

# 「太陽光発電主力電源化推進技術開発」

## 事業原簿 【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	--------------------------------------



## —目次—

概要	概要-1
プロジェクト用語集	用語集-1

### I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置づけ	I-1[1]
1.1 事業実施の背景と事業の目的	
1.2 国内外の研究開発の動向	
1.3 技術戦略上の位置づけ	
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-2[1]
2.1 NEDO が関与することの意義	
2.2 実施の効果(費用対効果)	

### II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標	II-1[1]
2. 事業の計画内容	II-2[1]
2.1 研究開発の内容	
2.2 研究開発の実施体制	
2.3 研究開発の運営管理	
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	
3. 情勢変化への対応	II-3[1]
4. 中間評価結果への対応	II-4[1]
5. 評価に関する事項	II-5[1]

### III. 委託テーマの成果詳細と実用化・事業化見通し

1. 事業全体の成果	III-1[1]
2. 研究開発項目毎の成果と実用化・事業化見通し	
(イ) 新市場創出技術開発	.....III-2-(イ) -[1]
(i) フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発	.....III-2-(イ)-(i)-[1]
A CIS太陽電池のドライプロセスによる高品質接合界面構造の開発 (学校法人立命館)	.....III-2-(イ)-(i)-A[1]
B ヘテロ界面制御による新型バッファレス CIS 太陽電池の開発 (国立大学法人東京工業大学)	.....III-2-(イ)-(i)-B[1]
C 多様な基板上で実現可能な CIS 太陽電池高効率化要素技術の研究開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人筑波大学 (再)、 国立大学法人鹿児島大学 (再))	.....III-2-(イ)-(i)-C[1]
D 多様な基板に適用可能な軽量 CIS 太陽電池 製造要素技術の開発 (出光興産株式会社)	

- .....Ⅲ-2-(イ)-(i)-D[1]
- E 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの研究開発  
(シャープ株式会社)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(i)-E[1]
- F 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池のモジュール化要素技術研究開発  
(株式会社エネコートテクノロジーズ)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(i)-F[1]
- G 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池の基盤技術研究開発  
(国立大学法人京都大学、公立大学法人兵庫県立大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(i)-G[1]
- H 超軽量モジュール技術の研究開発(株式会社東芝)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(i)-H[1]
- I 界面制御による高性能化技術と性能評価技術の開発  
(国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人京都大学(再)、  
学校法人立命館大学(再)、神奈川県立産業技術総合研究所(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(i)-I[1]
- J ロールトゥロール製造技術の研究開発(積水化学工業株式会社)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(i)-J[1]
- K ペロブスカイト太陽電池の新市場創出に向けた高効率化材料技術と製膜技術の開発  
(国立大学法人東京大学、国立大学法人電気通信大学(再)、学校法人東京都市大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(i)-K[1]
- (ii) 壁面設置太陽光発電システム技術開発  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-[1]
- A 赤外光を有効利用する量子ドット太陽電池の開発  
(国立大学法人東京大学、株式会社タカノ(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A[1]
- B AI 予測最適化手法を用いたシースルー量子ドット太陽電池の逆設計と開発  
(国立大学法人電気通信大学)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B[1]
- C ウェットプロセスを用いた中間バンド太陽電池の開発  
(花王株式会社、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C[1]
- D 多機能・高品質薄膜の利用による壁面太陽電池モジュールの長寿命化  
(国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学、国立大学法人東海国立大学機構岐阜大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-D[1]
- E 壁面設置タンデム太陽電池モジュールの構造最適化と屋外性能評価技術の開発  
(国立大学法人新潟大学、学校法人明治大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E[1]
- F 壁面設置太陽発電システムの生涯発電量最大化技術の研究開発(青山学院大学)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F[1]
- G 壁面設置太陽電池モジュールの高性能化技術開発(国立研究開発法人産業技術総合研究所、  
国立大学法人東京工業大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-G[1]
- H 壁面設置太陽光発電システムの効率向上、長寿命化技術開発(株式会社カネカ)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H[1]
- I 壁面設置太陽光発電システム市場拡大のための共通基盤技術の開発とガイドライン策定  
(太陽光発電技術研究組合、国立研究開発法人産業技術総合研究所(再))

- .....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-I[1]
- J ペロブスカイトBIPVモジュールの研究開発 (パナソニックホールディングス株式会社)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J[1]
- K 高性能化に向けたBIPV材料技術開発 (学校法人早稲田大学)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-K[1]
- L ZEB 達成に向けた同時同量を実現する太陽光発電システムの実証  
(株式会社カネカ、株式会社大成建設(再)、国立大学法人東京大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L[1]
- M デザイン性を考慮した後付け可能な新築・既築向け BIPV システムの実証  
(株式会社L I X I L)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M[1]
- (iii) 移動体用太陽電池の研究開発  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-[1]
- A 超高効率低コストセル・モジュール技術開発 (シャープ株式会社)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A[1]
- B 高効率多接合薄膜セル (国立大学法人東京大学)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B[1]
- C 超高効率ボトムセル開発 (CIS) (出光興産株式会社)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-C[1]
- D 超高効率多段接合モジュール開発 (学校法人トヨタ学園豊田工業大学、  
学校法人明治大学(再)、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D[1]
- E 低コスト成膜装置開発 (太陽日酸株式会社)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E[1]
- F 移動体用モジュール評価・構造設計技術開発 (国立大学法人宮崎大学)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F[1]
- G 低コストエピ・接合技術開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G[1]
- H 実用サイズペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池実現のためのプロセス技術開発  
(国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人山形大学(再))  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-H[1]
- I 高効率タンデム型太陽電池モジュールの開発 (株式会社カネカ)  
.....Ⅲ-2-(イ)-(iii)-I[1]
- (ロ) 太陽光発電の長期安定電源化技術開発  
.....Ⅲ-2-(ロ)-[1]
- (i) 安全性・信頼性確保技術開発  
.....Ⅲ-2-(ロ)-(i)-[1]

- A 高安全PVモジュール、高安全PVシステムの技術基準案の策定  
 (太陽光発電技術研究組合、学校法人日本大学(再))  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A[1]
- B 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定  
 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人北海道科学大学(再)、  
 国立研究開発法人防災科学技術研究所(再)、一般社団法人構造耐力評価機構、  
 公立大学法人大阪(再)、一般社団法人太陽光発電協会(JPEA)、  
 八千代エンジニアリング株式会社、デロイトトーマツコンサルティング合同会社)  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B[1]
- C 太陽光発電の安全性・信頼性評価、回復技術の技術情報基盤整備  
 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般社団法人構造耐力評価機構、  
 SOMPOリスクマネジメント株式会社、一般社団法人太陽光発電協会(JPEA))  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(i)-C[1]
- D 太陽光発電の長期安定電源化に向けた評価・回復の実用化促進技術開発  
 (関西電力株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所(再)、  
 一般社団法人構造耐力評価機構(再)、アジア航測株式会社、株式会社エクソル、  
 株式会社CO2O、日本地工株式会社)  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D[1]
- E 傾斜地設置型並びに営農型太陽光発電施設を対象とした凍上対策ガイドラインの策定  
 (国立大学法人北海道国立大学機構北見工業大学)  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(i)-E[1]
- F 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のための実証実験  
 (一般社団法人構造耐力評価機構、八千代エンジニアリング株式会社、  
 国立研究開発法人産業技術総合研究所、キョーラク株式会社)  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F[1]
- G 次世代のO&Mを支える発電電力量評価等の技術開発 (株式会社エナジービジョン、  
 一般社団法人新エネルギーO&M協議会)  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G[1]
- (ii) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-[1]
- A 太陽電池モジュールの低温熱分解法によるリサイクル技術開発 (株式会社トクヤマ)  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A[1]
- B 結晶シリコン及びCIS太陽電池モジュールの低環境負荷マテリアルリサイクル技術実証  
 (ソーラーフロンティア株式会社、宮崎県工業技術センター (再)、  
 国立大学法人宮崎大学(再))  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B[1]
- (iii) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-[1]
- A 太陽光発電による調整力創出技術の実現可能性に関する研究  
 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所)  
 .....Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A[1]
- B 多地点間における自己託送を活用した需給一体型太陽光発電システムの基本設計  
 (日本電気株式会社、東京電力エナジーパートナー株式会社)



.....Ⅲ-2-(二)-(iii)-[1]

A 太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査 (株式会社資源総合システム)

.....Ⅲ-2-(二)-(iii)-A[1]

B 国際技術協力プログラムへ参画 (株式会社資源総合システム)

.....Ⅲ-2-(二)-(iii)-B[1]

C 新市場の動向調査

(株式会社資源総合システム、みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社)

.....Ⅲ-2-(二)-(iii)-C[1]

(添付資料)

添付資料 1 プロジェクト基本計画

添付資料 2 事前評価関連資料 (事前評価書)

添付資料 3 論文、対外発表の明細



概要

		最終更新日	2022年9月22日
プロジェクト名	太陽光発電主力電源化推進技術開発		プロジェクト番号 P20015
担当推進部	PM 新エネルギー部 山崎 光浩 PT 新エネルギー部 井川 博之 (2020年7月～2022年9月) PT 新エネルギー部 石村 正憲 PT 新エネルギー部 岩田 雅史 (2020年7月～2022年3月) PT 新エネルギー部 葛西 正 (2020年7月～2020年9月) PT 新エネルギー部 吉柳 考二 (2022年4月～) PT 新エネルギー部 児玉 博人 (2022年4月～2022年6月) PT 新エネルギー部 近藤 信義 (2020年7月～2030年10月) PT 新エネルギー部 志賀 大輔 (2021年4月～) PT 新エネルギー部 白石 知己 PT 新エネルギー部 嶋田 聡 PT 新エネルギー部 中西 直明 PT 新エネルギー部 永瀬 収 (2021年4月～) PT 新エネルギー部 福嶋 清 PT 新エネルギー部 宮川 康陽 PT 新エネルギー部 保田 淑晴 (2020年7月～2021年3月) PT 新エネルギー部 山川 正路 (2020年7月～2022年3月)		
0. 事業の概要	<p>本事業では太陽光発電の主力電源化を推進するため、需要地に近接しているが従来の技術では太陽光発電を利用できなかった場所を利用可能にするためのセル・モジュール開発や長期安定的な事業運営確保として現在顕在化している課題解決とする技術開発を行う。上記と並行し、これらの技術を支える測定評価技術、日射量予測技術等、先進的共通基盤技術の開発や国内外の開発動向を把握し、開発を支援する動向調査等も実施する。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画では、「2030年に向けた基本的な方針と政策対応」として、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた取組は、「他の電源と比較して競争力ある水準までのコスト低減と固定価格買取制度(FIT)からの自立化を図り、日本のエネルギー供給の一翼を担う長期安定的な主力電源として持続可能なものとなるよう、円滑な大量導入に向けた取組を引き続き積極的に推進していく」ことが必要とされている。また、「2050年に向けたエネルギー転換・脱炭素化の挑戦」としては、変動するエネルギー需要を単独で満たす完璧なエネルギー技術は実現していないことから「全方位の複線シナリオ」が必要とされている。この中で太陽光発電などの再生可能エネルギーは主力電源化に向け、「面積的な制約の克服のための発電効率の抜本的向上」などの技術革新によるブレークスルーを要する課題に取り組む事が必要とされている。さらに、2021年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画では、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、電化の促進、電源の脱炭素化が鍵となる中で、再生可能エネルギーに関しては、S+3Eを大前提に、2050年における主力電源として最優先の原則の下で最大限の導入に取り組むとされており、太陽光発電の更なる導入が必要不可欠となる。</p> <p>シリコン系の太陽光発電の導入が進む中で更なる太陽光発電の導入を進めるために、従来の技術では太陽光発電の導入が難しかった場所への導入を目指し、発電効率の向上、軽量化、曲面追従化等とコスト低減などの技術開発を行い、将来の太陽光発電の導入量拡大とともに新たなセル、モジュール、システム技術に関連した産業競争力の強化を図る。例えば、移動体を含め、より高効率かつ高耐久性を求められる条件下への太陽光発電の導入を見据えた技術開発の実施や、重量制約の有る屋根、建物壁面などへの太陽光発電の導入に向け研究開発を行う。さらに、太陽光発電の主力電源化を推進するため、太陽光発電設備の長期安定電源化に向けた事業運営確保として現在顕在化している課題である安全の確保に資するガイドライン策定や小規模な事業用太陽光発電設備の適切なメンテナンスの確保や再投資を促すため必要となる信頼性に係る技術開発を行う。また、2030年代以降に急増が懸念される太陽光発電設備の廃棄物を回避するためのリサイクル技術や現在、出力抑制等の系統制約の克服に向けた太陽光発電側での対応方法の検討・実証等を行う。</p> <p>上記と並行し、これらの技術を支える測定評価技術、日射量予測技術等、先進的共通基盤技術の開発や国内外の開発動向を把握し、開発を支援する動向調査等も実施する。</p>		

II. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	<p>従来技術では太陽光発電の導入が進んでいない場所が必要とされる性能を満たし、各市場の創出・拡大に資する要素技術を開発することで、太陽光発電の新市場の創出につなげる。具体的には移動体や、重量制約のある屋根、建物壁面など、従来技術での導入では課題がある場所での基盤技術について、研究開発を促進し上記の目標を加速する。</p> <p>併せて既に導入されている太陽光発電の長期安定的な事業の運営確保として、安全性信頼性の確保、系統制約の克服等の現在顕在化している課題解決や発電設備の廃棄対策等の適切な事業環境整備に資する技術を開発する。更に上記の分野に資する共通基盤技術を開発する。</p> <p>新市場創出に向けた太陽光発電の技術開発によって、2050年時点での国内累積導入量として、約320GW（うち新市場 約170GW※）、太陽光発電によるCO2排出量削減（系統電源との比較）として、約110百万t/年（うち新市場 約60百万t/年）を推計した。※重量制約のある屋根、建物壁面、移動体（車載）、営農、水上の合計</p>						
事業の計画内容	研究開発項目	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	2024fy	
	(I)太陽光発電の新市場創造技術開発	←					→
	(II)太陽光発電の長期安定電源化技術開発	←					→
	(III)先進的共通基盤技術開発	←					→
	(IV)動向調査等	←					→
評価			★ 中間評価				★ 事後評価
開発予算 （会計・勘定別に事業費の実績額を記載）（単位：百万円） 契約種類：委託(100%)、共同研究(2/3)、助成(1/2)	会計・勘定	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	2024fy	総額
	一般会計	—	—	—	—	—	
	特別会計(需給勘定)	2,673	2,863	618	—	—	
	増額予算	—	—	—	—	—	
	総予算額	2,673	2,863	618	—	—	
	(委託)	1,685	1,854	414	—	—	
	(共同研究)	872	891	188	—	—	
	(助成)	116	118	16	—	—	
開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課					
	プロジェクトリーダー	プロジェクトリーダーは設置せず、推進委員会/技術検討委員会における委員のコメントをもとにNEDOがマネジメントを行った。					
	プロジェクトマネージャー	新エネルギー部 山崎 光浩					
	委託先・共同研究先	<p>(株)東芝、積水化学工業(株)、シャープ(株)、(株)エネコートテクノロジーズ、出光興産(株)、東京大学、京都大学、(国研)産業技術総合研究所、東京工業大学、立命館大学、花王(株)、パナソニックホールディングス(株)、(株)カネカ、(株)LIXIL、太陽光発電技術研究組合、電気通信大学、新潟大学、北陸先端科学技術大学院大学、早稲田大学、青山学院大学、宮崎大学、豊田工業大学、大陽日酸(株)、(一社)構造耐力評価機構、(一社)太陽光発電協会、八千代エンジニアリング(株)、デロイトトーマツコンサルティング(同)、SOMPOリスクマネジメント(株)、関西電力(株)、アジア航測(株)、(株)エクソル、(株)CO2O、日本地工(株)、(株)エナジービジョン、(一社)新エネルギーO&amp;M協議会、キョーラク(株)、北見工業大学、(株)トクヤマ、ソーラーフロンティア(株)、(一財)電力中央研究所、日本電気(株)、東京電力エナジーパートナー(株)、東芝エネルギーシステムズ(株)、東京理科大学、(一財)日本気象協会、みずほリサーチ&amp;テクノロジーズ(株)、(株)三菱総合研究所、(株)資源総合システム</p>					

情勢変化への対応	2050年カーボンニュートラル実現に向けて、2021年12月に「グリーンイノベーション基金/次世代型太陽電池の開発」事業（以下、GI基金事業とする）が開始され、ペロブスカイト単接合型太陽電池の開発および実用化はGI基金事業に移行することとした。GI基金事業への移行内容を踏まえて、本事業においては、多接合型ペロブスカイト太陽電池の研究開発に取り組むこととした。太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術の実用化に向けて、土台となる分離・マテリアルリサイクル技術の深化および確立、目標とするコストの検証など確立された技術の実証およびリサイクル材料の用途開拓など、実用化に向けた取り組みを推進するため、事業期間を3年間から4年間に延長した。	
評価に関する事項	事前評価	事前評価 2019年度 担当部 新エネルギー部
	中間評価	中間評価 2022年度 担当部 新エネルギー部
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>研究開発項目①では、新市場（重量制約のある屋根、建物壁面等）で求められる要件を満たす太陽電池モジュール（ペロブスカイト、CIS、Ⅲ-V化合物、結晶シリコン；上記の多接合型を含む）の実用化・事業化に向けた研究開発において、各々の分野で設定した中間目標を達成するべく、企業を核とした産学官連携の下で研究開発を行った。フィルム型超軽量太陽電池の開発では、フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール（30cm角）の変換効率で世界記録15.1%を獲得するなど大きな成果を上げた。また、耐久性向上に関しても進展があった。壁面設置太陽光発電システム技術開発では、ペロブスカイト-ペロブスカイト多接合型（ペロブスカイトタンデム）で変換効率と耐久性の顕著な向上が達成された。また、BIPV市場拡大に向け基盤技術の開発とガイドライン策定で進展があった。移動体用太陽電池の研究開発では、ペロブスカイト-シリコン多接合太陽電池で世界有数の変換効率&gt;28%（1cm<sup>2</sup>）を達成した。また、低コスト化に向けた装置の検討が進められた。</p> <p>研究開発項目②では、安全性・信頼性確保技術開発において、発電設備の安全性を確保するため、ガイドラインの作成等の基盤整備を実施した。太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発において、低コストかつマテリアルリサイクルに資する高い資源回収率を両立する分離処理技術を開発するとともに、実証プラントを構築して実モジュールサイズで検証を行った。系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証において、系統連系における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証を行った</p> <p>研究開発項目③では、新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発において、標準化や規格化が進んでいない新型太陽電池等の出力等の性能を正しく評価するための測定技術を開発した。発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発において、現在を起点に数時間先の1km四方程度のエリアの日射量を予測する技術の開発および評価を実施した。</p> <p>研究開発項目④では、移動体用太陽電池の動向調査（海外、国内）、リサイクル関連の動向調査、次世代型太陽電池を含む太陽光発電の動向調査及びIEA PVPSの国際協力活動への参加、情報収集、活動提案を行った。上記で得られた知見を基本計画・実施方針へ反映することにより、研究開発の効率向上、開発目標の改定につなげた。</p>	
	投稿論文	96件
	特許	59件（うち、国際出願9件）
	研究発表・講演	501件
Ⅳ. 実用化の見通しについて	本事業で確立した技術は、漸次担当企業で実用化されていく。新市場（重量制約のある屋根、建物壁面等）で求められる変換効率、耐久性、外観等を目標とする技術は、モジュールでの性能実証、実使用環境での実証の段階を経て、量産に向けて進展する。リサイクル技術は、目標とするコストの検証など確立された技術の実ラインでの実証、およびリサイクル材料の用途開拓など、実用化に向けて進展する。建物壁面や安全性に関して策定したガイドラインは、上記企業での実用化に向けた取り組みを支援する。	
Ⅴ. 基本計画に関する事項	作成時期	2020年3月制定
	変更履歴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2021年3月改訂、研究開発の目的を追記し、研究開発項目（Ⅱ）の実施内容の見直し</li> <li>・2022年3月改訂、第6次エネルギー基本計画に基づき研究開発目的を追記。グリーンイノベーション基金への事業移行に関する一文を追記</li> <li>・2022年8月改訂、研究開発項目（Ⅳ）の実施内容および実施期間の見直し</li> </ul>

## プロジェクト用語集

用語（日本語）	用語（英語）	説明
△型のロール形状	Triangle roll shape	ロール破砕機における2本のロールの表面突起部の形状が三角型のもの。
12ヶ月移動平均	moving average for past twelve months	発電効率の12ヶ月移動平均のこと。
1 $\sigma$	1 $\sigma$	測定値ばらつきの評価で標準偏差 $\sigma$ を倍率1倍で用いる。
1ダイオードモデル	1 diode model	太陽電池の等価回路モデルの一つであり、電流源、一つのダイオード、並列抵抗、直列抵抗を用いて太陽電池の電流-電圧特性をあらわすモデル。
2次準器	Secondary standard	各国にひとつ程度しかない1次準器によって校正された測定器。
2段階法	2step method	2種類の溶液を順番に塗布することによりペロブスカイト膜を成膜する方法。
3 $\sigma$ 誤差	Prediction error of 3 $\sigma$	予測が大きく外れる事象の予測誤差の大きさの指標。予測誤差の99.7パーセンタイル値。
8K高精細カメラ	8K resolution camera	ハイビジョン（1920×1080）の縦横4倍、7680×4320＝約3,300万画素の超高精細映像撮影カメラ。
ACモジュール	AC Module	マイクロインバータを装備した太陽電池モジュール。出力が交流であるモジュール。
Akima法	Akima interpolation	Akima氏によって考案された3次多項式補間法。
Al法	Al method	電圧誘起劣化現象の加速試験方法の一つ。太陽電池モジュールのカバーガラスに設置したAl板を電極とし、セルの電極との間に電界を印加し劣化現象を引き起こす。
APE	Average Photon Energy	一つの太陽光スペクトルに含まれるフォトンの平均エネルギーのこと。太陽光スペクトルの波長偏りを示す指標であり、AG1.5Gの標準スペクトルを350-1050nmの範囲で計算するとAPE=1.88eVとなる。すなわち屋外で測定した実スペクトルのAPEがこの値よりも高ければ短波長成分が相対的に多いブルーリッチ、逆であればレッドリッチであるといえる。
ARコート	Anti-reflection Coating	基板表面における光の反射を減少させるための薄膜。
ATC試験	Accelerated thermal cycle test	IEC61215に記載の温度サイクル試験をより加速評価できるように開発した新規信頼性試験。
BIPV	Building-integrated photovoltaics	建材一体型の太陽電池モジュール及び太陽光発電システム。修理、交換が容易でないケースが多く、より高い安全性が要求される。

BPD	Bypass diode	太陽電池モジュール内に設置するダイオード。セル断線などにより太陽電池の一部が高抵抗になり電流が流れない状況になった際に、電流をバイパスさせる。PV システムの出力低下を最小限にするとともに安全性を向上させるもの。
CBM	Condition Based Management / Maintenance	異常発生を検知し、修理等の対応を行うメンテナンス。
CCD	Charge Coupled Device	固体撮像素子であり、ビデオカメラなどイメージセンサに広く利用されている半導体素子。
CCD カメラ	CCD camera	CCD は人間の目でいう網膜、光をデジタル信号に変換するためのセンサー、撮像素子のこと。CCD カメラとは、これらを撮像素子として使用したカメラのこと。
CC プロット	Cole-Cole Plot	周波数ごとのインピーダンスの軌跡を複素平面上にプロットしたもの。別名：ナイキストプロット。
CIGS	CIGS	$\text{CuIn}_{(1-x)}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ を組成とする化合物半導体及び CIGS (Cu, In, Ga, Se 等の化合物半導体) を発電層に用いた太陽電池。
CIGSSe	CIGSSe	半導体 $\text{Cu}(\text{In, Ga})(\text{S, Se})_2$ の構成元素の頭文字からとった略称。光吸収層として使われる。
CIS 系太陽電池	Copper Indium Selenium cell	銅、インジウム、セレン他による化合物を光吸収層とした太陽電池。
CMOS カメラ	CMOS camera	光をデジタル信号に変換する撮像素子の一つ。各画素ごとのスイッチの ON/OFF により蓄積した電荷を電圧に変換した信号を転送し、画像として出力する。
CPV	Concentrating Photovoltaics	集光型太陽光発電。
DFT 法	Discrete Fourier Transform	離散フーリエ変換。
DH 試験	Damp Heat Test	電気電子製品を対象にして高温高湿が特性劣化に与える影響を加速して評価する標準的な試験方法で、相対湿度 85%、温度 85°C において対象品に適した長期の時間が推奨されている。
DR	Demand Response	電力不足の際に、需要側電力を節減すること。逆に太陽光発電電力が需要を上回る場合などに、需要側電力を増やす「上げ DR」もある。
EBIC	Electron Beam Induced Current	電子線誘起電流法。太陽電池断面に電子線を照射、電子線のエネルギーにより励起された電子・正孔電流を測定することにより、太陽電池内部の少数キャリアの収集効率を測定する。

ECMWF	The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	欧州中期予報センター。
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy	エネルギー分散型 X 線分析法。電子線などを物体に照射した際に発生する特性 X 線のエネルギーを分光することにより、元素分析を行う。
EL	Electroluminescence	半導体に電界を印加し、注入した電子と正孔の再結合により発光する現象。一般に PID が発生した太陽電池モジュールは発光強度が低下するとされている。
EL 検査	Electro Luminescence Test	太陽光発電モジュールの製造工程等で用いられる検査。太陽光発電モジュールに強制的に電流を流して発光させ、特殊カメラで撮影し検査を行う。
EMS	Energy Management System	電力(発電、売買電、消費)を制御することにより、電力料金節減、系統安定化などを行うもの。
Encoder-Decoder	Encoder-Decoder	入力データを別のデータへ変換する AI の総称。エンコーダーは入力データを抽象化する機能を持つ。デコーダーは抽象化されたデータを目的に合わせて変換する。
ESTI	European Solar Test Installation	欧州共同体の研究所。太陽電池評価研究を実施。
ETFE	Ethylene tetrafluoroethylene copolymer	エチレン-4 フッ化エチレン共重合体。
EVA	Ethylene-vinylacetate copolymer	太陽電池モジュールに用いられる代表的な封止材のひとつ。エチレン酢酸ビニル共重合体。
EVA	Ethylene-vinylacetate copolymer	EVA 樹脂はエチレン・酢酸ビニル共重合樹脂で、-58℃まで可撓性があり、水、紫外線に優れた安定性があると同時に、ゴム弾性、柔軟性、強靱性、低温特性、耐候性に優れた樹脂材料。太陽電池モジュールの封止に使用される樹脂材料の一つ。
EVA/セル層	EVA/Cell layer	太陽電池モジュールを分離装置で分離したセルを含むシート状の物。
EVA 積層体	Powder material with Ethylene Vinyl Acetate	研削工程により削り取られた EVA とシリコン、金属類が混合した粉状物質。
FF (曲線因子)	Fill factor	太陽光発電素子の短絡電流密度×開放端電圧に対し、最大電力を生じる電流密度×電圧の動作点のこと。直列抵抗が大きく、並列抵抗が小さくなると FF が減少する。
Flow Net	Flow Net	動画から各物体の移動量を推定する深層学習モデル。
G5, G8.5	Generation 8.5	ガラス基板サイズの呼称。G は世代 (Generation) を表す。通常、G5 は $1.1 \times 1.3\text{m}^2$ 、G8.5 は $2.2 \times 2.5\text{m}^2$ を指す。

GPIB ケーブル	GPIB cable	測定器や PC 間で測定信号や制御信号を通信するための接続ケーブル。
GPV	Grid Point Value	気象モデルによる数値予報の計算結果など、格子状に格納された気象要素などの数値データ。
GSM	Global Spectral Model	全球域（地球全体）を対象に計算する数値予報モデル。また、このモデルに基づく予測値を指す。
Hansen 球	Hansen sphere	Hansen 溶解度パラメータを3つの軸とする空間上に、ある判定値を基準として、当該判定値を内包するように描かれる球。
Hansen 溶解度パラメータ	Hansen solubility parameter	物質の凝集エネルギー密度の平方根で与えられる溶解度パラメータを分子間に働く3つの相互作用エネルギーに分割した値。
HAST 試験	Highly accelerated stress test	加圧により、100℃以上、かつ高密度な水蒸気雰囲気を再現した加速試験方法。
Headroom 制御	Headroom controal	意図的に出力を下げて上げ調整力を持つ制御方法。
IEA PVPS Task12	International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme, Task12	国際エネルギー機関（IEA）傘下の太陽光発電システムに関する技術協力プログラム（PVPS）にて実施されているプロジェクトの一つで、PV Sustainability をテーマとしている。
IEC	International Electrotechnical Commission	国際電気標準会議。電気工学、電子工学、および関連した技術を扱う国際的な標準化団体
IEC/TC82/WG2	IEC/TC (Technical Committee) 82/WG (Working Group) 2	IEC における太陽光発電システムに関する技術委員会 (TC82) 下に設置された非集光型モジュールに関するワーキンググループ (WG)。
IEC61730	IEC61730	太陽電池モジュールの安全性認証規格。
InGaAs カメラ	InGaAs camera	光をデジタル信号に変換する撮像素子に InGaAs をベースとした材料が使われているカメラ。近赤外領域の感度が非常に高い。
IoT	Internet on Things	モノのインターネット。本事業原簿では、太陽光発電に関する各種データを遠隔モニターにより取得すること全般を含み、必ずしも Internet 接続に限定していない(広義の IoT)。
IoT-PCS	IoT-PCS	IoT 機能を内蔵したパワーコンディショナ。IoT 機能を外付けで具備するものも含む。
Isc (短絡電流)	Short circuit current	太陽電池が短絡状態にある時の出力電流。
ISE	Institute of Solar Energy	ドイツフ라운ホーファ研究所の太陽エネルギー研究所。
ISO	International Organization for Standardization	国際標準化機構。国際的な標準である国際規格を策定するための非政府組織。

ITO	Indium tin oxide	インジウム・スズ合金の酸化物。透明で導電性を有する。
IV 特性	IV characteristic	太陽電池の電流電圧特性。
JIS-61215	JIS-61215	降雹試験を含む、太陽電池モジュールに関する認証規格。
k=2	k=2	包含係数 k を 2 とした不確かさの推定。通常は U95 に対応。
LAN ケーブル	Local area network cable	建物内などの狭い範囲のネットワークケーブル。
LBIC	Light-beam induced current	レーザー等の光を半導体に照射し、局所的な光電流を発生させる。光の照射位置を走査することにより、光電流発生量の分布評価が可能。
MgO/SiO <sub>x</sub>	MgO/SiO <sub>x</sub>	MgO 粒子を液体ガラス中に混入し、乾燥プロセスにて作製した粒子混成ガラス薄膜である。
MLPE	Module Level Power Electronics	直交変換、最大点追尾、シャットダウン機能などの機能を太陽電池モジュール単位で行うもの。マイクロインバータ、DC オプティマイザなどの MLPE 機器が開発、実用化されている。
Mo	Molybdenum	モリブデン。CIS 太陽電池の裏面電極に用いられている。
MPP	Maximum Power Point	最大電力点のこと。パワーコンディショナで電力変換する際に、得られる電力が最大となるように電圧(電流)を制御する。
MPPT	Maximum Power Point Tracking	最大電力点追従法。太陽電池からの電力が最大(最大電力点:MPP)となるように電圧(電流)を制御する手法である。
MSM	Meso-Scale Model	全球モデル(GSM)より高解像度で、ある領域のみを対象に数値シミュレーションを実施する数値予報モデル。また、このモデルに基づく予測値を指す。
NAS	Network Attached Storage	ネットワーク接続された通常大容量の記憶装置。
NREL	National Renewable Energy Laboratory	米国の再生可能エネルギー研究所。
N 型 Si 太陽電池	N-type Silicon solar cell	基板に N 型 Si ウエハを利用した太陽電池。P 型 Si 太陽電池より高効率な太陽電池が作製できる。
O&M	Operation & Maintenance	オペレーション(運転管理)とメンテナンス(保守点検)。太陽光発電システムなどを適切に運転するよう管理するとともに、正常に運転できる状態を保つこと。
PCS	Power Conditioner	太陽電池からの直流電力を交流電力に変換するほか、連系機能や出力最大化などの重要な機能を持つ。



PEN	Polyethylene naphthalate	ポリエチレンナフタレート、PET に比べて耐熱性が高い。
PERC 型	Passivated Emitter and Rear Cell	P 型 Si 太陽電池の一種。裏面構造が現行太陽電池と違っており、より高効率が期待できる構造である。
PET	Polyethylene terephthalate	ポリエチレンテレフタレート。
PET/Al/PET	PET/Al/PET	アルミ箔を PET フィルムで挟んだ構成の裏面材。
pH 感受性蛍光色素	pH Sensitive Fluorescent Dye	pH インジケータとも言われ、主に生物生体試料の pH を計測するための蛍光色素で、単一蛍光波長による場合と 2 波長蛍光強度の比から pH を求める場合がある。
PID	Potential Induced Degradation	電圧誘起劣化のことを指す。太陽電池に高電圧が印可されることで急激な出力低下が発生する現象。
Planar 型セル構造	Planar type cell structure	積層化形成された一般的なペロブスカイト太陽電池構造。
Pmax (最大出力)	Maximum Power	太陽電池の動作曲線上において、電力が最も大きくなる点での電力。
PN 接合	PN junction	P 型半導体と N 型半導体を接合させたもの。
Pt1000 温度センサ	Pt1000 sensor	白金測温抵抗体 (0°C で 1000 Ω の抵抗値)。
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	ドイツ計量研究所。
PV CYCLE	PV CYCLE	2007 年に設立された、欧州における太陽光発電モジュールリサイクルを手がける機関。
PVF/PET/PVF	PVF/PET/PVF	PET フィルムを PVF(ポリフッ化ビニル) フィルムで挟んだ構成の裏面材。
PVMS	Photovoltaic Module Irradiance Sensor	結晶シリコンの PV セルを全天日射強度測定に用いたセンサー。PV セルを用いることにより高速に日射強度の時間変動を捉えることができる。
RMSE	Root mean square error	誤差 (予測値 - 観測値) の二乗を平均して平方根をとった値を示す。日射量の単位を持ち、値が大きい程、誤差が大きく、0 に近い程誤差が小さい。
RP	Recycle Point	回収した PV システムをリサイクルする場所。
RPD 法	Remote Plasma Deposition method	薄膜堆積技術の一種。反応性プラズマ堆積法と呼ばれる。TCO 薄膜の成膜に利用される。
RPS における太陽光発電要件	PV requirement in Renewable Portfolio Standard	再生可能エネルギー・ポートフォリオ基準 (RPS) の一部を太陽光発電による電力供給により満たすという義務要件 (最低割当量 (セット・アサイド) と呼ばれることが多い)。

RTA 処理	Rapid thermal annealing treatment	急速に温度を上げ、短時間保ったのちに、急速に温度を低下させる処理。
SIMS	Secondary Ion Mass Spectrometry	二次イオン質量分析法。イオンビームを照射し、固体表面で発生する二次イオンを質量分析計検出する。
SiO <sub>x</sub> BS	SiO <sub>x</sub> Back Sheet	シリカ蒸着を行った PET フィルムを用いた裏面材。
Si セルシート	Si cell sheet	結晶 Si 太陽電池からフレーム、端子箱、カバーガラスを分離した後の樹脂層により封止された Si セルシート。
Si ヘテロ接合太陽電池	Silicon heterojunction (SHJ) solar cell	非晶質シリコンと結晶シリコンのヘテロ接合からなる太陽電池。
SLG	Soda Lime Glass	青板ガラス、ソーダ石灰ガラス。
SOC	State Of Charge	蓄電池の充電状況。残容量(Ah)/満充電容量(Ah)・
Spice	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis	電子回路の動作解析を行なうシミュレータ。
STEM	Scanning Transmission Electron Microscope	走査型透過電子顕微鏡。原子・分子像を直接観察可能なレベルの高倍率・高分解能で観察が可能である。
SUS	Steel use stainless	ステンレス鋼。鉄に一定量以上のクロムを含ませた、腐食に対する耐性を持つ合金鋼である。
SV 法 (Level 5)	Sophisticated Verification method level 5	太陽光発電システムの発電特性の定量的評価手法であり、システム出力係数と各種損失係数を用いた評価、および損失・利得の定量化を特徴とする。Level 5 は 1 分値を用いて解析を行うことにより 11 種類の要因の影響を評価可能である。
SY	Stock Yard	回収した PV システムを一時的に保管する場所。
TAS 法	Transient Absorption Spectroscopy	過渡吸収分光法。極微小時間に光励起された電子・正孔対 (キャリア) の消失過程を検出する手法である。
TBM	Time Based Management / Maintenance	定期的なメンテナンス。
TCO	Transparent Conductive Oxide	透明導電膜と呼ばれる。フッ素添加された酸化錫や酸化インジウム錫、酸化亜鉛などが良く用いられる。太陽電池の光入射側に用いて光を透過させながら電流を外部に取り出すのに必要な材料である。
ToF-SIMS	Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry	固体試料にイオンビーム (一次イオン) を照射し、表面から放出されるイオン (二次イオン) を、その飛行時間差 (飛行時間は重さの平方根に比例) を利用して質量分離する手法。

