

# 事業戦略ビジョン

実施プロジェクト名：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

実施者名：国立研究開発法人 産業技術総合研究所 代表名：小原 春彦（執行役員/エネルギー・環境領域領域長）

---

# 目次

## 2. 研究開発計画

- (1) 研究開発目標
- (2) 研究開発内容
- (3) 実施スケジュール
- (4) 研究開発体制
- (5) 技術的優位性

## 4. その他

- (1) 想定されるリスク要因と対処方針

## 2. 研究開発計画

## 2. 研究開発計画／（1）研究開発目標

発電コスト20円/kWhというアウトプット目標を達成するために必要な複数のKPIを設定

研究開発項目	アウトプット目標	
1．最適な材料組成の開発	20円/kWhを達成できる（家庭用グリッドパリティ）最適な材料組成の確立	

研究開発内容	KPI	KPI設定の考え方
① 実用化企業の太陽電池セル・モジュール作製条件へのフィードバックを目的とした <b>セルの最適化技術開発</b>	マテリアルズインフォマティクス(MI)やプロセスインフォマティクス(PI)等を用いた条件提案件数、あるいは最適化手法開発件数	・MIやPI等を用いた材料やプロセスの最適化や計算科学による新規候補材料の提案で社会実装をサポート。産業界にMI・PIを普及させることも重要。
② 実用化企業の材料・プロセス技術のフィードバックを目的とした <b>セル自動作製システムの構築</b>	・自動化させたプロセスの件数あるいは割合	・新しい技術を比較し、開発方針にフィードバックさせるセル自動作製装置を構築し、企業の技術開発を直接サポート、早期社会実装に貢献する。

## 2. 研究開発計画／（1）研究開発目標

発電コスト20円/kWhというアウトプット目標を達成するために必要な複数のKPIを設定

研究開発項目	アウトプット目標	
2. セル要素技術の開発	20円/kWh達成に資する変換効率と耐久性を両立するセルの要素技術の開発	

研究開発内容	KPI	KPI設定の考え方
① 量産可能な作製プロセスの基盤技術構築を目的とした <b>新規塗布・積層技術開発</b>	・現状の枚葉式塗布技術と比較したタクトタイム、歩留まり、性能	・量産可能な技術であるブレード塗布、スプレー塗布等の開発進捗を示す指標とした。
② 太陽電池の耐用年数向上を目的とした <b>耐久性向上に資する技術開発</b>	・耐熱・耐湿・耐光試験において初期性能から90%の効率を維持する時間（1500hまでの割合）とセルの変換効率	・目標を変換効率20%以上で、その維持率を90%以上1500hとし、その効率および性能維持割合を指標とした。

## 2. 研究開発計画／（1）研究開発目標

発電コスト20円/kWhというアウトプット目標を達成するために必要な複数のKPIを設定

研究開発項目	アウトプット目標	
3. 分析・評価技術開発	20円/kWh達成に資する分析・評価技術の開発	

研究開発内容	KPI	KPI設定の考え方
① 太陽電池の高性能化に資する <b>分析技術の開発</b>	変換効率低下因子の特定技術を開発した件数	セル内部の性能低下因子を特定し、技術開発にフィードバックさせる。
② 太陽電池セル・モジュール開発に資する <b>高精度・高能率な性能評価技術の開発</b>	高精度評価技術となる要素技術の開発件数、もしくは、高精度性能評価測定の実施件数	ペロブスカイト太陽電池の特性に応じた性能評価技術の高精度化を進める。企業等の開発品の第3者測定を実施し、デバイス（セル・モジュール）開発を支援する。
③ <b>実用サイズモジュール（面積＞900cm<sup>2</sup>）の性能評価技術の開発</b>	・実用サイズモジュールの屋内性能評価体制および計測システム構築の進捗度（完成割合） ・屋内測定での変換効率の測定精度	実用サイズモジュールの高精度な屋内性能評価測定を実現する。企業等の開発品を高精度で第三者評価し、実用サイズモジュール開発にフィードバックする。
	屋外環境下での高精度性能・発電量評価技術となる要素技術の開発件数	屋外環境下でのモジュールの高精度性能評価技術を開発し、企業等が自社で評価できる技術を確立する。

