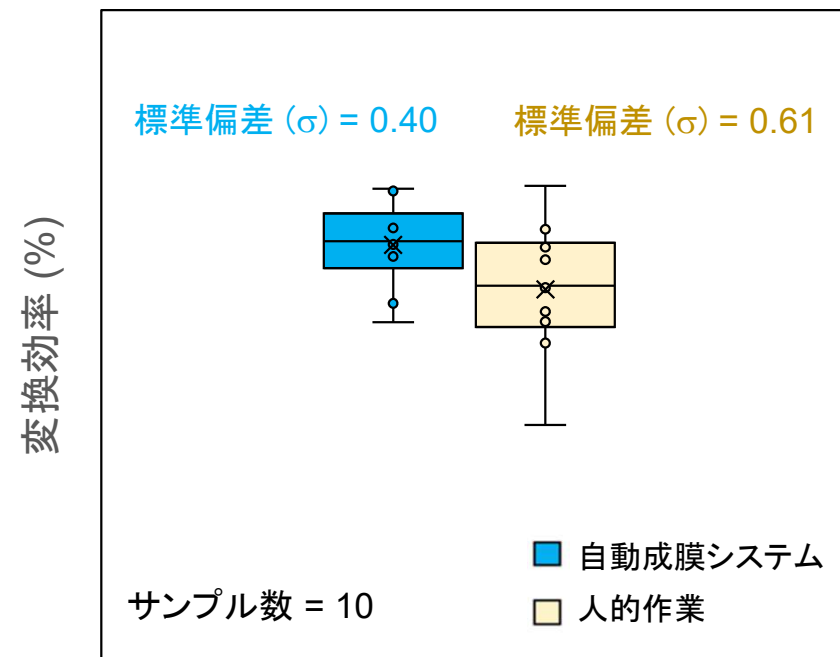
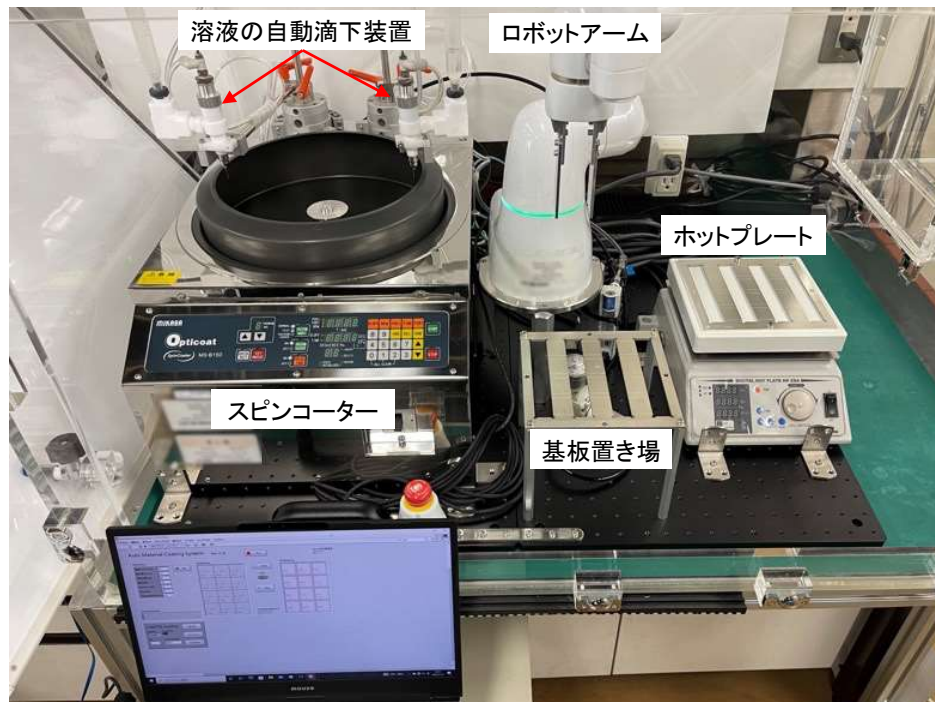