TPO	Third Party Ownership	第3者所有モデル。第3者が一般家庭や既設建物の屋根を借りて太陽光発電システムを設置し、発電事業を行うものなどがある。発電事業者は建物所有者に損害を与えられないため、一般的には高い安全性を持つPVが要求される。
U95	Upper end of 95% confidence interval	測定値の不確かさを信頼区間95%で見積もったもの。標準偏差の2倍に対応。
UV 光照射	Ultra violet light soak	紫外線を照射すること。
Voc (開放電圧)	Open circuit voltage	太陽電池が開放状態にある時の出力電圧。
VPP	Virtual Power Plant	小規模な発電電力を集め、バーチャルな発電所として発電所機能を果たすもの。
WPVS	World Photovoltaic Scale	一次基準太陽電池セルの国際根幹比較
WRF	The Weather Research and Forecasting Model	米国大気研究センター (NCAR) と米国環境予測センター (NCEP) を中心とする共同プロジェクトによって開発された天気予報と学術研究の両方に対応した領域気象モデル。
WRF-solar	WRF-solar	領域気象モデル WRF について、米国大気研究センター (NCAR) が日射量の数値シミュレーション向けに改良した気象モデル。
WRR	World Radiometric Reference	日射照度の国際標準。
X 線 CT	X-ray computed tomography	X 線を利用して物体を走査しコンピュータを用いて処理することで、物体の内部画像を構成する技術。
X 線光電子分光法 (XPS)	X-ray photoelectron spectroscopy	原子組成分析手法の一つ。試料表面から数 nm 程度の深さ領域における組成分析が可能である。
ZEB	Zero energy building	各種省エネ技術や創エネ技術を適用して、エネルギー消費量が正味ゼロになる建築物のこと。
Zn-Ge-O	Zinc Germanium Oxide	本研究で開発している新しい透明導電膜。酸化亜鉛にゲルマニウムを添加することにより低電子親和力の材料となる。結晶構造が不明なため、Zn-Ge-O と表記している。
ZnO 層	Zinc oxide layer	酸化亜鉛の層。
$\mu$ PCD 法	Microwave Photoconductance Decay	マイクロ波光導電率減衰法。半導体に光を照射すること変化する光導電率をマイクロ波の反射率として検出し、その減衰から半導体内キャリアの寿命を測定する手法。
アーキテクチャ	Architecture	AI モデルにおけるアーキテクチャとは、モデルの数理構造を示す。
アーク	Arc	アーク放電とは気体放電現象の一種。電荷キャリアのほとんどが一次電子放出によって供給される電子である自己維持型ガス伝導。太陽電池モジュールの不良部などでのアーク発生は、火災につながる場合がある。

アークフォルト	Arc fault	絶縁不良や接触不良が原因で起こるアーク放電による異常発熱故障。直流電流には電流を遮断しにくい性質があり、最悪の場合は火災事故に繋がる恐れがある
アイオノマー樹脂	Ionomer Resin	イオンによる擬似架橋構造を有する樹脂。高い水分バリア性を有し、架橋樹脂の強靭さを保持しつつ、熔融成型が可能な点で太陽電池封止材へ展開されている。
アグリゲート	Aggregate	集めること。複数の太陽光発電システムの発電電力を集めることにより、その電力を用いて発電、電力制御などの事業が可能となる
アセットマネジメント	Asset management	資産の運用、保全を行うこと
アセット評価	Asset evaluation	太陽光発電システムなどのアセット(資産)評価のこと。太陽光発電システムの場合は、発電性能評価や安全性能評価などから成る
アパーチャーエリア	Aperture Area	太陽電池モジュールにおいて発電部外周を囲った領域を示す。
アミン系	Amine compounds	分子構造に NH <sub>2</sub> や NH 等を含む化合物の総称。
アミン類	Amine	アンモニアの水素原子を炭化水素基または芳香族原子団で置換した化合物の総称。
アメダス	AMeDAS, Automated Meteorological Data Acquisition System	気象庁の無人観測システム。全国約 1,300 か所で降水量を観測している。そのうち、約 840 か所では降水量に加え、気温、風向・風速、日照時間も観測している。
アモルファスシリコン	Amorphous silicon	シリコンを主成分とし、原子配列に結晶性を持たない固体半導体。真空蒸着法などにより非常に薄い半導体膜を形成可能。半導体膜形成時の条件を変えることで pn 接合を作製することができる。
アライメント	Alignment	集光型太陽光発電システムの各構成部材において、各受光面に対する各入射光線がどのような角度関係にあるかを表すもの。
アルベド	Albedo	外部からの入射光に対する、反射光の比である。反射能とも言う。
アルミ枠	Aluminum frame	太陽電池パネルの機械的強度の確保と架台や屋根等への設置を容易とするアルミ製の外周枠。
アレイ	Array	ひとつの架台に取り付けられた太陽電池モジュールの集まりであり、ストリングを並列接続したもの。
アレイ実効最大出力係数	Effective array peak power	SV 法 Level 5 における損失係数の一つであり、温度や日陰、入射角など、屋内での標準試験条件下での測定に対して屋外条件下で生じる様々な発電特性に影響を与える

		要因を定量的に分離した後に得られる、システムの実環境下での発電性能を示しており、1.0 であれば銘板値通りの性能を示していることを意味する。
アレイ状メサ	Arrayed mesa	規則正しく配置されたメサ（段差）。
アンサンブルメンバー	Ensemble member	摂動を与えたわずかに異なる初期値などに基づくアンサンブル予報のうち、それぞれの初期値に対する数値予報のこと。
アンサンブル予報	Ensemble prediction	わずかに異なる複数の数値予報を実施し、この結果を統計的に処理することで、不確定さを考慮した確率的な予測を可能にするもの。
イオンクロマトグラフィ法	Ion Chromatography	イオンや極性分子のような電荷を持つ分子を分離して物質を分離精製する方法。
イオン化エネルギー	Ionization energy	半導体中の電子を価電子帯の頂上から真空準位まで励起するのに必要なエネルギー。
インターコネクタ	Interconnector	太陽電池のセルとセルを繋ぐ配線。
インバランス	Imbalance	計画からの差分。
インピーダンス	Impedance	直流回路におけるオームの法則の電気抵抗（レジスタンス）の概念を複素数に拡張することによって、交流回路に適用したもの。
インピーダンススペクトル	Impedance Spectra	周波数の異なる交流電圧あるいは電流を印加し、電圧と電流の位相のずれからインピーダンスの実部と虚部を得ることでスペクトルを作成し、分析する技術。
ウェーブレット法	Wavelet method	1 周期の波とその平行移動、およびその 2 の累乗倍の高調波の和として信号を表す方法。
ウェット処理	Wet treatment	主に化学薬品等の液体に浸漬させる、基板や半導体材料の表面処理技術。一般的な洗浄処理も含まれる。
エアマス	Air mass (AM)	地球大気に入射した太陽光直達光が通過した路程の長さ。標準状態の大気圧（標準気圧：1013hPa）に垂直に入射した太陽直達光が通過した路程の長さを AM1.0 として、それに対する倍率で表す。
エアロゾル	Aerosol	空気中に浮遊するちりなどの固体や液体の粒子。
エージング効果	Aging effects	太陽電池性能が作った直後よりも、時間経過とともに性能向上すること。
エチレンビニルアセテート	Ethylene-vinylacetate copolymer	EVA 樹脂はエチレン・酢酸ビニル共重合樹脂で、-58℃まで可撓性があり、水、紫外線に優れた安定性があると同時に、ゴム弾性、柔軟性、強靱性、低温特性、耐候性に優れた樹脂材料。
エッジシール	Edge seal	太陽電池モジュール内への水蒸気浸入を防ぐための封止。

エピタキシャル・リフトオフ	Epitaxial lift-off (ELO)	薄いリリース層を挟んで、高品質の太陽電池層を結晶成長させた後、リリース層を選択的にエッチングすることで、太陽電池層を基板から剥離する方法。
エピタキシャル成長	epitaxial growth	基板の結晶構造を反映した結晶膜をその上に堆積すること。
エミッタ層	Emitter layer	電子を放出する層。P型Si太陽電池においては、表面のN+層に該当する。
エルイーエス	Large Eddy Simulation (LES)	CFDの解析手法のひとつで、ナビエ-ストークス方程式を空間的に平均化して解く手法で、計算メッシュより大きい渦は直接計算され、小さい渦は乱流モデルを用いて計算される。
エレクトロルミネッセンス(電界発光)	Electronic luminescence (EL)	光を照射しない状態でセル(半導体)に電界を印加するとセルが発光する現象。セル正常部は電流が流れるので発光するが異常部は発光しないので、セル故障の検査ができる。
エンジニアリングプラスチック	Engineering Plastic	耐熱性・強度に優れるプラスチックの総称。
オートクレーブ	Autoclave	内部を高圧力にすることが可能な耐圧性の装置や容器、あるいはその装置を用いて行う処理のこと。医療分野では滅菌処理に、工学分野ではコンクリート製品の促進養生に使用されている。
オーミック	Ohmic	印可電圧に対して線形に電流が流れる状態、もしくは、単調に流れる電流が増加する状態。
オレフィン	Olefin	太陽電池モジュールに用いられる代表的な封止材のひとつで、EVAの代替品。炭素間に二重結合をもつ不飽和炭化水素。
カーボンナノチューブ	Carbon nanotube (CNT)	炭素によって作られるグラフェンシートが単層あるいは多層の同軸管状になった物質。
ガラス	Glass	太陽電池パネルの破損を回避するために表面を保護する強化ガラス。
ガラス/ガラス モジュール	Glass/Glass module	ガラス/封止材/セル/封止材/ガラス という構成からなる太陽電池モジュール。
ガラス/バックシート モジュール	Glass/Back sheet module	ガラス/封止材/セル/封止材/バックシート という構成からなる太陽電池モジュール。
ガラスカレット	glass-cullet	太陽電池パネルを保護するガラスを破碎することで得られる粒状のガラスのかけら。
キャパシタンス	Capacitance	静電容量のこと
グライド現象(雪)	Glide	積もった雪が地盤面での滑りによって移動する現象。
クラスタ	Cluster	セルの直列接続にバイパスダイオードが並列接続されたものであって、太陽電池モジュールは数クラスタで構成される。

クランプセンサ	Clump sensor	ドーナツ状または U 字状の形体のセンサで、ケーブルを中央に通すことでケーブルに入り込むことなしに電流を計測できるもの。
クリープ現象（雪）	Creep	積もった雪が徐々に変形することによって移動する現象。
グリーン電力制度	Green electricity schemes	顧客は、再生可能エネルギーによるグリーン電力を、一般にプレミアム価格で電力事業者から購入できる。
グリッドパリティ	Grid parity	再生可能エネルギーによる発電コストが既存の電力のコスト（電力料金、発電コスト等）と同等かそれより安価になる点（コスト）を指す。
ゲスト	Guest	複合体の母体材料に包含される側の素材と定義。本研究では、中間バンドを形成する量子ドットがゲストに相当。
ゲッター剤	Getter agent	水分やアウトガスなどを吸着する材料。
コレクションポイント	Collection Point	使用済の太陽光発電モジュールの回収拠点であり、発生場所から運び込まれる。一定量が収集されると、リサイクル処理プラント等に搬送される。
コロイド量子ドット	Colloidal quantum dot	量子ドットが均一分散している溶液。
コンポーネントセル	Component cell	多接合太陽電池を構成するトップセルやボトムセルなど各太陽電池のこと。
サブストレート型太陽電池	Substrate type solar cell	太陽光を基板を通さずに入射させるタイプの太陽電池。
サブモジュール	Submodule	集積構造を備えているがカバーガラス等による封止がされていない太陽電池、サーキット（Circuit）とも言う。
シート抵抗	Sheet resistance	薄膜における電気抵抗を表す量。
システム出力係数	Performance Ratio	等価システム運転時間を等価太陽日照時間で除した値。太陽光発電システムの性能を示す指標として用いられる。
シャドーブレード	Shadow blade	上空カメラの前面に設置する帯状の板。太陽の日周運動に追従し、直達日射が上空カメラのレンズに入射しないようにする。
シャント抵抗	Shunt resistance	太陽電池モジュールの並列抵抗成分で、出力電力を低減し損失の原因となる。PID 劣化によって値が小さくなり、PID 回復によって値が大きくなる。
シリカ	Silica, SiO <sub>2</sub>	シリコン酸化物。二酸化珪素または主として二酸化珪素によって構成される天然鉱石、珪石、珪砂の総称。
シリコン型日射計	Silicon photo sensor	シリコン半導体をセンサとして用いた日射計。
スウェーデン式サウンディング試験	Swedish weight sounding (SWS)	スクリーポイントにロッドの先端につけて荷重段階 0.05kN、0.15 kN、0.25 kN、0.50 kN、0.75 kN、1.0 kN のおもりを載荷

		する。おのおのの荷重段階で貫入量を測定する。おもりが 1.0kN になっても貫入しなくなれば、回転を加え 25cm 貫入に要する半回転数を測定する地盤調査方法である。
スーパーコンティニウムレーザ	Super-continuum laser	超短パルス光を非線形光学材料に入力し非線形光学効果を利用して非常に広い波長範囲の光を出す広帯域パルス光源。
スーパーストレート型太陽電池	Superstrate type solar cell	ガラス基板などの透光性基板上に、透明導電膜、シリコン層、裏面電極の順に製膜され、光は透光性基板と透明導電膜層を通して、光活性であるシリコン層に入射させるタイプの太陽電池。
スタンダードキュア方式	Standard Cure	EVA の架橋反応を架橋炉を用いて行う生産方式。
ストリング	String	直列接続された複数太陽電池モジュール。太陽光発電システムでは太陽電池モジュールは直列及び並列に接続され、パワーコンディショナに入力されるが、直列接続された最小単位のモジュール群をストリングと呼ぶ。
スネイルトレイル	Snail trail	セルに発生したマイクロクラック部分に水分が侵入し、PV モジュールのオモテ面にカタツムリが這ったような模様が見える現象。
スパイラル杭・スクリュー杭	Screw pile	鋼管の周囲に螺旋状の羽根を溶接した鋼管杭。
スパッタ法	Sputtering Method	真空中で加速されたイオンを材料(ターゲット)に衝突させ、はじき飛ばされた材料を基板上に成膜する物理的気相成長法の一種。
スピコート	Spin-coating	薄膜材料の溶液を基板上に滴下し、その基板を高速回転させることによる遠心力を使って成膜する塗工方法。
スペクトルミスマッチ	Spectrum mismatch	基準太陽光スペクトルと測定光源のスペクトルが異なり、かつ、測定光源の強度を校正した基準太陽電池の分光感度と測定対象の分光感度が異なる場合に生じる短絡電流値の誤差。
スペクトルミスマッチ補正	Spectral mismatch correction	太陽電池の特性を測定する際の、被測定太陽電池と基準太陽電池の分光感度スペクトルの差及び基準太陽光スペクトルと入射光の分光放射照度スペクトルの差による測定誤差を補正すること。
スペクトルミスマッチ補正係数	Spectrum mismatch correction factor	スペクトルミスマッチを補正するための係数。
スマートメーター (略称 スマメ)	Smart meter	電力をデジタルで計測して通信機能を併せ持つ電子式電力量計。



スマート保安	Smart security	IoT やドローンなどの技術を活用したスマートな保安。設備の老朽化が進む一方で保守保全人員の老齢化が進む現状のもと、経済産業省も普及に向け注力している。
セル	Cell	集積構造を備えていない太陽電池、単セル (Single Cell) とも言う。
セル屑	Cell waste	太陽電池パネルを構成するガラス以外のもの (セル、バックシート、樹脂等) の総称。
ソイリング	Soiling	太陽電池モジュール表面カバーガラスの汚れ。電流低減により性能低下の要因となる。
ダイポール (双極子)	Dipole	一対の正負の同じ大きさの単極子をわずかに離れた位置に置いたもの
ソーダライムガラス	Soda lime glass	現在最も広く利用されている安価なガラス。板ガラスや瓶ガラスに使用されている。
ソーラシミュレータ法	Solar simulator method	ソーラシミュレータを用いて一次基準太陽電池を校正する手法。
ダーク I-V 測定	Dark I-V measurement	セル、又は PV モジュールに光を照射しない状態で主回路を直流電源に接続し、I-V 特性 (ダイオード特性) を測定すること。
ターンキー価格	Turnkey price	VAT/TVA/売上税、運転・保守費を除いた、設置費を含む太陽光発電システムの価格である。独立形ではバッテリーの保守費/交換費に関連した価格は除外される。太陽光発電システムに直接関係しない事由で追加費用が発生した場合、その費用も除外される (例えば、生産中断を回避する特別措置を講じたために、工場の屋根に太陽電池モジュールを設置する際に発生した特別費用は含めない。同様に、遠距離通信システムを設置する際の追加輸送費も含めない)。
ダイコート	Die-coating	ダイヘッドから薄膜材料の溶液を押し出しながら基板へ塗工して成膜する方法。
タスク	Tasks	研究プロジェクトであり活動領域。
タスク 15	Task15	Enabling Framework for the Development of BIPV (BIPV 開発のためのフレームワークの有効化)。IEA PVPS が取り組むタスクの一つ。
タスク代表	Operating Agent	各タスクの代表。
ダブルガラスモジュール	Double-glass module	受光面側のみならず、裏面材にもバックシートではなくガラスを用いた太陽電池モジュール。
タブ配線	Tab line	太陽電池セルと太陽電池セルとを電氣的に接続する細長い配線。

タンデム型セル	Tandem cell	短波長を吸収するセルを光の入射側、その後ろに長波長側を吸収するセルを直列になるように構成されたセル。
タンデム型太陽電池	Tandem-type solar cell	最小単位のセル（単セル）を重ね合わせた構造を有する太陽電池をタンデム型太陽電池という。
ダンプヒート試験	Damp Heat Test	高温高湿環境下テスト。本開発では温度 85℃湿度 85%環境下と規定。
ディップコート法	Dip-coating method	基板に機能性材料を塗布する方法の一つで、基板を機能性材料を含む溶液に浸漬し、引き上げる過程で塗工する方法。
テクスチャー	Texture	光を散乱させるためウエハ表面に形成する凹凸のこと。光を凹凸によって散乱させることで光の吸収長を長くとり、光をより効果的に半導体で吸収させるのに用いられる。薄膜シリコン太陽電池では必須技術である。
デラミネーション	Delamination	太陽電池モジュール内の層間剥離。光入射側（セルとガラス間）、裏側（セルとバックシート間）の両者がある。光入射側の場合は表面白濁、裏面側の場合はバックシートの膨らみが観測される。
テルル化カドミウムモジュール	CdTe module	カドミウムとテルルから成る II-VI 族化合物半導体を材料とする薄膜系太陽電池モジュール。低コストで製造できる点に特徴を有する。
ドーピング	Dope	結晶の物性を変化させるために少量の不純物を母材結晶に添加すること。GaAsN に Si 原子をドーピングすると GaAsN は n 型半導体に変化する。
トップセル	Top cell	タンデム太陽電池の光受光面側最上層にある太陽電池セル。
ドライ処理	Dry treatment	主に反応性ガスやプラズマ処理などを用いる、化学薬品等の液体を用いない基板や半導体材料の表面処理技術。
トレーサビリティ	Traceability	測定値がその上位標準に結び付けられていること（正式には、「不確かさがすべて評価された切れ目のない比較の連鎖によって、決められた基準に結び付けられ得ること」）。
バイパス回路	Bypass route (BPR)	セル断線などにより太陽電池の一部が高抵抗になり電流が流れない状況になった際に、電流をバイパスさせるバイパスダイオードとクラスタへ接続する配線からなり、PV システムの出力低下を最小限にするとともに安全性を向上させるもの。

バイパスダイオード	bypass diode	太陽電池モジュール内に設置するダイオード。セル断線などにより太陽電池の一部が高抵抗になり電流が流れない状況になった際に、電流をバイパスさせる。PV システムの出力低下を最小限にするとともに安全性を向上させるもの。
ハイブリッド・システム	Hybrid system	太陽光発電とその他の発電源（例えばディーゼル、水力、風力など）を組み合わせたシステム。
パイルドライバー	Pile driver	主として、打撃エネルギーと振動エネルギーを利用する杭打ち機械。
パターニング	Patterning	デバイス製造プロセスにおいて、有効的に電気を取り出すために行う加工処理。
バックコンタクト型結晶 Si 太陽電池	Back contact crystalline Si solar cell	結晶 Si 太陽電池の 1 種で受光面に金属電極が無く、裏面に正負の両方の電極を有するもの。
バックコンタクト型太陽電池	Interdigitated back contact solar cells	裏面に n+拡散層と p+拡散層を形成し、その直上に電極を形成した構造をしている。この構造では電極を裏面に集約し受光面の電極を無くすることができるため、そのぶん受光面を広くし多くの光を取り込むことで変換効率を高めることが可能となる。
バックシート	Back sheet	太陽電池モジュールの裏面側に用いる高分子系シート。ポリエチレンテレフタレート（PET）をベースフィルムとするものが多く、PET フィルムをフッ素系の樹脂ではさんだものや、アルミニウム箔を PET フィルムではさんだものなどが用いられる。
パッシベーション	Passivation	欠陥など再結合の起因を不活性化し、再結合を抑制するもの。
バッファ層	Buffer layer	光吸収層と透明電極層の間に形成される緩衝層。界面におけるキャリア再結合の低減を主目的として形成される。
バッフルユニット	Baffle unit	本研究では、不要な光の経路を遮って有効な光を取り出すための遮光装置。
ハロゲン化物	Halide carbon	炭素-ハロゲン元素結合を持つ有機化合物の総称。
パワーアナライザ	Power analyzer	電力を測定する装置。
パワーコンディショナー	Power conditioner	太陽光発電システムや家庭用燃料電池を利用する上で、発電された電気を家庭などの環境で使用できるように変換する機器。
パワーデバイスアナライザ	Power device analyzer	パワーデバイス用の測定器で、電子負荷装置、プログラマブル電源、電流計、電圧計、データロガーなどの機能をあわせ持つ機器。
バンカビリティ	Bankability	金融機関がその事業に融資する可能性を意味する。

バンドギャップ	Band gap	固体中の電子が定常状態でとり得るエネルギー値の差。電子がエネルギーを受けて低エネルギー状態から高エネルギー状態へ遷移する際、バンドギャップ以下のエネルギーでは遷移できない。
ハンマー式破碎剥離機	Hammer-type crushing and separation machine	太陽電池パネルを回転する突起(ハンマー)で破碎・粉碎してパネルからガラスを剥離する装置。
ヒステリシス	Hysteresis	太陽電池の特性が過去の印加電圧等の履歴に依存して変化する現象。
ビッグデータ	Big data	データの収集、取捨選択、管理及び処理に関して、一般的なソフトウェアの能力を超えたサイズのデータ集合。ビッグデータには、ボリューム (volume、データ量)、速度 (velocity、入出力データの速度)、バラエティ (variety、データ種とデータ源の範囲) がある。
ファーストキュア方式	Fast Cure	EVAの架橋反応を真空ラミネータ内で行う生産方式。
ファイヤスルー	Fire-through	Si 太陽電池表面の楕型銀電極を形成する際の熱処理手法。
ファブリーペロー共振器	Fabry-Perot resonator	2つの反射面をもつ構造で、特定の光の波長に対して共振ピークを示す。
ファンデルワールス力	van der Waals force	電荷を持たない中性の原子、分子間ではたらく凝集力。この力を介して物体間の物理吸着が生じる。
フィードイン・タリフ制度	Feed-in tariff	生産した太陽光発電電力に対して明確な金銭的報酬が提供されるもので、顧客が支払う kWh 当たりの小売電力価格よりいくらか高い金額が (通常、電力事業者により) 支払われる。
フィールドテスト・プログラム	Field Test Programme	実際の使用条件で太陽光発電システム/コンポーネントの性能を試験するプログラム。
フィンガー電極	Finger electrode	セルで発電した電気を集電するために太陽電池セル表面に形成される細い電極。
フーチング	Footing	布基礎の底辺部。
フーリエ変換法	Fourier transform method	ある区間で定義された関数を、その区間を周期とする基本正弦波と、その整数倍の周波数をもつ高調正弦波の和に分解する方法。
フォトルミネッセンス(PL)	Photoluminescence (PL)	物質に光を照射し、励起された電子が基底状態に戻る際に発生する光、またはその現象をさす。太陽電池においては、フォトルミネッセンス強度が強いことは、太陽電池内部において再結合損失が少なく、発電性能が高いことに対応する。

フォトルミネッセンス検査(PL 検査)	Photo Luminescence Test	太陽電池製造工程で用いられる検査。太陽電池セルに光を照射して発光させ、特殊カメラで撮影し検査を行う。
ブチルゴム	Butyl rubber	合成ゴム的一种であり、太陽電池モジュールの周辺の封止に用いられることがある。
プラズマ CVD	Plasma-enhanced chemical vapor deposition	高周波などを印加することで原料ガスをプラズマ化させることを特徴とする化学気相成長法 (CVD) の一種。化学反応を活性化させるため、高周波などを印加することで原料ガスをプラズマ化させ、薄膜等を堆積させる方法。
フレーム	Solar Panel Frame	PV パネルを固定するアルミ製の枠。
プログラマブル DC 電源	Programmable DC source	指定したように電圧を変化させることができる直流の電圧源。
プロシューマー向けインセンティブ (自家消費、ネットメタリング、ネットビリング)	Compensation schemes (self-consumption, net-metering, net-billing)	太陽光発電に対する評価により、顧客は電力料金の節約が可能となる。自家消費 (即時に消費される電力は計上されず請求対象とならない)、またはネットビリング (系統からの電力および系統に逆潮流した電力を個別に記録し、電力料金は支払い請求期間に調整される) のどちらについて言及しているのかよりよく理解するため、詳述の必要がある。自家消費された電力及び系統に逆潮流した電力の双方に対する補償は、詳述されるべきである。ネットメタリングでは、太陽光発電システムを利用する顧客の電力消費が太陽光発電による発電電力と全く同じ場合は料金が発生せず、電力消費が発電量を上回る場合は小売価格に応じた料金が発生し、また系統に太陽光発電による余剰電力を逆潮流する場合は報酬を受け取ることができるため、固有である。
ブロッキングダイオード	Blocking Diode (BLD)	日陰になった太陽光パネルや、夜間に発電していない場合に、バッテリーや他の太陽光パネルから電流が逆流するのを防ぐ逆流防止ダイオード。
フロントエミッター型太陽電池	Front-emitter solar cell	エミッター層が光入射側に設置されている太陽電池。
ベアセル	Bare cell	モジュール化する前の結晶シリコン太陽電池セル。
ヘテロ接合	Heterojunction	異種材料の接合。例えば、単結晶膜とアモルファス (非晶質) 膜との接合。
ヘテロ接合結晶系太陽電池	Heterojunction crystalline silicon solar cell	結晶シリコンとアモルファスシリコンで pn 接合を形成した結晶シリコン系太陽電池。高い電圧が得られて高性能が実現する。実用化されたものとしては、三洋電機が開発した HIT 太陽電池が代表例である。一般的な結晶系に比べれば、水蒸気浸入に弱いとされている。

ペロブスカイト	Perovskite	結晶系の名前であるが、ペロブスカイト太陽電池業界では有機アミン、鉛、ハロゲンから成る光吸収材料としてのペロブスカイト結晶を指すことが多い。
ペロブスカイト太陽電池	Perovskite Solar Cell	有機アミン、鉛、ハロゲンから成る光吸収材料を用いた太陽電池のことを指すことが多い。
ホール輸送層	Hole transport layer	発電層で発生したホールを抽出し、電極側へ輸送する層、および、それを形成するための材料。
ホール輸送材料	Hole transport material	
ホスト	Host	複合体の母体材料と定義。本研究では、ペロブスカイト層がホストに該当。
ホットスポット	Hot spot	PV モジュールの受光面の一部又は全部が日陰になると、その部位が高抵抗化し発熱する現象。遂には PV モジュールの損傷に至る。
ホットスポット	Hot spot	太陽電池モジュールにおいて他より温度の高い部分。
ホットスポット試験	Hot spot endurance test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。部分影などにより太陽電池が局所的に遮蔽された場合に局所的に温度が上昇した場合に不具合が発生しないか確認する試験。
ホットプレート	Hot plate	ワークの温度を精密に調整するための熱板を有する実験器具。
ボトムセル	Bottom cell	タンデム太陽電池の裏面側最下層にある太陽電池セル。
ホモジナイザー	Homogenizer	入射光の面内むらを均一化する光学素子または装置。
ポリオレフィン	Polyolefin	炭素の二重結合を有するポリマーの総称であり、EVA を代替する太陽電池モジュール用封止材として用いられている。
ポリシリコン	Polysilicon	半導体用、太陽電池用に用いられる高純度シリコン。主としてシーメンス法で生産される。
ボルツマン定数	Boltzmann constant	状態数とエントロピーを関連付ける物理定数。
マイクロインバータ	Microinverter	太陽電池パネル 1 枚分程度の電力容量にて、交流電力を出力する小容量のインバータ。
マイクロクラック	Micro crack	EL 観察により観察されるセル割れ。
マイクロ波光導電減衰法	microwave photoconductivity decay ( $\mu$ -PCD)	パルスレーザーで半導体中に生成した余剰キャリアの再結合を、反射マイクロ波強度の減衰から観測し、キャリア寿命を求める手法。
マルチポップ通信	Multihop Communication	基地局を介さずに通信装置を経由してデータを伝送する方法。

マンソーラ 11	MONSOLA-11 (MONSOLA: MONthly mean SOLAR radiation data throughout Japan)	NEDO のホームページで公開されている月平均の日射量データを収録したデータベース。
メソアンサンブル予報	Meso-scale ensemble prediction system	メソモデルを用いてアンサンブル予報を実施する数値予報システム。
メタルハライドランプ	Metal halide lamp	水銀とハロゲン化金属（メタルハライド）の混合蒸気中のアーク放電による発光を利用した高輝度ランプのこと。略称としてメタハラなどと呼ばれる場合もある。
メッシュネットワーク	Mesh network	通信ノード同士が相互に通信を行うことにより、網の目状に形成された通信ネットワーク。
メットピーヴィ 11	METPV-11 (METPV: MEteorological Test data for PhotoVoltaic system)	NEDO のホームページで公開されている日射量を含む毎時の気象データを収録したデータベース。
メンブレンフィルター	Membrane Filter	精度の高い分溜・分離・抽出・ろ過に使われる多孔性の膜で、主な用途として粒子の除去・ろ過滅菌・液体モニタリング・微生物分析・粒子分析やガス用フィルターなどがある。
モジュールパフォーマンスレシオ	Module performance ratio	IEC 61853 シリーズで定義される。使用される環境条件（気温、日射スペクトル、角度特性）を考慮した際に、標準試験条件におけるモジュール出力に対して、年平均でどの程度の環境要因の影響を受けるかを数値化した（無次元）指標。日本を含めた 6 ヶ所の環境条件で計算される。
モジュール製造企業	Module manufacturer	太陽電池モジュールの生産工程で封止を実施している企業。
モジュール変換効率	Module efficiency, $\eta$ module	モジュールの受光面に入った太陽光と発電された電力の割合。
モノリシックモジュール	Monolithic module	1 枚の基板上に太陽電池構成材料を層状に積層して作製したモジュール。
ラバーヒータ	Rubber heater	発熱体であるニクロム線をシリコンのシートで両側から挟み込んだ面状ヒーター。
ラピッドシャットダウン	Rapid shutdown	即時に（短時間で）出力を遮断する機能。火災時等の緊急時に、屋根上の太陽光発電アレイ付近で電圧を遮断することで、消防隊員等が住宅内の直流配線から感電するリスクを低減させるための安全性技術である。米国では米国電気工事基準(NEC2014)以降においてラピッドシャットダウンの導入が要求されている。
ラマン蛍光強度比	Raman ratio of fluorescence intensity	sp 結合に起因する蛍光強度とラマン散乱光強度の比の値。

ラマン分光法	Raman Spectroscopy	物質に単色光を照射してラマン効果により発生したラマン線の波長や散乱光強度を測定して物質のエネルギー準位を求めたり、物質の同定や定量を行う分光法。
ラミネータ	Laminator	熱圧接装置。
ラムサウンディング試験	Ram-sounding (RAM)	質量 63.5kg のハンマーを 50cm の高さから自由落下させることで貫入ロットに取り付けた先端コーンが 20cm 貫入するのに要する打撃回数を求める動的貫入試験である。
ランズ	Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)	CFD の解析手法のひとつで、ナビエストークス方程式を空間的・時間的に平均化して解析する手法で、気流の乱れ（渦）の影響はすべてモデル化して計算される。
リアエミッター型太陽電池	Rear-emitter solar cell	エミッター層（p 型基板であれば n 型層、n 型基板であれば p 型層）が光入射面とは反対側に設置されている太陽電池。
リガンド	Ligand	配位子、量子ドット表面に結合した分子やイオンなどのこと
リガンド交換	Ligand exchange	量子ドット表面のリガンドを別のリガンドに交換すること。
リサイクル	Recycle	不要物等を再生、再資源化して使用すること。
リスクコスト	Risk-cost	事前の事故防止・軽減のための費用、ならびに万一事故が発生した際の対応・修繕費用およびそれに備えた損害保険等のリスクファイナンス費用の総体。
リテストガイドライン	Retest guideline	太陽電池の部材を変更した場合に認証取得に必要な信頼性試験項目を示したガイドライン。
リパワーリング	Repowering	太陽光発電システムなどの修理、改造などにより、性能回復、性能向上を図ること。
リフトオフ	Lift-off	薄膜と基板間に層構造を有する場合に、下層を化学反応により取り去ることにより、薄膜を基板から剥離する方法。
リユース	Reuse	一度使用されたものをそのまま再び使用すること。
リユース選別	Sorting for reuse	太陽電池モジュール廃棄の際、リユースが的確かどうか選別すること。
リレーショナルデータベース	Relational database	関係モデルに基づいて設計されたデータベース。
レーザー誘起分光分析	Laser induced breakdown spectroscopy	試料表面に短パルスでレーザーを当てることで発生するマイクロプラズマを用いた分析法。
ロールツーロールプロセス	Roll to Roll Process	材料フィルムをロールからロールへと連続的に供給し、印刷やラミネートを行うプロセス。
ロール間隔	Distance between the rolls	ロール式破碎機の 2 本のロール間の隙間（数 mm レベル）。



ロール式破砕機	Roll-type crushing machine	アルミ枠を外した太陽電池パネルを2本のロールの間に挿入してその押付圧により破砕する装置。
ロットアウト	Lot out	抜取検査で一定水準以上の不良品が見つかりロット全体が不合格されたもの。
ワイブル分布	Weibull distribution	物体の強度を統計的に表現するための確率分布であり、耐久消費財の使用年数を表現する分布として排出量予測に適用される例が多い。
合わせガラス	Laminated glass	複数の板ガラスの間に樹脂などの中間膜を挟み、接着したガラスのこと。
安定化効率	Stabilizing efficiency	アモルファス Si 太陽電池は光にあたると出力が低下するが、光を照射して出力が安定になったときの変換効率。
雲量	Cloud cover	空の面積に対し、雲の面積が占める割合。
衛星コンステレーション	Satellite constellation	比較的安価・小型の人工衛星を軌道に多数（数十～数百基）配置し、一連の観測体制を構築することで、従来と比較して高頻度（毎日もしくは一日複数回）の衛星観測を実施する観測システム。
遠隔監視システム	Remote monitoring system for solar photovoltaic generation	太陽光発電設備に設置し、少なくとも発電電力量を含む発電データを計測し、計測したデータを WEB 上で可視化するとともにダウンロードして取り出しする機能を具備したシステム。
遠心風力式破砕機	Centrifugal crushing machine	太陽電池パネルを高速回転するブローア状の羽根で破砕・風選し、ガラスとその他に分離する装置。
凹凸型のロール形状	Ruggedness roll shape	ロール破砕機における2本のロールの表面突起部の形状が角型のもの。
親モデル	Weather model that calculates initial/boundary conditions of regional atmospheric model	領域モデルでの数値シミュレーションを実施する際に、初期値・境界値として入力する大気等のデータを計算した気象モデル（全球（地球全体）を計算対象領域とする気象モデルなど）。
温度サイクル試験	Thermal Cycle Test	IEC61215 に定められた、85℃と-45℃の温度変化を一定周期で一定回数与える試験。試験後の出力低下5%以下であれば合格。
快晴時日射量	Clear sky solar radiation	雲が存在しない場合の日射強度。雲以外の物質（大気、水蒸気など）による減衰効果のみが反映される。
回折結合型プラズモン	Diffraction-coupled Plasmon	物質内の電子振動と光波との共鳴現象であるプラズモンを励起する方法の一つで、回折格子ピッチより大きな波数を入射させて回折光が格子面上を伝搬させることで金属プラズモンを励起する方法。

外部発光量子効率 (ERE)	External radiation quantum efficiency	素子に注入された電子と正孔の数に対する、素子の外部まで取り出すことができた光子(フォトン)の数の割合。
外部量子収率(EQE)	External quantum efficiency	太陽電池が吸収した光が電流に変換され、実際に外部に取り出せる割合。
開放電圧(Voc)	Open circuit voltage	太陽電池セル・モジュールの出力端子を開放した時の両端子間の電圧。
界面制御	Surface Modification, Surface Control	材料界面に導入される単分子層レベルの修飾。修飾により界面のエネルギーレベルや疎水性等の物性が変化する。
外来事故	Accident caused by external factor	太陽光発電設備に内在する故障等の事由によらない、自然災害等の外来事由による事故。
可視光下	Under visible light	照度 200Lx (光波長範囲 400~700nm での光エネルギー57.7 $\mu$ W/cm <sup>2</sup> ) 環境下。
角パイプ	Square pipe	JIS G 3466 一般構造用角形鋼管 (STKR400, STKR490) に適合した角形鋼管 (200 角未満) のこと。
駆け付け対応	Rush to the site	太陽光発電システムなどの異常を検知した際に、現場に駆け付け、応急対応、修理などの対応を行うこと。
荷重試験	Load test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。太陽電池モジュールに対して、一定荷重を一定時間負荷する試験。
加水分解	Hydrolysis	反応物に水が反応し、分解生成物が得られる反応。エチレン酢酸ビニル共重合樹脂では、水との反応により酢酸が発生する。
加速負荷試験	Accelerated test	太陽電池モジュールの信頼性を加速して評価する試験。
架台	Support Structure	太陽光発電モジュールを取り付けるための支持物。
活性化エネルギー	Activation energy	反応の基底状態から遷移状態に励起するのに必要なエネルギー。
活性層	Active layer	太陽電池の構成部材の一つで、光吸収により、電子と正孔を生成する層。
簡易動的コーン貫入試験	Simple dynamic cone penetration test	人力で 5kg のハンマーを 50cm の高さから自由落下させて、地盤内にコーンを 10cm 貫入するのに必要な打撃回数を求める試験である。
規格値	Normalized value	一定の決まりに基づき変換した値で、初期値を 1 とした火の値を用いることが多い。
基準状態	Standard test condition	太陽電池セル・モジュールの特性を測定する際の基準。(セル温度: 25°C、分光分布: 基準太陽光、放射照度 1000W/m <sup>2</sup> )
基準太陽光	Standard sunlight	太陽電池セル・モジュールの出力特性を共通の条件で表現するために放射照度および分光放射照度を規定した仮想的太陽光。