## 2. 研究開発計画／（2）研究開発内容

### 各KPIの目標達成に必要な解決方法を提案

#### 1. 最適な材料組成の開発

研究開発内容	KPI	現状	達成レベル	解決方法
① 実用化企業の太陽電池セル・モジュール作製条件へのフィードバックを目的とした <b>セルの最適化技術開発</b>	マテリアルズインフォマティックス（MI）技術等を用いた条件提案件数、あるいは最適化手法開発件数	実験、MI、計算の連携事例は希少（TRL4）	・効率20% 耐熱・耐湿・耐光試験1500h （TRL 6）	・実験・計算・文献データからMI解析し最適化 ・MIと計算科学の連携により、新規候補材料を提案し性能向上 ・セル自動作製技術によるばらつき低減
② 実用化企業の材料・プロセス技術のフィードバックを目的とした <b>セル自動作製システムの構築</b>	自動化させたプロセスの件数あるいは割合	セル作製自動化の前例無し（TRL2）	基板からスタートしてセル作製が自動でできる（TRL6）	・セル作製作業を自動化させる機器を組み合わせてシステムを構築する。

## 2. 研究開発計画／（2）研究開発内容

### 各KPIの目標達成に必要な解決方法を提案

#### 2. セル要素技術の開発

研究開発内容	KPI	現状	達成レベル	解決方法
① 量産可能な作製プロセスの基盤技術構築を目的とした <b>新規塗布・積層技術開発</b>	・現状の枚葉式塗布技術と比較したタクトタイム、歩留まり、性能	枚葉式以外のプロセスで高い効率の報告無し。 (TRL3)	量産可能手法にて枚葉式で作製した効率レベル（TRL6）	ブレードコート、スプレーコート等で平滑なペロブスカイト層を成膜する。 ブレードコート、スプレーコート等で150℃以下で平滑に各種材料を積層させる。
② 太陽電池の耐用年数向上を目的とした <b>耐久性向上に資する技術開発</b>	・耐熱・耐湿・耐光試験において初期性能から90%の効率を維持する時間（1500hまでの割合）とセルの変換効率	全ての耐久性をクリアしている報告は無し。 (TRL3)	変換効率20%で耐熱・耐湿・耐光試験1500h後の維持率90%以上 (TRL6)	耐湿性向上に向けては、防湿材料の導入と探索・開発を進める。 耐光性については劣化因子の特定と劣化抑制処理（材料開発・洗浄技術）技術の開発を進める。



## 2. 研究開発計画／（2）研究開発内容

### 各KPIの目標達成に必要な解決方法を提案

#### 3. 分析・評価技術開発

研究開発内容	KPI	現状	達成レベル	解決方法
① 太陽電池の高性能化に資する <b>分析技術の開発</b>	変換効率低下因子の特定技術を開発した件数	分析技術をルーティン作業で実施できる技術の報告無し。 (TRL 4)	因子の特定をルーティン作業で実施できる状態 (TRL6)	劣化因子を測定する手法を物性測定などを組合せて確立。劣化に伴う変化をモニタリングし劣化測定技術を構築。
② 太陽電池セル・モジュール開発に資する <b>高精度・高能率な性能評価技術の開発</b>	高精度性能評価技術となる要素技術の開発件数、もしくは、高精度性能評価測定の実施件数	性能評価技術を開発中 (TRL 4)	性能評価技術の高精度化・高能率化 (TRL7)	定常出力特性評価手順の確立
③ <b>実用サイズモジュールの性能評価技術の開発</b>	・実用サイズモジュールの屋内性能評価体制および計測システム構築の進捗度（完成割合） ・屋内測定での変換効率の測定精度	実用サイズモジュールでの評価の実施無し。 (TRL 3)	実用サイズモジュール評価系の構築 (TRL6)	大面積照射定常光シミュレータ等装置・評価システムの開発、評価体制の構築、評価精度の向上
	屋外環境下での高精度性能・発電量評価技術となる要素技術の開発件数	高精度評価技術は未開発 (TRL 3)	屋外測定技術の確立と高精度化 (TRL 6)	・ペロブスカイト太陽電池に適した屋外計測系（日射計測、温度計測）の構築 ・温度・照度補正方法の開発