8. 裏面電極成膜



ペロブスカイト層自動成膜システムの構築

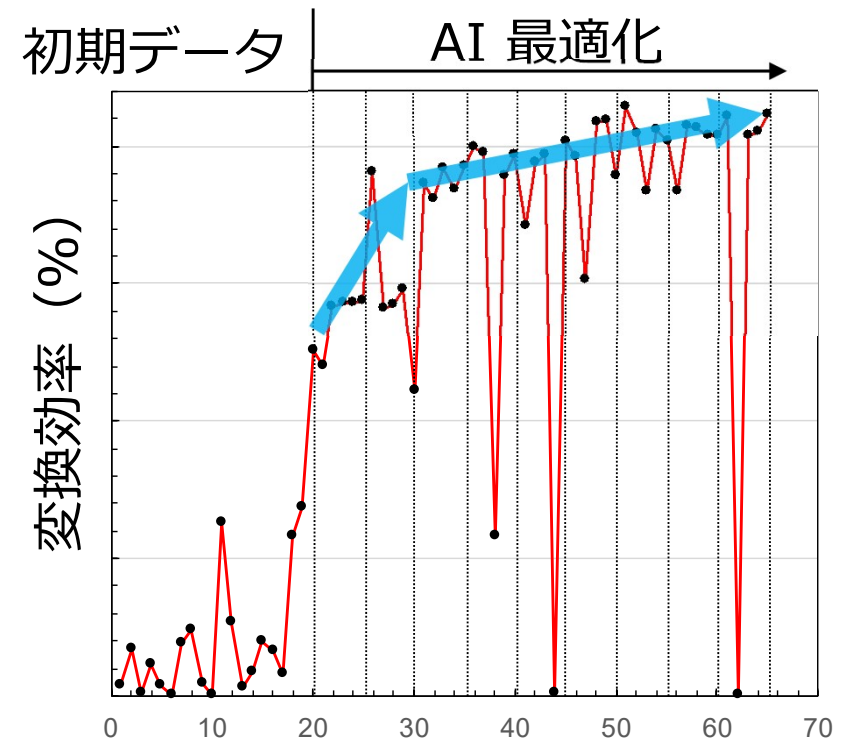
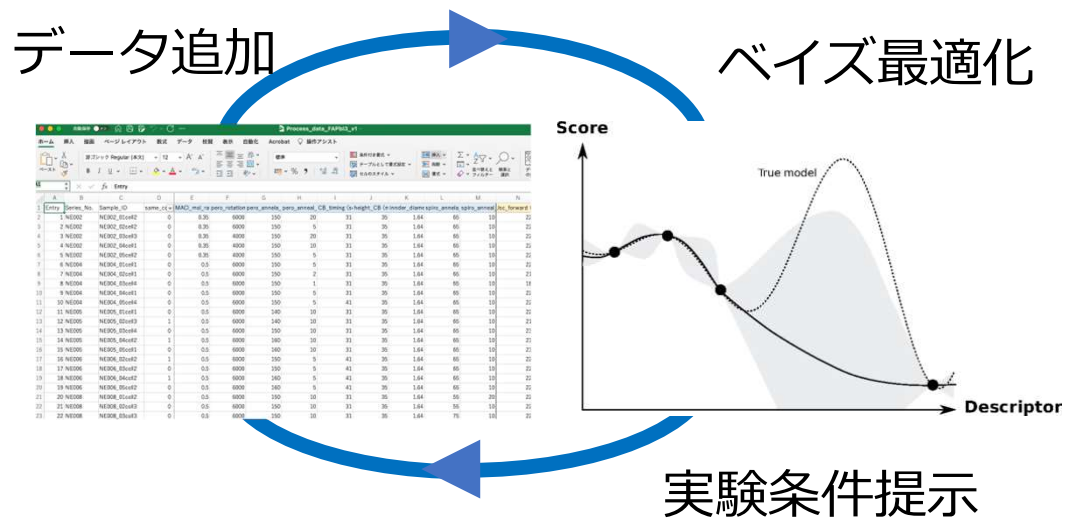
- 初期検討としてガラス基板をホームポジションからピックアップしペロブスカイト前駆体溶液をスピコート、ホットプレートによる加熱、ホットプレートからの取出し、ホームポジションに戻す一連の作業を自動化。
- 標準偏差（デバイス間の性能のばらつき）が約35%低減。
- 自動成膜システムを用いることでヒューマンファクターを除去し、性能のばらつきが低いデバイスを作製することが可能となる。