基準太陽光スペクトル	Reference solar spectrum	太陽電池を測定するために定められた太陽光の分光放射照度スペクトル。
基準太陽電池セル	Reference solar cell	太陽電池セル・モジュールの測定にあたって、測定用光源の放射照度を基準太陽光換算で決定するために使用される、基準セル・モジュールと相対的に同じ分光感度を持った太陽電池セル。
気象モデル	Weather model	地球大気の状態の変化について物理法則に基づく数値シミュレーションを実施する際に用いるコンピュータープログラム。
規制のリバランス	Rebalance of regulation	規制緩和と規制強化を組合せて最適な規制を行うもの。例えば、保安規定を強化すると同時に、スマート保安(遠隔モニターなどを併用)を容認し、全体として安全性を高める規制とする。
犠牲防食	Sacrificial protection	めっき層がある鋼材において、何らかの理由で鉄素地が露出した際に、鉄が腐食されるより先に、めっき層が腐食され、保護することで鉄を腐食させない効果のこと。
逆型構造	Inverted structure	受光面から見て、透明電極層/ホール輸送層/ペロブスカイト層/電子輸送層/電極で構成されるペロブスカイト太陽電池構造。
逆流防止ダイオード	Blocking diode	太陽光発電システム内で逆流を防止するために設置するダイオード。一部の太陽電池モジュールが短絡故障を起こした場合などで、正常なストリングから異常ストリングへ電力が逆流してしまうことを防止する。
曲線因子 (FF)	Fill-factor	最大出力を開放電圧と短絡電流との積で除した値。
境界値	Boundary conditions	気象モデルを用いた数値シミュレーションを実施する際に、計算対象期間にわたって計算領域の外(境界部)から入力する大気や海面水温などのデータ。
近赤外領域	Near infrared region (NIR)	可視領域の長波長側から赤外領域の波長域(800-2500nm)。
空乏層	Depletion layer	PN接合を形成した際にできる電気二重層によりキャリアが排他された層(領域)。
傾斜面日射量	Tilted surface irradiance	水平面ではなく傾斜した面に全方位から入射する太陽光の単位面積当りのエネルギー。
系統安定化	Stabilization of grid	一般に太陽光発電システムは変動が大きく、電力系統を不安定にする懸念があるが、これを低減、防止するもの。蓄電池を併用して出力の平準化を図るものなどがある。
系統連系	Grid connection	太陽光発電等の設備と商用電力系統との接続。安全に接続できるよう連系規程などが定められている。

系統連系形集中配置太陽光発電システム	Grid-connected centralized PV power system	集中配置型発電所の機能を果たす太陽光発電システムである。こうしたシステムから供給される電力は特定の電力顧客とは関連せず、系統において電力系統に大容量電力を供給する以外の機能のために設置されない。代表的なシステムは地上設置であり、近隣の開発とは独立して機能する。
系統連系形分散配置太陽光発電システム	Grid-connected distributed PV power system	系統に連系した顧客に電力を供給するシステム、あるいは、直接、系統に電力を供給するシステム（特に、電力系統が送電機能を提供するものではなくて複数の顧客に配電するように構成されている場合）である。こうしたシステムは、積算電力量計の需要側にある消費者の土地建物に設置された太陽光発電システムである可能性もある。これには公共施設や商業用ビル、自動車道路遮音壁等の構築環境に単純に設置されたシステムも含まれる。電力会社の配電網の支援にも利用するために特別に設計されることもある。容量の規模はこの応用を決定する要因とはならない。太陽光発電の標準からいえば1MWの屋根用システムは大規模であるが、そのほかの形態の分散型電源ではそうではない。
蛍光 X 線分析	X-ray fluorescence analysis	X 線を試料に照射したときに発生する蛍光 X 線のエネルギーや強度から物質の成分元素や構成比率を測定する分析法。
軽量屋根	Lightweight roof	「スレート屋根」や「金属屋根」などの軽量材による屋根。
結晶シリコンライトスルー太陽電池モジュール	Silicon light-through photovoltaic module	半導体材料として結晶シリコンをもちいた透光性の太陽電池である。
結晶シリコン太陽電池	Crystal-silicon solar cell	太陽電池セルが結晶シリコンの無機質である太陽電池。
建材一体型太陽電池 (BIPV)	Building Integrated Photovoltaics	屋根、壁面、天窓、ファサードなど、建物の外皮にある建築材料と一体化した太陽光発電設備。
原子層堆積	Atomic layer deposition (ALD)	ガス原料を交互に供給し、1層ずつ制御して薄膜を形成する方法。
構造色	Structural color	材料自体は色を持たないが、多層構造を持つことで光学干渉効果により生ずる色。透明な誘電体薄膜の積層構造等で様々な色を実現できる。
光電子収量分光法	Photoelectron yield spectroscopy	イオン化エネルギーを測定する手法。
固液分離	Solid-liquid separation	液体の中に分散している状態の固体を液体から分けること。

国際エネルギー機関 (IEA)	International Energy Agency	29 の加盟国が、その国民に信頼できる、安価でクリーンなエネルギーを提供する為の諮問機関。
固定価格買取制度	The establishment of Feed-in Tariff	2012 年 7 月に導入された再生可能エネルギーによる発電電力の全量買取制度。
交流インピーダンス測定	AC impedance	作用極－参照極間の電位を、対極－参照極に電流を流すことでコントロールし、作用極－参照極間のインピーダンスを測定すること。その際、与える電位を交流として、その電位の周期を変えることで測定する
光電変換層	Photoelectric conversion layer	光を電気に変換する層。
杭基礎	Pile foundation	構造物を直接に支持することが難しい地盤などで直接基礎に代って杭を用いて支持する形式の基礎。支持方式には、支持杭によるものと摩擦杭によるものがある。
杭頭処理	Processing of pile head joint	杭頭高さを設計高さにそろえるため、杭頭部を切断、壊し取るあるいは継ぎ足しを行うこと。
孔食	Pitting (Corrosion pit)	金属の腐食の一種。金属面の欠陥部分から腐食が進行し、孔状に腐食が起こる現象。
差分型	Differential mode	二つの対象の間にある違いや差を比較すること。
三段階法	Three-stage method	CIS 光吸収層の製膜手法の一つ。真空蒸着法を改良した製膜手法。
散乱日射量	Diffuse horizontal irradiance (DHI)	大気成分により散乱・反射して天空の全方向から届く太陽光の散乱日射を、水平面で受けた単位面積あたりの散乱日射エネルギー。
自己組織化単分子膜	Logistics operator	撤去された機器・設備等を中間処理事業者に運搬する者。
事故ハザード	Free electron absorption	半導体において電子濃度が高くなると伝導帯内で赤外線領域の光を吸収できるようになる現象。
収集運搬事業者	Self assembled monolayer (SAM)	自己組織化により配向が揃った有機系単分子膜。
自由電子吸収	Accident hazard	自然災害等の外来事由に際して、実際に事故を生じせしめる太陽光発電所に内在する危険事情。
新業務項目提案 (NP)	New work item proposal	IEC における新業務項目の提案段階の活動。
親水性コート	Hydrophilic coat	表面が水をはじかず水滴を作らない（濡れやすい）性質を有する被膜。
正孔輸送層	Hole transport layer	太陽電池の構成部材の一つで、正孔を選択的に通過させるための層。
赤外吸収スペクトル	Infrared Spectra	赤外線の吸収スペクトル。化合物の結合の種類に応じて吸収波長が異なるため、分析手段となる。

接触角	Contact angle	固体表面に液体を滴下した際に生じる液滴の接線と固体表面がなす角。
高温光誘起劣化 (LETID)	Light and elevated temperature-induced degradation (LETID)	太陽電池モジュールの温度が 50 度を超える高温環境において出力が低下する現象。
高温高湿試験	damp heat (DH) test	太陽電池モジュールの信頼性試験の一つ (IEC61215 10.13 項に規定の耐環境試験)。一般的な条件は温度 85 °C、湿度 85%である。認証試験では、1000 時間の試験後の性能低下が初期値の 5%以内であることを要件としている。
国際エネルギー機関・太陽光発電システム研究協力プログラム (IEA PVPS)	IEA Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS)	IEA の枠組みにおける技術協力プログラム (TCP) のひとつで、1993 年に制定された。IEA PVPS の使命は、「国際協力を推進して持続可能なエネルギー・システムへの転換における太陽光発電の礎石としての役割を促進すること」である。
国際電気標準会議 (IEC)	International Electrotechnical Commission (IEC)	電気工学、電子工学、および関連した技術を扱う国際的な標準化団体。
再結合	Recombination	表面や欠陥によって電子・正孔が消失する現象。
再生可能エネルギー・ポートフォリオ基準 (RPS)	Renewable portfolio standards (RPS)	電力事業者（電力小売り業者である場合が多い）が、電力供給の一部を再生可能エネルギーから調達する義務要件。
最大電力	Maximum power (Pmax)	太陽電池セル。モジュールの電流電圧特性曲線上で電流と電圧の積が最大になる点での電力。
三角分布	Triangular distribution	有限区間の上限と頂点、下限を直線で結ぶことで表現される確率分布であり、三角形の形状を取るもの。サンプルデータに限りがあり、母集団の特定が困難な場合に利用されることが多い。
散乱過程	Scattering process	太陽光などの放射が大気分子や水蒸気、雲粒子などと衝突して伝達方向が変わる現象。
仕事関数	Work function	材料表面から電子を外部（真空中）へ放出させるための最少エネルギー。
市場普及イニシアチブ	Market deployment initiative	グリーン・プライス制度、レート・ベース・インセンティブ等市場開発手段を用いて太陽光発電システムの市場展開を奨励するためのイニシアチブ等である。イニシアチブは政府、金融会社、電力事業者等によって実施される。
支持層	Bearing stratum	構造物を十分に支持する能力があり、かつ沈下に対しても安全である地層、または支えている地層。

持続可能建築物に関する要件	Sustainable building requirements	建物の新規開発（住宅用、事業用）要件。販売用不動産の一部も含まれる場合がある。これには、太陽光発電が建物のエネルギー消費を低減するひとつの選択肢として含まれる場合、或いは建物開発に太陽光発電の装備を特に義務付けている場合がある。
実効的キャリア寿命	Effective carrier lifetime	半導体中のキャリア寿命を測定する時、バルクのキャリア寿命は表面や裏面の影響を受けるため、実際のバルクのキャリア寿命は測定されず、実効的なキャリア寿命が測定される。
実証プログラム	Demonstration Programme	一般大衆および潜在的ユーザー/所有者に対する太陽光発電システムの運転を実証するプログラム。
遮へい暴露試験	Sheltered exposure test	遮へい構造物の下若しくは中又は屋内に試料の一部若しくは全部を設置して、日照、雨、雪、風などの直接的な影響を避けた状態で暴露し、試料の化学的性質、物理的性質及び性能の経時変化を調査する暴露試験方法のこと。
需給一体型	Supply/Demand integrated system	供給（発電）と需要（電力消費）を一体とした太陽光発電システム。自家消費（電力消費）を組み込むことにより系統コスト増抑制などのメリットが見込め、経済産業省も需給一体型への移行を推進している。
需給調整市場	Balancing Energy Market	調整力に関する電力市場。
集光型太陽光発電	Concentrating photovoltaics (CPV)	集光レンズ、集光鏡等を用いて太陽光を集光し、その光で発電する方法。
出力係数	Performance ratio	出力係数 = 屋外測定出力 (W) / 室内測定出力 (W) × 1000 (W/m <sup>2</sup> ) / 屋外測定日射強度 (W/m <sup>2</sup> ) で計算される。出力係数では太陽電池出力に最も大きな影響を与える日射量を一定の条件に換算している。
出力力率	Output Power Factor	力率の定義は実効電力/皮相電力である。その中で、電源回路からの出力の力率を出力力率、入力を入力力率と呼ぶことがある。
順型構造	Normal structure	受光面から見て、透明電極層/電子輸送層/ペロブスカイト層/ホール輸送層/電極で構成されるペロブスカイト太陽電池構造。
初期値	Initial conditions	気象モデルを用いた数値シミュレーションを実施する際に入力する、計算初期時刻の大気データ。
床材	Flooring material	地表面を覆う材料。
上空カメラ	Sky camera	上空に向けて設置されたカメラ。天候や雲の様子を撮影する。
蒸着法	Vapor deposition	真空中で金属等を蒸発させて、基板表面にその材料の薄膜を形成する方法。

色素増感太陽電池	Dye Sensitized Cell	色素で光感度を増大した酸化チタン等を用いる太陽電池。
締固め	Compaction	土壌を振動させる、たたく、突くなどして空隙を無くし、密実にする
振動篩型分級機	Vibration type screening machine	分別機に振動を与えることで形状(重さ、大きさ等)の異なるものを効率的に分別できる装置。
酢酸蒸気曝露試験	Exposure test to acetic acid vapor	一定の温湿度条件にて太陽電池を酢酸蒸気に曝露し、セル電極の信頼性を評価する試験。セルをモジュール化せずとも、セル電極の信頼性を評価可能な試験法であり、モジュールの高温高湿試験に代替可能な試験法として SEMI 標準化が決定した。
水蒸気透過率/水蒸気透過度	Water vapor transmission rate (WVTR)	単位面積・単位時間あたりフィルムから水蒸気が透過する量。一般的な単位としては、g/m <sup>2</sup> day が用いられる。
数値流体解析	Computational Fluid Dynamics (CFD)	コンピュータを用いて流体力学の方程式を解く数値解析手法。
据付システム	Installation System	モジュールを屋根等に取り付けるシステムを指す。
世界気象機関	World Meteorological Organization (WMO)	国連の専門機関の一つ。世界の気象業務の調和と統一のとれた推進に必要な企画・調整活動を実施。
精錬	Smelting	鉱石を還元することによって金属を取り出す過程。
静特性	Static characteristic	直流電圧又は、電流を印加して得られる素子特性。
税額控除	Income tax credits	太陽光発電システム設置関連費用の一部または全額を課税所得から控除できる。
積分球	Integrating sphere	散乱光の照度を計測する際に用いる。
赤外線サーモグラフィ	Infrared thermography	赤外線を測定して対象の温度分布を画像表示する装置。
接続箱	Junction box	太陽電池モジュールの接続ケーブルをまとめるための箱。
接続箱	Connection box	太陽電池モジュール出力とパワーコンディショナ入力をつなぐ箱。
設置角	Tilt angle	地面と太陽電池モジュールがなす角度。
絶縁体	Insulator	電気を通し難い材料。
絶縁耐圧試験	Dielectric withstand voltage test	IEC61215 10.3 項に規定の絶縁性能試験。試験条件：システム電圧×2+1000V を 1 分間。
絶縁抵抗	Insulation resistance	太陽電池モジュールの出力端子と接地間の抵抗。これが不十分(低抵抗)であれば地絡の危険性があり、感電や火災の原因となしえる。
絶対分光放射計	Absolute spectroradiometer	分光放射照度の絶対値を測定する分光放射計。



絶対放射計	Absolute radiometer	光の放射照度絶対値を測定する装置。
潜在変数	Hidden variable	エンコーダーにより求めた抽象的なデータを示す。
全天日射計	Pyranometer	半球面上の全方位から入射する太陽光の単位面積当たりのエネルギーを計測する測定器。
掃引方向	Sweep direction	太陽電池特性を測定する際の印加電圧の変化方向（増加方向または現象方向）。
相互相関法	Cross correlation method	現在時刻の雲画像と直近の雲画像の類似度から、雲の移動量を計算する手法。
相対誤差	Mean absolute percentage error	（予測値－観測値）の絶対値を観測値で割って平均した値を示す。0～100%の値をとり、値が大きい程、誤差が大きく、0に近い程誤差が小さい。
総観場	Synoptic-scale condition	1000 kmから 10000 km程度までの水平スケールの気象。
送り速度	Input speed	ロール破碎機の回転する2本のロールで挟まれた太陽電池パネルの送り込まれる速度。
速報報告書	Snapshot Report	各国が提出する前年の太陽光発電市場に関する速報値に基づいた世界の太陽光発電市場に関する包括的な報告書で、2013年以降年に1回作成している。
第一励起状態	First excited state	量子ドットの光吸収によって起こる電子・正孔対を生成する最低励起状態（基底状態と表すこともある）。
体積抵抗率	Volume resistivity	材料内部の電気抵抗。
対光応答非直線性	Nonlinearity versus irradiance	太陽電池の出力電流と入射光照度の比例関係からのずれ。
太陽光発電	Photovoltaics (PV)	太陽光のエネルギーを直接電気エネルギーに変換する発電方式。光電効果を利用した太陽電池を用いるのが一般的である。
太陽光発電システム	Solar power generation	太陽電池パネルで得た電気を、パソコンを経て自家消費又は系統連結して利用する電力システム。
太陽光発電システム	PV system	太陽電池モジュール、太陽電池モジュールの直流電流を交流に変換するインバータ、蓄電池、及び全ての設備及び制御装置から構成される容量40W以上のシステム。
太陽光発電システム研究協力プログラム (PVPS)	Photovoltaic Power System Program	太陽光発電システム研究協力プログラム (IEA PVPS) は、IEA内に制定された研究開発協力プログラムの一つ。1993年の設立以来、IEA PVPSの参加国・機関は、太陽光発電の応用に関する様々な共同プロジェクトを実施。
太陽光発電システム市場	PV power system market	容量40W以上の太陽光発電システムで、全て自国内に（地上）設置された太陽光発電システム応用市場。

太陽光発電システム設置容量	Installed PV power	標準試験条件 (STC) 一日射強度 1,000W/m <sup>2</sup> 、太陽電池セル温度 25°C、AM1.5 で太陽電池モジュールまたは太陽電池アレイが給電する電力量 (定格電力の項を参照)。
太陽光発電に特化したグリーン電力制度	PV-specific green electricity schemes	顧客は、太陽光発電によるグリーン電力を、一般にプレミアム価格で電力事業者から購入できる。
太陽光発電モジュール	Photovoltaic Module	配線材を用いて複数の太陽電池セルを直列に接続し、ガラスや高分子部材を用いて封止したもの。太陽電池パネルともいう。
太陽光発電応用に関する国内調査報告書 (NSR)	National Survey Report of PV Power Applications (NSR)	国内調査報告書は、各国のタスク 1 専門家が年に 1 回作成する報告書で、その国の太陽光発電市場の発展、支援施策、産業、研究開発活動、その他の情報などに焦点をあてている。報告書は、毎年発行される「太陽光発電応用の動向報告書」のベースとして使用される。
太陽光発電応用の動向報告書	Trends Report	タスク 1 の重要な成果物であり、1992 年以降年に 1 回作成している世界の太陽光発電市場及び産業に関する詳細な調査報告書。
太陽光発電投資ファンド	Investment funds for PV	民間による太陽光発電投資ファンドにおける分益提供や、富の創出やビジネスの成功の手段として太陽光発電を目的達成のために活用するその他のスキーム。
太陽天頂角	Solar zenith angle	地表面における法線方向と太陽方向が成す角度。0 度に近い程南中時に近く、90 度に近い程日の出・日の入付近に近い。
太陽電池セル	Photovoltaic cell (Solar cell)	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
太陽電池パネル	Solar panels	複数の太陽電池セルを直列に接続し、ガラスや樹脂等で封止したもの。太陽電池モジュール。
太陽電池モジュール	Photovoltaic module	太陽電池セルまたはサブモジュールを耐環境性のため外囲器に封入し、かつ、規程の出力をもたせた最小単位の発電ユニット (JIS C 8960 より)。※太陽電池セル：太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
太陽電池モジュールの温度係数	Photovoltaic module temperature coefficient	太陽電池は一般的に温度上昇に伴い出力が低下する。この係数が温度係数である。
太陽電池屋外計測	Outdoor PV panel performance test	屋外にて、実際の太陽光を用いて行う太陽光パネルの IV 計測。
耐用年数	Durability	太陽電池モジュールが使用できる期間として法的に定められた年数。
大気外日射量	Extraterrestrial radiation	地球大気の上端 (約 10km 上空) において、太陽光線に直角な単位面積が単位時間に受ける太陽放射エネルギーの量。

大気暴露試験	Atmospheric corrosion test	開放及び遮へい大気環境下で材料及び製品を暴露して、それらの化学的性質、物理的性質及び性能の変化を調査する試験。
多項式補間法	Polynomial interpolation method	関数値が既知の部分においてその関数に最も合うように多項式関数を構成することによって補間する方法。
多孔質多層型セル構造	Multi porous layered electrode (MPLE) type cell structure	酸化物と炭素材料で構成された多孔質構造にペロブスカイト塗液を浸透・結晶化した形成されたペロブスカイト太陽電池構造。
多接合太陽電池	Multi-junction solar cell	光の利用波長領域が異なる太陽電池を複数積層した太陽電池。
単結晶シリコン太陽電池セル	Monocrystalline silicon	精製された高純度シリコン結晶をスライスした、一つの結晶から製造される太陽電池セル。
端子ボックス	Terminal box	太陽電池パネルで発電した電力と外部に出すための送電線とを繋ぐパネル裏面に取り付けた箱。
単接合太陽電池	Single junction solar cell	PN 接合などの接合を一つ有した従来型の太陽電池。
短波放射	Shortwave radiation	可視光線、近紫外線、近赤外線の波長帯における放射エネルギー。太陽を起源とする放射に相当する。
短絡電流 (Isc)	Short circuit current	太陽電池セル・モジュールの出力端子を短絡した時の両端子間に流れる電流。
短絡電流密度 (Jsc)	Short circuit current density	光照射状態にある太陽電池の電極を短絡した時に流れる電流値をその面積で除した値。
中間処理事業者	Intermediate processor	使用済みとなった機器・設備等の分解・分離・選別等の処理を行う者。再資源化が可能な回収物はリサイクル、不可能なものは最終処分場に送られる。
中間バンド	Intermediate band	半導体材料のバンドギャップ中にエネルギーバンド(中間バンド)を作り込んだ状態。
中間バンド型太陽電池	Intermediate band solar cell	半導体の価電子帯と伝導帯の中間的な位置に電子が入る「中間バンド」を形成させた太陽電池であり、高いエネルギー変換効率を達成できると期待されている次世代太陽電池の一種。
直達日射量	Direct normal irradiance (DNI)	太陽光線に対して垂直な面で受けた単位面積あたりの直達日射エネルギー。
超軽量構造架構(造語)	Ultra-light structure Frame	鋼構造設計基準、軽鋼構造設計施工指針・同解説等の設計基準の適用範囲外となる厚さ 2.3mm 未満の超軽量鉄材を用いても安全性を満足できる太陽電池架台。
超高温定点黒体炉	Ultra-high temperature black body furnace	約 3000K の超高温で定点を実現できる黒体炉。

長期信頼性	Long term reliability	太陽電池モジュールが30年以上の運転環境下で安定して期待された役割を果たすことができる能力のこと。
直接基礎	Spread foundation	基礎スラブからの荷重を直接地盤に伝える形式の基礎をいう。
直接暴露試験	Open exposure test	大気暴露試験の一種で、気象因子(日照、雨、雪、風など)の影響を直接受ける状態で材料及び製品を暴露し、化学的性質、物理的性質及び性能の変化を調査する方法。
直列接続	Series connection	複数の太陽電池を電氣的に直列につなぐこと。
直列抵抗	Series resistance	太陽電池に対して直列的に作用する抵抗。直列抵抗が大きくなった場合、発電性能は低下する。
地絡	Ground fault	PVシステムなどの電気回路と大地が相対的に低いインピーダンスで電氣的に接続される状態。火災や感電の要因となる現象。
沈降荷重(雪)	Settling load	地盤上の積雪とアレイ面上の積雪が繋がることによってアレイの端部に作用する下方方向への荷重。
通函	Returnable Box	繰り返し使用される運搬用の容器。
定格電力	Rated power	標準試験条件(STC)で太陽電池モジュールまたは太陽電池アレイが発電する電力量でWの単位で記す。
低分子	Small molecule	分子量が数百以下のもの。
撤去・解体事業者	Decommissioning/dismantlement operator	所有者の委託を受け、機器・設備等の撤去・解体工事を行う者。廃掃法においては、撤去された機器・設備等の処理を委託された者が排出者となるため、撤去・解体工事を行う者が排出者となることが想定される。
転移学習	Transfer learning	あるモデルで学習したパラメータを別のモデルに転用する学習方法を示す。
転送行列法	Transfer-matrix method	波動方程式から得られる境界条件から領域間の波動関数の関係を表現する行列を導出し、その後はその行列の積で層状の媒質中の波の伝搬の様子を調べる手法。
電圧変成器	Voltage transducer	所定範囲の電圧を所望の範囲の電圧に変換する機器。
電圧誘起劣化(PID)	Potential-induced degradation (PID)	モジュールのフレームとセル間にかかる電圧により誘起される劣化の総称。大規模太陽光発電所の普及によるシステムの高電圧化にともない顕在化した。セルやモジュールの部材や構造により劣化現象は大きく異なり、そのメカニズムも十分に解明されていない。
電気化学測定	Electrochemistry measurement	化学物質の性質を電氣的に計測する方法。

電子親和力	Electron Affinity	真空準位から半導体の伝導帯下端までのエネルギー差。
電子負荷装置	Electronic load device	電子回路を内蔵していて負荷の大きさを可変にできる負荷装置。
電子ブロッキング層	Electron blocking layer	太陽電池の構成部材の一つで、電子を選択的に遮断させるための層。
電子輸送層	Electron transport layer	太陽電池の構成部材の一つで、電子を選択的に通過させるための層。
伝導帯オフセット	Conduction band offset	異種材料の接合間の伝導帯の不連続量。
電流分布	Current distribution	ある面内などにおいて電流密度の高い部分や低い部分を示す。
電流密度	Current density	単位面積あたりに単位時間に流れる電気量。
電力事業者の取り組み	Activities of electricity utility businesses	顧客がグリーン電力を購入できる「グリーン電力」制度、大規模の電力事業規模太陽光発電所、多様な形態による太陽光発電による電力の所有、一部の顧客による資金調達オプション、太陽光発電電力購入モデルなどがある。
電力販売契約	Power Purchase Agreement (PPA)	電力販売契約という意味で第三者モデルとも呼ばれている。企業・自治体が保有する施設の屋根や遊休地を事業者が借り、無償で発電設備を設置し、発電した電気を企業・自治体が施設で使うことで、電気料金とCO <sub>2</sub> 排出の削減するビジネスモデル。
凍結深さ	Frost penetration depth	地表面から地盤中温度の0℃線までの深さ
凍上現象	Frost heave	気温の低下に伴って地盤内温度が低下し地盤中に0℃等温面ができ、凍っていない地盤内の水分が凍結面に向かって移動して、凍結面に集まった水分が凍結して氷の薄い層が形成される。この氷の薄い層の成長に伴って土骨格が広げられて地盤が隆起する現象。
凍着現象	Adfreeze	気温が低下して土中の構造物の周囲の水分が凍り、構造物と凍土が付着する現象。なお、周囲の地盤が凍上することによって、構造物が隆起する現象を凍着凍上という。
等価システム運転時間	Photovoltaic system yield	アレイから供給されるシステム出力電力量を、標準太陽電池アレイ出力で除した値。
等価システム稼働時間	Final annual yield	太陽光発電システムから負荷に対して1年間供給された電力を太陽光発電システムの定格出力で割って求めた比率。
等価回路	Equivalent circuit	交流インピーダンス測定の結果から考えられる反応場の電気回路のこと
等価太陽日照時間	Reference yield	基準アレイ面日射強度で積算アレイ面日射量を供給するのに必要な時間数。
透明電極	Transparent electrode	高い可視光透明性と電気導電性を併せ持つ材料である透明導電体を用いた電極

動特性	Dynamic characteristic	交流電圧又は、電流を印加して得られる素子特性。
導電体	Conductor	金属など電気を通し易い材料。
独立形住宅用太陽光発電システム	Off-grid domestic PV power system	(主要な) 電力系統に連系しない住宅や村落に設置される太陽光発電システム。通常蓄電装置が利用される(最も一般的なものは鉛蓄電池である)。独立形太陽光発電システムと呼ばれることもある。他の電力源と組み合わせた「ミニグリッド」を通して住宅や地域(及びその他の応用に)に電力を供給することもある。
独立形非住宅用太陽光発電システム	Off-grid non-domestic PV power system	電力系統に連系しない揚水ポンプ、遠距離通信、安全・保護装置等の多種多様な産業や農業の応用に使用される太陽光発電システムで、系統には連系されていない。通常は蓄電装置が装備される。独立形太陽光発電システムと呼ばれることもある。
特高、高圧、低圧	Extra high tension power, high tension power, low tension power	電力系統の電圧の種類(特高:7000V超、高圧:600V超~7000V以下、低圧:600V以下)。太陽光発電システムはその規模によって、連系する電圧が異なる(2MW以上のPVシステムは特高、50kW以上は特高、50kW以下は低圧)。
曇天指数	Cloudiness index	(1-日射強度/快晴時日射強度)で計算される量。雲の厚さを表す。0に近い程快晴に近く、1に近い程雲が多く日射が小さい。
内部量子収率(IQE)	Internal quantum efficiency	太陽電池内部で吸収された光が電流に変換される割合。
二乗平均平方根誤差	Root mean square error	真値との差の二乗の平均をとり、その平方根の値で表した誤差。
二段階法	Two-step method	ペロブスカイト層の成膜方法の一種。基板上に塗布したヨウ化鉛(PbI <sub>2</sub> )などの薄膜にハロゲン化アンモニウム溶液を塗布して反応させてペロブスカイト層を成膜する方法。
日射スペクトル	Solar spectrum	波長別の日射強度。太陽から降り注ぐ日射エネルギーは波長毎に強さが異なる。一般に用いられる日射量は全ての波長域の日射強度を積分した値である。
日射空間ムラ	Non-uniformity	2つのセンサーで計測される計測時間内の、日射強度の瞬間差の最大値を日射強度で正規化した指標。
日射時間変動	Temporal instability	日射強度計測時間内の、日射強度の最大値と最小値の差を日射強度で正規化した指標。
日射熱取得率(SHGC)	Solar Heat Gain Coefficient	照射した太陽光の熱を遮断する度合いを示す建築材料の省エネ指標。

日射量予測	Global horizontal irradiance forecast	地表面における全天日射量の予測。
布基礎	Strip footing foundation	逆 T 字の断面形状の鉄筋コンクリートが連続して設けられた基礎。
熱蒸着	Thermal evaporation	固体を加熱して蒸発させることで薄膜化する方法。
軒先荷重（雪）	Eaves load	アレイ面の下端部（軒先）に作用する積雪荷重。
野立て	Open rack	太陽電池モジュールと架台を地面に設置する方法。
薄膜シリコンシースルー太陽電池モジュール	Thin-film Si see-through photovoltaic module	半導体材料として薄膜シリコンをもちいた透光性の太陽電池であって、太陽電池の向こう側が透けて見える。
薄膜系太陽電池	Thin-film solar cell	数 $\mu\text{m}$ の光吸収層を用いた太陽電池であり、省資源・低コスト化が期待される。シリコンを用いたものと銅-インジウム-ガリウム-セレン化合物を用いたものが実用化されている。結晶系に比べて水蒸気浸入に弱いとされている。
破砕装置	Crushing machine	固体を目的の大きさまで細分化する装置。
波長セレクター	Wavelength selector	特定の波長、波長幅で光を取り出す光学デバイス。
発光ダイオード	Light emitting diode(LED)	半導体に電流を流すことにより、禁制帯幅に応じた光を放出する素子。
発光分光分析	Emission spectrochemical analysis	放電等により試料を発行させ、分光器によってそのスペクトルを調べ、試料中に含まれる元素の種類やその含有量を定量的に測定する分析法。
発電効率	Ratio of solar photovoltaic generation against solar radiation	発電電力量を日射量で除した値のこと。
発電事業者・所有者	PV electricity producer/PV system owner	太陽光発電システムの所有者（個人、事業者）。
発電阻害要因	Reduction factor of solar photovoltaic generation	太陽光発電設備について、通常の経年劣化を超えて発電を低下させる要因（気象要因を除く）
発電電力量解析	Analysis of solar photovoltaic generation	遠隔監視システムから取得する発電電力量等のデータについて、発電の傾向を視覚化または数値化するために行う解析。解析には、気象情報等を用いても良い。
光起電流	Photo-carrier current	光が照射されることで流れる電流。
光照射効果	Light induced effect	太陽電池の特性が光照射によって変化する効果。
光閉じ込め	Light trapping	太陽電池内部での光の伝播方向を制御することにより、伝播距離を伸ばし太陽電池内部での光吸収率を向上させ、太陽電池の変換効率を向上させる技術。

光劣化	Light-induced degradation (LID)	セルが光照射されることにより、性能が低下する現象。結晶シリコン、アモルファスシリコン等の材料を用いたセルで観測されるが、その両者で原因は異なる。
被測定モジュール	Module under Test (MUT)	被測定モジュール。
ひまわり 8 号	Meteorological satellite Himawari-8	日本が運用している静止気象衛星で、東経 140 度の赤道上約 36,000km からアジア・太平洋域の気象を常時観測している。2014 年 10 月 7 日に打ち上げられ、2015 年 7 月 7 日から正式運用を開始した。
標準貫入試験	Standard penetration test (SPT)	重さ 63.5kg の重錘を 75cm 落下させて、標準貫入試験用サンプラーを打撃し、サンプラーが 30cm 地盤に貫入されるまでに要した打撃回数から地盤の固さを調べる地盤調査方法である。
標準試験条件	Standard test condition (STC)	太陽電池の測定条件。温度 25°C、光強度 1 kW/m <sup>2</sup> 、エアマス 1.5 を指す。
表面銅欠乏相	Copper deficiency layer (CDL)	CuInSe <sub>2</sub> の化学量論組成よりも Cu が欠乏した欠陥相。
表面パッシベーション	Surface passivation	半導体素子の表面保護膜を作成する工程。
表面プラズモン共鳴	Surface Plasmon Resonance	入射光によって励起される物質内での電子の集団振動を表し、光の振動数が表面電子のプラズマ周波数と一致したとき共鳴的な応答が得られる。
封止	Lamination	太陽電池セルならびに配線をモジュール構成材料（ガラス、フィルム、中間膜など）で封じ込めること。
封止材	Encapsulant	太陽電池モジュール内にセルを固定するための高分子部材。一般的には、エチレン-酢酸ビニル共重合体（EVA）を用いる。
不純物	Impurity	結晶中に混入している微量元素。
腐食	Corrosion	金属が環境中の酸素・水などとの化学反応によって変質すること。また、その現象。普通、変質部が酸化物やイオンなどのかたちでその表面から失われ、金属材料としての品質が低下する場合をいう。
腐食減量	Corrosion weight loss	腐食試験により生成した表面にある腐食生成物を取り除いた試験片の重量減少量のこと。これらを単位面積当たりの量として暴露期間で除すると、腐食速度が算出される。
部分影	Partial shadow	太陽電池モジュールの一部にかかる影のこと。
分解処理コスト	Disassembling cost	太陽電池パネル 1 W あたりの処理費用。
分級機	Screening machine	ガラスやバックシート等をその形状（重さ、大きさ等）の違いで分別する装置。



分光感度	Spectral response	太陽電池の入射光波長ごとの変換効率。太陽電池出力の入射光波長依存性を表した特性で、短絡電流の入射単色光入力に対する比。なお、単位は A/W または相対値（相対分光感度）で表す。
分光放射照度標準電球	Spectral irradiance standard lamp	分光放射照度の基準となる標準電球。
分子線エピタキシー	Molecular beam epitaxy	高真空中で高純度の金属材料を蒸発させ、ビーム状の分子線を生成し、基板に照射することで結晶成長を行う手法。
分子量分布	Molecular weight distribution	合成高分子は同一組成だが、分子量は異なる分子の混合物である。分子量の広がりをも分子量分布と呼ぶ。
変換効率	Efficiency	最大電力を太陽電池セル・モジュール面積と放射照度との積で除した値。
防汚コート	Antifouling coat	太陽電池モジュール表面に汚れを付着しにくくすることを目的に形成される被膜。
放射モデル	Radiative transfer model	放射強度を計算する物理モデル。太陽光などの放射は、大気や雲などと相互作用することで伝達方向や強度が変化するため、日射量などの放射強度を推定するためには放射モデルを解く必要がある。
補外	Extrapolation	ある区間で定義された関数に対して、その区間の外側の隣接した区間における関数値を推定すること。
補間	Interpolation	ある区間で定義された関数が、その区間内部の部分区間において関数値が不明の場合に、関数値が既知の部分から不明の関数値を推定すること。
補助金	Capital subsidies	直接補助金は、太陽光発電システムの特定の発電装置コストまたは総設置コストのいずれかについての初期費用の障壁に対処することを目的としている。
膜建築	Membrane structure	屋根や外壁に膜材料を用いた膜構造建築物。
水みち(造語)	Water path	太陽電池モジュール面から落下する雨水や結露水の通り道等の架台に局所的に降雨が集中する環境。
水みち腐食(造語)	Corrosion by water path	水みちにより濡れ時間が他の部位より長くなることで発生する局所的な腐食のこと。
見守りサービス	Monitoring service	太陽光発電システムなどの運転状況などをモニター(見守る)し、迅速に異常を検知するサービス。
民間金融機関の取り組み	Commercial bank activities	太陽光発電システムを設置した住宅に対する優遇住宅ローン、および太陽光発電システム設置のための優遇グリーン・ローンなどの活動を含む。