# 事業開始からの進捗状況

研究開発内容	実施計画・マイルストーン	開発進捗	進捗度
1. 最適な材料組成の開発  ・セルの最適化技術開発 ・セル自動作製システムの構築	・自動塗布システム設計完了  ・MI最適化開始  ・計算科学による材料探索開始	・自動塗布システムを設計。  ・実験データを収集。MIデータとして最適化開始。  ・計算科学による結晶内のイオン拡散の検討評価方法を確立	○
2. セルの要素技術の開発  ・新規塗布・積層技術開発 ・耐久性向上に資する技術開発	・連続作製手法で効率17%達成	・ブレードコートにて17%を達成  ・新規ホール輸送材を用いて発電効率19%を達成  ・吸着導入可能な新規界面修飾型ホール輸送材を開発。  ・太陽電池が劣化する水蒸気暴露量を調査  ・無機正孔輸送層および透過率の高い透明導電材料の開発に着手	○
3. 分析・評価技術の開発  ・分析技術の開発 ・高精度・高能率な性能評価技術の開発 ・実用サイズモジュール（面積 >900cm <sup>2</sup> ）の性能評価技術の開発	・第三者性能評価測定開始 （面積<30cm角）	・インピーダンス分光を用いた界面物性評価技術を開発  ・企業および外部研究機関開発品等のペロブスカイト太陽電池 （面積<30cm角）の性能評価測定を実施しフィードバック  ・屋外性能評価の要素技術として、温度・照度補正方法の開発に着手	○

## ペロブスカイト太陽電池の最適な材料組成の開発実施内容（MI・計算G）

- セル自動作製システムの構築では、基板搬送およびペロブスカイト前駆体溶液の塗布、基板加熱工程の自動化の初期システムを検討
- セルの最適化技術開発ではプロセスインフォマティックスの試みとし、セル性能のデータフォーマットを作成し、Pythonコードを用いた解析に着手している。計算科学ではペロブスカイト結晶内部におけるLi等不純物イオンの導入モデルを構築

## 変換効率と耐久性を両立するペロブスカイト太陽電池セルの 要素技術の開発実施内容（基盤技術G）

- ブレードコートによる連続成膜手法の開発
- 劣化に至る水蒸気暴露量を推定するため、水蒸気透過率（WVTR）の異なる封止材料を用い、累積水蒸気透過量とセル劣化の関係性を解明
- 大面積化へも対応可能となる自己組織化単分子膜(SAM)を形成する新規ホール輸送材料を開発し、従来のホール輸送材料であるPTAA、および従来SAMよりも高い効率を得た

# ペロブスカイト太陽電池の分析・評価技術の開発実施内容（評価技術G）

## 分析技術

- 性能劣化に影響を与える界面状態の分析技術開発としてインピーダンス分析による界面性能と性能劣化の分析手法を検討
- セルを破壊せずに劣化機構を特定する評価基盤技術として、過渡発光分光手法を用いた電荷再結合部位の特定技術を検討

## 性能評価技術

- ペロブスカイト太陽電池の性能評価技術として、温度・照度補正技術を検討
- 高精度性能評価測定（第3者測定）として新開発デバイスの性能評価測定を実施、測定手順の検証、測定精度の評価を実施し、測定結果は各デバイス開発元にフィードバック