	自動成膜システム	人的作業
標準偏差	0.40	0.61

目標：太陽電池作製条件の最適化を図るためのマテリアルズインフォマティクス（M I）、プロセスインフォマティクス（P I）技術を確立し、計算科学手法により最適材料の候補と材料開発指針を示す。

- AIがこれまで研究者が最適化させた条件よりも高い変換効率が得られる条件を提示した



ペロブスカイト太陽電池セル自動作製システム

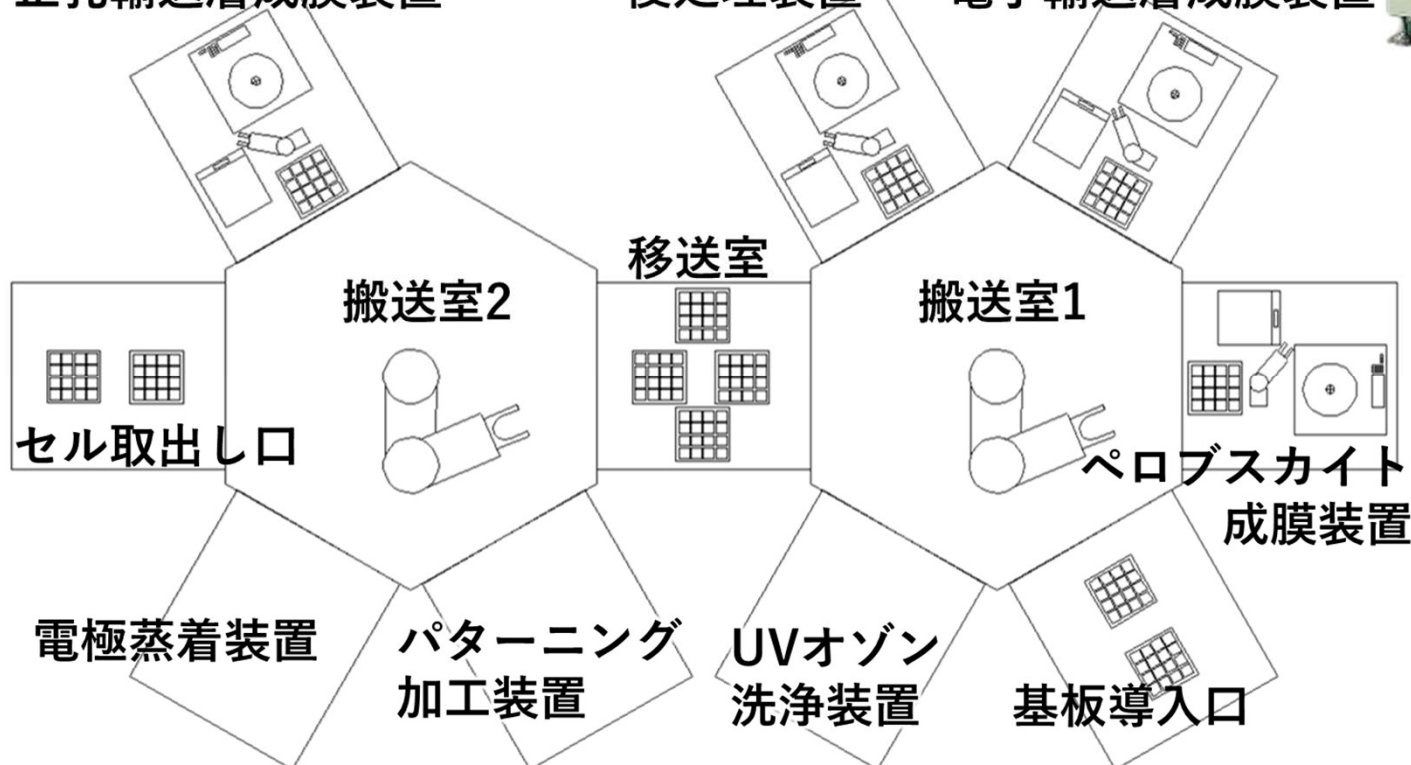
自動成膜システムの知見を
活用し世界初となる
セル自動作製システムを開発した。



正孔輸送層成膜装置