無軌道搬送システム	Trackless transfer system	物流倉庫などで用いられている搬送システムで床面に経路ガイド線を用いずに搬送台車が移動するシステム。
銘板値	Nameplate value	太陽電池モジュールに貼付けられた銘板に記載されている定格出力。
融解プラトー	Melting plateau	超高温定点黒体炉において、融解・凝固の潜熱のため凝固点において温度変化がない平坦部。
有機金属気相成長法	Metalorganic chemical vapor deposition	半導体の製膜手法の一つ。原料に有機金属ガスを使用する。
有機系太陽電池	Organic solar cell	有機半導体でpn接合を形成する太陽電池。最近では効率も10%を超え、早期の実用化が期待されているが、水蒸気浸入に弱いとの欠点もある。
有機色素	Organic dye	色素分子を構成する元素が主に炭素からなり、かつ金属元素を含まない色素。
誘導負荷	Inductive load	モータなどで突入電流が流れる負荷
油化	Oiled	廃プラスチックを熱分解して生成油を製造する方法。
陽電子消滅寿命測定	Positron annihilation lifetime spectroscopy	ポリマー中に入射された陽電子の一部は、ポジトロニウムを形成して自由体積空隙中へ局在化した後、電子と対消滅する。空隙のサイズが大きいほど陽電子の寿命が長い。陽電子が消滅するまでの寿命を測定することにより、空隙サイズを測定することができる。
翌日予測	Next day forecast	予測情報を発表する日の翌日を対象とした予測。
横座屈	Lateral buckling	曲げねじり座屈。曲げ材に対して横座屈、圧縮材に対して曲げねじり座屈と使い分ける。
寄棟	Hipped Roof	屋根の形状の一つ。4方向に傾斜する屋根面をもつものをいう。
予定損害率	Intended loss ratio	損害保険会社が、個々の保険商品の保険料算出方法の決定に際し、その基礎として予め見込む損害率（発生保険金／既経過保険料）。
裏面バックシート	Back sheet	太陽電池モジュールの裏面側のシート。一般的には不透明の樹脂を用いる。モジュールの不具合事例のひとつが裏面バックシートの膨らみであるが、断線や水分侵入などが懸念される。
裏面パッシベーションセル	Passivated emitter rear cell (PERC)	従来のセルは裏面にアルミニウム電極を直接印刷していたが、裏面に絶縁膜を形成することで再結合を低減し、効率向上を図ったセル。従来のセルと比べて大幅な工程増とならずに製造できる利点がある。

裏面材	Back material	太陽電池モジュールの裏面に用いる部材。一般的にはバックシートを用いる。
裏面電極セル	Interdigitated back contact (IBC)	セルの n 型電極、p 型電極ともに裏面に楕型に配置したセル。セル表面に電極が存在しないため、光損失が少なく高効率を達成している。
離散フーリエ変換法	Discrete Fourier transform method	離散 (デジタル) 信号のフーリエ変換
領域モデル	Regional (atmospheric) model	日本周辺域など、ある領域を対象に気象の数値シミュレーションを実施する際に用いるコンピュータプログラム。
量子ドット	Quantum dot	電子の波長以下の微小領域に 3 次元的に閉じ込めた (3 次元量子井戸) 構造で、自然原子内の電子のような固有エネルギー状態をもつ。
両面受光太陽電池	Bifacial solar cell	表面、裏面両方からの光で発電する太陽電池。
励起電子	Excited electron	光エネルギーを吸収して高エネルギー状態に遷移した電子。



# I. 事業の位置づけ・必要性について（事務局、総括）

## 1. 事業の背景・目的・位置づけ

### 1.1 事業実施の背景と事業の目的

我が国における太陽光発電の導入は、FIT開始後に導入が急拡大したが、規模や属性も異なる様々な事業者による参入する中で、安全面、防災面、景観や環境への影響、将来の設備廃棄等に対する地域の懸念や、FIT事業認定者が、20年間等の買い取り期間終了後も、事業を継続するのか、更に発電事業終了後に再投資が行われて持続的な導入・拡大が図れるのかといった懸念が高まっている。また、導入拡大により従来の系統運用の下で系統制約が顕在化しており、一部地域では出力抑制等が生じている。再生可能エネルギーの出力変動を調整するための調整力の確保を含め、電力系統へ受け入れるコストは増大している。そのため、再生可能エネルギーの適地遍在性への対応や、大量導入を支えるネットワーク整備・運用が求められており、太陽光発電としての適切な調整力を確保するために出力制御量の低減に向けた方策や系統接続要件の整備が必要とされている。

さらに、再生可能エネルギーは主力電源化に向け電源特性に応じた電源となる事が求められており、太陽光発電は他の電源と比較して発電コストの低い「競争電源」のみではなく、「地域活用電源」として需要地に近接して柔軟に設置できる電源としても期待されている。

我が国は太陽光発電の大量導入社会の実現に着実に近づきつつあるが、大量導入社会を構築するためには様々な課題が顕在化してきている。

2018年7月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、「2030年に向けた基本的な方針と政策対応」として、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた取組は、「他の電源と比較して競争力ある水準までのコスト低減と固定価格買取制度（FIT）からの自立化を図り、日本のエネルギー供給の一翼を担う長期安定的な主力電源として持続可能なものとなるよう、円滑な大量導入に向けた取組を引き続き積極的に推進していく」ことが必要とされている。

また、「2050年に向けたエネルギー転換・脱炭素化の挑戦」としては、変動するエネルギー需要を単独で満たす完璧なエネルギー技術は実現していない事から「全方位の複線シナリオ」が必要とされている。この中で太陽光発電などの再生可能エネルギーは主力電源化に向け、「面積的な制約の克服のための発電効率の抜本的向上」などの技術革新によるブレークスルーを要する課題に取り組む事が必要とされている。

我が国のエネルギー安定供給の確保や、低炭素社会実現の観点から、再生可能エネルギーの導入拡大を進めることは非常に重要である。その一翼を担う太陽光発電に関しては、その特性を十分に理解し、また、その特長を活かした導入形態を模索していくことで、太陽光発電システムの適正な導入を実現し、エネルギー供給量を着実に拡大していく事が求められる。太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの普及がさらなる普及のためには、太陽光発電の適地が減少していく中、これまで導入が困難な場所にも導入を可能とする技術が望まれる。また、FIT制度による買取期間が終了した後は、小規模発電設備の事業継続性の懸念、および発電事業終了後の設備廃棄の懸念が生じている。

こうした状況を踏まえ、NEDOは太陽光発電の大量導入社会における、1) 太陽光発電の安定的拡大、2) 安全性の確保と循環型社会の構築、3) 新市場における発電コスト低減、4) 技術開発を推進すべき市場の4つの視点から、現状分析、課題抽出を包括的に行い、その課題解決の方策を検討した。そして今後の技術開発の指針を得ることを目的として、2020年12月に「太陽光発電開発戦略2020（以下、「開発戦略」という。）」を策定した。開発戦略では以下の5つの課題について整理し、解決に向けた取組方針、開発事項等について論じた。

- 【課題 1】 高付加価値化事業の創出
- 【課題 2】 立地制約と系統制約の顕在化
- 【課題 3】 安全性の向上
- 【課題 4】 循環型社会の構築（信頼性、リサイクル）
- 【課題 5】 発電コストの低減

上記の課題に対する、解決へ向けた取組として従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいない場所で必要とされる性能を満たし、各市場の創出・拡大に資する要素技術を開発することで、太陽光発電

の新市場の創出につなげる技術（具体的には移動体や、重量制約のある屋根、建物壁面など、従来技術での導入では課題がある場所での基盤技術）について、研究開発を促進することとした。併せて、既に導入されている太陽光発電の長期安定的な事業の運営確保として、安全性信頼性の確保、系統制約の克服等の現在顕在化している課題解決や発電設備の廃棄対策等の適切な事業環境整備に資する技術の開発を目的とし、NEDOは2020年から5年間のプロジェクトとして本プロジェクト「太陽光発電主力電源化推進技術開発」を開始した。なお、本プロジェクトにおいては上記と並行し、これらの技術を支える測定評価技術、日射量予測技術等、先進的共通基盤技術の開発や国内外の開発動向の把握についても実施する。

## 1.2 国内外の研究開発の動向

太陽電池の分野では国内においては1974年のサンシャイン計画開始以降、NEDOが主導して技術開発を推進してきた。日本以外の主要地域における開発状況をみると、現在では世界各国で国を挙げた研究開発が行われている。

一方、世界各国の主要地域における開発状況をみると、国を挙げた研究開発が行われている。プロジェクト開始の2020年時点においては、欧州では、Horizon 2020（2014～2020）を策定し、製造装置プロセス、集光型太陽電池、次世代太陽電池、薄膜系太陽電池、結晶シリコン太陽電池等、国家横断的な技術開発を行っている。

また、米国では、2011年2月に新たな技術開発戦略として「Sunshot イニシアティブ」を策定し、太陽光発電技術に係るコスト削減、太陽光発電の系統連系に係るコスト削減、太陽光発電の設置・運用に係るコスト削減等の開発を行っている。

一方、中国では、第13次5ヵ年計画（2016～2020年）で、2020年までに単結晶シリコン太陽電池で23%、薄膜太陽電池の効率向上等の目標を設定し、研究開発を推進していた。研究開発推進の結果、シリコン太陽電池では中国製モジュールの効率、品質とも大きく改善し、シェアの拡大を実現している他、ペロブスカイト等の次世代の太陽電池についても積極的に取り組んでいる。

## 1.3 技術戦略上の位置づけ

図 I-1 に近年の太陽光発電の研究開発プロジェクトを示す。本プロジェクトは太陽電池の開発を主としていた「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」と「太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト」の成果を踏まえ、シリコン系の太陽光発電の導入が進む中で更なる太陽光発電の導入を進めるために、従来の技術では太陽光発電の導入が難しかった場所への導入を目指し、発電効率の向上、軽量化、曲面追従化等とコスト低減などの技術開発を行い、将来の太陽光発電の導入量拡大とともに新たなセル、モジュール、システム技術に関連した産業競争力の強化を図る。例えば、移動体を含め、より高効率かつ高耐久性を求められる条件下への太陽光発電の導入を見据えた技術開発の実施や、重量制約の有る屋根、建物壁面などへの太陽光発電の導入に向け研究開発を行う。さらに、太陽光発電の主力電源化を推進するため、太陽光発電設備の長期安定電源化に向けた事業運営確保として現在顕在化している課題である安全の確保に資するガイドライン策定や小規模な事業用太陽光発電設備の適切なメンテナンスの確保や再投資を促すため必要となる信頼性に係る技術開発を行う。また、2030年代以降に急増が懸念される太陽光発電設備の廃棄物を回避するためのリサイクル技術や現在、出力抑制等の系統制約の克服に向けた太陽光発電側での対応方法の検討・実証等を行う。

また、上記と並行し、これらの技術を支える測定評価技術、日射量予測技術等、先進的共通基盤技術の開発や国内外の開発動向を把握し、開発を支援する動向調査等も実施することとした。

図 I -1

太陽光発電開発戦略課題	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
政府予算	太陽光発電のコスト低減や信頼性向上等に向けた技術開発事業						太陽光発電の導入可能量拡大等に向けた技術開発事業				
発電コスト低減	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発						太陽光発電主力電源化技術開発  中間評価2022年 事後評価2025年				
信頼性向上	太陽光発電システム効率向上・維持管理技術開発プロジェクト										
リサイクル技術確立	太陽光発電リサイクル技術開発プロジェクト										
立地制約解消 高付加価値事業創出	太陽光発電多用途化実証プロジェクト										

太陽光発電システム長期安定電源化基盤技術開発  
別途、グリーンイノベーション基金事業(2021-2030)

## 2. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

### 2.1 NEDOが関与することの意義

1974年に開始したサンシャイン計画以降、NEDOは太陽光発電分野の研究開発を牽引してきた。30年以上にわたるコーディネートの経験があることは研究開発マネジメントにおける大きな強みである。

NEDOは企画、立案段階においては産学官を取りまとめてロードマップを策定するとともに、事業環境の変化に即して改訂を行い、国策を盛り込んだ企画を行う。また、業界全体のニーズを把握するために産学官のヒアリング等を実施し、開発戦略を踏まえた目標を設定することができる。

研究開発体制構築の段階では産学官を組み合わせた柔軟な研究開発体制を構築ことができ、企業、大学、公的研究機関でコンソーシアムを形成するとともに、複数の競合企業をコンソーシアムにまとめ上げ、共通の技術目標に向けて研究開発を推進することができる。

事業推進の際には公的機関としての中立性を確保できること、国立研究開発法人制度を最大限に生かして柔軟に推進が可能である。大学及び公的研究機関の基礎研究成果を企業の事業化に活かせるように調整し、必要に応じて加速資金の投入や事業環境の変化に即して追加公募を実施する。長期間にわたる太陽電池の技術開発を牽引してきたNEDOが本研究開発分野に関与するのは最大限の研究開発成果を得るために適切であると考えている。

### 2.2 実施の効果(費用対効果)

本プロジェクトでは新市場創出に向けた太陽光発電の技術開発によって、従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいない場所向けに必要とされる性能を満たし、各市場の創出・拡大に資する要素技術を開発し、太陽光発電の新市場の創出につなげる。移動体や、重量制約のある屋根、建物壁面などと共通して導入の課題とされている基盤技術において研究開発を促進する。

併せて既に導入されている太陽光発電の長期安定的な事業の運営確保として、安全性信頼性の確保、系統制約の克服等の現在顕在化している課題解決や発電設備の廃棄対策等の適切な事業環境整備に資する技術を開発することで、太陽光発電の主力電源化に向け大きな波及効果を持つ。



## II. 研究開発マネジメントについて

### 1. 事業の目標

#### (1) 研究開発の目的

本プロジェクトでは従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいない場所として重量制約のある屋根、建物壁面、移動体向けに必要とされる性能を満たし、各市場の創出・拡大に資する要素技術を開発することで、太陽光発電の新市場の創出につなげる。併せて、既に導入されている太陽光発電の長期安定的な事業の運営確保として、安全性信頼性の確保、系統制約の克服等の現在顕在化している課題解決や発電設備の廃棄対策等の適切な事業環境整備に資する技術を開発する。更に上記と並行し、これらの技術を支える測定評価技術、日射量予測技術等、先進的共通基盤技術の開発や国内外の開発動向を把握し、開発を支援する動向調査等も実施する。

具体的には、地上型設置や住宅屋根設置等の太陽光発電システムの設置に適した低コスト好条件の適地が減少している中、重量制約の有る屋根、建物壁面、移動体などの需要地に近接しているが、従来の技術では太陽光発電を導入されていなかった場所を、更なる発電効率の向上、軽量化、曲面追従化等とコスト低減により、上記の分野に導入可能とするための技術開発を行い、将来の太陽光発電の導入量拡大とともに新たなセル、モジュール、システム技術に関連した産業競争力の強化を図る。

さらに、太陽光発電の主力電源化を推進するため、太陽光発電設備の長期安定電源化に向けた事業運営確保として現在顕在化している課題である安全の確保に資するガイドライン策定や小規模な事業用太陽光発電設備の適切なメンテナンスの確保や再投資を促すため必要となる信頼性に係る技術開発を行う。また、2030年代以降に急増が懸念される太陽光発電設備の廃棄物を回避するためのリサイクル技術や現在、出力抑制等の系統制約の克服に向けた太陽光発電側での対応方法の検討・実証等を行う。

上記と並行し、これらの技術を支える測定評価技術、日射量予測技術等、先進的共通基盤技術の開発や国内外の開発動向を把握し、開発を支援する動向調査等も実施する。

#### (2) 研究開発の目標

##### ① アウトプット目標

従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいない場所として重量制約のある屋根、建物壁面、移動体向けに必要とされる性能を満たし、各市場の創出・拡大に資する要素技術を開発することで、太陽光発電の新市場の創出につなげる。併せて既に導入されている太陽光発電の長期安定的な事業の運営確保として、安全性信頼性の確保、系統制約の克服等の現在顕在化している課題解決や発電設備の廃棄対策等の適切な事業環境整備に資する技術を開発する。更に上記の分野に資する共通基盤技術を開発する。

##### 【最終目標】

1) 太陽光発電の新市場創造技術開発 (i) フィルム型超軽量太陽電池の開発 (重量制約のある屋根向け)

- ・ 架台を含めたモジュール重量  $3 \text{ kg/m}^2$  以下。
- ・  $30 \text{ cm}$  角以上の大面積フィルムモジュールで変換効率  $23\%$  以上。
- ・ 製造コスト  $15 \text{ 円/W}$  以下の見通しを得る。
- ・ 屋外曝露  $15$  年時点での初期変換効率に対する低下率  $10\%$  以下。

2) 太陽光発電の新市場創造技術開発 (ii) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

a) 壁面設置太陽光発電システムの技術開発 (非開口部、開口部)

(非開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合)

- ・ 壁面を想定した設置形態 (東南西面への設置) で発電コスト  $14 \text{ 円/kWh}$  以下を達成する要素技術を確認する。
- ・ 建築物としての寿命  $40$  年以上を達成する要素技術を開発する。

- ・面内の色調が均一なモジュールで変換効率20%以上を達成する。

(開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合)

- ・壁面を想定した設置形態(東南西面への設置)で発電コスト16円/kWh以下を達成する要素技術を確認する。
- ・半透明モジュールで可視光透過率20%以上、変換効率13%以上の性能を達成する要素技術を開発する。
- ・窓の代替として用いる際の性能について、20年相当の寿命を確認する。

b) 壁面設置基盤技術開発

- ・評価・技術基準案等を3件以上作成する。

c) 太陽光発電システム壁面大量設置実証

- ・建築物の壁面へ太陽光発電システム設置前後での環境性能、発電性能を評価し、その効果を広く公開する。

3) 太陽光発電の新市場創造技術開発 (iii) 移動体用太陽電池の研究開発

a) 超高効率モジュール技術開発

- ・モジュール効率35%以上(30cm×30cm)
- ・上記モジュールと同等の効率をもつセルを使った3D曲面モジュール(曲率半径1mを含む)
- ・実用サイズの複数枚処理装置(4インチ以上)においてモジュールコスト200円/W(量産時GWレベル)を達成するための基板再生装置及び高速成膜装置の実証。

b) 次世代モジュール技術開発

- ・モジュール効率30%以上、3D曲面(球面曲率半径1mを含む)。
- ・モジュール価格:70円/W。

4) 太陽光発電の長期安定電源化技術開発 (i) 安全性・信頼性確保技術開発

a) 安全性に係る基盤整備

①安全ガイドラインの策定(傾斜地設置型、営農型、水上設置型)(2022年度)

- ・実証試験と調査、シミュレーションの結果に基づき、設置環境の多様化に必要となる新たな裏付けを加えて、2022年版を発行する。

②機器設置に関する基準類、ガイドラインの策定(2023年度)

- ・発行、公開とセミナー等の実施を通じて、発電事業者の利用を促進する。

b) 信頼性評価技術、信頼性回復技術の開発(2023年度)

- ・気候区による気象データやスペクトルデータ等を整理し、ユーザーにとって利便性の高い日射量データベースを構築する。

5) 太陽光発電の長期安定電源化技術開発 (ii) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

実モジュールサイズの実証プラントを構築し、連続運転で以下の性能を満たすこと。

- ・分離処理コスト3円/W以下の分離技術であること。
- ・資源回収率80%以上の分離技術であること。
- ・太陽電池モジュール由来の回収物がマテリアルリサイクルに資する性能であること。

6) 太陽光発電の長期安定電源化技術開発 (iii) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

- a) 太陽光発電による需給一体型システム構築上の課題抽出と対応方法の検討および実証

・経済合理性を前提とした需給乖離率3%以下のシステムの構築

b) 系統連係における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証  
・経済合理性を前提として、需給調整市場の応動・継続時間の要件（一次から三次）に適合しうる計画技術・制御技術を備えたシステムの構築

7) 先進的共通基盤技術開発

a) 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発

・新型太陽電池等について、その設置形態環境・形状を考慮した屋内屋外測定技術を確立し、海外主要研究機関の測定技術との国際整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$  ( $1\sigma$ )以内を目指す。屋外環境下においては精度 $\pm 1.0\%$  ( $1\sigma$ )以内を目指す。性能評価技術の標準化に取り組む。

b) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発

・1km四方程度のエリアを想定した数時間先の発電量の予測に向け、想定エリアの日射量予測情報を提供する技術を開発する。(2022年度)

・現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発において、日射量予測の最大誤差を20%以上低減することを目指す。

8) 動向調査等

a) 移動体用太陽電池の動向調査

・今後の移動体用太陽電池の技術開発に資する分析、検討をまとめる。

b) リサイクル関連の動向調査

①太陽電池モジュールのリサイクルに関わる調査

・リサイクルに関わる調査結果を、太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発へフィードバックする。(2021年度)

②太陽電池モジュールの適正処理に関わる調査

・太陽電池モジュールの適正処理を実証できる企画を提案する。(2021年度)

c) 太陽光発電の動向調査

①太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査

・今後の技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する情報をまとめる。

②国際技術協力プログラムへ参画

・PVPSでの活動を踏まえ、定期的な情報発信を行うと共に分析、検討をまとめる。

③新市場の動向調査

・技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する調査結果を中間報告書としてまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックを行う。

#### 【中間目標】

1) 太陽光発電の新市場創造技術開発 (i) フィルム型超軽量太陽電池の開発 (重量制約のある屋根向け)

・架台を含めたモジュール重量 $5\text{ kg/m}^2$ 以下。

・30cm角以上の大面積モジュール変換効率18%以上。

・製造コスト35円/W以下の見通しを得る。

・屋外曝露10年時点での初期変換効率に対する低下率10%以下。

2) 太陽光発電の新市場創造技術開発 (ii) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

a) 壁面設置太陽光発電システムの技術開発 (非開口部、開口部)

(非開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合)

- ・建築物としての寿命35年相当の性能を確認する。
- ・モジュール内の色調均一性と変換効率を両立させる要素技術を開発する。

(開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合)

- ・半透明モジュールで可視光透過率20%以上、変換効率10%以上の性能を達成する要素技術を開発する。
- ・窓の代替として用いる際の性能について、10年相当の寿命を確認する。

b) 壁面設置基盤技術開発

- ・評価・技術基準等に資する測定・評価技術等を開発する。

c) 太陽光発電システム壁面大量設置実証

- ・壁面へ太陽電池を大量設置する際の課題を解決し、外観をアピールできる太陽光発電システムを建築物壁面へ適用する。

3) 太陽光発電の新市場創造技術開発 (iii) 移動体用太陽電池の研究開発

a) 超高効率モジュール技術開発

- ・モジュール効率33%以上(30cm×30cm)
- ・上記モジュールと同等の効率をもつセルを使った3D曲面モジュール(曲率半径1mを含む)
- ・実用サイズの複数枚処理装置(4インチ以上)において、モジュールコスト200円/W(量産時GWレベル)を達成するための基板再生装置及び高速成膜装置の試作および要素技術構築

b) 次世代モジュール技術開発

- ・モジュール効率25%以上、3D曲面(球面曲率半径1mを含む)。

4) 太陽光発電の長期安定電源化技術開発 (i) 安全性・信頼性確保技術開発

a) 安全性に係る基盤整備

①安全ガイドラインの策定(傾斜地設置型、営農型、水上設置型)(2021年度)

- ・暫定版として2021年9月までに2020年版を取りまとめる。

②機器設置に関する基準類、ガイドラインの策定(2021年度)

- ・調査や実験等の結果をもとに利用の見通しを示す。または暫定版を公開、発行する。

b) 信頼性評価技術、信頼性回復技術の開発(2021年度)

- ・開発した技術の有効性を評価するとともに、その実証方法を具体化する。

5) 太陽光発電の長期安定電源化技術開発 (ii) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

実モジュールにおいて、以下の技術を確立する。

- ・分解処理コスト3円/W以下。
- ・部材として再利用可能な状態で資源回収率80%以上。
- ・太陽電池モジュール由来の回収物のマテリアルリサイクル技術を開発する。

6) 太陽光発電の長期安定電源化技術開発 (iii) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

a) 太陽光発電による需給一体型システム構築上の課題抽出と対応方法の検討および実証

- ・経済合理性が評価された需給一体型システムの実証プランを企画策定する。(2020年度)

b) 系統連係における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証

- ・系統連係における影響緩和の技術的な対応方法の検討や、有効性確認のための手法を策定する。  
(2020年度)

#### 7) 先進的共通基盤技術開発

##### a) 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発

- ・新型太陽電池等について、その設置形態環境・形状を考慮した測定技術を開発し、海外主要研究機関の測定技術との国際整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度±1.0% (1σ) 以内を目指す。

##### b) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発

- ・発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発 (2022年度) 現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発において、日射量予測の最大誤差を10%以上低減することを目指す。

#### 8) 動向調査等

##### a) 移動体用太陽電池の動向調査

- ・移動体用太陽電池の調査結果を中間報告書としてまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックする。

##### c) 太陽光発電の動向調査

###### ① 太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査

- ・技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する調査結果を中間報告書としてまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックする。

###### ② 国際技術協力プログラムへ参画

- ・PVP Sの活動に参画し、その内容を産業界に発信する。

#### ② アウトカム目標

新市場創出に向けた太陽光発電の技術開発によって、2050年時点での国内累積導入量として、約320GW (うち新市場約170GW\*)、太陽光発電によるCO2排出量削減 (系統電源との比較) として、約110百万t/年 (うち新市場約60百万t/年) を推計した。

\*重量制約のある屋根、建物壁面、移動体 (車載)、営農、水上の合計

また、太陽光発電の長期安定的な技術開発により、2030年時点で導入が予想される小規模発電設備 (50kW以下) を中心とした発電設備20GWの導入量維持 (2018年12月時点の50kW以下発電設備のFIT認定容量) が期待される。さらに、太陽光発電設備のリサイクル技術開発によって、約510万tの埋立処理量の削減 (2030年までに導入される設備64GWを対象として試算) が期待される。

#### ③ アウトカム目標達成に向けての取組

開発した技術については、太陽光発電分野だけでなく、新市場に関連する分野とも情報共有が図れる様にNEDOの報告会や展示会で積極的に宣伝し、成果普及に努める。また、IEA PVP Sを活用し、IEC TC82 (太陽光発電) との連携を図り、技術の促進を図る。また、安全ガイドライン、リサイクル技術、太陽光発電による調整力技術については、経済産業省や環境省が実施する法規制や社会システムの検討・整備において、成果を共有し、実用化・事業化を促進させる。

## 2. 事業の計画内容

### 2. 1 研究開発の内容

#### 2. 1. 1 研究開発分野及び事業形態

本プロジェクトでは、以下の研究開発を実施する。

#### 研究開発項目①「太陽光発電の新市場創造技術開発」

##### 1. フィルム型超軽量太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）

高効率化技術、高耐久性化（高耐光性化）、低コスト技術等を構築し、低コスト超薄型でフィルム形状のセル、モジュール生産可能な太陽電池を開発する。大学、国研においては企業と連携し、超軽量薄膜系太陽電池の開発において必要になる高効率、耐光性等の実用化に耐える要素技術を開発する。

##### 2. 壁面設置太陽光発電システム技術開発

地上設置に比べ日射量が少ない事での経済性確保が困難、建築物の寿命に対し太陽光発電設備の寿命が短い、周辺の構造物と親和性が図れる外観を満たさない等から適用事例は限られるという課題を解決する壁面設置太陽光発電システムの開発を行う。また、普及促進に必要となる規格・標準等に資する基盤技術の開発、建築物として受け入れられる外観を持つ太陽光発電システムを建築物壁面へ大量設置する実証を行う。

##### 3. 移動体用太陽電池の研究開発

2050年に広く一般の電動自動車に搭載されるための技術開発として、自動車形状に追従可能で、高効率、低コストを実現できる太陽電池モジュールを開発する。具体的には、より高効率なⅢ－Ⅴ化合物を大幅に低コスト化、モジュール化する技術開発（超高効率モジュール化技術開発）と、より低コストな結晶シリコンをベースとして高効率化、モジュール化を目指す技術開発（次世代モジュール化技術）を行う。

・事業形態：研究開発課題設定型事業

・契約等種別：共同研究（NEDO負担率：2／3、1／2）、委託（NEDO負担率：1／1）、助成・補助（NEDO負担率：1／2以内）

本研究開発項目は、①大学等との連携が必要となる基盤的な要素技術開発（委託（NEDO負担率：1／1））、②主力電源化に向けて実用化が進んでいる太陽電池を対象として企業が実施する研究開発（共同研究（NEDO負担率：2／3、1／2））、③高効率太陽電池の開発実績を有する民間企業が事業化を加速し、国際的に競争力を有するために行う開発・実証（NEDO負担率：1／2）で実施する。

#### 研究開発項目②「太陽光発電の長期安定電源化技術開発」

##### 1. 安全性・信頼性確保技術開発

発電設備の安全性を確保するため、ガイドラインの作成等の基盤整備を行う。知見の不足する項目については、必要に応じて実証実験等を実施する。

太陽光発電設備の長期安定運用に資する、信頼性評価技術、信頼性回復技術または両者を併せ持った技術の開発を行う。なお当該技術は既存の小規模発電設備（50kW未満）に採算性を含めて適用可能な技術であり、多様化が進む設置環境においても適用が期待できるものとする。

##### 2. 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

低コストかつマテリアルリサイクルに資する高い資源回収率を両立する分離処理技術を開発、実証プラントを構築し、実モジュールサイズで検証を行う。

##### 3. 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

太陽光発電による電力系統への影響を緩和するため、太陽光発電による需給一体型システム構築上の課題抽出と対応方法の検討および実証、系統連係における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証を行う。

リサイクル技術開発においては、現時点で廃棄量は少なく2030年までは市場性と結びつけることが困難であるが、実用化を見据えた開発とするため、応分の負担を設け共同研究（NEDO負担率2／3）で実施する。

今後整備される需給調整力市場の運用に幅広く活用されるような短時間の日射量予測に関しては公共性の高い事業であるため、委託事業として実施する。

同じく需給調整力市場の運用に幅広く活用される太陽光発電の調整力創出については、2020年度に実施するフィージビリティスタディ（FS）では委託事業とし、その後の2021年度以降の実証フェーズにおいては、大学・研究機関は委託事業とするが、企業については前項同様に応分の負担を設け共同研究事業（NEDO負担率2/3、もしくは1/2）で実施する。

- ・事業形態：研究開発課題設定型事業
- ・契約等種別：共同研究（NEDO負担率：2/3、1/2）、助成・補助（NEDO負担率：1/2以内）、委託（NEDO負担率：1/1）

本研究開発項目は、①大学・国研等が取り組む基盤整備、要素技術開発、技術課題の抽出等（委託（NEDO負担率：1/1））、②企業が取り組む実用化に向けた技術開発および検証、課題の解決方法の検証（共同研究（NEDO負担率：2/3、1/2））、③事業化に向けて企業が取り組む実証（助成（NEDO負担率：1/2））で実施する

#### 研究開発項目③「先進的共通基盤技術開発」

1. 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発  
標準化や規格化が進んでいない新型太陽電池等の出力等の性能を正しく評価するための測定技術を開発するとともに、開発に資する基準太陽電池および校正技術を開発し、性能・信頼性・安定性を評価する。
2. 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発  
発電量の短期的な予測に向け、現在を起点に数時間先の1km四方程度のエリアの日射量を予測する技術を開発するとともに本技術の評価を行う。加えて、現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発への可能性についても検討する。さらに、現在から翌日および翌々日程度先の日射量予測が大きく外れる課題を改善する技術開発を行う。

安全性等のガイドラインや太陽電池の国際標準化に資する試験・評価方法においては、公益性が高いものの、研究開発成果が直接的に市場性を結びつかない公共性の高い事業であるため、委託事業として実施する。

- ・事業形態：研究開発課題設定型事業
- ・契約等種別：委託（NEDO負担率：1/1）

本研究開発項目は、試験・評価方法の開発等、国民経済的には大きな便益がありながらも、民間企業の研究開発投資に見合うものが見込めない「公共財の研究開発」事業であり、原則委託事業（NEDO負担率：1/1）として実施する。

#### 研究開発項目④「動向調査等」

1. 移動体用太陽電池の動向調査  
電動自動車等の移動体への搭載を目指した太陽電池の国内外における研究開発、市場動向を調査、分析すると共に、今後の方向性を議論し、その結果をプロジェクト参画機関等、国内の関係事業者によく展開する事により、移動体分野の研究開発を加速する。
2. リサイクル関連の動向調査  
太陽電池モジュールのリサイクルに関わる国内の技術開発動向、普及動向、政策動向、実施事例などの調査に加え、ガラスの再利用の状況調査、災害時のリサイクル状況を把握するための調査、使用済太陽光発電設備の排出量予測の精緻化を実施する。  
リサイクルの適正処理のプロセスにおけるモジュール回収の現状について調査を行うと共に、海外の太陽電池モジュールの回収システムを初めとしたリサイクル動向を調査することにより、太陽電池モジュールの適正処理を実証できる企画を提案する。
3. 太陽光発電の動向調査  
技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する太陽光発電セル、モジュール、システムおよび太陽光発電が導入される分野に関する国内外の技術や産業・市場動向や今後の太陽光発電の可能性の調査を行い、その結果を的確に本プロジェクトへフィードバックする。  
諸外国の技術開発動向や政策動向等について、国際エネルギー機関（IEA）の太陽光発電シス

テム研究協力実施協定（PVP S）に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた調査・分析を実施すると共に、諸外国の技術開発、政策及び市場動向を把握する。併せてこの活動を通じて日本の太陽光発電の国際競争力向上等を図る。

動向調査は外国の技術開発動向や政策動向等を把握し、技術開発の方向性や分析評価手法等の判断に活用するため、各種動向調査や I E A 国際協力事業等を実施するもので、委託事業として実施する。

- ・事業形態：調査委託
- ・契約等種別：委託（N E D O 負担率：1 / 1）  
諸外国の技術開発動向や政策動向等を把握し、技術開発の方向性や分析・評価手法等の判断に活用するため、各種動向調査や I E A 国際協力事業等を実施するもので、委託事業（N E D O 負担率：1 / 1）として実施する。

## 2.1.2 研究開発テーマ：契約助成審査委員会資料

各研究開発分野で実施する研究開発テーマは、公募により選定した。採択にあたっては、公募時に策定、公表した審査項目・基準に基づいて候補を決定し、外部専門家による採択審査委員会、N E D O 内の契約・助成審査委員会を経て最終決定した。

### (1) 2020年度「太陽光発電主力電源化推進技術開発」に関する公募

公募の結果、59件の提案があったが、各研究開発項目の目標を達成するに資する取り組みとなる50件を採択した。

#### 研究開発項目①「太陽光発電の新市場創造技術開発」

##### 1. 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）

- ・公募期間：2020年3月30日～2020年5月29日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。（不必要な部分はないか）
  - II) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
  - III) 設定する各目標値は、分離処理コスト低減及び再利用可能な回収に十分に効果のあるものか。
  - IV) 実証試験では、試験方法、評価基準等が明確になっており、効率的に検証ができる計画・体制となっているか。
  - V) 提案内容・研究計画は実現可能か（技術的可能性、計画、中間目標の妥当性等）。
  - VI) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか（関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等）。  
共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるか。
  - VII) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか（企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どの様な形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか。）

##### ・審査委員会委員（敬称略）：

山口真史（豊田工業大学名誉教授）、工藤一浩（千葉大学名誉教授）、喜々津仁密（国土技術政策総合研究所構造基準研究所）、高野章弘（F-WAVE株式会社）、中島靖之（三晃金属工業株式会社）

##### 2. 壁面設置太陽光発電システム技術開発

- ・公募期間：2020年3月30日～2020年5月29日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。（不必要な部分はないか）



- II) 提案された方法に新規性・合理性があり、技術的・手法的に優れているか。
- III) 共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるか。
- IV) 提案内容・研究計画は実現可能か（研究開発スケジュール、技術的可能性、研究開発活動の妥当性、取り組むべき課題とそのボリューム、中間目標の妥当性等）、また提案の研究開発を遂行するための予算は妥当か。
- V) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか。（関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等）
- VI) 応募者が当該研究開発を行うことにより太陽光発電の中長期的なビル壁面への太陽光発電導入拡大に寄与できるか（企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか）。

・審査委員会委員（敬称略）：

工藤一浩（千葉大学名誉教授）、植田譲（東京理科大学教授）、亀田正明（一般社団法人太陽光発電協会）、小野塚能文（株式会社日本設計）、森山泰一（株式会社三菱地所設計）

### 3. 移動体用太陽電池の研究開発

・公募期間：2020年3月30日～2020年5月29日

・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。

・審査項目・基準

- I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。（不必要な部分はないか）
- II) 提案された方法に新規性・合理性があり、技術的・手法的に優れているか。
- III) 共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるか。
- IV) 提案内容・研究計画は実現可能か（研究開発スケジュール、技術的可能性、研究開発活動の妥当性、取り組むべき課題とそのボリューム、中間目標の妥当性等）、また提案の研究開発を遂行するための予算は妥当か。
- V) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか。（関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等）
- VI) 応募者が当該研究開発を行うことにより太陽光発電の中長期的な導入の大幅拡大、特に移動体への太陽光発電導入拡大に寄与できるか（企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか）。
- VII) I)～VI) の評価結果を総合的に判断して、プロジェクト実施が望ましいか否か。特段考慮すべき点があるか。

・審査委員会委員（敬称略）：

小長井誠（東京都市大学教授）、高倉秀行（立命館大学特別任用教授）、一木修（株式会社資源総合システム）、今泉充（国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構）、角谷正友（国立研究開発法人物質・材料研究機構）

### 研究開発項目②「太陽光発電の長期安定電源化技術開発」

#### 1. 安全性・信頼性確保技術開発

・公募期間：2020年3月30日～2020年5月29日

・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。

・審査項目・基準

- I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。（不必要な部分はないか）
- II) 提案内容は公募要領が示す要求と背景や課題の認識と合致しているか。（課題の適合性は十分か）
- III) 成果物の実用化によって、社会・経済への波及効果が期待できるか。
- IV) 提案の研究開発内容に示す企画書案の作成方法は具体的で手法的に優れているか。
- V) 提案内容・研究計画は実現可能か。（研究スケジュール、取り組み課題のボリューム、研究活動の妥当性等）