## 2. 研究開発計画／（3）実施スケジュール

### 複数の研究開発を効率的に連携させるためのスケジュールを計画

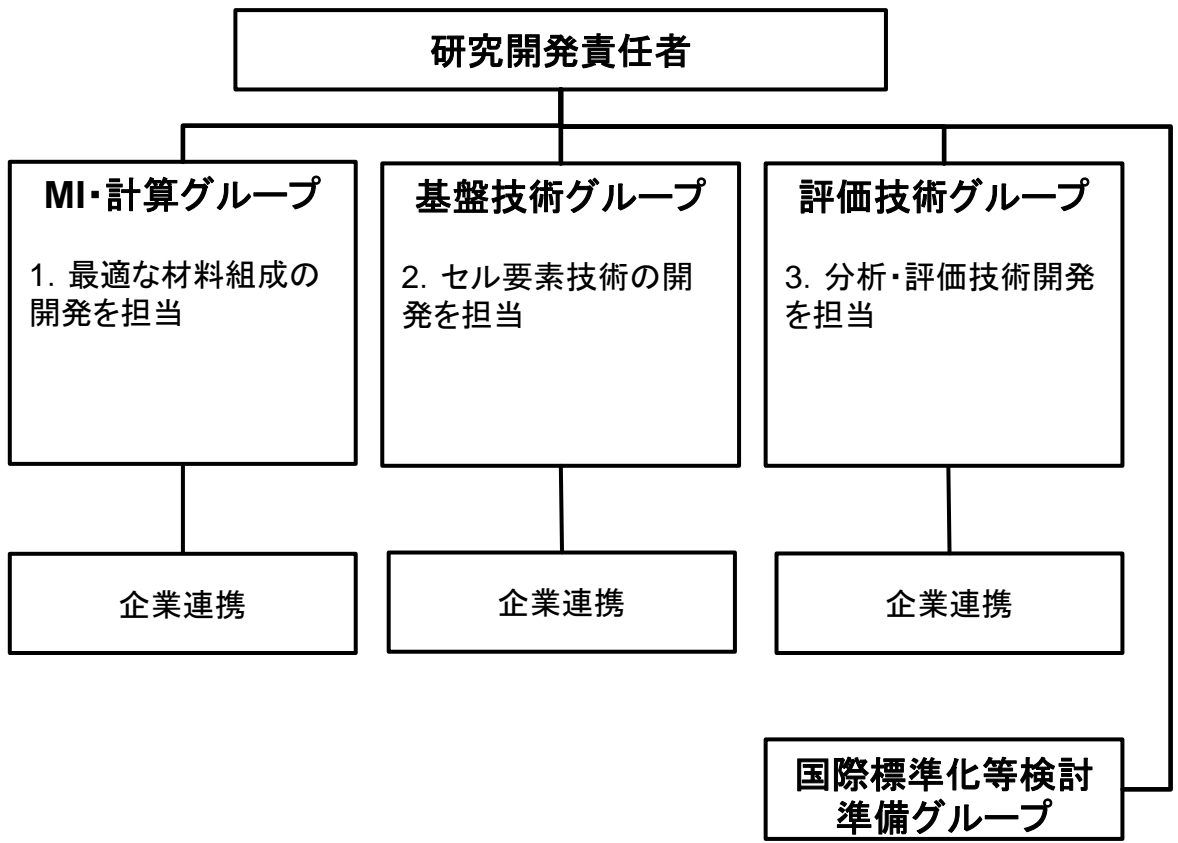
研究開発内容	2022	2023	2024	2025
研究設備・環境整備状況	・ドライルーム導入完了 ・大型分析装置導入完了	・塗布試験装置導入完了 ・各種計測分析装置導入完了		
ペロブスカイト太陽電池の最適な材料組成の開発	・自動塗布システム設計完了 ・MI最適化開始 ・計算科学による材料探索開始	・自動塗布システム完成 ・MI、PI最適化ファクター・材料候補提示	・自動蒸着、封止システム完成 ・PIによるプロセス最適候補提示	・自動作製・測定システム完成 ・PI・計算によるサポート継続
変換効率と耐久性を両立するペロブスカイト太陽電池セルの要素技術の開発	・連続作製手法で効率17%達成	・効率20%で耐熱・耐湿・耐光性 500h ・セル劣化メカニズム解明	・連続作製手法で効率18%達成 ・効率20%で耐熱・耐湿・耐光性 1000h	・連続作製手法で効率20%、耐熱・耐湿・耐光性 1500h
ペロブスカイト太陽電池の分析・評価技術の開発	・第三者性能評価測定開始 (面積<30cm角) (以後継続実施)	・物性評価技術確立 ・実用サイズ計測系構築、性能評価開始	・効率低下因子特定技術確立 ・屋外性能評価系構築完了	・モジュール劣化解析サポート ・屋外高精度測定手法開発完了