後処理装置

電子輸送層成膜装置



ブレードコートを用いたペロブスカイト層の連続成膜技術の開発

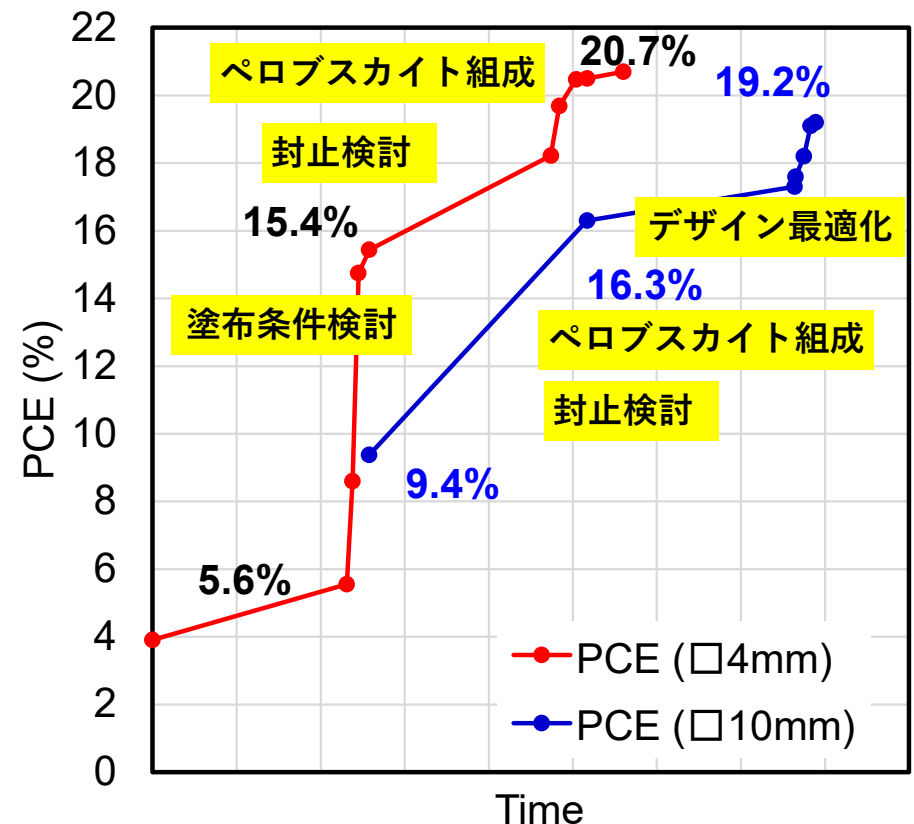
- ペロブスカイト太陽電池のRoll-to-roll生産を想定したブレードコート技術の研究開発を進めている
- ブレードコートを用いたセル作製において、これまで研究で活用されたスピンコート+溶媒処理法による枚葉式成膜と同等の性能が得られている
- ブレードコートを用いてペロブスカイト層を成膜したセルの変換効率は20.7% (0.16 cm²) と 19.2% (1.1 cm²) が得られている