- VI) 提案の研究開発を遂行するための予算案は妥当か。
- VII) 複数の課題への提案は、複数の課題について統一性や合理性があるか。単一の課題への提案は、深い専門性があるか。
- VIII) 応募者の研究開発を遂行するための体制は問題ないか。

・審査委員会委員（敬称略）：

若尾真治（早稲田大学教授）、西岡賢祐（宮崎大学教授）、田中良（株式会社N T Tファシリテーターズ）、五十嵐広宣（ソーラーエッジテクノロジージャパン株式会社）、河本桂一（みずほ情報総研株式会社）

## 2. 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

- ・公募期間：2020年3月30日～2020年5月29日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。
  - II) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
  - III) 設定する目標値は、小規模発電設備の維持に十分に効果のあるものか。
  - IV) 提案の研究開発内容に示す企画書案の作成方法は具体的で手法的に優れているか。
  - V) 提案内容・研究計画は実現可能か。（研究スケジュール、取り組み課題のボリューム、研究活動の妥当性等）
  - VI) 提案の研究開発を遂行するための予算案は妥当か。
  - VII) 複数の課題への提案は、複数の課題について統一性や合理性があるか。単一の課題への提案は、深い専門性があるか。
  - VIII) 応募者の研究開発を遂行するための体制は問題ないか。
  - IX) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか（企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか）。

・審査委員会委員（敬称略）：

大和田秀二（早稲田大学教授）、松野泰也（千葉大学教授）、加藤聡（ガラス再資源化協議会）、大木達也（国立研究開発法人産業技術総合研究所）、南悌二（公益財団法人地球環境センター）

## 3. 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

- ・公募期間：2020年3月30日～2020年5月29日
  - ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
  - ・審査項目・基準
    - I) 提案内容は、実施方針の目的・目標に合致しているか（目指す目標に漏れは無い）。
    - II) 提案内容は、公募要領が示す要求と背景や課題の認識と合致しているか。
    - III) 提案の研究開発内容に示された、技術的対応方法を作成するプロセスは妥当なものか。
    - IV) 提案内容・研究計画は妥当か（研究スケジュール、取り組み課題のボリューム、研究活動の妥当性等）。
    - V) 提案の研究開発を遂行するための予算案は妥当か。
    - VI) 課題への提案に、深い専門性があるか。
    - VII) 応募者の本研究開発を遂行するための体制に問題ないか。
    - VIII) 応募者が当該研究開発を行うことにより、国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか（企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか）。
- ・審査委員会委員（敬称略）：
- 若尾真治（早稲田大学教授）、貝塚泉（株式会社資源総合システム）、石田健雄（一般社団法人日

本電機工業会)、田中良(株式会社NTTファシリティーズ)、南悌二(公益財団法人地球環境センター)

### 研究開発項目③「先進的共通基盤技術開発」

1. 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発、及び2. 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発

- ・公募期間：2020年3月30日～2020年5月29日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 提案内容は、実施方針の目的・目標に合致しているか(目指す目標に漏れは無いか)。
  - II) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
  - III) 目標達成に向けたアプローチ、スケジュールが明確になっており、効率的に技術開発ができる計画・体制となっているか。
  - IV) 提案内容・研究計画は現実的か。(研究スケジュール、取り組み課題のボリューム、研究活動の妥当性等)。
  - V) 提案の研究開発を遂行するための予算案は妥当か。
  - VI) 複数の課題への提案は、複数の課題について統一性や合理性があるか。  
単一の課題への提案は、深い専門性があるか。
  - VII) 応募者の本研究開発を遂行するための体制に問題ないか。

・審査委員会委員(敬称略)：

小長井誠(東京都市大学教授)、高倉秀行(立命館大学特別任用教授)、田中良(株式会社NTTファシリティーズ)、一木修(株式会社資源総合システム)、鈴木義人(北海道北部風力送電株式会社)

### 研究開発項目④「動向調査等」

1. 移動体用太陽電池の動向調査、2. リサイクル関連の動向調査及び3. 太陽光発電の動向調査

- ・公募期間：2020年3月30日～2020年5月29日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 記載されている目標がNEDOの意図と合致しているか。
  - II) 調査の内容・方法が優れていること。
  - III) 調査の経済性が優れていること。
  - IV) 関連分野の調査等に関する実績を有すること。
  - V) 当該調査を行う体制が整っていること。
  - VI) 経営基盤が確立していること。
  - VII) 当該調査等に必要な研究員等を有していること。
  - VIII) 委託業務管理上NEDOの必要とする措置を適切に遂行できる体制を有していること。

・審査委員会委員(敬称略)：

山口真史(豊田工業大学名誉教授)、近藤道雄(国立研究開発法人産業技術総合研究所)、南悌二(公益財団法人地球環境センター)、森山泰一(株式会社三菱地所設計)

2. 2021年度「太陽光発電の長期安定電源化技術開発/安全性・信頼性確保技術開発」に関する公募

傾斜地・営農・水上の各分野でのガイドラインの強化のため、多様なケースの実証実験を行い、より幅広いケースに対応できるガイドライン策定のための体制強化(追加公募)を行った。公募の結果、3件の提案があった。採択審査委員会での審査を経て3件を採択した。

- ・公募期間：2021年6月9日～2021年7月19日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。(不必要な部分はないか)
  - II) 提案内容は公募要領が示す要求と背景や課題の認識と合致しているか。(課題の適合性は十分か)
  - III) 成果物の実用化によって、社会・経済への波及効果が期待できるか。
  - IV) 提案の研究開発内容に示す企画書案の作成方法は具体的で手法的に優れているか。
  - V) 提案内容・研究計画は実現可能か。(研究スケジュール、取り組み課題のボリューム、研究活動の妥当性等)
  - VI) 提案の研究開発を遂行するための予算案は妥当か。
  - VII) 複数の課題への提案は、複数の課題について統一性や合理性があるか。単一の課題への提案は、深い専門性があるか。
  - VIII) 応募者の研究開発を遂行するための体制は問題ないか。
- ・審査委員会委員(敬称略)：
 

若尾真治(早稲田大学教授)、西岡賢祐(宮崎大学教授)、田中良(株式会社NTTファシリティーズ)、五十嵐広宣(ソーラーエッジテクノロジージャパン株式会社)、河本桂一(みずほ情報総研株式会社)

### 3. 2021年度「太陽光発電の長期安定電源化技術開発／系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証」に関する公募

2020年度に実施したフィージビリティスタディ(FS)が完了したことを受け、需給調整力市場の運用に幅広く活用される太陽光発電の調整力創出に関する実証フェーズに向けた体制構築(追加公募)を行った。公募の結果、1件の提案があった。採択審査委員会での審査を経て1件を採択した。

- ・公募期間：2021年6月9日～2021年7月19日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 提案内容は、実施方針の目的・目標に合致しているか(目指す目標に漏れは無い)。
  - II) 提案内容は、公募要領が示す要求と背景や課題の認識と合致しているか。
  - III) 提案の研究開発内容に示された、技術的対応方法を作成するプロセスは妥当なものか。
  - IV) 提案内容・研究計画は妥当か(研究スケジュール、取り組み課題のボリューム、研究活動の妥当性等)。
  - V) 提案の研究開発を遂行するための予算案は妥当か。
  - VI) 課題への提案に、深い専門性があるか。
  - VII) 応募者の本研究開発を遂行するための体制に問題ないか。
  - VIII) 応募者が当該研究開発を行うことにより、国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか(企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか)。
- ・審査委員会委員(敬称略)：
 

若尾真治(早稲田大学教授)、貝塚泉(株式会社資源総合システム)、石田健雄(一般社団法人日本電機工業会)、田中良(株式会社NTTファシリティーズ)

### 4. 2021年度「先進的共通基盤技術開発／発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発」に関する公募

2020年度に実施したフィージビリティスタディ（FS）により、翌日および翌々日程度先の日射量予測の最大誤差低減に向けた技術開発の要件を整理するとともに、技術開発の可能性について検討を行った。2020年度の成果を土台として、翌日および翌々日程度先の日射量予測を改善するための体制構築（追加公募）を行った。公募の結果、2件の提案があった。採択審査委員会での審査を経て1件を採択した。

- ・公募期間：2021年6月18日～2021年7月19日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 提案内容は、基本計画・公募要領の目的・目標に合致しているか（目指す目標に漏れは無い）か。
  - II) 提案内容は、公募要領が示す要求と背景や課題の認識と合致しているか。
  - III) 提案の研究開発内容に示された、技術的対応方法を作成するプロセスは妥当なものか。（2020年度の成果がプロセスに反映されているか）
  - IV) 提案の研究開発内容に示された、技術的対応方法を作成するプロセスは妥当なものか。（有効性を確認する手法の妥当性）。
  - V) 提案内容・研究計画は妥当か（研究スケジュール、取り組み課題のボリューム、研究活動の妥当性等）。
  - VI) 提案の研究開発を遂行するための予算案は妥当か。
  - VII) 課題への提案に、深い専門性があるか。
  - VIII) 応募者の本研究開発を遂行するための体制は問題ないか。
- ・審査委員会委員（敬称略）：  
小長井誠（東京都市大学教授）、高倉秀行（立命館大学特別任用教授）、杉渕康一（株式会社資源総合システム）、鈴木義人（北海道北部風力送電株式会社）

#### 5. 2021年度「動向調査等／太陽光発電の動向調査（次世代型太陽電池の新市場への導入・実装に向けての動向調査）」に関する公募

新市場（重量制約のある屋根、建物壁面等）における、次世代型太陽電池の目指すべき実証イメージを明らかにすることを目的として、新市場のポテンシャル及び導入量の精緻化、発電コストの現状と次世代型太陽電池のコスト競争力の把握等、新市場展開に向けた課題整理に関する調査を行うこととした。公募の結果、1件の提案があった。採択審査委員会での審査を経て1件を採択した。

- ・公募期間：2021年6月9日～2021年7月19日
- ・採択審査委員会：以下の審査項目・基準に基づき採択審査を行った。
- ・審査項目・基準
  - I) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか（不必要な部分はないか）。
  - II) 提案内容・研究計画は実現可能か（技術的可能性、計画の妥当性等）。
  - III) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか。
  - IV) 応募者は本研究開発を遂行するための高い能力を有するか（関連分野の開発等の実績、再委託予定先・共同研究相手先等を含めた実施体制、優秀な研究者等の参加等）。また、共同提案者や連携先と相互補完的、効率的かつ効果的な体制での提案となっているか。
  - V) 研究開発予算は、開発する技術や期待する成果に対して過大となっていないか。
  - VI) 応募者が当該研究開発を行うことにより国民生活や経済社会への波及効果は期待できるか。  
（企業の場合、成果の実用化・事業化が見込まれるか。大学や公的研究開発機関等で、自らが実用化・事業化を行わない場合には、どのような形で製品・サービスが実用化・事業化されることを想定しているか。）
- ・審査委員会委員（敬称略）：  
山口真史（豊田工業大学名誉教授）、近藤道雄（国立研究開発法人産業技術総合研究所）、杉本完蔵（一般社団法人太陽光発電協会）、田中誠（太陽光発電技術研究組合）

## 2. 1. 3 研究開発予算の推移

年度ごとの研究開発予算（実績）の推移を表1に示す。

表1. 研究開発予算（実績）の推移（単位：億円）

分野	年度	2020	2021	2022	総額
研究開発項目①		19.7	19.4	3.8	42.9
研究開発項目②		4.1	5.4	1.1	10.6
研究開発項目③		1.8	2.2	0.8	4.8
研究開発項目④		1.2	1.7	0.5	3.4
計特別会計(需給勘定)		26.7	28.6	6.2	61.5

(2022年6月20日時点)

## 2. 1. 4 研究開発内容

### 研究開発項目①「太陽光発電の新市場創造技術開発」

#### 1. 研究開発の必要性

##### (1) フィルム型超軽量太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）

FITの効果等により、産業用太陽光発電だけでなく一般家庭にも太陽光発電の普及が進みつつあるが、エネルギー消費の多い工場、事業所、店舗等への設置実績は少ない。これら産業部門においては、CO<sub>2</sub>排出量削減による大気汚染対策へ寄与やRE100加盟等による企業イメージの向上を目的として、再生可能エネルギーの需要が高まっている。工場、事業所、店舗の屋根はその施行の容易さから、金属製屋根が多く（屋根の比率で70%）使用されている。金属製の屋根は比較的厚みのない金属鋼板を使用していることから新設においてもコンクリート製屋根と比較して強度に制約がある上、既設においては屋根に重量物が設置されているケースがあり、新設よりも重量制限を受け従来の太陽光パネルを設置出来ないことが課題となっている。

##### (2) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

エネルギー基本計画では、業務部門における省エネルギー社会の実現としては、「非住宅建築物については、2020年までに国を含めた新築公共建築物等で、2030年までに新築建築物の平均でZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）を実現することを目指す」と示されている。これは、エネルギー消費量の削減が前提であるが、おおむねゼロ以下となるエネルギー収支を目指すには太陽光発電等の再生可能エネルギーによるエネルギー創出は不可欠である。しかし、平均でZEBを達成するには屋上に太陽光発電を設置するだけでは十分な創エネルギー量を得るのは困難とされている。太陽光発電で創エネルギー量を拡大するには、変換効率を向上させるだけでなく壁面等を活用し設置面積を広げることも重要となるが、地上設置に比べ日射量が少ない事での経済性確保が困難、建築物の寿命に対し太陽光発電設備の寿命が短い、周辺の構造物と親和性が図れる外観を満たさない等から適用事例は限られる。そのため、建築物壁面へ太陽光発電を設置するにはこれら課題の解決が必要である。

##### (3) 移動体用太陽電池の研究開発

エネルギー需要の大部分を化石燃料に頼っている運輸部門ではCO<sub>2</sub>排出量削減や大気汚染対策の取り組みの一つとして電動化の動きが加速し、その効果を最大限に引き出すために再生可能エネルギーからの電力供給が期待されている。IEAの予測（Energy Technology Perspectives 2015）では、2050年には全体の3/4が次世代自動車（FCV、EV、HEV）であり、その数は120（百万台）にも及ぶと見込まれている。次世代自動車に太陽電池を搭載することは、再生可能エネルギー由来の電力を直接供給することが可能となるだけでなく、燃料費の削減、充電回数低減等ユーザーの利便性を高めることが出来る。また、次世代自動車の急速な増加により充電ステーションなど社会インフラの整備が追いつかない地域における

スムーズなEV系自動車への転換や系統への負荷低減等にも貢献すると予想される。しかしながら市販されている太陽電池搭載車は効率が低い従来の太陽電池を流用し、屋根の一部に搭載するにとどまっており、動力に用いるには発電の効果が小さいため、現状ではユーザーニーズもマーケットも小さい。発電効率が高く、且つボンネットやトランクなど、屋根以外の曲面にも搭載可能な太陽電池モジュールを開発すれば、太陽光のみを使って走行できる走行距離、及びユーザー数の拡大を図ることができるとともに、大きなCO<sub>2</sub>削減効果を期待できる。

上記の課題を解決し、従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいない場所として重量制約のある屋根、建物壁面、移動体向けに必要とされる性能を満たし、各市場の創出・拡大に資する要素技術を開発することで、太陽光発電の新市場の創出につなげる。

## 2. 研究開発の具体的内容

### (1) フィルム型超軽量太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）

軽量化を目的とした太陽光パネルのフィルム化において、CIS太陽電池ではコスト及び変換効率、ペロブスカイト太陽電池では変換効率及び耐久性が技術課題として挙げられる。実用化に向けて、上記の課題を解決するセル、モジュール技術開発を行う。

### (2) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

地上設置に比べ日射量が少ない事での経済性確保が困難、建築物の寿命に対し太陽光発電設備の寿命が短い、周辺の構造物と親和性が図れる外観を満たさない等の課題を解決する壁面設置太陽光発電システムの開発を行う。また、普及促進に必要となる規格・標準等に資する基盤技術の開発、建築物として受け入れられる外観を持つ太陽光発電システムを建築物壁面へ大量設置する実証を行う。

### (3) 移動体用太陽電池の研究開発

高効率、優れたデザイン性を担保する曲面追従性、普及の可能性を高めるための低コスト化を同時に実現するためのセル・モジュール技術の開発を行う。

## 3. 達成目標

### 【中間目標】

#### (1) フィルム型超軽量太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）

- ・ 架台を含めたモジュール重量  $5 \text{ kg/m}^2$  以下。
- ・ 30cm角以上の大面積モジュール変換効率18%以上。
- ・ 製造コスト35円/W以下の見通しを得る。
- ・ 屋外曝露10年時点での初期変換効率に対する低下率10%以下。

#### (2) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

##### ①壁面設置太陽光発電システムの技術開発（非開口部、開口部）

（非開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合）

- ・ 建築物としての寿命35年相当の性能を確認する。
- ・ モジュール内の色調均一性と変換効率を両立させる要素技術を開発する。

（開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合）

- ・ 半透明モジュールで可視光透過率20%以上、変換効率10%以上の性能を達成する要素技術を開発する。
- ・ 窓の代替として用いる際の性能について、10年相当の寿命を確認する。

##### ②壁面設置基盤技術開発

評価・技術基準等に資する測定・評価技術等を開発する。

##### ③太陽光発電システム壁面大量設置実証

壁面へ太陽電池を大量設置する際の課題を解決し、外観をアピールできる太陽光発電システムを建

建築物壁面へ適用する。

(3) 移動体用太陽電池の研究開発

① 超高効率モジュール技術開発

- ・モジュール効率33%以上(30cm×30cm)
- ・上記モジュールと同等の効率をもつセルを使った3D曲面モジュール(曲率半径1mを含む)
- ・実用サイズの複数枚処理装置(4インチ以上)において、モジュールコスト200円/W(量産時GWレベル)を達成するための基板再生装置及び高速成膜装置の試作および要素技術構築

② 次世代モジュール技術開発

- ・モジュール効率25%以上、3D曲面(球面曲率半径1mを含む)。

【最終目標】

(1) フィルム型超軽量太陽電池の開発(重量制約のある屋根向け)

- ・架台を含めたモジュール重量3kg/m<sup>2</sup>以下。
- ・30cm角以上の大面積フィルムモジュールで変換効率23%以上。
- ・製造コスト15円/W以下の見通しを得る。
- ・屋外曝露15年時点での初期変換効率に対する低下率10%以下。

(2) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

① 壁面設置太陽光発電システムの技術開発(非開口部、開口部)

(非開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合)

- ・壁面を想定した設置形態(東南西面への設置)で発電コスト14円/kWh以下を達成する要素技術を確認する。
- ・建築物としての寿命40年以上を達成する要素技術を開発する。
- ・面内の色調が均一なモジュールで変換効率20%以上を達成する。

(開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合)

- ・壁面を想定した設置形態(東南西面への設置)で発電コスト16円/kWh以下を達成する要素技術を確認する。
- ・半透明モジュールで可視光透過率20%以上、変換効率13%以上の性能を達成する要素技術を開発する。
- ・窓の代替として用いる際の性能について、20年相当の寿命を確認する。

② 壁面設置基盤技術開発

評価・技術基準案等を3件以上作成する。

③ 太陽光発電システム壁面大量設置実証

建築物の壁面へ太陽光発電システム設置前後での環境性能、発電性能を評価し、その効果を広く公開する。

(3) 移動体用太陽電池の研究開発

① 超高効率モジュール技術開発

- ・モジュール効率35%以上(30cm×30cm)
- ・上記モジュールと同等の効率をもつセルを使った3D曲面モジュール(曲率半径1mを含む)
- ・実用サイズの複数枚処理装置(4インチ以上)においてモジュールコスト200円/W(量産時GWレベル)を達成するための基板再生装置及び高速成膜装置の実証。

② 次世代モジュール技術開発

- ・モジュール効率30%以上、3D曲面(球面曲率半径1mを含む)。
- ・モジュール価格:70円/W。



## 研究開発項目②「太陽光発電の長期安定電源化技術開発」

### 1. 研究開発の必要性

#### (1) 安全性・信頼性確保技術開発

太陽光発電はFITにより急速に拡大したが、発電施設の設置・運営の不備による安全面での不安が顕在化しつつある。NEDOでは地上設置のための設計ガイドラインを策定しているが、昨今設置環境、設置形態は多様化しており、それらの安全性を確保する基盤整備は喫緊の課題である。また、FITによる買取期間が終了した後も再生可能エネルギー発電事業が適正に継続され、将来的な再投資が行われる事業環境の整備が必要とされている。FIT終了後の発電設備において、安全確保を前提としたうえで健全に維持するには、小規模発電設備（50kW未満）へ展開可能な評価・回復技術が必要である。これらの技術は太陽光モジュールのリユース等の他用途への展開も期待される。

#### (2) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

太陽光発電設備は、発電事業終了後の太陽電池モジュールの放置や不法投棄などの懸念が生じている。廃棄処理には設備の撤去・回収・分離処理の費用が必要となり、廃棄費用はシステム価格の5%が割り当てられている。NEDOでは太陽電池モジュールのリサイクル技術開発を進め、分離処理コスト低減としては大きな成果を上げている。しかし、太陽光発電設備のシステム価格低減が進む中、撤去・回収費用を同レベルで削減することは困難となっており、今後、正しくリサイクル処理を行うためには分離処理の更なる低コスト化が必要になる。

また、NEDOの試算によると太陽電池モジュールの大量廃棄は2034年以降、年間約20万トンに及ぶため、産業廃棄物の最終処分場はひっ迫される。これを解消するためには、最終処分となる埋立廃棄物量を最小限にとどめる必要があり、太陽電池モジュールの分離物を有効活用するマテリアルリサイクル技術の開発が重要になる。

ここで、マテリアルリサイクル技術とは、太陽電池モジュール由来の回収物の水平リサイクルにより、当該製品を原料化するための技術、もしくは、太陽電池モジュール由来の回収物の新規用途開発を行い、当該用途を原料化するための技術をあらわす。

#### (3) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

太陽光発電はFITにより急速に拡大したが、出力不安定性などの安定供給上の問題があることから、既存の系統へ与える影響が懸念されている。しかし、太陽光発電の導入拡大とその長期安定電源化の実現には、上記影響を緩和して系統の安定化を図らねばならない。そのためには、太陽光発電の出力制御や発電量・需要予測の高度化、需給一体型システムの構築等によって、変動電源である太陽光発電と需要側との需給バランスの実現に資する技術を開発する必要がある。加えて、今後の総発電量に占める太陽光発電の割合のさらなる増加によって、需給変動に対する調整力が不足し、系統運用への支障をきたすことも懸念されており、太陽光発電を用いた調整力創出に関する技術開発も必要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) 安全性・信頼性確保技術開発

発電設備の安全性を確保するため、ガイドラインの作成等の基盤整備を行う。知見の不足する項目については、必要に応じて実証実験等を実施する。

太陽光発電設備の長期安定運用に資する、信頼性評価技術、信頼性回復技術または両者を併せ持った技術の開発を行う。

#### (2) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

低コストかつマテリアルリサイクルに資する高い資源回収率を両立する分離処理技術を開発、実証プラントを構築し、実モジュールサイズで検証を行う。

#### (3) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

太陽光発電による電力系統への影響を緩和するため、需給一体型システム構築上の課題抽出と対応方法の検討および実証、系統連係における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証を行う。

### 3. 達成目標

#### 【中間目標】

- (1) 安全性・信頼性確保技術開発（2021年度末）
  - ①安全性に係る基盤整備（2021年度）
    - ①-1) 安全ガイドラインの策定（傾斜地設置型、営農型、水上設置型）
      - ・ 暫定版として2020年版の発行
  - ②信頼性評価技術、信頼性回復技術の開発（2021年度末）
    - ・ 開発した技術の有効性を評価するとともに、その実証方法を具体化する。
- (2) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発  
実モジュールにおいて、以下の技術を確立する。（2021年度末）
  - ・ 分解処理コスト3円/W以下。
  - ・ 部材として再利用可能な状態で資源回収率80%以上。
  - ・ 太陽電池モジュール由来の回収物のマテリアルリサイクル技術を開発する。

#### 【最終目標】（2023年度末）

- (1) 安全性・信頼性確保技術開発
  - ①-1) 安全ガイドラインの策定（傾斜地設置型、営農型、水上設置型）  
実証試験と調査、シミュレーションの結果に基づき、設置環境の多様化に必要な新たな裏付けを加えて、2022年版を発行する。
  - ①-2) 設置機器に関する基準類、ガイドラインの策定  
発行、公開とセミナー等の実施を通じて、発電事業者の利用を促進する。
  - ②信頼性評価技術、信頼性回復技術の開発（2023年）
    - ・ 信頼性評価技術（構造・電気）、信頼性回復技術（構造・電気）  
開発した技術の実証を行いその結果を受けた改良により実用性と採算性を確立する。小規模発電設備（50kW未満）における評価結果をもとに普及計画を立案する。
- (2) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発（2023年度末）  
実モジュールサイズの実証プラントを構築し、連続運転で以下の性能を満たすこと。
  - ・ 分離処理コスト3円/W以下の分離技術であること。
  - ・ 資源回収率80%以上の分離技術であること。
  - ・ 太陽電池モジュール由来の回収物がマテリアルリサイクルに資する性能であること。
- (3) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証（2023年度末）
  - ・ 経済合理性を前提とした需給乖離率3%以下のシステムの構築。
  - ・ 経済合理性を前提として、需給調整市場の応動・継続時間の要件（一次から三次）に適合する計画技術・制御技術を備えたシステムの構築。

#### 研究開発項目③「先進的共通基盤技術開発」

##### 1. 研究開発の必要性

太陽電池の高効率化・低コストに資する技術開発が進められる中、新型太陽電池（ペロブスカイト型、多接合型等）も実用化に向けた開発が活発化しつつある。しかし、これらの新型太陽電池を研究開発レベルから産業化まで進めるには、その性能評価試験を実施するプラットフォームの整備・確立も欠かせない。公平な性能評価を行うには、自然太陽光を用いた屋外でのモジュール入射角依存性・設置角依存性、日射スペクトル補正および温度補正を考慮する必要がある。また、基準太陽電池や校正技術、得られた発電性能を基に発電性能の安定性・信頼性の評価およびこれらの評価技術を標準化する取組みも重要である。

また、太陽光発電を取り巻く市場環境変化に伴い、需給運用の複雑化や電力の安定供給等の観点から発電量予測技術の高度化が求められている。太陽光発電は気象条件に左右される変動型電源であり、発電した電気を有効活用するには、その発電量を正確に予測することが重要であるが、時々刻々と日射量は変化しているため、過去の実測発電量の値から未来の発電量を予測することは難しい。そのため、発電量を高精度に予測するには、日射量予測について空間軸的および時間軸的に高精度化を行う必要がある。空間軸的な高精度化は、従来の広い範囲の地域における電力の需給調整ではなく分散型電源として扱われる個人宅や発電所レベルの狭い範囲の地域における電力の需給調整を円滑に行うことにつながり、時間軸的には数時間先から翌日および翌々日程度における日射量予測技術を高精度化することで、蓄電池の活用や系統への影響緩和などの需給調整の可能性が広がることが期待される。

## 2. 研究開発の具体的内容

### (1) 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発

標準化や規格化が進んでいない新型太陽電池等の出力等の性能を正しく評価するための測定技術を開発するとともに、開発に資する基準太陽電池および校正技術を開発し、性能・信頼性・安定性を評価する。

### (2) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発

発電量の短期的な予測に向け、現在を起点に数時間先の1km四方程度のエリアの日射量を予測する技術を開発するとともに本技術の評価を行う。加えて、現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発への可能性についても検討する。さらに、現在から翌日および翌々日程度先の日射量予測が大きく外れる課題を改善する技術開発を行う。

## 3. 達成目標

### 【中間目標】

#### (1) 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発

新型太陽電池等について、その設置形態環境・形状を考慮した測定技術を開発し、海外主要研究機関の測定技術との国際整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$  ( $1\sigma$ )以内を目指す。

#### (2) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発

現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発において、日射量予測の最大誤差を $10\%$ 以上低減することを目指す。

### 【最終目標】

#### (1) 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発

新型太陽電池等について、その設置形態環境・形状を考慮した測定技術を開発し、海外主要研究機関新型太陽電池等について、その設置形態環境・形状を考慮した屋内屋外測定技術を確立し、海外主要研究機関の測定技術との国際整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$  ( $1\sigma$ )以内を目指す。屋外環境下においては精度 $\pm 1.0\%$  ( $1\sigma$ )以内を目指す。性能評価技術の標準化に取り組む。

#### (2) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発 (2022年度)

1km四方程度のエリアを想定した数時間先の発電量の予測に向け、想定エリアの日射量予測情報を提供する技術を開発する。

#### (3) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発 (2024年度)

現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発において、日射量予測の最大誤差を

20%以上低減することを目指す。

#### 研究開発項目④「動向調査等」

##### 1. 調査等の必要性

太陽光発電は、産業、市場、技術等、どの視点においても、国内外で急激に変化している。発電コスト低減を着実に進めるとともに、我が国産業の国際競争力を確保するためには、国内外の動向を把握し、プロジェクトマネジメントに反映していく必要がある。

##### 2. 調査等の具体的内容

###### (1) 移動体用太陽電池の動向調査

電動自動車等の移動体への搭載を目指した太陽電池の国内外における研究開発、市場動向を調査、分析すると共に、今後の方向性を議論し、その結果をプロジェクト参画機関等、国内の関係事業者幅広く展開する事により、移動体分野の研究開発を加速する。

###### (2) リサイクル関連の動向調査

太陽電池モジュールのリサイクルに関わる国内の技術開発動向、普及動向、政策動向、実施事例などの調査に加え、ガラスの再利用の状況調査、災害時のリサイクル状況を把握するための調査、使用済太陽光発電設備の排出量予測の精緻化を実施する。

リサイクルの適正処理のプロセスにおけるモジュール回収の現状について調査を行うと共に、海外の太陽電池モジュールの回収システムを初めとしたリサイクル動向を調査することにより、太陽電池モジュールの適正処理を実証できる企画を提案する。

###### (3) 太陽光発電の動向調査

技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する太陽光発電セル、モジュール、システムおよび太陽光発電が導入される分野に関する国内外の技術や産業・市場動向や今後の太陽光発電の可能性の調査を行い、その結果を的確に本プロジェクトへフィードバックする。

諸外国の技術開発動向や政策動向等について、国際エネルギー機関(IEA)の太陽光発電システム研究協力実施協定(PVPS)に参画し、太陽光発電の普及・促進に向けた国際協力活動を通じた調査・分析を実施すると共に、諸外国の技術開発、政策及び市場動向を把握する。併せてこの活動を通じて日本の太陽光発電の国際競争力向上等を図る。

##### 3. 達成目標

###### 【中間目標】

###### (1) 移動体用太陽電池の動向調査

移動体用太陽電池の調査結果を中間報告書としてまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックする。

###### (3) 太陽光発電の動向調査

###### ①太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査

技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する調査結果を中間報告書としてまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックする。

###### ②国際技術協力プログラムへ参画

PVPSの活動に参画し、その内容を産業界に発信する。

###### 【最終目標】

###### (1) 移動体用太陽電池の動向調査

今後の移動体用太陽電池の技術開発に資する分析、検討をまとめる。

###### (2) リサイクル関連の動向調査

①太陽電池モジュールのリサイクルに関わる調査

リサイクルに関わる調査結果を、太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発へフィードバックする。

②太陽電池モジュールの適正処理に関わる調査

太陽電池モジュールの適正処理を実証できる企画を提案する。

(3) 太陽光発電の動向調査

①太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査

今後の技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する情報をまとめる。

②国際技術協力プログラムへ参画

P V P Sでの活動を踏まえ、定期的な情報発信を行うと共に分析、検討をまとめる。

③新市場の動向調査

技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する調査結果を中間報告書としてまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックを行う。

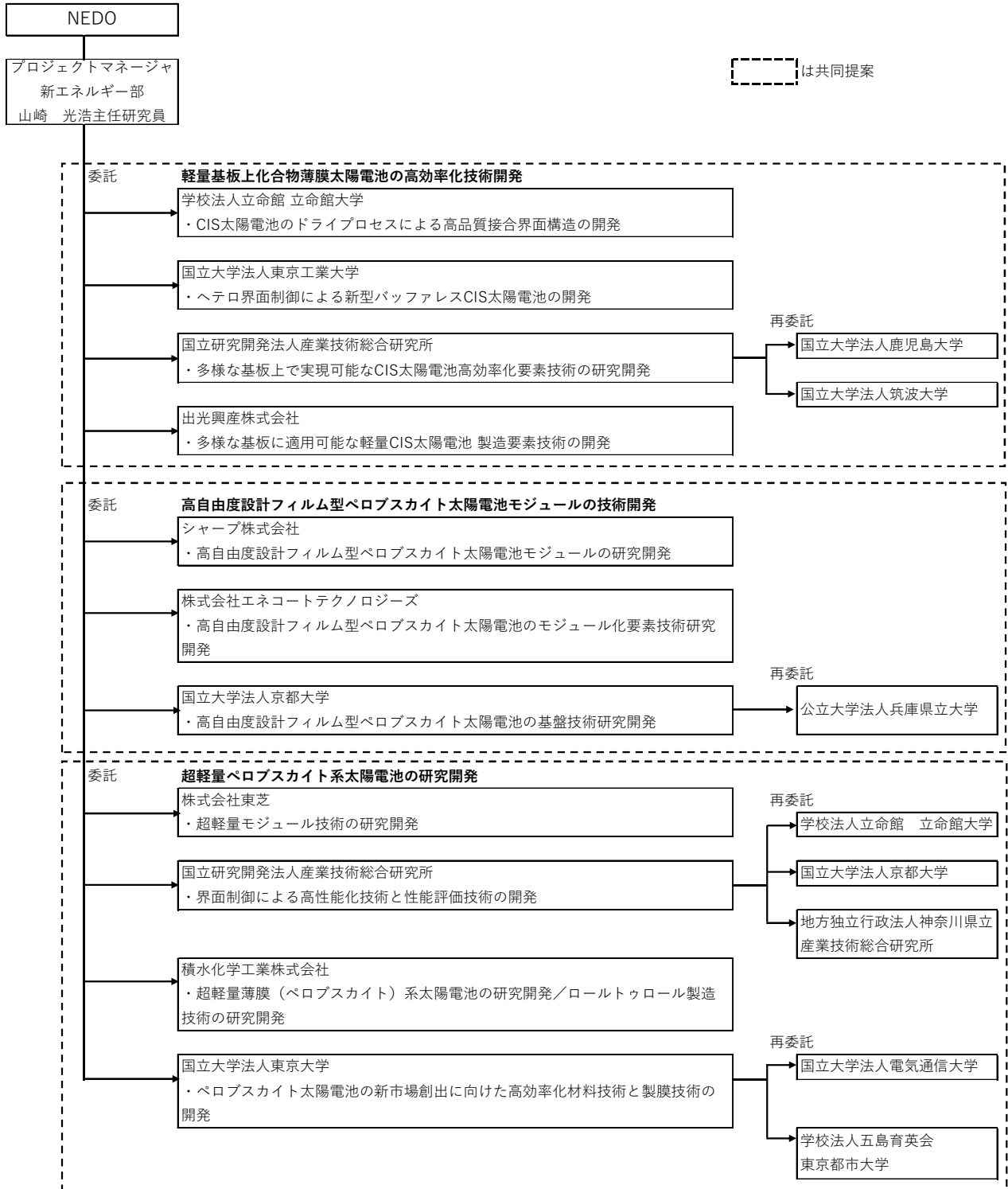
## 2. 2 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは国立研究開発法人等（以下、「委託先」という。）が、NEDOと委託研究契約を締結し実施している。