## 2. 研究開発計画／（4）研究開発体制

### 一気通貫の利点を生み出す研究開発実施体制の構築

実施体制図 ※総事業費/国費負担額：38.5/38.5億円

主体の体制における役割とその連携方法



#### 主体の役割

- MI・計算グループはセルの最適化技術開発およびセル自動作製システムの構築を担当。
- 基盤技術グループは新規塗布・積層技術開発および耐久性向上に資する技術開発を担当。
- 評価技術グループはセル分析技術の開発、高精度・高能率な性能評価技術の開発、実用サイズモジュール（面積>900cm<sup>2</sup>）の性能評価技術の開発を担当。
- 国際標準化等検討準備グループは標準に対する企業ヒアリング等を担当。
- 基盤技術グループが各種条件で作製した、セル性能のデータはMI・計算グループに共有し、MI・PI等の技術により最適化した作成条件を基盤技術グループにフィードバックする。
- 基盤技術グループが各種条件で作製したセルを評価技術グループにて分析評価を行い、基盤技術グループにフィードバックする。
- 基盤技術グループで作製されたセルを用いて、評価技術グループにて高精度測定法の技術開発を行う。
- 国際標準化等検討準備グループは国際標準の必要性和課題を整理。

#### 本プロジェクトにおける他実施者等との連携（貢献）

- 基盤技術グループで得られた、セルの高性能化技術に関する共通基盤的な知見について連携企業に共有する。知財が発生する技術については権利化後に共有する。
- 評価技術グループでは、「次世代型太陽電池実用化事業」の実施者が作製した太陽電池セル・モジュールの高精度測定を実施する。



## 2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

### 国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

研究開発項目	研究開発内容	活用可能な技術等	競合他社に対する優位性・リスク
1.最適な材料組成の開発	セルの最適化技術	<ul style="list-style-type: none"><li>MI技術①ベイズ最適化を用いた多元化合物の組成最適化技術</li><li>MI技術②実験・計算のデータ同化による材料特性評価技術</li><li>計算科学の技術①第一原理計算を中心とした電子状態と原子構造の解析技術</li><li>計算科学の技術②表面・粒界・界面のモデリング技術</li><li>素子開発の技術①</li><li>素子開発の技術②</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ 磁性材料で有効性を検証し、論文発表済み。他の材料系やプロセスパラメータの最適化へ転用可能</li><li>→ 磁性材料に対して開発し、論文発表済み。ペロブスカイト系の特性評価に転用可能</li><li>→ 半導体・電池関連の材料系で実績・ノウハウ多数。MI・実験連携が可能</li><li>→ 任意の表面・粒界方位や異種物質界面モデルの自動生成が可能。欠陥濃度を変えつつも、適切な形の複数結晶モデル（スーパーセル）を作る手法を確立</li></ul>
	セル自動作製システムの構築	<ul style="list-style-type: none"><li>ロボットを用いた基板搬送技術</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ ロボットを活用した実験システムの構築経験を保有。基板搬送まで含めたペロブスカイト太陽電池自動作製システムは国内に無いものと認識</li></ul>