ブレードの進行方向



サンプル 1 サンプル 2 サンプル 3

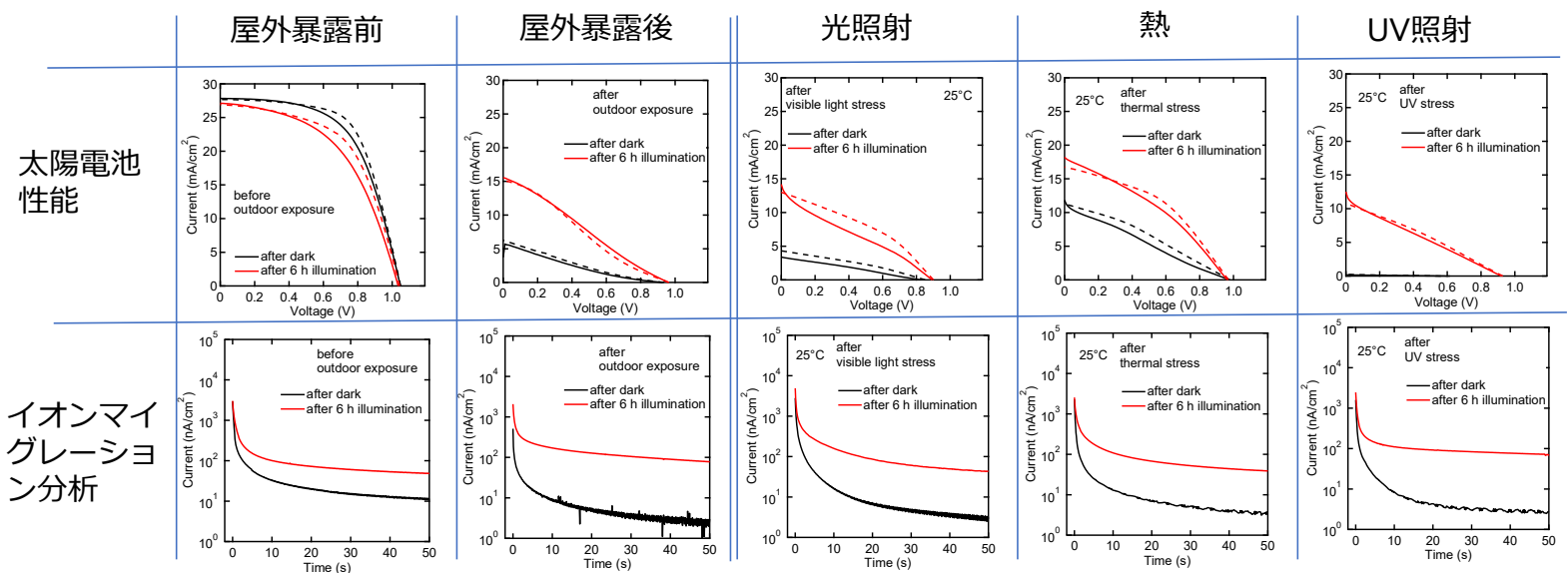
面内の変換効率のバラツキ：±0.4% in PCE



目標：耐久性向上に向け、環境負荷等による太陽電池内部の効率低下因子を特定するための分析技術を確立する。

- 太陽電池セルを実用動作条件に近い状態で屋外曝露し、太陽電池セルに発現する性能低下・劣化を検証した。
- イオンマイグレーション性能分析から、深い欠陥生成による劣化の可能性を示した。
- 屋内加速劣化試験による劣化との比較を行い、UV照射ストレスが屋外曝露の主要因である可能性を示した。

・屋外曝露（つくば市）

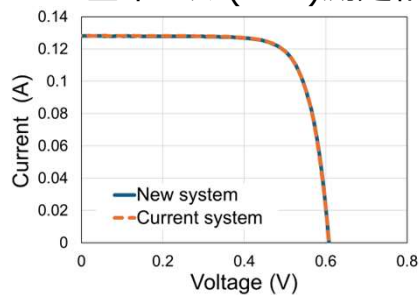


T. Tayagaki *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **272**, 112879 (2024).

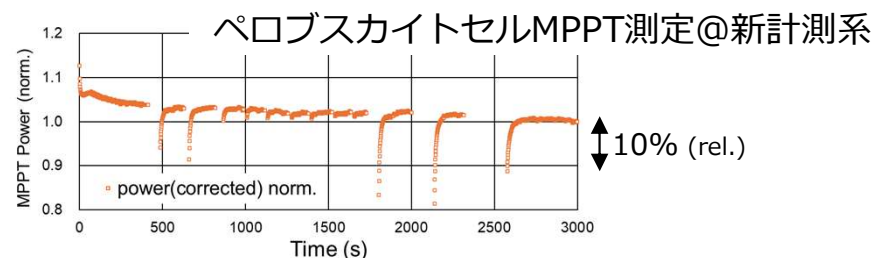
- GI基金事業者が開発する各種ペロブスカイト太陽電池構造（セル、ミニモジュール、モジュール）を性能評価可能な計測系の開発・構築を進めた。新たに構築した太陽電池セル測定系の評価を完了し、測定手順書を作成。
- GI基金事業者開発品を含むペロブスカイト太陽電池の高精度性能評価測定を実施。