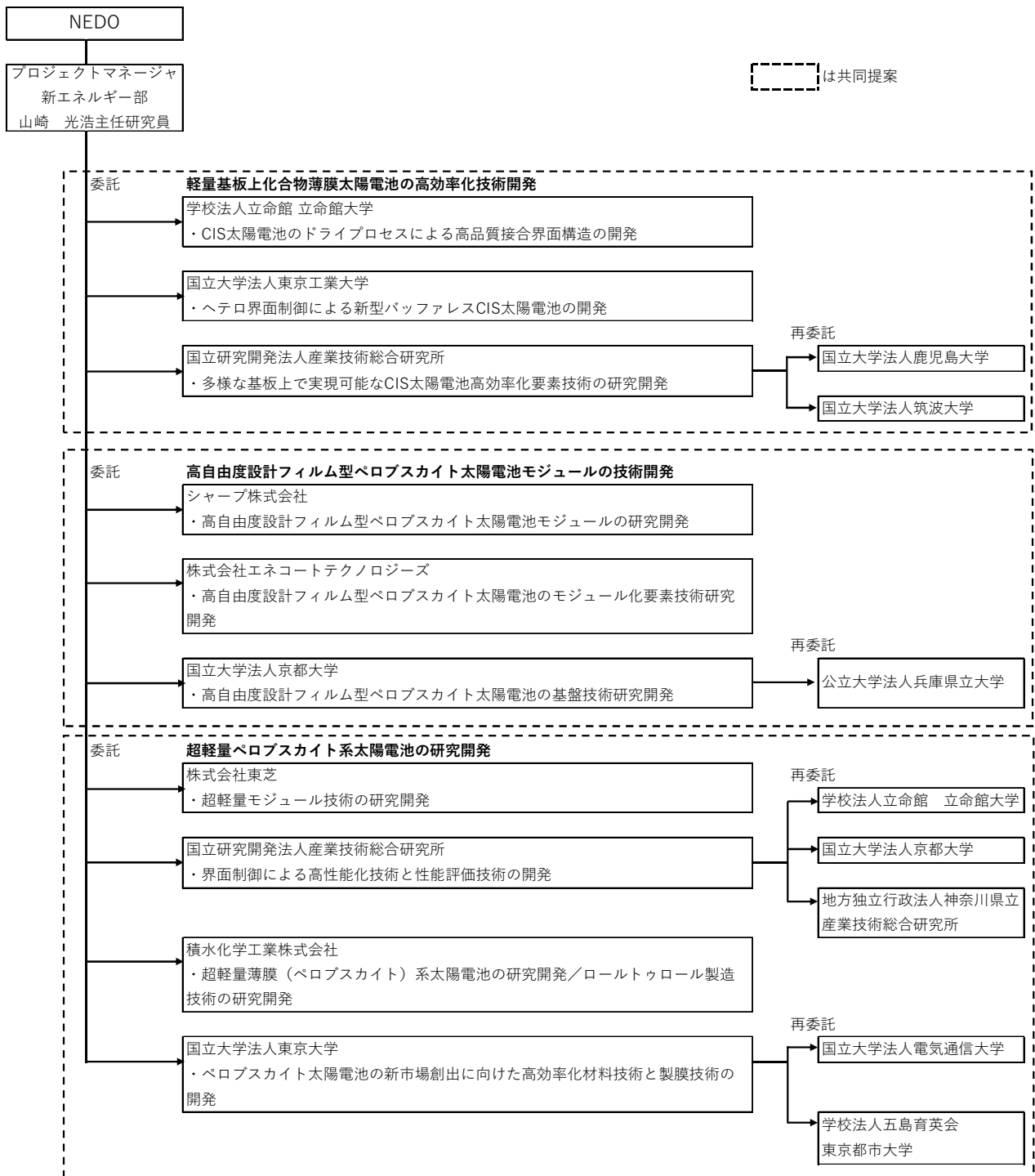
### 研究開発項目①「太陽光発電の新市場創造技術開発」

#### (1) フィルム型超軽量太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）

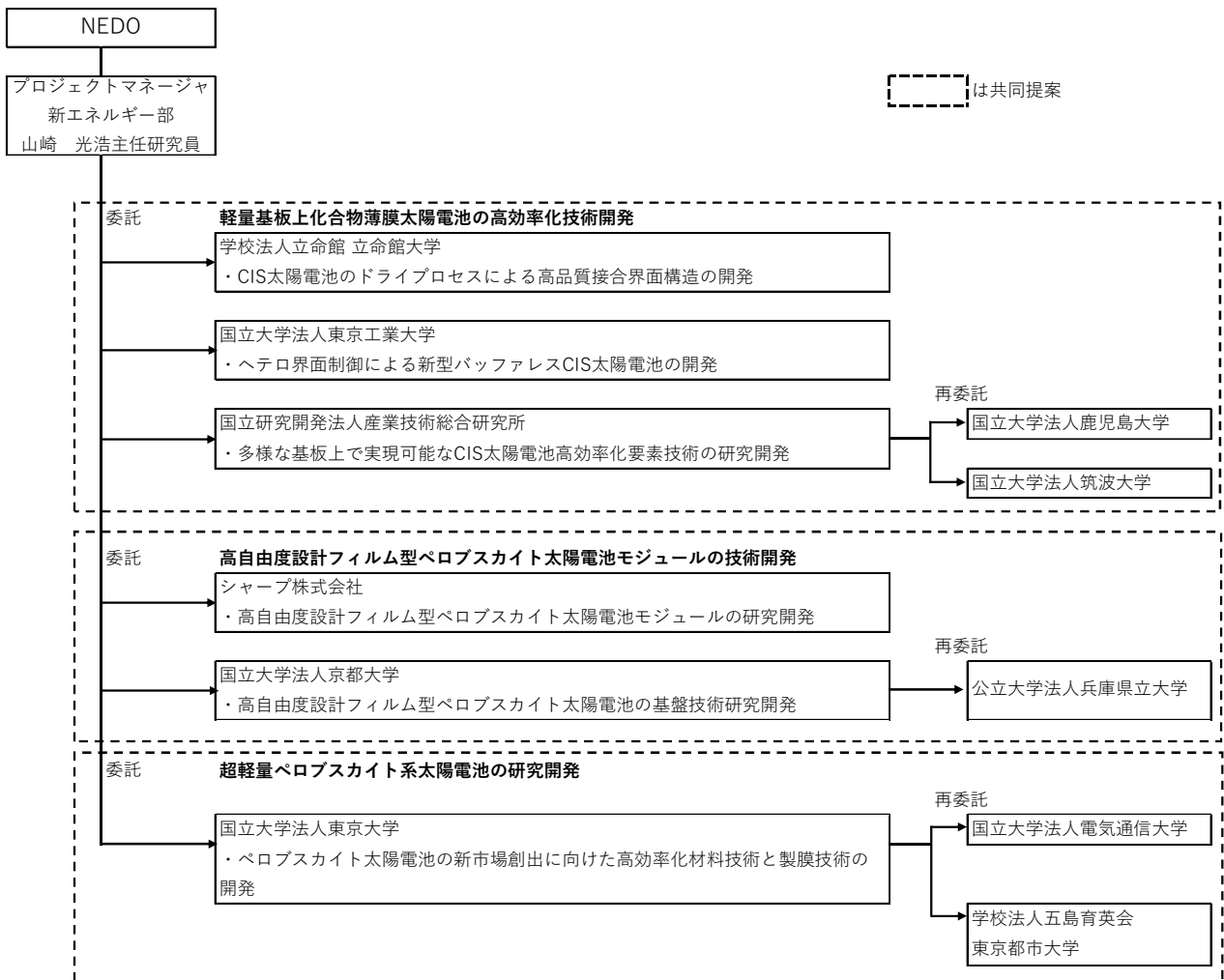
【2020年度～2021年9月末】



【2021年10月度～2022年3月末】



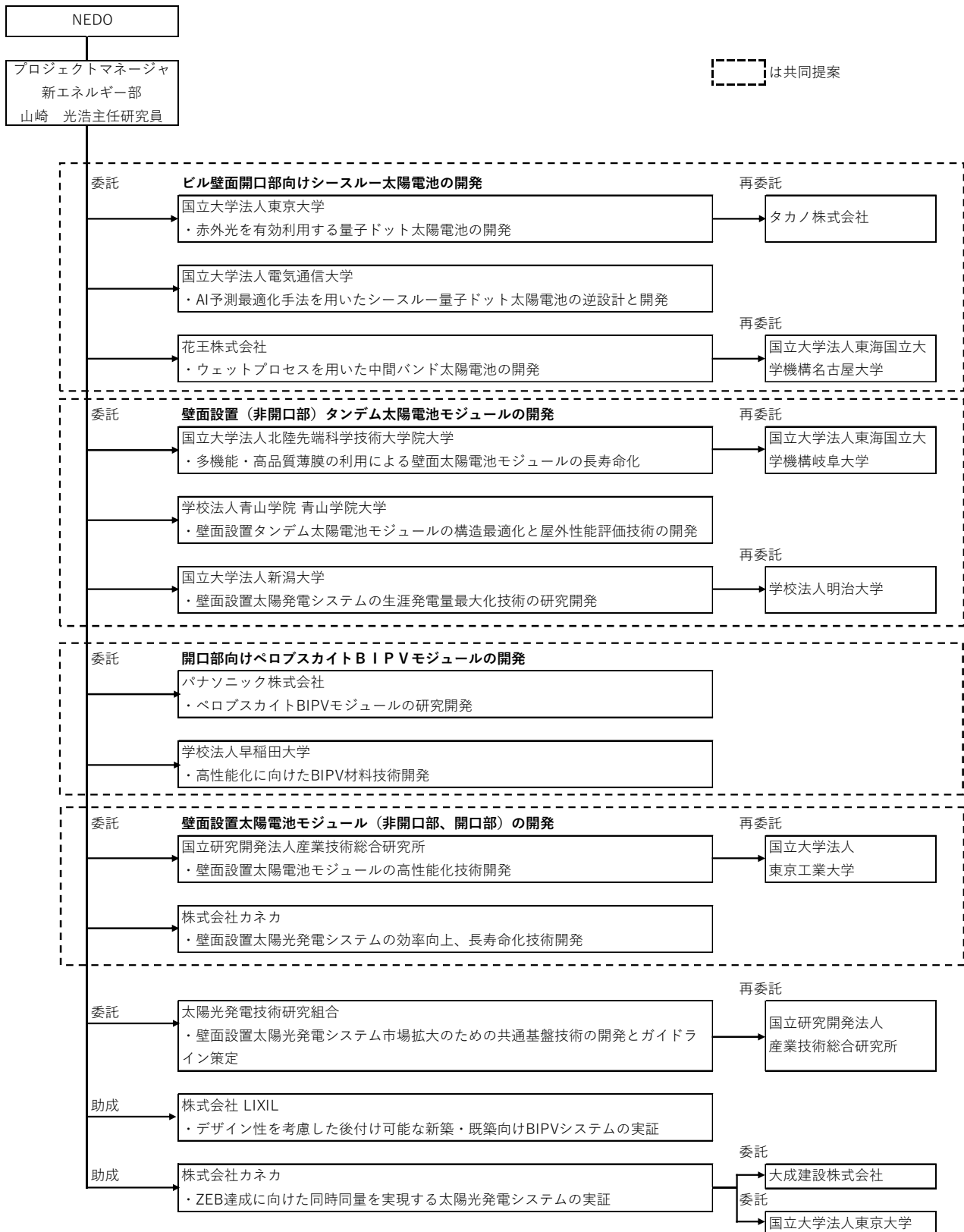
【2022年度】





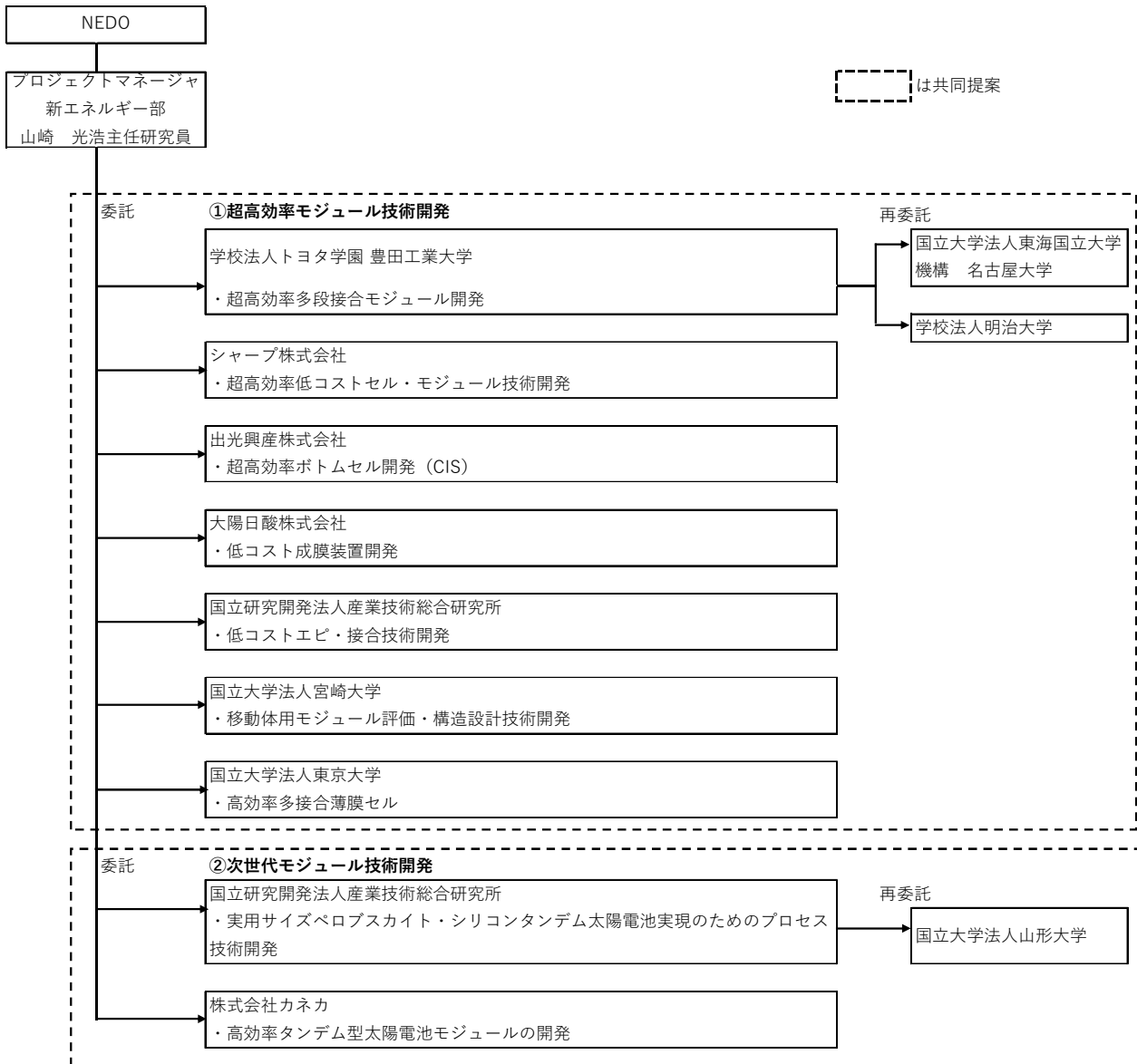
## (2) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

【2020年度～2022年度】



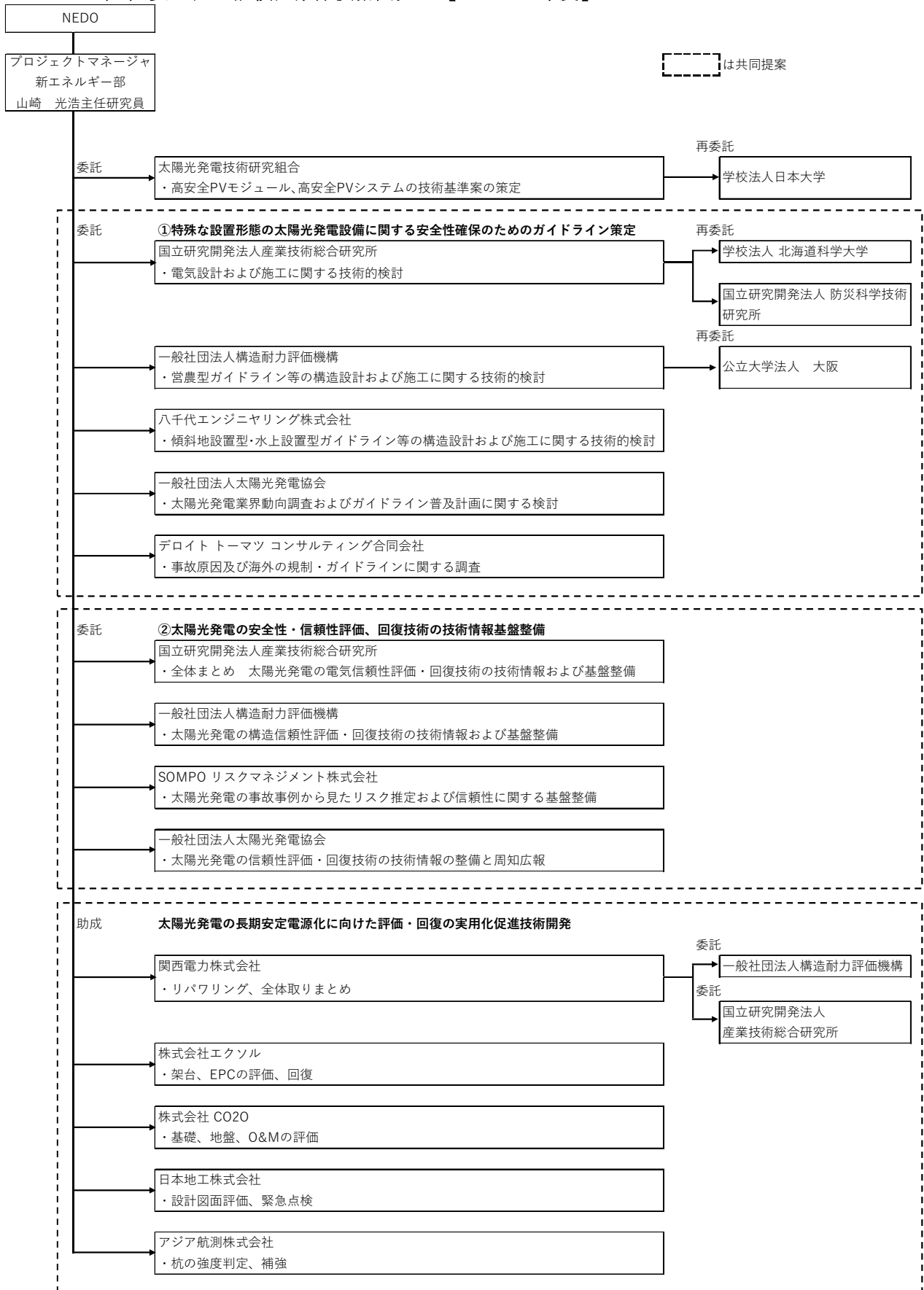
(3) 移動体用太陽電池の研究開発

【2020年度～2022年度】

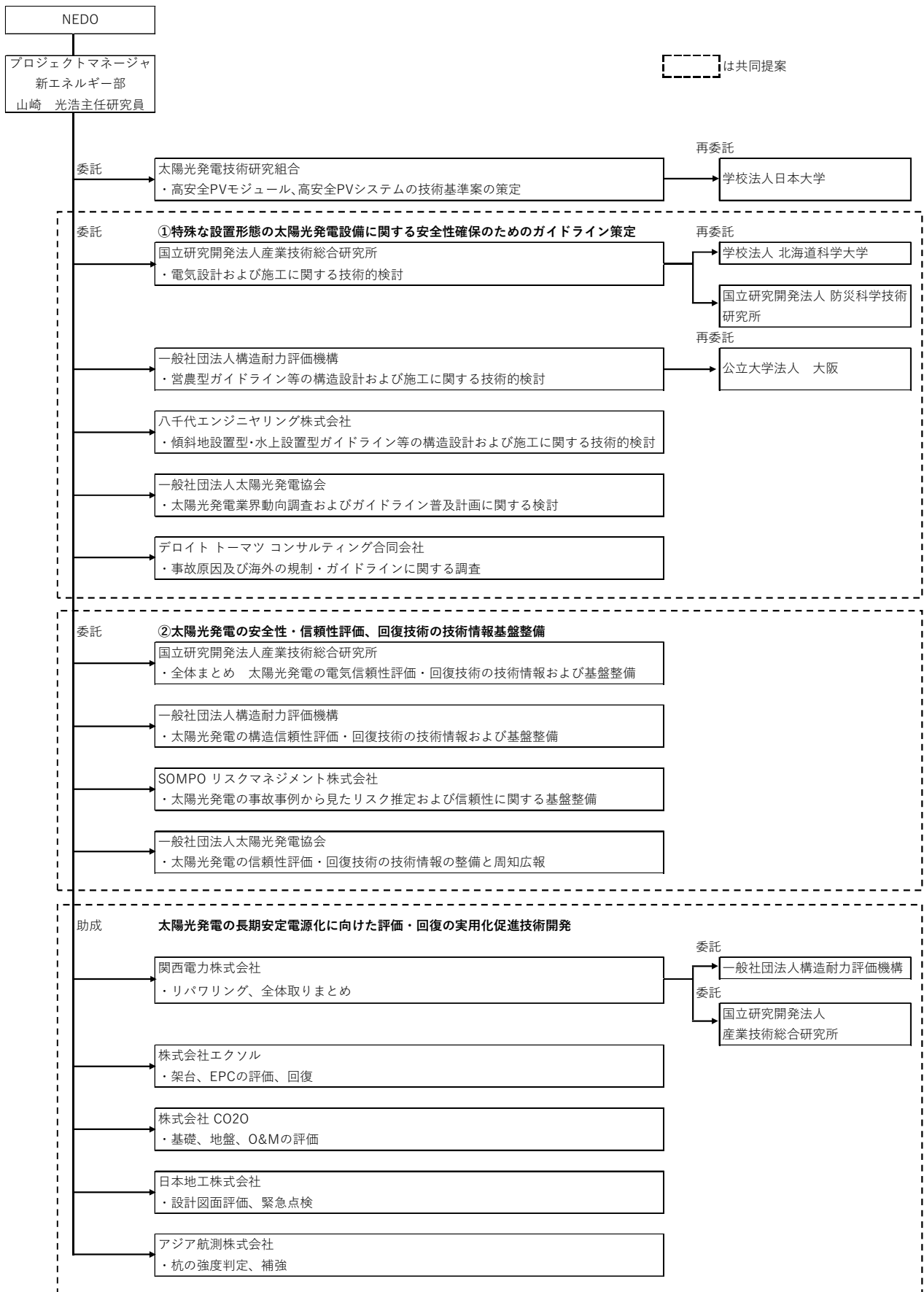


研究開発項目②「太陽光発電の長期安定電源化技術開発」

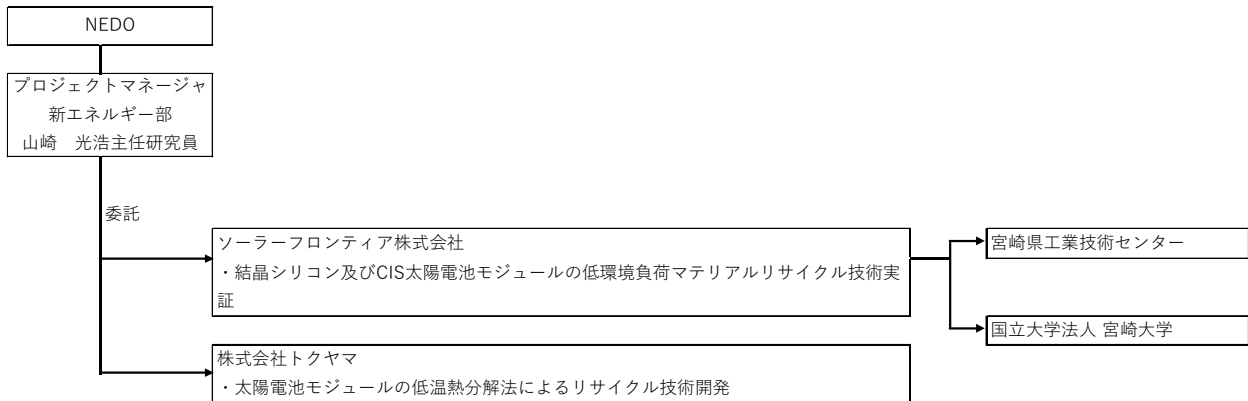
(1) 安全性・信頼性確保技術開発 【2020年度】



【2021年度～2022年度】

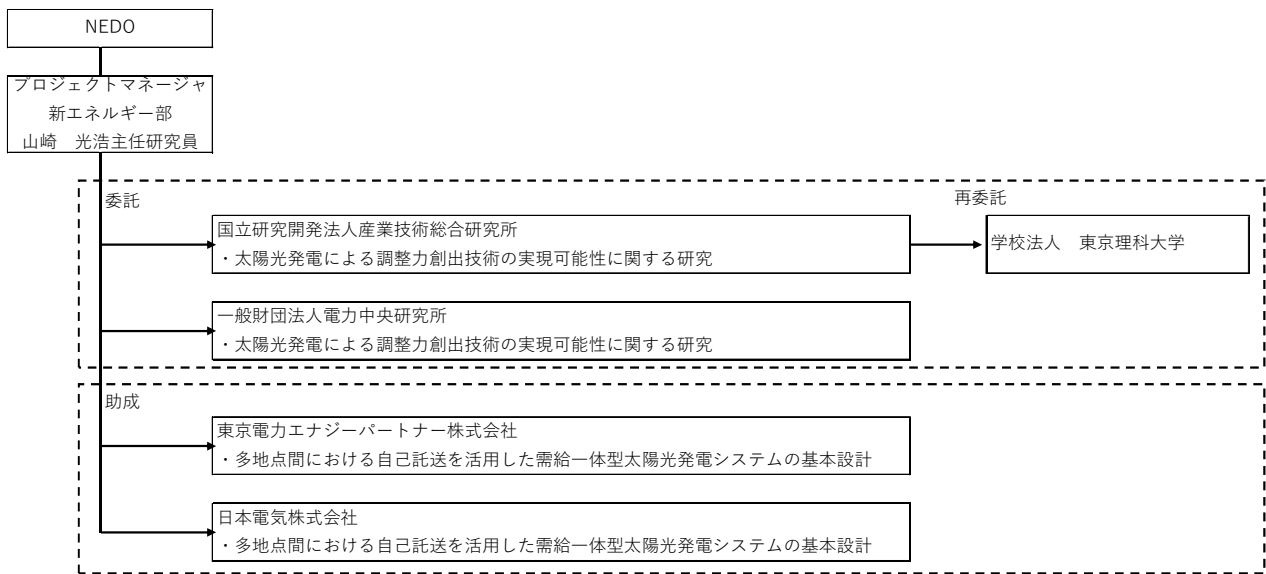


(2) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発  
【2020年度～2022年度】

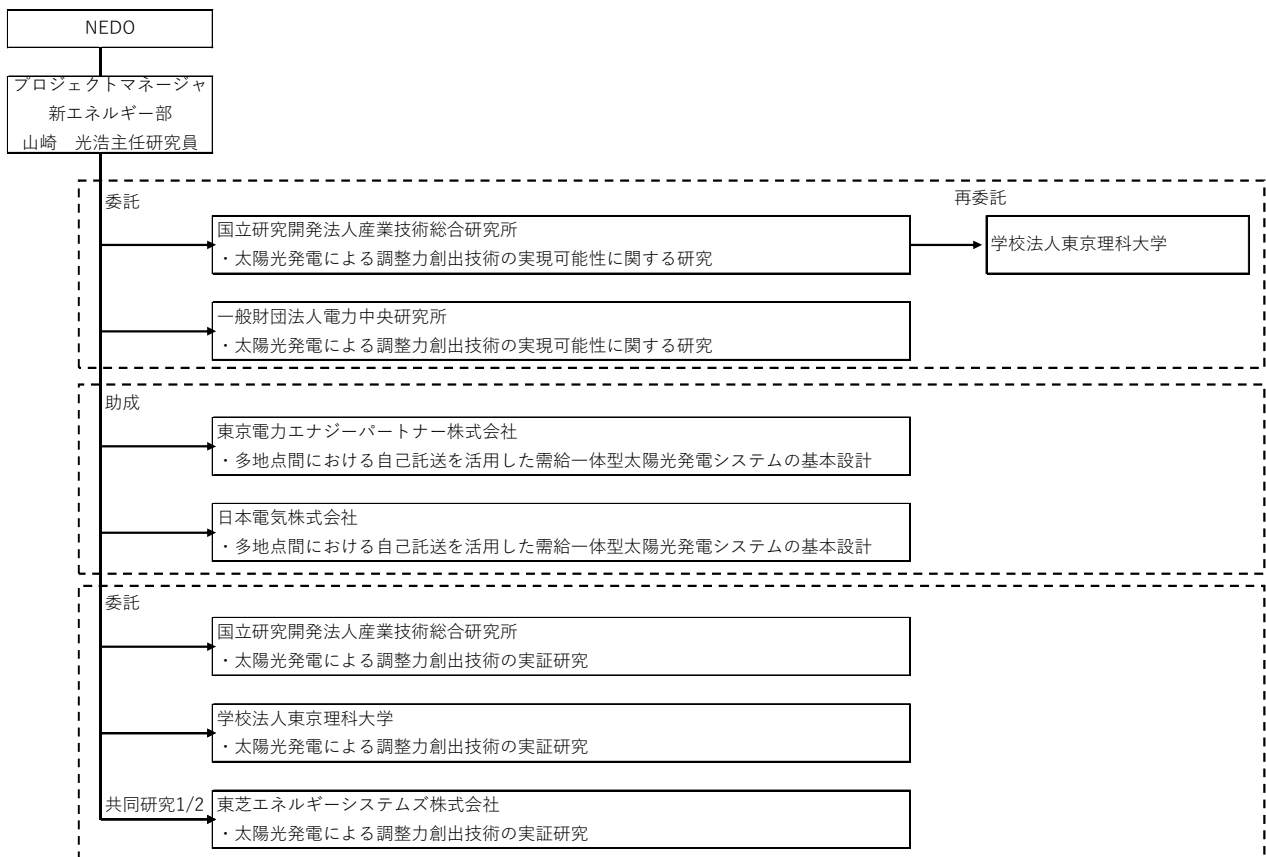


### (3) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

【2020年度】



【2021年度～2022年度】

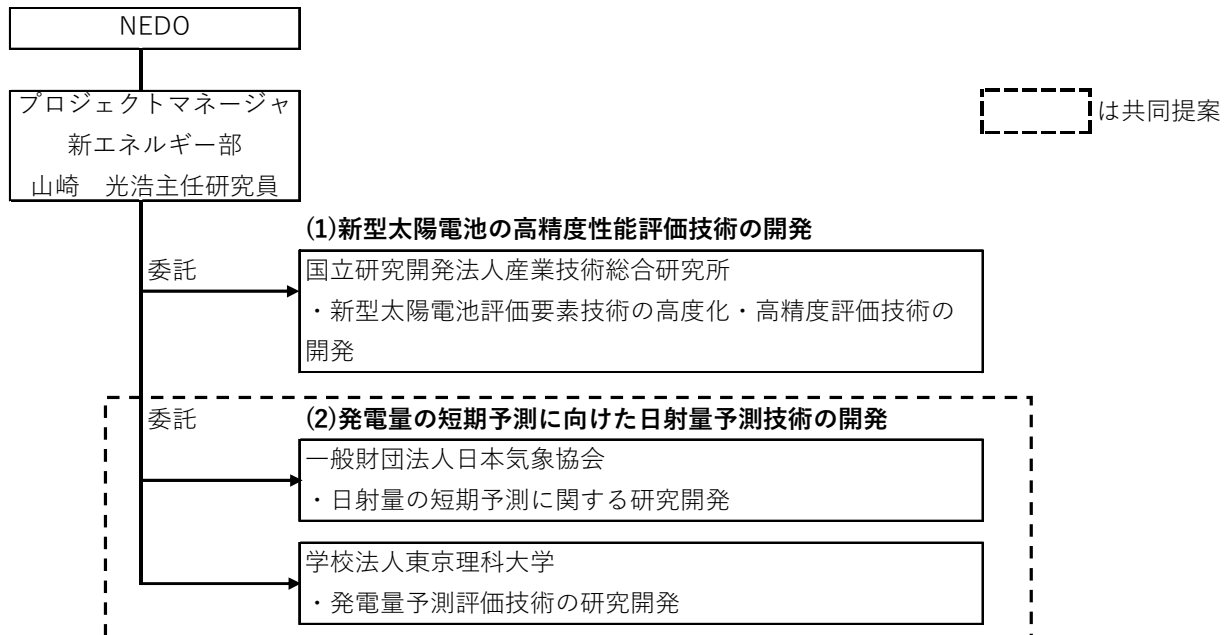


研究開発項目③「先進的共通基盤技術開発」

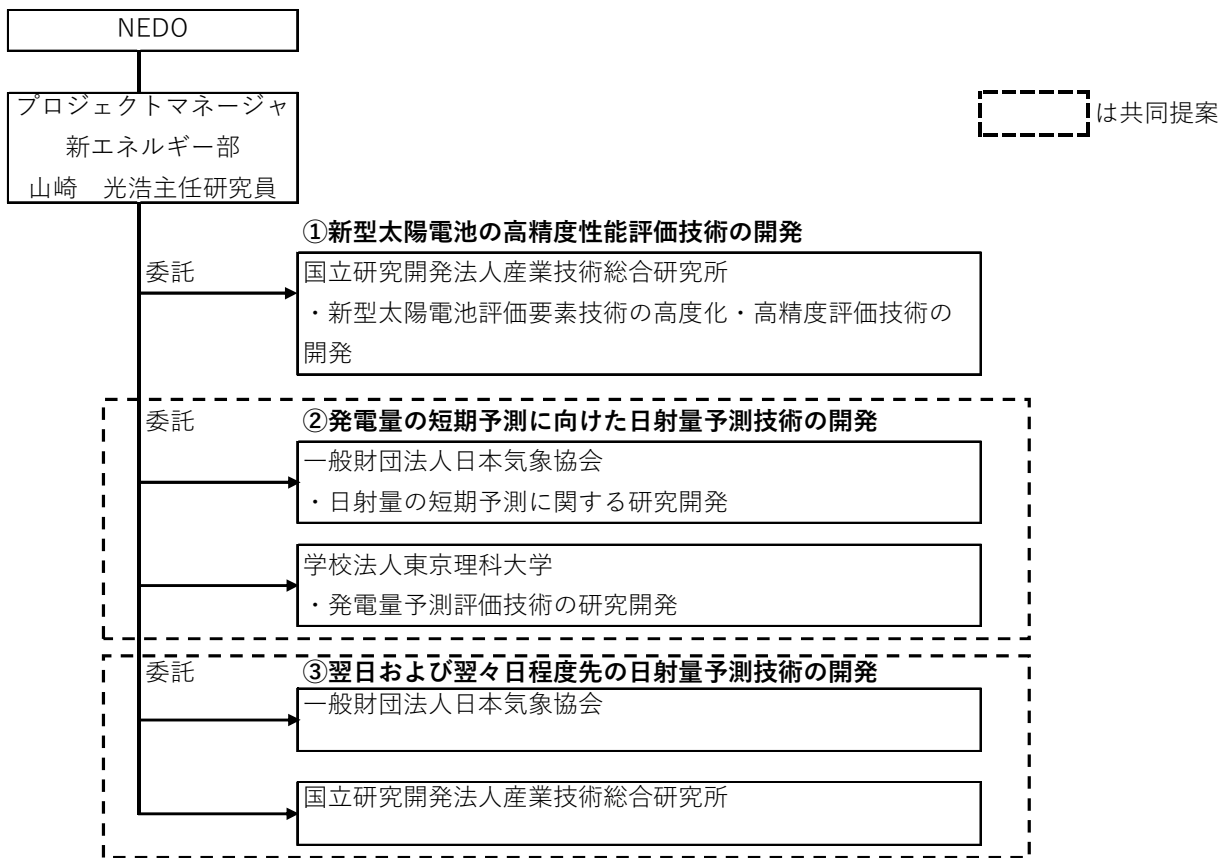
(1) 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発

(2) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発

【2020年度】



【2021年度～2022年度】

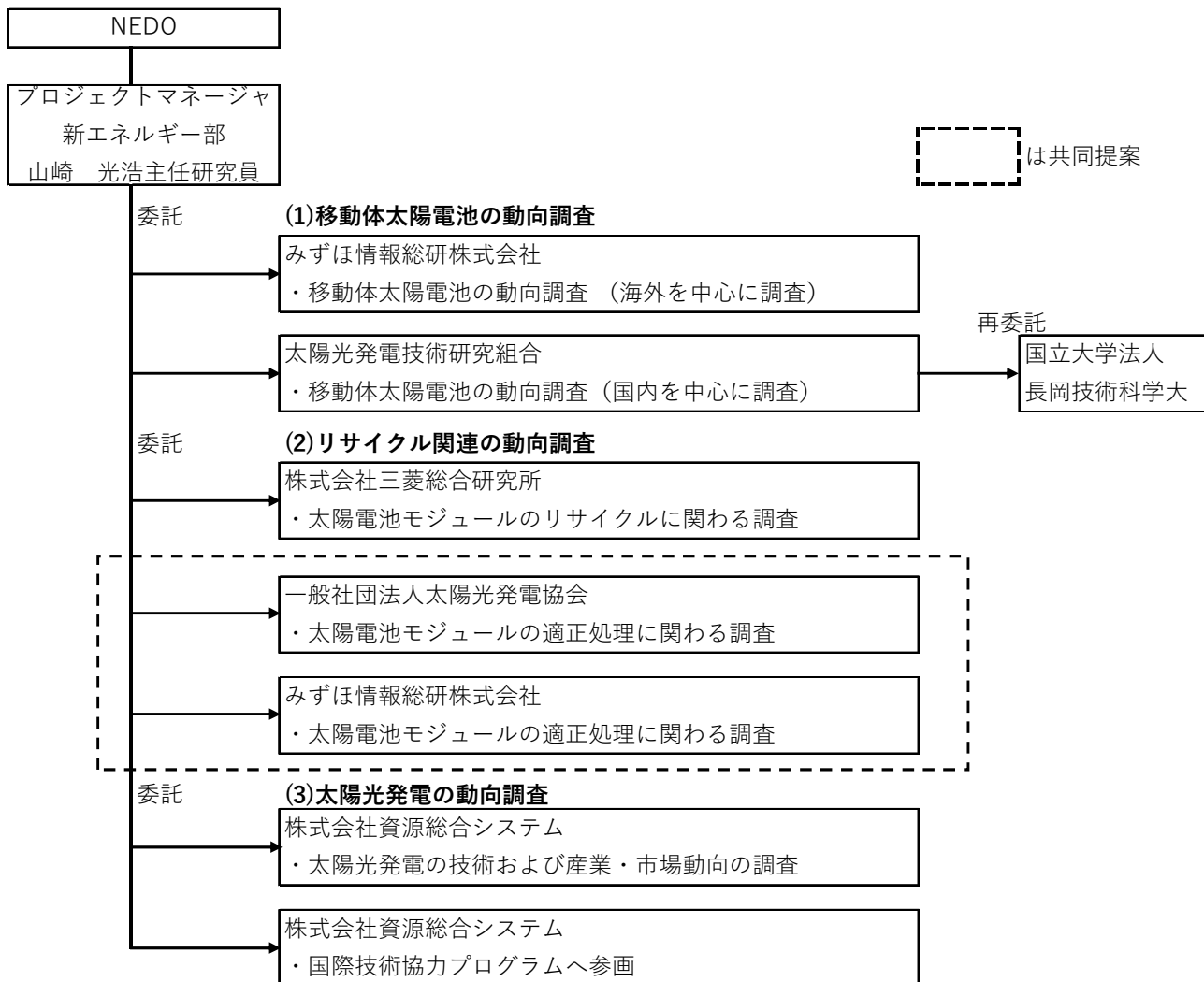




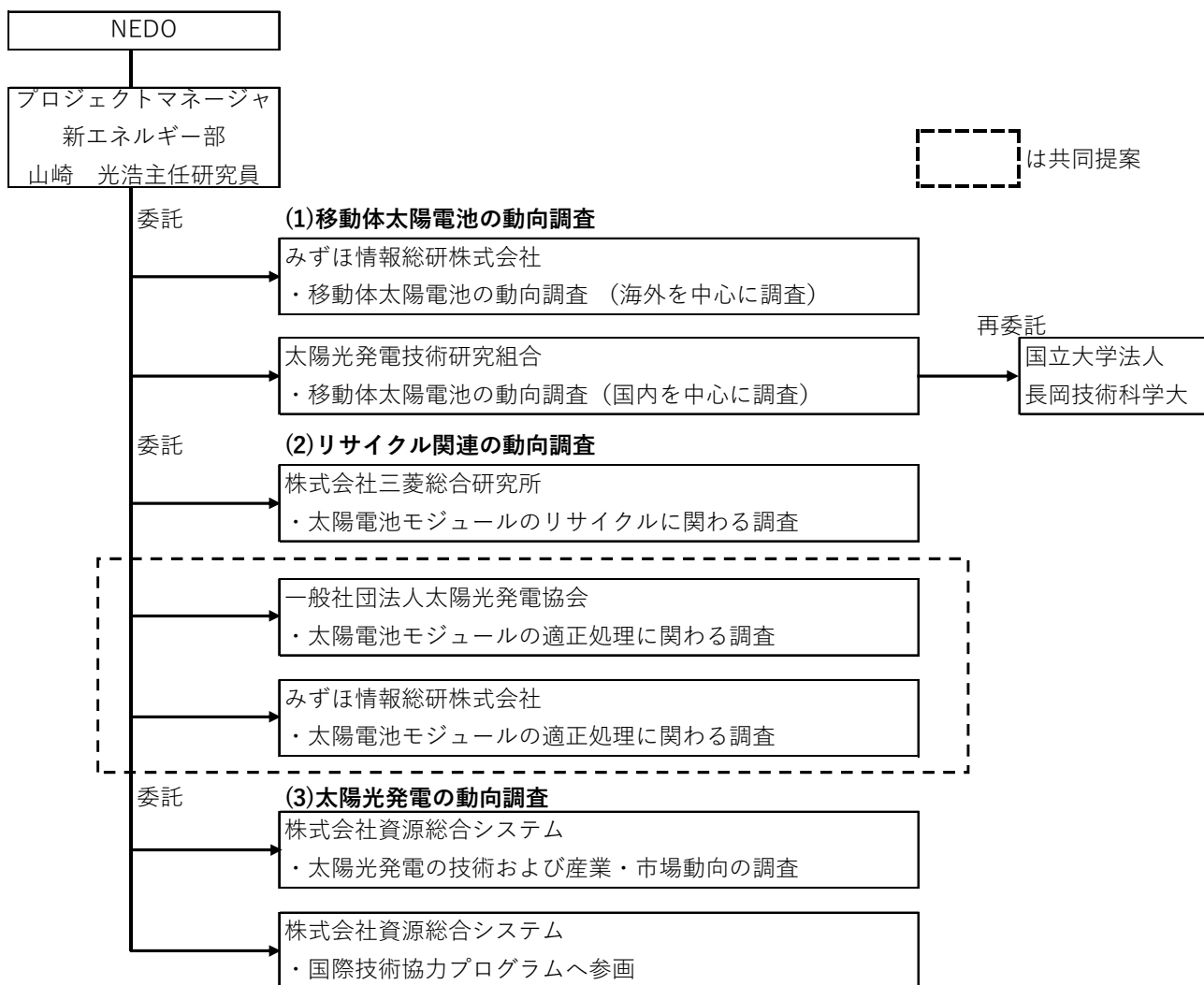
研究開発項目④「動向調査等」

- (1) 移動体用太陽電池の動向調査
- (2) リサイクル関連の動向調査
- (3) 太陽光発電の動向調査

【2020年度】



【2021年度～2022年度】



## 2. 3 研究開発の運営管理

### 2. 3. 1 運営方法

本プロジェクトではプロジェクトリーダーを設置せず、NEDOプロジェクトマネージャー（PM）と担当（PT）は、コンソーシアムの研究開発責任者あるいはテーマリーダーと緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握するとともに、実用化時期を配慮した適切な産業財産権の出願管理を行った。