## 2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

### 国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

研究開発項目	研究開発内容	活用可能な技術等	競合他社に対する優位性・リスク
2. セル要素技術の開発	新規塗布・積層技術開発	<ul style="list-style-type: none"><li>高効率ペロブスカイト太陽電池作製技術</li><li>ペロブスカイト層のブレードコート技術</li><li>ペロブスカイト層の結晶化過程の解析技術</li><li>ペロブスカイト層の蒸着技術</li><li>金属酸化物等の界面バッファ層形成技術</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ 効率20%以上を達成できる技術を保有</li><li>→ ペロブスカイト層のブレードコート技術を保有している機関は2者程度と認識</li><li>→ 高輝度X線回折等による結晶化過程の解析技術を保有</li><li>→ ペロブスカイト層のレーザー蒸着による成膜技術を世界で最初に構築</li><li>→ 電荷輸送層/電極界面のバッファ層形成技術（ALD）を保有</li></ul>
	耐久性向上に資する技術開発	<ul style="list-style-type: none"><li>劣化抑制材料の開発技術</li><li>劣化解析技術</li><li>封止方法と水分暴露量計算方法</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ 劣化評価のための封止セル作製技術を保有している機関は5者程度と認識</li><li>→ 分光分析による劣化解析技術を保有</li><li>→ 封止性能の目標を立てられる。</li></ul>

## 2. 研究開発計画／（5）技術的優位性

### 国際的な競争の中においても技術等における優位性を保有

研究開発項目	研究開発内容	活用可能な技術等	競合他社に対する優位性・リスク
3.分析・評価技術開発	セル開発に資する物性分析技術の開発	<ul style="list-style-type: none"><li>レーザー分光による過渡応答測定を含む各種分光分析の技術</li><li>インピーダンス分光によるデバイス界面物性の評価技術</li><li>劣化因子を特定するモデルデバイス作製技術</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ 太陽電池の高速レーザー分光等による解析技術で実績がある機関は限られる。</li><li>→ 太陽電池の基礎的なインピーダンス解析を実施している機関は限られる。</li><li>→ モデルデバイスの作製はオリジナル</li></ul>
	高精度・高能率な性能評価技術の開発	<ul style="list-style-type: none"><li>結晶Si、CIGS薄膜等各種太陽電池（セル、モジュール）の高精度性能評価測定技術</li><li>国際相互承認トレーサビリティを担保した計測技術（計測法、人材）</li><li>基準太陽電池の一次校正技術（世界PVスケール(WPVs)の1機関）</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ 高精度な性能評価技術の蓄積（評価技術、計測スキル）</li><li>→ 世界を先導する性能評価機関として認知されている（例えば、Eff.Tables 指定ラボ）</li><li>→ 性能評価基準の根幹をなす基準セル一次校正の日本で唯一の機関。校正トレーサビリティ体系を維持</li></ul>
	実用化サイズデバイスの性能評価技術の開発	<ul style="list-style-type: none"><li>太陽電池モジュールの性能評価技術（STC、温度依存性）</li><li>結晶Si、CIGS薄膜等PVモジュールの屋外高精度評価技術、温度・照度補正技術</li><li>屋外設置システムの発電量計測技術</li><li>屋外曝露サイトの活用</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ 各種太陽電池モジュール計測技術の蓄積</li><li>→ 現在開発を進める屋外高精度評価技術をペロブスカイト太陽電池の屋外計測に展開可能</li><li>→ 屋外曝露サイト計測システムの本事業への転用が可能</li></ul>

## 4. その他

## 4. その他 / (1) 想定されるリスク要因と対処方針

### 本プロジェクトだけでは解決しきれない課題とその対応

- 本プロジェクトでは実用化を可能にする共通基盤技術の開発を進めるが、製造コストを正確に評価することが難しい。特に材料コストは最終的な受注量や為替相場、需給バランスで単価の変動が予測される。この課題を解決するために、代替可能な材料や技術の選択肢（技術ポートフォリオ）を可能な限り広く準備しておく必要があると考えている。
- 将来の社会情勢の変化により必要とされる技術の内容や完成時期が変化する可能性も考えられる。例えば既存のガス・石油・石炭火力発電等の電力単価高騰や、地域情勢の不安定化による材料供給網が滞る等により、次世代型太陽光発電の社会実装条件が変化する可能性がある。この課題も上記同様に代替可能な材料や技術の選択肢（技術ポートフォリオ）を可能な限り広く準備しておく必要があると考えている。
- 産総研では必要とされる材料や技術、目標等が変化し、新しい専門分野が必要な場合に組織として対応し、内部から適任者を探し、メンバーの組入措置も可能である。技術条件や情勢の変化に柔軟に対応する。