性能評価計測系(GI事業専用)を構築・性能検証

基準セル(c-Si)測定結果(現高精度測定系との比較)

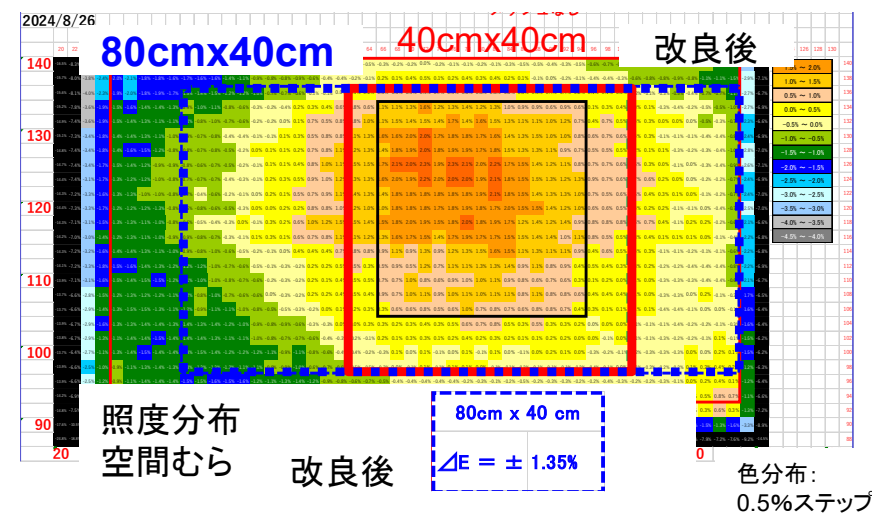


項目	New/Current -1 (%)
Isc	-0.03%
Voc	0.11%
Pmax	0.27%
F.F.	0.20%



モジュール性能評価系(現有)の改良 測定可能なモジュールサイズの拡張

モジュール用MPPT計測システムの構築(照度空間分布@基準面)