各テーマ（研究開発項目）では研究開発開始当初より実施者主導で個別に行う進捗報告会、研究会等を実施しているが、研究開発全体の管理・執行をより厳格に行うため、NEDOは2020年度より外部有識者で構成する推進委員会・技術検討委員会を組織し、知財管理や標準化等の重要事項について検討する他、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努めた。

具体的には、4～5名の技術委員・推進委員から構成される技術検討委員会・推進委員会を以下の6分野について設置して、2～3回／年の頻度で委員会を開催することにより、研究開発の運営に反映した。

#### 【技術検討委員会・推進委員会のリスト】

1. 新市場創出技術開発／フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発技術検討委員会
2. 新市場創出技術開発／壁面設置太陽光発電システム技術開発技術検討委員会
3. 新市場創出技術開発／移動体用太陽電池の研究開発技術検討委員会
4. 太陽光発電の長期安定電源化技術開発／安全性・信頼性確保技術開発推進委員会
5. 太陽光発電の長期安定電源化技術開発／太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発推進委員会
6. 先進的共通基盤技術開発技術検討委員会

#### 【推進委員・技術検討委員（敬称略）】

1. 新市場創出技術開発／フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発技術検討委員会  
山口 真史（豊田工業大学）  
亀田 正明（太陽光発電協会）  
高倉 秀行（立命館大学）  
吉田 弘幸（千葉大学）
2. 新市場創出技術開発／壁面設置太陽光発電システム技術開発技術検討委員会  
小長井 誠（東京都市大学）、  
宇佐美 徳隆（名古屋大学）  
佐伯 昭紀（大阪大学）  
柳田 真利（物質・材料研究機構）
3. 新市場創出技術開発／移動体用太陽電池の研究開発技術検討委員会  
高倉 秀行（立命館大学）  
池谷 知彦（電力中央研究所）  
今泉 充（宇宙航空研究開発機構）  
山田 昇（長岡技術科学大学）
4. 太陽光発電の長期安定電源化技術開発／安全性・信頼性確保技術開発推進委員会  
近藤 道雄（産業技術総合研究所）  
五十嵐 広宣（ソーラーエッジテクノロジージャパン株式会社）  
河本 桂一（みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社）  
西岡 賢祐（宮崎大学）
5. 太陽光発電の長期安定電源化技術開発／太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発推進委員会  
大和田 秀二（早稲田大学教授）  
大木 達也（産業技術総合研究所）  
加藤 聡（ガラス再資源化協議会）  
松野 泰也（千葉大学）

南 悌二（地球環境センター）

6. 先進的共通基盤技術開発技術検討委員会

山口 真史（豊田工業大学）  
 亀田 正明（太陽光発電協会）  
 高倉 秀行（立命館大学）  
 吉田 弘幸（千葉大学）

【開催実績、開催予定】

年度	2020	2021	2022	2023	2024
技術検討委員会・ 推進委員会 (分野毎に開催)	4	12	(8) (中間評価)	(8)	(8)

技術検討委員会・推進委員会では、コンソーシアムの研究開発責任者、テマリーダー、テマ内の個別のチームリーダー、或いは各委託先の担当者が個別に進捗報告を行い、技術検討委員・推進委員による質疑応答、及びNEDOと技術委員・推進委員による意見集約を通してプロジェクトにおける研究開発内容に対する見解、及び改善すべき点等について議論し、コンソーシアムの研究開発責任者、テマリーダー、チームリーダー、各委託先担当者等に伝達した。技術検討委員会・推進委員会での主な指導内容を以下の表に示す。

1. 新市場創出技術開発／フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発 技術検討委員会

進捗報告会	主な指導内容
第1回技術検討委員会 2021年3月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大面積化による発電効率の低下の要因解析を、ミニセル・ミニモジュール・モジュール等の違いも含めて明確にするとともに、大面積化しても効率が低下しないようなセル・モジュール構成を考えること。</li> <li>・高い最終目標に向けて、コンソーシアム内での連携を密にして取り組むこと。</li> </ul>
第2回技術検討委員会 2022年3月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中間目標達成のためのアクションを具体的・定量的に整理して検討すること。</li> <li>・小面積での効率向上の成果が出てきているので、大面積化に向けて均一性等も意識して検討するとともに、フィードバックがかかるようにすること。</li> </ul>

2. 新市場創出技術開発／壁面設置太陽光発電システム技術開発 技術検討委員会

進捗報告会	主な指導内容
第1回技術検討委員会 2021年3月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・花王・東京大学・電気通信大学のコンソーシアムにおいて、各事業者がどんな役割をしているかがわかりにくいので、役割分担を明確に示して欲しい。</li> <li>・太陽光発電技術研究組合の事業において、日本がBIPVの国際規格の作成を主導してほしい。</li> <li>・パナソニック・早稲田大学のコンソーシアムにおいて、世界の開発状況を意識して開発を進めてほしい。</li> </ul>
第2回技術検討委員会 2021年9月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新潟大学・北陸先端科学技術大学院大学・青山学院大学のコンソーシアムにおいて、開発しているタンデム太陽電池がどのようなものにするかの方向性を明確にして欲しい。</li> <li>・太陽光発電技術研究組合の事業において、作成したガイドラインをどのように国内企業に展開するか、また海外にどのように展開していくかを検討すること</li> <li>・カネカ・産総研のコンソーシアムにおいて、開発目標を達成しても、市場で受け入れられるかが気になるので、売り先の検討も併せて進めること。</li> </ul>
第3回技術検討委員会 2022年3月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・花王・東京大学・電気通信大学のコンソーシアムにおいて、事業者間の連携を強化し、各事業者の成果が花王の量子ドット太陽電池に活かされている状態を目指して欲しい。</li> <li>・カネカ・産総研のコンソーシアムにおいて、競合他社の動向の調査を実施し、競合が出てきても勝てるように開発を進めて欲しい。</li> </ul>

### 3. 新市場創出技術開発／移動体用太陽電池の研究開発 技術検討委員会

進捗報告会	主な指導内容
第1回技術検討委員会 2021年7月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・研究資金を有効に使えるように、方式が絞れる局面が出てきたらリーダーの判断で効率的に進めてほしい。</li> <li>・今回は低コスト化が目標なので、高効率化は少し抑えて、現実的に使う環境と低コスト化を意識してプロジェクトを進めてほしい。</li> <li>・世界がマネできないように、知財も押さえた上で、NEDOもマネジメントをしっかりと行って、プロジェクトを進めてほしい。</li> <li>・移動体太陽電池の動向調査では地上用の太陽電池の規格基準と車載用電気品の規格基準をすべて満たすよりも合理的な方法がないか検討しているので、連携することを提案する。</li> <li>・他のNEDOのペロブスカイトのプロジェクトの事業者との技術の独立性は担保しながらもNEDOの成果として共有していくこと。</li> <li>・デザイン性やコストなど、ユーザー視線での意匠性も考慮して進めること。</li> </ul>
第2回技術検討委員会 2022年3月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・車載は振動や熱衝撃、安全性などのモジュールへの要求要件が変わってくるので、早めに小モジュール等で信頼性、耐久性の試験などをラフにでもやってみるべき。材料や配線によってセルの応力の影響が大きく、その様な検討を試行して欲しい。</li> <li>・ボトムセルのシリコンについて、歪み計算で許容できる最大厚さの目途をつけておくこと。CIGSでは、剥がれについて目途をつけておくこと。モデルを作って振動試験を行い、高効率化との両立を検討すること。</li> <li>・車載での振動の影響を自動車の専門家に条件など聞いて明らかにした上で振動試験をして、課題を把握すること。</li> <li>・HVPEの遅れを早めに取り戻すこと。</li> <li>・実モジュール構造を想定した小モジュールを試作し、温度サイクル試験など、車載を想定した試験を早めにトライすべき。</li> <li>・その際に、実用化において採用されないような材料やプロセスの採用は避けて、現実的なものでどこまでできるかの検討をすること。</li> <li>・ペロブスカイトは日本が優位な技術であり、早めに大面積化をすすめて、是非実用化してほしい。</li> </ul>

### 4. 太陽光発電の長期安定電源化技術開発／安全性・信頼性確保技術開発 推進委員会

進捗報告会	主な指導内容
第1回推進委員会 2021年2月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・事故事例は損保一社だけでなく、複数社からデータを集めてもらいたい。(→3社からデータを収集し、分析)。傾斜地設置型ガイドラインは施工時だけでなく、その後の補修を意識してもらいたい。営農型ガイドラインでは構造の安全と、従業員の安全の両立を図ること。</li> </ul>
第2回推進委員会 2021年6月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・故障検出技術では既存技術との違いを明確にすること。情報基盤整備の成果物を明確にすること。水上設置型ガイドラインでは安全性確保のため、コネクタの嵌合等についても触れるように。海外の状況も参考にしてもらいたい。</li> </ul>
第3回推進委員会 2021年11月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・今年度公開するガイドラインはいかに多く利用されるかが重要。動画の活用など工夫して策定後の周知活動を強化してもらいたい。(→ガイドライン説明会をYouTubeにて公開。) ビッグデータについては内容と活用方法を明確にし、低圧事業者が利用できるようにするのが重要。</li> </ul>
第4回推進委員会 2022年2月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・信頼性評価・回復技術は、小規模発電事業者が利用できるコスト感も重要。モジュールに起因する発火・火災へのメカニズムを明らかにしてもらいたい。ビッグデータについては各種ニーズの発見、整理はできたが、これ以上の安全性・信頼性確保のための事業成果が見込めないで、今年度で終了とする。</li> </ul>

### 5. 太陽光発電の長期安定電源化技術開発／太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発 推進委員会

進捗報告会	主な指導内容
第1回推進委員会 2021年1月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・今後の太陽電池モジュールのトレンドによっては、現在検討しているプロセスが将来排出される太陽電池モジュールにも適用可能か、ということが課題となる可能性があるため、留意が必要。</li> </ul>
第2回推進委員会 2021年5月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・太陽電池モジュール由来のガラスをガラスウールへの用途を検討されるとのことだが、ガラスウールへの用途に関してヒアリング調査を実施しているプロジェクトがあるため、事務</li> </ul>

	局に情報共有をお願いしたい。⇒これ以降、調査の発表は事業者も聴講できるようにマネジメントした。
第3回推進委員会 2021年11月	・屋外曝露の時間によりEVAの劣化度が異なると考えられるため、劣化の違いによる処理時間、処理温度の整理が重要。外部有識者（推進委員）による期間延長の可否判断の審議を行い、株式会社トクヤマ、ソーラーフロンティア株式会社、株式会社三菱総合研究所の3事業者について、継続することにした。
第4回推進委員会 2022年2月	・本件は技術開発プロジェクトのため、技術的な優位性をもって優先的にビジネスモデルを構築できる体制にしなければ、競争もあるため実際にビジネスが成立しないことになってしまうのではないかと。安定的な生産、受入に持ち込まなければ、大量処理時代にあっては収支の見込みを達成できない恐れがあるため、ビジネスの場で今回発表の目標値を達成しようとしたときのポイントを整理するべき。

## 6. 先進的共通基盤技術開発 技術検討委員会

進捗報告会	主な指導内容
第1回技術検討委員会 2022年3月	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非常に重要なテーマに取り組んでいると認識している。現在の研究開発においてもより理解が必要な事象も転がっている一方で、本研究開発を踏まえて更に実施いただきたい事象もある。引き続き課題解決に向け推進をいただきたい。</li> <li>・国際標準化について、国際的にはどのような動きになっていて、その中で本プロジェクトではどういう立場でやっていくつもりなのか、明確に提示してほしい。</li> </ul>

また、他の太陽電池関連事業を含めて、ホームページや展示会による広報、事業紹介パンフレットの作成、学会やシンポジウムでの講演、国際学会への参加と発表、雑誌への寄稿、報道機関のニュースリリースなどを通じて成果の発信に努めている。

### 2. 3. 2 加速・拡充

必要に応じて事業の加速・拡充を実施している。

#### 【予算増額】

研究開発項目	主な予算増額
研究開発項目① (フィルム型超軽量モジュール太陽電池の開発)	(2020年度)出光興産株式会社 69,888千円 CIS太陽電池において、用途に応じた多様なモジュールの作製技術と耐久性評価技術の開発を追加した。
	(2020年度)国立大学法人京都大学 39,875千円 原子層堆積(ALD)装置を導入することで、タンデムセルの作製に必要な、低温・低損傷条件下でのSnO <sub>2</sub> 層やNiO <sub>x</sub> 層の極薄膜の作製を可能にした。 真空蒸着装置を導入することで、太陽電池の高性能化に繋がる、p-i-n逆型構造の電子回収層の作製およびペロブスカイト層表面のパッシベーションを可能にした。
	(2020年度)国立研究開発法人産業技術総合研究所 9,240千円 太陽電池の劣化を評価するための光照射環境試験装置の仕様を精査し、湿度・温度をより精度よく制御可能な装置に変更したため。 また太陽電池の耐久性評価装置の仕様を精査し、低周波数領域のインピーダンスを精度よく測定可能な装置に変更したため。
研究開発項目① (壁面設置太陽光発電システム技術開発)	(2020年度)国立大学法人東京大学 33,200千円 ①量子ドット光吸収層の結晶品質を向上させる目的で、Asソースの供給安定性と供給・遮断の急峻性に優れたバルブドクランクセルを整備した。 ②赤外吸収コロイド量子ドットインク及び量子ドット層の膜質を評価する目的で、蛍光測定用ファイバーユニットを整備した。 ③LBICの空間分解能の改良と、ステージ稼動長を長くして、試料を取り出すことなくPL評価ができる環境を整備した。
	(2020年度)国立大学法人電気通信大学 16,900千円 ①キャリアの再結合に直接起因する価電子帯と伝導帯が空間的に分布する様子を時々刻々

	<p>と局所的にマッピングし、キャリア再結合の原因究明に利用するために最新の計算ソフトを導入した。</p> <p>②超高時間、スペクトル分解能を有する測定装置を用いて、太陽電池デバイス中の電荷損失を定量的に解析し、高効率化へのボトルネックを明らかにするために時間分解能 P L 装置を導入した。</p> <p>(2020年度) 太陽光発電技術研究組合 19,800千円</p> <p>①SHGC測定の高精度化を目指して、光源の規格適合性と経時変化を評価する目的で広波長帯域分光器を導入した。</p> <p>②屋外発電量の評価並びに推定を高精度化するために屋外での垂直設置モジュールの発電量計測システムを導入した。</p> <p>③発電量の算定方法の選別や高精度化のための計測方法などガイドライン策定の議論をリードするために I E A のラウンドロビンで用いられると同等の垂直設置 B I P V の発電量評価システムを導入した。</p> <p>(2020年度) 学校法人早稲田大学 14,941千円</p> <p>①ホール輸送材料の探索、合成を加速するため、反応条件と精製を効率化するためリサイクル分取 H P L C を導入した。</p> <p>②パナソニック(株)と並行して素子の耐久性も早大ラボで評価するため、素子の封止に必要な機械器具を導入した。</p> <p>(2020年度) 株式会社カネカ(助成) 30,000千円</p> <p>既築向け P V モジュールの構造設計を新規技術開発するためにモジュール製造装置及び評価装置を購入した。</p> <p>(2020年度) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 20,000千円</p> <p>壁面設置 P V の高出力化に関する技術開発に関し、審美性や透光性の調整余地を増やして B I P V としての付加価値を高めるために、新たに線幅の小さいストライプセルの開発を実施計画に追加した。この開発を行うために、再現性良く精密にセルを切断することが可能なレーザースクライブ装置を導入した。また、斜入射光への反射損失低減技術の開発を新たに追加し、反射防止構造の開発を進めるため、断面観察等に必要となるイオンミリング装置を導入した。</p> <p>(2021年度) 学校法人早稲田大学 3,900千円</p> <p>ホール輸送高分子材料の探索・合成を加速するために重合度をインラインで分析しながら反応条件を効率良く決定が可能となるフロー合成サンプリングシステム付き分子量分布測定ユニットを導入した。</p> <p>(2022年度) 国立大学法人新潟大学 5,750千円</p> <p>タンデム太陽電池に特化したボトムセル試作の加速を図るため、再委託費を増額した。</p> <p>(2022年度) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 4,945千円増額</p> <p>壁面設置 P V の色調制御技術に関し、大面積の色調制御実装手法に関する技術開発に必要な装置導入と研究補助者の増員を行った。</p>
研究開発項目① (移動体用太陽電池の研究開発)	<p>(2020年度) 産業技術総合研究所(つくば) 12,012千円</p> <p>セレン化法で作製した出光興産製 C I S に G a A s 系トップセルを接合する技術の早期開発のため、シート貼り付け装置、P d 処理用専用プラズマ装置、電極形成装置(4インチ以上対応)を導入した。</p> <p>(2021年度) 豊田工業大学 1,931千円</p> <p>部分日影を考慮した太陽電池構造の最適化を前倒して実施するため、試作ラインの生産能力強化による試作量の増加を行った。</p> <p>(2021年度) 名古屋大学 6,625千円</p> <p>フラット基板に適用できる光閉じ込め構造技術の開発を加速するため、プラズマエッチング装置及び反射防止構造モールドなどの設備等を導入した。</p>
研究開発項目④ (動向調査等)	<p>(2022年度) みずほリサーチ&amp;テクノロジーズ株式会社 3,050千円</p> <p>I E A P V P S タスク 1 2 ( P V S u s t a i n a b i l i t y ) に参加し、太陽光発電のライフサイクル評価や持続可能性に関する情報、動向を収集する。併せて次世代型太陽電池の動向の最新情報を収集するための文献取得、およびライフサイクルデータベースの利用料が改訂に対応する。</p>

### 2. 3. 3 追加応募の実施

研究開発項目②の体制強化、技術開発の可能性検討の深化等を目的として、以下に記す3次の追加応募を行った。

傾斜地・営農・水上の各分野でのガイドラインの強化のため、多様なケースの実証実験を行い、より幅広いケースに対応できるガイドライン策定のための体制強化を目的とした追加応募を行った。採

採択審査委員会での審査を経て3件を採択した。

2020年度に実施したフィージビリティスタディ（FS）が完了したことを受け、需給調整力市場の運用に幅広く活用される太陽光発電の調整力創出に関する実証フェーズに向けた体制構築を目的として追加応募を行った。採択審査委員会での審査を経て1件を採択した。

2020年度に実施したフィージビリティスタディ（FS）により、翌日および翌々日程度先の日射量予測の最大誤差低減に向けた技術開発の要件を整理するとともに、技術開発の可能性について検討を行った。2020年度の成果を土台として、翌日および翌々日程度先の日射量予測を改善するための体制構築を行った。採択審査委員会での審査を経て1件を採択した。

研究開発項目④において、新市場（重量制約のある屋根、建物壁面等）における次世代型太陽電池の目指すべき実証イメージを明らかにすること、新市場のポテンシャル及び導入量の精緻化、発電コストの現状と次世代型太陽電池のコスト競争力の把握等、新市場展開に向けた課題整理に関する調査を行うこと、を目的とした追加応募を行った。採択審査委員会での審査を経て1件を採択した。

## 2. 4 研究開発の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

### 2. 4. 1 実用化、事業化に向けたマネジメント

研究開発項目④の動向調査を通して研究開発動向、市場動向を随時把握し、技術検討委員会／推進委員会でのマネジメントに反映させた。また、50機関以上ある事業者を訪問し、幹部や研究開発のキーパーソンとの技術戦略、事業戦略についての議論により、プロジェクト成果の実用化、事業化に向けたマネジメントを行った。

### 2. 4. 2 実用化、事業化につなげる戦略

○研究開発項目①では、新市場（重量制約のある屋根、建物壁面等）に適した太陽電池モジュールの開発、ガイドラインの策定を行うため、企業（技術研究組合を含む）を核とした産学官のコンソーシアムを形成して、実用化に必要な要素技術の確立および低コスト・高効率・高耐久性を満たす製品技術の開発を一体で行うことにより2030年の事業化を目指す。また、建物壁面分野で実証事業に取り組むことにより、事業化に向けた課題の抽出と対策を行う。

○研究開発項目②、③では、太陽電池モジュールのリサイクル技術や安全ガイドライン、系統影響緩和、日射量予測、性能評価等、従来の太陽光発電設備が抱える課題を解決する技術開発を産学官で推進することにより、社会的利用が開始されるための強固な土台を構築することを目指す。また、上記技術の実証事業を実施することにより早期の実用化・事業化を目指す。

○シリコン系太陽電池に対抗しうる太陽電池として有望視されるペロブスカイト太陽電池（単接合型）に関しては、「グリーンイノベーション基金／次世代型太陽電池の開発」への発展的移行により開発・製品化・市場開拓を早期・着実に進めるために、産学官の連携した開発体制を構築することに加え、開発事業者と住宅メーカー・ゼネコン等のエンドユーザに近い事業者との連携体制を構築する。

### 2. 4. 3 知財戦略・標準化戦略

連携体制に基づき、研究開発項目、或いは連携チーム内で知財合意書を締結させるとともに、データマネジメントプランを策定させ、各々の研究開発に即した知財戦略、及び発明委員会の設置など管理方法について規定した



### 3. 情勢変化への対応

- 研究開発項目④の動向調査を通して研究開発動向、市場動向における情勢変化を把握し、基本計画・実施方針に反映することにより、研究開発の効率向上、開発目標の改定をマネジメントした。
- 2021年12月に「グリーンイノベーション基金／次世代型太陽電池の開発」事業（以下、G I 基金事業とする）が採択され、ペロブスカイト単接合型の太陽電池の開発および実用化・事業化はG I 基金事業に移行することになった。このため本事業において、2022年2月にエネコートテクノロジー株式会社、2022年5月に株式会社東芝、国立研究開発法人産業技術総合研究所、および積水化学工業株式会社が契約を終了した。また、国立大学法人京都大学および国立大学法人東京大学については、上記機関の移行内容を踏まえて多接合型ペロブスカイト太陽電池の研究開発に取り組むこととした。
- 出光興産株式会社より研究開発中止の申し入れを受けた。軽量基板でのC I S太陽電池の形成、軽量性を活かした工法の開発など一定の成果が得られたが、量産時を見据えたコスト（歩留まり含む）や従来型太陽電池との市場での競合性に鑑み、優位性を堅持した事業とする見通しを得難いとの判断に基づくものである。出光興産株式会社との協議の上、研究開発期間を2021年9月までと短縮し、研究テーマを完了させることとした。コンソーシアムを形成している大学・国立研究開発法人については、引き続きサンプル提供などの連携を継続するとともに、技術の集約の場を移行して研究開発を継続している。
- 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術の実用化・事業化に向けて、土台となる分離・マテリアルリサイクル技術の深化および確立、目標とするコストの検証など確立された技術の実証、およびリサイクル材料の用途開拓など、実用化に向けた取り組みを推進するため事業期間を3年間から4年間に延長した。

#### 4. 評価に関する事項

##### 【事前評価】

評価実施時期：2019年度

評価手法：内部評価

評価部門：評価部、戦略技術センター

評価内容：事前評価

### Ⅲ. 委託テーマの成果詳細と実用化・事業化見通し

#### 1. 事業全体の成果

研究開発項目①では、新市場（重量制約のある屋根、建物壁面等）で求められる要件を満たす太陽電池モジュール（ペロブスカイト、C I S、Ⅲ-V化合物、結晶シリコン；上記の多接合型を含む）の実用化・事業化に向けた研究開発において、各々の分野で設定した中間目標を達成すべく、企業を核とした産学官連携の下で研究開発を行った。フィルム型超軽量太陽電池の開発では、フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール（30cm角）の変換効率で世界記録15.1%を獲得するなど大きな成果を上げた。また、耐久性向上に関しても進展があった。壁面設置太陽光発電システム技術開発では、ペロブスカイトーペロブスカイト多接合型（ペロブスカイトタンデム）で変換効率と耐久性の顕著な向上が達成された。また、B I P V市場拡大に向け基盤技術の開発とガイドライン策定で進展があった。移動体用太陽電池の研究開発では、ペロブスカイトーシリコン多接合太陽電池で世界有数の変換効率 $> 28\%$  ( $1\text{cm}^2$ )を達成した。また、低コスト化に向けた装置の検討が進められた。

研究開発項目②では、安全性・信頼性確保技術開発において、発電設備の安全性を確保するため、ガイドラインの作成等の基盤整備を実施した。太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発において、低コストかつマテリアルリサイクルに資する高い資源回収率を両立する分離処理技術を開発するとともに、実証プラントを構築して実モジュールサイズで検証を行った。系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証において、系統連系における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証を行った

研究開発項目③では、新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発において、標準化や規格化が進んでいない新型太陽電池等の出力等の性能を正しく評価するための測定技術を開発した。発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発において、現在を起点に数時間先の1km四方程度のエリアの日射量を予測する技術の開発および評価を実施した。

研究開発項目④では、移動体用太陽電池の動向調査（海外、国内）、リサイクル関連の動向調査、次世代型太陽電池を含む太陽光発電の動向調査及びI E A P V P Sの国際協力活動への参加、情報収集、活動提案を行った。上記で得られた知見を基本計画・実施方針へ反映することにより、研究開発の効率向上、開発目標の改定につなげた。

以下に研究開発項目ごとの主要成果について示す。

#### 研究開発項目①「太陽光発電の新市場創造技術開発」

##### 1) フィルム型超軽量太陽電池の開発（重量制約のある屋根向け）

C I S系太陽電池およびペロブスカイト太陽電池をプラットフォームとして、重量制約のある屋根に適用可能で、高効率、高耐久性、コスト競争力を有するフィルム型超軽量太陽電池の開発を行った。

「多様な基板に適用可能な軽量C I S太陽電池製造要素技術の開発」において、単セル構造へのモジュール構造の変更により、低電圧化が可能となり、太陽光発電システムの低コスト化寄与する可能性が確認された。太陽光発電システムの軽量化については、工期に制約がある屋根向けにモジュールの軽さを活かした新規工法を開発し、従来工法と比べて半分の工期で完工できる高速施工法の開発に成功した。高効率化の研究開発については、ガラス基板で開発された高効率化技術を金属基板へ適用することで、大面積（90cm×120cmサイズ）でのモジュール変換効率14.9%（産総研測定）を達成した。

「多様な基板上で実現可能なC I S太陽電池高効率化要素技術の研究開発」においては、出光興産製のC I S太陽電池に対して、特に光吸収層／バッファ層界面の分析評価を進めるとともに、産総研製のC I S太陽電池との比較評価を行った。T E M - E D X分析により得られたZ n系バッファ層の膜厚評価の結果等を参考に界面構造の制御を実施し、C I S光吸収層表面の銅欠乏相とアルカリ金属効果の相関性を突き止めた。得られた知見を超軽量フレキシブルミニモジュール（集積型10cm角程度）に応用し、世界最高となる変換効率18.6%を達成

した。また、外部発光量子効率（ERE）測定による評価技術を確認すべく、装置の立ち上げを行った。産総研製CIS太陽電池を測定したところ、ERE $\sim$ 0.396%が得られ、中間目標であるERE $\sim$ 0.3%を上回る値が得られた。

「ヘテロ界面制御による新型バッファレスCIS太陽電池の開発」においては、出光興産製のCIS太陽電池に対して、低コスト化ならびにバッファ層の役割解明を目指し、温水への浸漬、アンモニア水への浸漬、酢酸亜鉛を溶かしたアンモニア水への浸漬などの表面処理を行ない、Zn(O, S, OH)<sub>x</sub>バッファ層を製膜したサンプルと、表面処理のみのサンプルとの比較を行なった。その結果、アンモニア水に浸漬したサンプルにおいて、バッファ層を設けずに変換効率18.6%が得られ、表面処理後にi-ZnO/n-ZnO:B構造の透明導電膜(TCO)を設けるだけで高効率なCIS太陽電池が得られることを明らかにした。また、出光興産製のCIS太陽電池を用いて電子線励起電流(EBIC)法による光吸収層断面の電子収集効率を評価し、変換効率20%台を示すCIS太陽電池と同等の収集効率を示すことを見出した。

「CIS太陽電池のドライプロセスによる高品質接合界面構造の開発」においては、出光興産製のCIS太陽電池のデバイス内再結合分離解析を行い、バッファ層/CIS界面、およびCIS空乏層内での再結合に大きな改善の余地があることを明らかにした。また、出光興産製のCIS基板を用いて、大気中で130°Cのアニール処理6時間を施すことで、表面改質を行った。その結果、開放電圧のロスを低減させることに成功し、アニール処理の無いもの(効率10.6%)に対して、効率15.7%まで改善することに成功した。さらに、再結合分離解析を行うことで、バッファ層/CIS界面における再結合係数を1/6程度に低減できることを明らかにした。

「高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの技術開発」においては、Pb-Sn混合ペロブスカイトを用いたp-i-n型太陽電池で、独自の表面パッシベーション技術により、23.6%の光電変換効率を達成した。また、開発した単分子正孔回収材料を用いたPb系のp-i-n型太陽電池で、23.0%の光電変換効率と連続光照射条件下(MPPT、>100h)でも高い安定性が得られることを見出した。封止技術については、フィルム封止ガラス基板セルにて60°C/90%RH恒温恒湿試験における1,000h後の初期特性維持率85%以上を達成した。85°C/85%RH恒温恒湿試験については、ゲッター剤を導入することで、耐久性向上の効果があることを確認した。フィルム化、集積化については、レーザーパターニング条件の最適化を進め、7.5cm角フィルム10段モジュールにて変換効率14.6%を得ている。さらなる大面積化、モジュールの高効率化に向けて、ダイコーター、インクジェット、ディスペンサーでの大面積塗工の開発を進めている。低コスト化については、Agスパッタプロセスの開発により、Au蒸着等同等の初期性能を得た。また、印刷可能な透明導電性薄膜材料として、酸化物ナノ粒子の合成(M-In-Sn-O(ITO), M-SnO<sub>2</sub>)を実施し、合成のプロセスを確認した。

「ペロブスカイト太陽電池の新市場創造に向けた高効率化材料技術と製造技術の開発」においては、フレキシブル基板デバイスの面積拡大に向けてプロセス条件を調整し、小面積セル効率21.4%の材料を用い、有効面積2.76cm<sup>2</sup>のフレキシブル3直列モノリシックミニモジュールで効率20.4%を得た。また、トップセル向けワイドギャップペロブスカイトをダイコーターで大面積製膜するとともに、トップセルのグラフェントネル接合層上への作製プロセスを構築した。ボトムセル用SnPb混合ペロブスカイトセルは正孔輸送層を改良し、高温耐久性が向上した。

「界面制御による高性能化技術と性能評価技術の開発」においては、これまで開発したペロブスカイト層とホール輸送層との界面修飾材料を進展させ、自己組織化単分子層として正孔輸送機能を有する界面制御材料を開発し、塗布プロセスによる逆構造セルにてPTAAよりも開放電圧とフィルファクターを向上させ、変換効率を約2割向上(効率17.9%)させた。また、界面再結合の評価技術開発ではJ-V特性、EQEスペクトル、再結合発光の量子収率を組み合わせ、輻射再結合・無輻射再結合損失を定量評価する技術を確認した。さらにPSCモジュールの屋外暴露試験を開始した。他方、デバイスシミュレータを用いた最適デバイス設計を検討し、シングルセルにおいてペロブスカイト層のキャリア拡散長が10マイクロメートルかつバンドギャップ分布を二段階傾斜構造とすることで効率29.9%が達成可能であると試

算した。

「超軽量モジュール技術の研究開発」においては、中間目標であるフレキシブル基板30cm角の大面积モジュールにて変換効率18%実現に向け開発を進めた。大面积・高効率化を実現するために、大面积塗布技術の改良、塗布プロセスの最適化などを実施し、フレキシブル基板30cm角モジュールにて変換効率16.6%(自社測定)を観測した。また、さらなる高効率化のために、インク組成や層構造の最適化などの要素検討を実施し、フレキシブル基板5cm角モジュールにて変換効率19.6%、0.5cm<sup>2</sup>セルにて変換効率21.1%(自社測定)を観測し、中間目標実現に向けて技術的な目途を得た。

「ロールトゥロール製造技術の研究開発」では、新規の界面材料を適用することにより、全工程ロールトゥロールで製造した受光部2mm角のミニセルの変換効率を16.4%から18.6%まで向上させた。さらに塗工工程の乾燥プロセスを最適化することにより30cm角程度の超軽量太陽電池モジュールの変換効率を13.2%から14.7%まで向上させた。また幅広化によるスクライブ工程での課題抽出を進めるために、1m幅パターンニング装置を導入した。

## 2) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

地上設置に比べ日射量が少ないことでの経済性確保が困難である、建築物の寿命に対し太陽光発電設備の寿命が短い、周辺の構造物と親和性が図れる外観を満たさない等から適用事例は限られる等の課題を解決するため、ペロブスカイトを用いたタンデム太陽電池(ペロブスカイト/ペロブスカイト、ペロブスカイト/シリコン)、ペロブスカイト/量子ドット太陽電池等を用いた壁面設置太陽光発電システム技術開発を行った。また、普及促進に必要となる規格・標準等に資する基盤技術の開発、建築物として受け入れられる外観を持つ太陽光発電システムを建築物壁面へ大量設置する実証を行った。

「ビル壁面開口部向けシースルー太陽電池の開発」において、キャリアの逆流抑制に向けたコアシェル型量子ドットの合成及び評価、価電子帯準位の低い量子ドット(QD)の開発、ワイドバンドギャップペロブスカイトベースセルの性能改善、QD複合化中間バンドセルの性能改善、耐久性評価系の構築等を行った。また、QDセルにおける光閉じ込め構造や赤外コロイドQDインクによる緻密QD層を開発し、LBIC・PL複合評価装置を構築した。加えて、コアシェル型QDのDFT物性計算と逆設計を行い、強化学習を用いた中間バンド太陽電池の光閉じ込め構造設計を実施した。

「壁面設置(非開口部)タンデム太陽電池モジュールの開発」においては、2端子型ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池で概ね20%の変換効率を得た。発電量の試算により、当該太陽電池の南面設置の優位性を示した。高照度条件下での屋外EL撮像に成功した。高温高湿下での窒化シリコン膜の高い安定性を確認した。タンデム太陽電池モジュール化時の温度や部材の要件を明確化した。モジュール化したペロブスカイト試料のキャリア寿命測定に成功した。酸化マグネシウム膜による放熱効果を確認した。