⇒測定サイズ拡大に向けて、測定基準面における照度空間均一性を向上

- 基準セルによる動作確認（現有装置結果と良く一致）
- ペロブスカイト太陽電池セルによる検証測定
→ 高精度・能率的な評価手法の開発・検証に活用

研究施設準備・設備導入状況

- 約120平米のドライルームを設置し、セル自動作製装置、モジュール加工装置、大型分析装置等を導入済み。
- 大面積モジュール対応性能評価装置を今後導入予定。



本事業で設備導入した建物

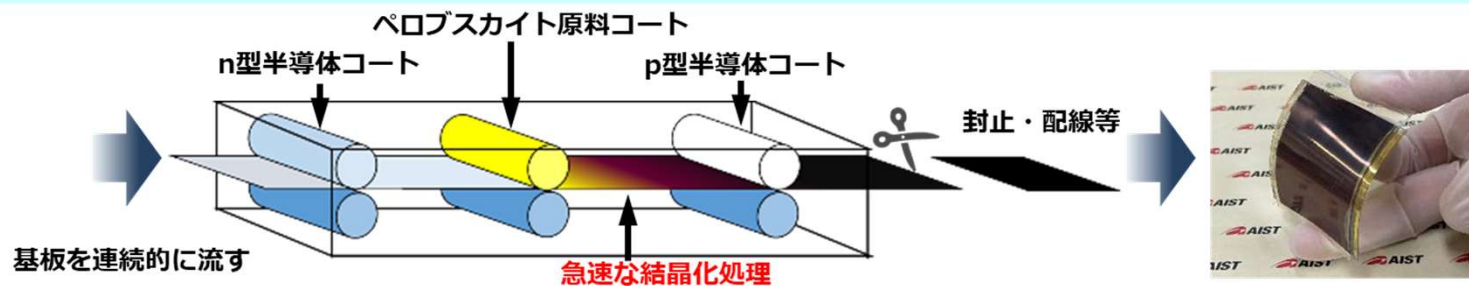


ドライルーム



ペロブスカイト太陽電池
自動作製システム

- 実用化に取り組む企業との秘密保持契約は順次締結。課題を整理し、共同研究にて企業の早期事業化に貢献する。
- 産総研で開発した**連続成膜技術**と**AIを活用**したプロセスインフォーマティクス (PI) による成膜条件の**最適化手法**、**セル・モジュール劣化解析**、**モジュール性能評価**について、GI参画企業へ**順次展開を開始**。量産に向けた技術開発をサポート。
- 産総研が開発した**自動塗布装置**や材料評価のノウハウについても、GI参画企業へ順次展開中。
- ペロブスカイト太陽電池内部の**電気特性評価手法**を開発し、企業が開発中のペロブスカイト太陽電池について加速劣化試験による変化について**分析結果をフィードバック**。劣化分析への適用を検討。



ペロブスカイト層の連続成膜技術で効率19%以上 ($>1\text{cm}^2$) を達成

成果を展開



研究開発進捗状況

研究開発項目	内容	進捗状況
1. 最適な材料組成の開発	セルの最適化技術開発	AIを用いた初期効率の最適化について 有効性を実証 。 計算科学で高効率化処理材料を探索中。
	セル自動作製システムの構築	自動塗布システムの知見を活用し世界唯一となる セル自動作製システム を開発し導入した。
2. セル要素技術の開発	量産可能な新規塗布・積層技術開発	ブレードコートにて 19.2% (1.1cm ²), 20.7% (0.16cm ²)を達成。 スプレーコートによる成膜に着手。今後は条件を精査。
	耐久性向上に資する技術開発	耐熱試験 (85℃) 1500h後の効率15% (0.16cm ² , 初期18.5%, 維持率83%)を達成。 耐光試験 (1Sun, 30℃, 50%RH) 1500h後の効率14% (0.16cm ² , 初期18.5%, 維持率83%)を達成。 スクライブ技術を活用し1.5cm ² で変換効率20.0%を達成。
3. 分析・評価技術開発	高性能化に資する 分析技術の開発	劣化評価技術として、 過渡発光分光法 、インピーダンス計測法、 過渡電流応答 計測法などを開発。様々な条件で作製した性能の異なるセルや性能劣化前後の比較により、性能劣化因子の特定と劣化メカニズム解明中。
	モジュール開発に資する 高精度・高効率な性能評価技術の開発	企業等のペロブスカイト太陽電池 (<30cm角) の 性能評価測定を実施 し、結果をフィードバック。変換効率の 測定再現性±1%以内達成 。 性能評価法の高精度化・能率化を検討するための、GI事業用性能評価計測系を構築。
	実用サイズモジュール (面積 >900cm²) の性能評価技術の開発	40cm角モジュールの性能評価計測系を構築 。1.2m角対応の屋内性能評価計測システム装置の設計完了。 屋外性能評価方法の開発に向けて、現有設備を活用 (移設・整備拡充) した屋外計測系を構築中。

内容	技術課題
セルの最適化技術開発	AIを用いた高効率・高耐久化条件の探索
セル自動作製システムの構築	太陽電池性能自動計測システムの稼働開始
量産可能な新規塗布・積層技術開発	1cm ² で20%以上の初期効率達成
耐久性向上に資する技術開発	耐熱性、耐光性のホール輸送材の開発 加速劣化1500h後の効率18%達成
高性能化に資する分析技術の開発	セル・モジュール劣化解析技術の開発 セル劣化機構の解明
モジュール開発に資する 高精度・高能率な性能評価技術の開発	高精度化とより能率的な評価手法の開発、 および有用性の検証。
実用サイズモジュール(面積>900cm ²) の性能評価技術開発	1.2m角以上の大型モジュールを性能評価 する屋内計測システムの構築。 屋外性能評価測定技術の開発