「開口部向けペロブスカイトBIPVモジュールの開発」においては、ペロブスカイトタンデム用のトップセル/ボトムセル製膜プロセス、界面処理技術を開発し、トップセルで効率15.8%、ボトムセルで効率21.3%を達成、四端子タンデムセルで20.8%の変換効率を確認した。また、ミニモジュールにおいて、耐熱性と耐光性の両立の見通しを得た。さらに要素技術として、新たに合成した15種余りのトップセル用ホール輸送ポリマーから無ドープで13%超を示す3種を選定し、また800nm厚みのペロブスカイト層の塗布法を確立した。

「壁面設置太陽電池モジュール(非開口部、開口部)の開発」では、非開口部太陽電池にて、開発した配線が視認できない構造で、高温高湿保存試験でIEC規格5倍相当の5000時間を確認した。開口部太陽電池を製作し、可視光透過率20%換算で、モジュール効率10%以上を達成した。開口部太陽電池用セルの高効率化を進め、セル(40mm×5mm)効率で16.6%(事業目標換算効率:16.9%以上に対して)を得た。色調制御に関し構造色技術により、複数の色相で角度依存性が緩和できる可能性を確認した。

「壁面設置太陽光発電システム市場拡大のための共通基盤技術の開発とガイドライン策定」においては、以下の4項目に取り組んだ。①壁面PV設置用の設計・設置ガイドラインの目次案を作成し、執筆を開始。屋外暴露中の着色PVモジュールの発電量データ取得及び設置半年後の外観確認を実施。②日射熱取得率装置の設置を完了。複数の夏条件、冬条件でのデータを

取得し、結露対策、気密維持対策などの改良を実施。また、北杜市にて垂直に設置した5種類のモジュールの屋外曝露の評価データを取得し、データ分析を実施。③海外での建築物設置PVの信頼性、安全性に関する基準、規格の調査実施。④IEATask15への参加。報告書の国内紹介。国内外の景観に関する条例、規制の壁面PVへの制約、影響調査の実施。

「デザイン性を考慮した後付け可能な新築・既築向けBIPVシステムの実証」では、PVロールスクリーンシステム（PVロールスクリーン、駆動部装置、充放電回路）の開発が完了し、既に製作フェーズに入っている。PVロールスクリーンは、デザイン性も考慮し、カラーモジュールにも対応している。現在実現しているカラーバリエーションは、紫（PVセルカラー）、青色、緑色、茶色、黄色、白色、銀色、薄銀色の計8色である。

「ZEB達成に向けた同時同量を実現する太陽光発電システムの実証」では、東京大学先端科学技術センター壁面を活用した太陽電池設置実証内容について、取付太陽電池種類・設置方法・電気システム等の具体的な内容を協議し、実証システムの基本設計まで完了した。また、広角化技術を活用したモックアップサンプルを作製し、東京大学先端科学技術研究センター門扉へ設置して周辺住民に意匠性に関するアンケートを行った。

### **3) 移動体用太陽電池の研究開発**

III-V化合物/シリコンおよびCIS構造、ペロブスカイト/シリコン構造のタンデム太陽電池をプラットフォームとした低コスト、高効率で曲面追従性を有する太陽電池モジュールの開発を行った。

「超高効率モジュール技術開発」においては、移動体用途向けに曲面設置可能なモジュールで、多接合型構造による変換効率33%以上の高効率化技術開発、200円/W（GW量産時）を達成するための製造装置開発実証を目指し、①高効率・曲面モジュールのための、ボトムセル（SiおよびCIS）およびIII-V化合物2接合トップセル高効率化検討、4端子型モジュール設計、②III-V化合物セル低コスト化のための、基板再利用工程および量産化を想定した装置の要素技術開発、低コストエピタキシャル成長（HVPE）技術によるセル試作（>28%達成）およびHVPE量産型成膜装置の設計検討、スマートスタック技術による高効率セル試作、③曲面モジュールの特性評価および発電量評価に取り組んだ。

「次世代モジュール技術開発」においては、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において、シミュレーション技術を活用したタンデムセルの構造設計および要素セル（トップセル、ボトムセル）の高効率化技術開発を実施した。また、ボトムセルを用いた曲面モジュールの試作を行い、屋内外での特性評価における測定系を構築および測定の妥当性を検証した。また、実用サイズタンデムセルに対応したペロブスカイト層および電子・正孔輸送層の材料ならびに成膜技術を構築するとともに、ペロブスカイトセルの高開放電圧化及び変換効率の向上を進めた。

## **研究開発項目②「太陽光発電の長期安定電源化技術開発」**

### **1) 安全性・信頼性確保技術開発**

安全性に係る基盤整備に関しては、発電設備の安全性を確保するため、ガイドラインの作成等の基盤整備を実施した。知見の不足する項目については、必要に応じて実証実験等を実施した。信頼性評価技術、信頼性回復技術の開発では、太陽光発電設備の長期安定運用に資する、信頼性評価技術、信頼性回復技術または両者を併せ持った技術の開発を行った。なお、当該技術は既存の小規模発電設備（50kW未満）に採算性を含めて適用可能な技術であり、多様化が進む設置環境においても適用が期待できるものであることを要件とした。

「高安全PVモジュール、高安全PVシステムの技術基準案の策定」においては、①「最先端のPVシステム診断技術の技術基準の検討」では、BPD故障診断技術などの新規技術開発を行い、従来法に対する優位性を確認するなどの成果を得た。また、技術基準を策定すべき診断技術候補をリストアップするとともに技術基準素案の策定を開始した。②「ビッグデータ活用手法の検討」では、中小PVの安全性に資するユースケースを重点的に調査し、現状を把握するとともに課題抽出と対応策提言を行った。③「太陽電池モジュールの火災安全設計技術の開発」では、モジュール火災発生メカニズム解明に注力しており、屋外実証試験で火災起因と

なるアークを強制的に発生させることが可能となった。また、予兆の可能性などの有力な知見を得た。

「特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定」においては、傾斜地設置型、営農型、水上設置型の設計・施工ガイドライン(2021年版)を策定、公開をした。実証実験として、(i) 傾斜地設置型ガイドラインの策定に関する積雪荷重の測定開始、風速増加の数値流体解析(CFD)の実施、(ii) 営農型ガイドラインの策定に関する遮光率等の異なるモデルの風洞実験を実施、(iii) 水上設置型ガイドラインの策定に関する実システムにおける係留索に作用する荷重の計測を開始、コネクタ水没試験の継続などを実施した。また、(iv) 傾斜地設置型、営農型、水上設置型ガイドラインの共通事項について、海外事例として英国、ドイツ、フランス、米国、韓国、台湾の規制の調査、事故事例についてヒアリングを実施、ガイドラインの周知のためのWEBによる説明会を開催した。

「傾斜地設置型並びに営農型太陽光発電施設を対象とした凍上対策ガイドラインの策定」においては、積雪寒冷地の傾斜地、営農地で使用が想定される布基礎と杭の実物大模型を施工することができた。また、杭については凍上対策として、置換工法を適用したケースも施工している。さらに、温度計、土圧計、荷重計といった各種の計測機器も埋設、基礎と杭の凍上・融解沈下挙動を明らかにすることを目的とした水準測量を開始し、凍結深さ、凍上力などの計測も併せて開始している。計測の結果、初冬の12月下旬頃から、凍結深さに対して十分な埋設深さが確保できていない浅い杭では、凍上が発生することが明らかとなった。

「太陽光発電の安全性・信頼性評価、回復技術の技術情報基盤整備」においては、(i) 事故情報調査、不具合メカニズム分析について、2017年から約2年間の保険事故情報にその後約1年半の情報を追加し整理し、個別事例の詳細分析、モジュールの耐風圧試験の実施等を行った。さらに、他の保険会社の事故情報の提供を受け、約800件の事例の統計的分析を行った。また、(ii) 有望技術の評価(構造)について、オンサイトによる非専門家による構造関係の情報収集ツール、杭の支持力をオンサイトで簡易的に診断・評価、地盤の締固め度測定、構造計算書の不備事項等確認リストの作成、地盤補強および表土洗堀防止技術に関する技術の調査を行った。(iii) 有望技術の評価(電気)について、発電性能分析に関して、現在テクニカルデューデリで発電特性評価方法、目視確認における限度見本について目視事例収集、アーク検知、遮断技術の実験、絶縁抵抗監視の予防保全に関する高抵抗領域の測定方法の検討を行った。さらに(iv) PV発電設備の評価・回復手法の技術情報および技術評価ガイド策定について、アウトプット資料の骨子の作成、太陽光発電の設計に係る図書を収集等、関連情報を収集した。

「太陽光発電の長期安定電源化に向けた評価・回復の実用化促進技術開発」では、基盤整備側との情報連携を行い、実用化技術開発が必要である「設計図面のない太陽光設備の現地での図面化」、「架台の補強」、「杭基礎の補強」に焦点を絞り進めることとした。

「次世代のO&Mを支える発電電力量評価等の技術開発」では、2022年度開始の本格的な実証に向けて、以下を実施している。(1) 主要な遠隔監視システムの仕様整理および遠隔監視システムCSVデータの自動ダウンロード用RPAの設定(10機種程度)、(2) 複数の発電所での発電電力量解析の実施とその結果の類型化、(3) 遠隔監視システムによる日常監視結果の深堀、人監視と自動監視の平行実施、(4) 遠隔でインピーダンス等を自動測定するための準備(発電電力量解析との比較検証用)、(5) 新検査用の検査項目・確認シートの作成とその試行(6) 上記の参考として市町村別落雷データの集計、パネルメーカー向けアンケート。

## 2) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

低コストかつマテリアルリサイクルに資する高い資源回収率を両立する分離処理技術を開発するとともに、実証プラントを構築して実モジュールサイズで検証を行った。

「結晶シリコン及びCIS太陽電池モジュールの低環境負荷マテリアルリサイクル技術実証」では、フレーム分離治具、パネルセパレータ装置、パネル破碎/剥離装置を使用してCISモジュールのリサイクル処理実証を実施し、2021年12月末にて6,929枚(1,247.2kw)の実績を得た。さらに市場から1,000台以上の結晶シリコンモジュールを回収し、それを元に各種マテリアルの用途開拓と必要なマテリアル品質を調査し、パネル分解コストとマテリアルリサイクル率が高次元にて両立する様に各々のモジュールに対応した分

解および選別方式を開発し、パネル重量構成比90%以上のマテリアルリサイクル率見込みを達成した。またPVマテリアルを応用したコンクリート2次製品開発において新たな知見を獲得、現時点にて2回の学会発表を行いPVマテリアルリサイクルコンクリートの認知を促進した。

「太陽電池モジュールの低温熱分解法によるリサイクル技術開発」では、処理コストのステータスとして3.76円/Wを達成した。今後の連続運転とバーナー性能UPにより処理時間を短縮させる。個々の研究開発項目の成果は以下のとおりである。

- ・分離技術の確立：各処理条件を決定し、1.5時間連続運転まで実施（3月には3時間連続運転を予定）。処理速度を12枚/hまで上げることができた。

- ・触媒の開発：触媒の種類や厚さ等の最適条件を決定した。

- ・リサイクル工程開発：回収コンベア、保温槽、排気ダクト、選別機（2月末）を導入し、連続運転が可能となる工程を完成した。

- ・省エネルギープロセス：モデルを用いて時間短縮効果を予測し、分離技術開発の仕様を決定した。

- ・マテリアルリサイクル：板ガラスメーカーから、熱分解処理後のガラスが、板ガラス材料としてプラントテスト可能であると評価された。また、金属回収メーカーから、セル、リボンが有価であると評価された。

### **3) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証**

太陽光発電による電力系統への影響を緩和するため、①太陽光発電による需給一体型システム構築上の課題抽出と対応方法の検討および実証、②系統連系における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証を行った。いずれの研究開発項目においても、効率的に研究開発を推進するため、基本設計またはフィジビリティスタディの後に、技術検討や実証実験等を行った。

「系統連系における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証」では、太陽光発電を調整力として活用するための技術開発として、2020年度に実施したフィジビリティスタディ(FS)の結果をもとに、新たに「太陽光発電による調整力創出技術の実証研究」の開発テーマを2021年度下期から開始した。2021年度においてはHeardroom制御方法の開発に向けて、単地点における制御方式について検討を行うとともに、当該制御における経済合理性評価の観点から、電力市場モデルの検討および最適計画アルゴリズムの検討を行った。また、次年度からの実証システムの実装に向けて、同システム構成の検討および既存設備を活用するための準備を実施した。

## **研究開発項目③「先進的共通基盤技術開発」**

### **1) 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発**

標準化や規格化が進んでいない新型太陽電池等の出力等の性能を正しく評価するための測定技術を開発するとともに、開発に資する基準太陽電池および校正技術を開発し、性能・信頼性・安定性を評価した。

「新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発」においては、新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発として、曲面太陽電池モジュールの性能評価測定を実施し、モジュール形状・照度分布を踏まえた出力特性の解析を行った。また、セル諸特性やセル接続、日射条件が曲面太陽電池モジュールの発電性能に及ぼす影響をモデル解析した。多接合型を含む各種新型太陽電池の性能評価測定技術の開発を進め、NEDO開発品等の新型太陽電池の高精度性能評価測定を実施した。屋外環境での高精度評価技術開発として、PVモジュール日射センサ(PVMS)を使用した太陽電池出力連続監視装置の開発を進め、高効率結晶シリコン系太陽電池アレイでの検証実験を実施した。屋内測定結果との比較等から、1%程度の僅かな出力変化を高13精度に検出できることを確認した。また、高効率結晶シリコン系太陽電池のPERCにおいて、夏季に特性が低下する高温光誘起劣化(LETID)を観測した。様々な新型太陽電池への適用に向けて、PVMSの性能仕様の検討と試作、モジュール測定システムの構築を進めた。基準太陽電池校正技術では、世界気象機構(WMO)が主宰する国際直達日射比較(IPC)に参



加し、世界標準器群（WSG）との差の大幅な改善（0.9%→0.1%）を実証した。また、太陽電池の分光感度特性の入射角依存性を高精度に評価するためのSCレーザを利用した光学系を開発した。

## **2) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発**

発電量の短期的な予測に向け、現在を起点に数時間先の1km四方程度のエリアの日射量を予測する技術を開発するとともに、その評価を実施した。加えて、現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発への可能性について検討した結果を踏まえて、現在から翌日および翌々日程度先の日射量予測の最大誤差低減に向けた技術開発を行った。

「日射量の短期予測に関する研究開発」においては、「ひまわり8号データを用いた短時間先の日射量予測技術の開発」に関して、2020年度に引き続き、予測技術検証のベンチマークとなるモデルを用いて改良前の予測精度を整理するとともに、計算環境の構築を行い、必要な入力データ・検証用データを収集・整理した。

## **3) 翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発**

「翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発」においては、「日射量予測に特化した気象モデル」、「複数機関の気象モデル予測値の統合」、「アンサンブル予報に基づく信頼度予測」の技術開発に関して、計算環境の整備・維持、解析で用いる気象モデル予測値等のデータ収集・整理、既往モデルの過去予測計算、および、ベンチマークの予測精度検証を実施した。さらに、パラメータ調整や予測手法の高度化検討を行った。また、「気象庁GPVを利用した日射量予測の特性分析」として、気象庁予報データの日射量予測結果を調査するとともに、アンサンブル予報データを入力とした機械学習モデルの検討を実施した。

## **研究開発項目④「動向調査等」**

本研究開発項目では移動体用太陽電池の動向調査（海外、国内）、リサイクル関連の動向調査、次世代型太陽電池を含む太陽光発電の動向調査及びIEA PVPSの国際協力活動への参加、情報収集、活動提案を行っている。

### **1) 移動体用太陽電池の動向調査**

「移動体用太陽電池の動向調査（海外を中心に調査）」では、IEA PVPS Task 17 (PV and Transport) 等への参加、文献調査等により、自動車等への太陽電池搭載に関する動向を調査した。IEA PVPS Task 17においては、プロジェクト議長を担当し、海外専門家との共著による技術報告書をIEA PVPS Websiteより公開した。また、今後の活動計画を作成した。「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」において、太陽光発電システム搭載自動車に関する情報の共有、今後の方向性に関する議論を行った。

「移動体用太陽電池の動向調査（国内を中心に調査）」では、移動体への搭載を目指した太陽電池の動向を調査、分析すると共に、今後の方向性を議論、展開することにより移動体分野の研究開発を加速することを目標に以下の3点を重点的に推進した。

①「国内におけるPV搭載移動体の研究機関、企業、利用者等を対象にした調査、分析」では、海外やトラックPVなどに裾野を広げた研究会を実施するなど、移動体PVコミュニティの拡大を行った。

②「国内におけるPV搭載移動体の普及に資するレジリエンスの定量評価、事例調査」では、災害時に車載太陽電池を活用することにより生じるメリットを定量評価するためのシミュレーションを開始し、災害時に必要な太陽電池搭載車台数の導出などの定量評価を行った。

③「車載太陽電池の信頼性評価に資する技術検討」では、車載部品の評価規格の調査を行うとともに、車載用曲面PVモジュールの応力解析（実験と計算）などの信頼性に関わる技術開発を行った。本研究開発項目では移動体用太陽電池の動向調査（海外、国内）、リサイクル関連の動向調査、IEA PVPSの国際協力活動への参加、情報収集、活動提案を行っている。

## 2) リサイクル関連の動向調査

「太陽電池モジュールのリサイクルに関わる調査」では、太陽電池モジュールのリサイクルに関わる国内の最新動向（技術開発動向、政策動向、実施事例等）の定点観測として、文献調査、ヒアリング調査により、最新情報を取りまとめた。太陽電池モジュールのガラスの再利用の状況については、ガラスの再利用先を対象としたヒアリング調査を実施するとともに、太陽電池モジュール由来ガラスに関するグラスウールを採りあげ、その受入条件・ポテンシャルを確認するために関係者で構成されるワーキンググループを立ち上げ、受入基準（第一版）を作成した。公表情報をベースに、太陽電池モジュールの災害時の排出量に関する定量情報を整理した。使用済太陽光発電設備の排出量予測の更なる精緻化に向けて、文献調査に基づき導入量・排出量予測の更新を行った。

「太陽電池モジュールの適正処理に関わる調査」においては、2020年度に実施したアンケート調査の結果を分析し、適正処理の推進に向けて、解決すべき課題や制約要因を把握した。IEA PVPS Task 12 (PV Sustainability) への参加等を通じ、海外における太陽電池モジュールの適正処理の現状や課題について情報を収集した。以上の結果に基づき、太陽電池モジュールの適正処理の円滑化に向け、考えられる使用済み太陽電池モジュールの回収・運搬パターンの整理、その効率化に資するモデルの作成と特徴・課題の整理を行い、将来モデルの検討を行った。

## 3) 太陽光発電の動向調査

「太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査」では、技術動向に関し太陽光発電の主要国際会議（IEEE-PVSC、EU-PVSEC、PVSEC）等にオンラインで参加し、重点分野（①フィルム型軽量太陽電池、②壁面設置太陽光発電システム、③太陽光発電の安全性・信頼性確保、④太陽光発電の系統影響緩和、⑤新型電池の評価と日射量予測）を中心に、新たな市場展開に繋がる技術についても幅広く情報収集した。市場・産業については、海外では欧州連合、ドイツ、米国、中国および世界全体、また国内の状況について、導入量、価格、発電コスト、市場規模等について調査した。また海外の研究機関、産業団体等から発表された市場予測等を分析した。

「国際技術協力プログラムへ参画」では、IEA PVPSタスク1の協力活動に参画した。タスク1の成果物であるSnapshot Report及びTrends Reportの制作に参画したほか、日本における太陽光発電の動向を分析・調査し、National Survey Report Japan 2020（2020年の動向の詳細報告）及びAnnual Report 2021（2021年の動向のまとめ）を作成し、提出した。オンラインで開催されたタスク1専門家会議に参加し、日本の最新動向を報告するとともに、各国の太陽光発電の動向を調査した。さらに、タスク1副OA（副代表）として、執行委員会会議に参加したほか、執行委員会の下で参加を要請された、情報の普及及びタスク活動の枠組み、タスク1で収集する情報のデータベース化及び統計情報の整合性に関するワーキンググループのオンライン会議に参加し、今後のIEA PVPSの全体的な活動に関わる審議に貢献した。このほか、タスク1が欧州太陽光発電国際会議（EU-PVSEC 2021）の併催イベントとして開催したワークショップにおいてタスク1成果物に関する講演を実施したほか、国内外の太陽光発電に関するシンポジウム等で招待講演を行った。

「次世代型太陽電池の新市場への導入・実装に向けての動向調査」においては、重量制約のある屋根・建物壁面に関する業界ヒアリング調査方法の検討を行った。次世代型太陽電池（ペロブスカイト太陽電池等）の国内外の開発・技術動向の調査および、従来型太陽電池サプライチェーンの実態調査と分析を実施した。次世代太陽電池の導入見通しの方法検討および各種統計調査を実施した。また、発電コストや製造コストに関する情報、エネルギー・ペイバック・タイムに関する前提条件等の情報について各種文献から調査した。また、発電コストの試算・感度分析のためのツールを更新した。

2. 研究開発項目毎の成果と実用化・事業化見通し

(イ) 新市場創出技術開発

(i) 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)

【A CIS 太陽電池のドライプロセスによる高品質接合界面構造の開発】 (学校法人立命館 立命館大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
CIS 太陽電池のドライプロセスによる高品質接合界面構造の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ CIS 太陽電池のデバイス解析を実施し、FF 制限要因を明らかにする。</li> <li>・ 高品質な接合界面構造を開発することで、従来に対して 0.02 以上高い FF を実現できる接合界面構造を開発する。</li> <li>・ 小面積セル (1cm<sup>2</sup> 程度) において Voc × Jsc 値で 26.8mW/cm<sup>2</sup> 以上、効率で 22% 以上を達成し、産総研が開発する 10cm 角程度の超軽量ミニモジュールで、効率 19% 以上の達成または達成見通しを得るための要素技術を確認する。</li> </ul>	<p>CIS 表面の改質処理を開発した。従来の減圧下による長期間 (数カ月単位) の改質処理ではなく、大気下で 130℃、6 時間の熱処理を行うことで表面改質を行った。本改質技術に加え、セル構造として (Zn, Mg)O 系のバッファ層、透明電極層の材料組成と成膜条件を最適化することで、オーロドライプロセスで効率 16.7% を達成し、従来構造 (17.1%) に対して 98% の性能を実現した。</p>	△	CIS の高品質化と上記の高品質接合界面構造の形成技術を高度化させることで、達成できる見込み

\* 1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、○ : 達成、△ : 達成見込み、× 未達

【B ヘテロ界面制御による新型バッファレス CIS 太陽電池の開発】 (国立大学法人東京工業大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
ヘテロ界面制御による新型バッファレス CIS 太陽電池の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現行の ZnO と同程度のシート抵抗を有しながら、ZnO の電子親和力より小さな電子親和力を有する新規透明導電膜を開発する。</li> <li>・ 開発した Zn-Ge-O 透明導電膜を産総研が開発する超軽量ミニモジュールに適用し、変換効率 19% 以上の達成または達成見通しを得るための要素技術を確認する。</li> <li>・ EBIC 評価により、出光興産が開発する軽量モジュールの pn 接合界面から CIS/Mo 裏面界面に至る断面の電子収集効率プロファイルを明確にし、デバイス解析と合わせて変換効率および FF 制限要因を明らかにする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 有機金属気相成長法による Zn-Ge-O 透明導電膜の作製技術を確認した。Ge 組成 8.1% の Zn-Ge-O の電子親和力は 4.06eV であり、ZnO の電子親和力 4.35eV よりも小さく、新規透明導電膜開発に関する中間目標を達成した。</li> <li>・ 産総研が開発する超軽量モジュールへの Zn-Ge-O 膜の適用に関する検討を開始、2022 年 6 月時点で順調に進捗している。</li> <li>・ 出光興産が開発する軽量モジュールの EBIC 評価技術を確認した。断面 EBIC プロファイルの膜内分布が均一であることを明らかにするとともに、EBIC 強度は三段階法あるいは出光興産のガラス基板 CIGS モジュールと比較して遜色ないことを示し、電子収集効率評価に関する中間目標を達成した。また軽量モジュールの透明導電膜評価を行なったところ、FF 制限の一要因が透明導電膜の抵抗率にあることを明らかにした。</li> </ul>	○	—

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×未達

【C 多様な基板上で実現可能な CIS 太陽電池高効率化要素技術の研究開発】  
(国立研究開発法人産業技術総合研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度* 1	今後の課題と解決方針
多様な基板上で実現可能な CIS 太陽電池高効率化要素技術の研究開発 (産業技術総合研究所)	小面積セルにおいて外部発光量子効率 (ERE) 0.3%、曲線因子 (FF) 0.82 達成を目指すとともに、10cm 角程度の超軽量ミニモジュールで変換効率 19%以上の達成、または達成見通しを得るための要素技術を確認する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>ERE は 0.367%@15mA を達成し、中間目標値をクリアした。</li> <li>FF は 0.81 を達成し、中間目標値の達成に向け、2022 年 6 月時点で順調に進捗している</li> <li>10cm 角程度の超軽量ミニモジュールで 18.64%を達成しており、2022 年 6 月時点で中間目標の達成に向けて順調に進捗している。</li> </ul>	○	—
電氣的・光学的欠陥解析による軽量 CIS 系太陽電池開発支援 (筑波大学)	CIS 系薄膜太陽電池の欠陥準位分布が、再結合機構、ならびにデバイス特性 (FF や開放起電圧) に与える影響を、定量的に明らかにする。	放射再結合式を用いたエネルギー損失の解析を実施し、開放起電圧約 100 mV の損失に界面ならびに空乏層再結合成分がかなりの割合で含まれていること、また、SUS 基板試料はガラス基板試料とほぼ同等のバルク特性、かつ界面が比較的優れることを明らかにした。	○	—
界面・バンドプロファイル評価による CIS 系太陽電池高効率化技術開発支援 (鹿児島大学)	CIS 系薄膜太陽電池の欠陥準位分布が、再結合機構、ならびにデバイス特性 (FF や開放起電圧) に与える影響を、定量的に明らかにする。	CIGSSe 裏面/Mo 電極界面のバンド接続を決定し、モジュールを縦貫するバンドプロファイルを決定した。	○	—

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×未達

【D 多様な基板に適用可能な軽量 CIS 太陽電池 製造要素技術の開発】（出光興産株式会社）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
軽量モジュールの低コスト化	多様な基板や封止材を検討、低コストかつ軽量化実現。 50円/W以下。	原材料費の大半を占める基板及び表面材の選定を実施。軽量化は僅かであったが、原材料費は大幅な削減を実現。 コスト47円/W	○	—
太陽光発電システムの軽量化	架台込みモジュール重量7kg/m <sup>2</sup> の見通しを得る。	大波スレート屋根向け、陸屋根向け防水シートを開発。大幅な軽量化を実現するとともに材料費、工事費の削減を達成。 大波スレート屋根向け：7.3kg/m <sup>2</sup>	○	—
p-nヘテロ接合の高品質化による高効率化	30cm角以上の大面積モジュール変換効率18%以上。	ガラス基板で開発された高効率化技術を金属基板へ適用、90×120cmの大判サイズでのモジュール変換効率を14.9%まで改善。 30cm角サイズでの、17%に相当。	△	更なる面内分布の改善等

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成 ○：達成 △：達成見込み

補) 高効率化についての課題と対策

現在の試作レベル（10枚程度/日）サンプル製造から、安定かつ連続的な基板流動させている中でのプロセス調整・最適化が課題であり、現状の試作ラインを本格的に改造し、大量流動させることで対応可能。

【E 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの研究開発】（シャープ株式会社）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と検討方針
① 高精細/高自由度パターンニング技術開発	フィルム基板上30cm□サイズでのプロセス確立。モジュール変換効率18%	・大面積・フィルムを想定したセル構造とプロセスの選定評価と性能検証を実施。フィルムセル変換効率13.8%。 ・モジュール作製プロセスにおける性能影響要因を明確化。加工条件の最適化を図り、30cm□高性能モジュールの試作検証中。 ・大面積対応塗工機で均一塗工手法を検討、ペロブスカイトの良質膜形成の課題抽出。	△	・大面積の成膜・加工に適した環境、処理条件制御システムの整備構築を推進。 ・フィルム基材・表面処理の改善による性能底上げ。
② 高信頼性封止技術及び信頼性評価技術開発	製造コスト35円/W、信頼性10年の見通しを立てる。	・各種セル構造でのコスト試算。 ・セルと封止部材の耐水分性能への影響要因の切り分けと改善。 ・85℃85%RH、1000hで変換効率最高値から17%劣化。	△	封止条件の適正化とセル自体の高耐久構造(層)導入により耐久性改善の見込み。
③ 軽量屋根向け高自由度設計モジュール開発	モジュール重量5kg/m <sup>2</sup> のモジュールデザイン提示	・施工性、メンテナンス性を考慮した軽量化モジュールデザイン的设计。	△	貼り付け施工に適したモジュールのデザイン化。

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成（あるいは2022年9月頃に達成が確実に見込まれる）

△：達成見込み（2022年度末までに達成が見込まれる）、×：未達

【F 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池のモジュール化要素技術研究開発】(株式会社エネコートテクノロジーズ)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
電極材料開発	スパッタ法での裏面電極等より、製造コスト35円/Wの見通しを立てる。	セル・モジュールにて蒸着/スパッタ品で同等性能を確認。ターゲットコスト 1/10 程度となる複数種スパッタ材料での比較を進め、有力候補材料を絞り込み。	△	スパッタ電極材料を用いたモジュール化検証および耐久性試験
ホール輸送材料 (HTM) 開発	最適 HTM で 10 cm 角モジュール効率 18%達成。	従来 HTM の塗布条件の最適化にて、7.5cm 角 10 段ガラス/フィルムモジュールにて 19.2/16.9%を達成。新規単分子膜ホール輸送性化合物の検証を実施し、ガラス基板ミニセルで 19.8%、3.8cm 角ガラスモジュールにて 13.0%を確認。	△	新規材料検討や膜厚等の最適化、大面積塗工条件の検討
塗工技術開発	各層材料の最適塗布条件を確立し、10 cm 角モジュール効率 18%達成。	自動スピコートシステムでの塗布を開始し、各層材料の塗布条件最適化を実施。7.5cm 角 10 段ガラス/フィルムモジュールにて 19.2/16.9% を達成。10cm 角ガラスモジュールの試作に着手し、13.9%を確認。ダイコートによる大面積塗工、二段階法の検証を開始し、ガラス基板セル 16.5%を確認。	△	ペロブスカイト材料組成検討、電子輸送層や正孔輸送層の新規材料検討や膜厚等の最適化
パターンニング技術開発	最適材料の塗布技術開発及び微細パターンニング技術の開発により 10 cm 角モジュール効率 18%を達成。	7.5cm 角 10 段ガラス/フィルムモジュールの作製にて、レーザー加工による各層パターンニングの最適化を進め、セル間接続の仕様を検討。7.5cm 角ガラス/フィルムモジュールにて 19.2/16.9%を達成。10cm 角モジュールの仕様検討、ガラスモジュールにて 13.9%を確認。	△	モジュールデザインの最適化および、さらなる微細パターンニング技術の確立
封止技術開発	封止フィルムあるいは封止材料製膜技術により、1 cm 角フィルムセルで信頼性 10 年達成。	ガラス基板セルにて、60℃/90%RH、1000 時間で初期値からの変化率-10%以内を達成。ゲッター剤入りガラス基板セルにて 85℃/85%RH、1000 時間で初期値からの変化率-10%を確認。	○	フィルム基板セル/モジュールでの両面封止プロセスの検討

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成（あるいは 2022 年 9 月頃に達成が確実に見込まれる）、△：達成見込み（2022 年度末までに達成が見込まれる）×：未達

今後の課題については、グリーンイノベーション基金事業に移行し検討することで、目標に到達する見込み。

【G 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池の基盤技術研究開発】  
(国立大学法人京都大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
1. ペロブスカイト材料・電荷回収層材料の開発	大面積塗工に展開できる手法を用いて光電変換効率 $\geq 23\%$ のセルのための光電変換材料を開発する。	1000 nm 以上の光を光電変換する Pb-Sn 混合型ペロブスカイト材料の開発およびペロブスカイト層の界面処理に成功し、 <b>23.6%</b> の変換効率を達成した。 Pb 系ペロブスカイト太陽電池の正孔回収層のための単分子材料を開発し、 <b>23.0%</b> の変換効率を達成した。	○	-
2. 大面積塗工技術の開発	30 cm 角以上の大面積モジュール変換効率 18% 以上を実現する。	モジュールパターンニング技術開発および各層の成膜条件検討により、75 mm 角ガラスモジュールで <b>19.5%</b> 、フィルムモジュールで <b>17.1%</b> の変換効率を得た。 ダイコート、インクジェット塗布装置を用いた実証実験を開始した。	△	新塗工法の開発に伴って、溶媒、材料組成を変更した。これらの最適化により目標を達成する。
3. 封止技術開発	屋外曝露 10 年相当で初期変換効率の低下率 10%以下を達成する。	ダンプヒート試験 (85 °C/85% RH) 240 時間後も太陽電池特性が劣化しない封止プロセス、部材を選定した。	○	-
4. 耐久性・信頼性・特性評価技術開発	屋外曝露 10 年相当で初期変換効率の低下率 10%以下を達成する。	長寿命ランプを用いた MPPT 耐久性評価システムを開発。AIST での測定結果と同等の評価法を開発した。 独自の単分子電荷回収層で高い耐久性が得られることを確認した。	△	10 年相当の加速条件により、耐久性を達成する。

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×未達

今後の課題はグリーンイノベーション基金事業で検討し、達成の見込み

【H 超軽量モジュール技術の研究開発】(株式会社東芝)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
超軽量ペロブスカイト系太陽電池の研究開発	5cm 角程度以上の超軽量モジュールにおいて、初期効率から相対効率低下 10%以下である耐熱試験時間を 1000 時間、光照射試験を 500 時間とする。	・鉛系 1 ステッププロセスの確立 ・5cm 角フィルムモジュールが相対効率低下 10%を維持している時間は、光照射で 400 時間、耐熱試験で 550 時間。	△	GI 基金にて引き続き素子構成、材料組成の改良を検討することで達成見込み。
超軽量ペロブスカイト系太陽電池の研究開発	30cm 角程度の超軽量モジュール変換効率 18%以上。	30cm 角程度の超軽量フィルムモジュール変換効率 16.6%、5cm 角のフィルムモジュール変換効率 19.6%。	△	GI 基金にて引き続き素子構成、塗布技術による膜の高品質化を検討することで達成見込み。
超軽量ペロブスカイト系太陽電池の研究開発	架台及びモジュール重量 5kg/m <sup>2</sup> 以下。	簡易降雹試験で割れないことを確認し、目標軽量化にめど。	○	GI 基金にて架台を含めたさらなる軽量化技術を推進する。

\*1 達成度

◎：数値目標クリアに加えて想定以上の付加価値を実証、○：数値目標クリア、△：数値目標未達  
今後の課題はグリーンイノベーション基金事業で検討し、達成の見込み



【I 界面制御による高性能化技術と性能評価技術の開発】(国立研究開発法人産業技術総合研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
①-1. 材料・プロセス技術の開発 (産業技術総合研究所)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・フィルム基板上の小面積セルで、変換効率 22%以上を達成する。</li> <li>・フィルム基板上の小面積セルまたはモジュールで IEC TS 62876-2-1 準拠光照射 500 時間・85℃加熱 1000 時間後で 10%以内の減少率を達成する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・界面制御材料を開発し、効率向上効果を確認した。逆構造では新規 SAM 導入し効率 3%ポイント改善効果を確認した。</li> <li>・ガラス基板上の小面積セル (面積 &lt;math&gt;1\text{cm}^2&lt;/math&gt;) で変換効率は 21%を達成した。</li> <li>・封止と吸湿材で耐光性向上させた。耐光試験で 1000 時間以上を維持した。</li> </ul>	○	—
①-2. 高効率化・高耐久化の最適デバイス設計 (立命館大学)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シングルセルで効率 26%、タンデムセルで 28%を得るための高効率化設計指針を明らかにする。</li> <li>・実デバイスの経時変化をデバイスシミュレータ上で模擬し、劣化を引き起こす可能性のある主要な物性パラメータを明確化する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シングルセルにおけるペロブスカイト層の Eg 分布最適設計を行い、表面側 2.45eV、中間部 1.50eV、裏面側 1.70eV で効率 29.9%が得られる事を試算した。</li> <li>・光劣化モデルの基礎となる欠陥密度と電子密度の増加が出力特性に与える影響を計算で模擬した。</li> </ul>	○	—
①-3. 界面再結合の制御技術と評価技術の開発 (京都大学)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中間目標である大面積モジュール効率 18%を実現するための指針を明らかにするため、1 cm角の標準セルを用いて界面再結合速度の評価技術の確立とともに主要な再結合損失機構の解明に取り組む。連携機関のフィルム基板上の小面積セルまたはモジュールで変換効率 22%以上の実現に貢献する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・界面再結合損失機構については、開放電圧の温度依存および強度依存により再現良く機構を議論できることを確認し、手法としてほぼ確立した。再結合速度評価法として、発光寿命による評価についてもほぼ確立し、長寿命成分の測定により評価範囲をさらに拡大する。</li> <li>・低分子アミンによるパッシベーションにて 22.2% (面積 &lt;math&gt;1\text{cm}^2&lt;/math&gt;) を達成した。</li> </ul>	○	—
②-1. 劣化解析技術の開発 (産業技術総合研究所)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・各種界面制御材料導入による劣化抑制機構を明らかにし、耐久性 10 年のペロブスカイト太陽電池の実現に貢献する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐久性向上に向け、環境要因の影響を調べるための封止セルを開発した。</li> <li>・セルを非破壊で劣化状態を調べるための SHG 分光法を検討した。</li> </ul>	○	—
②-2. セル・モジュールの性能評価技術の開発 (神奈川県立産業技術総合研究所)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実使用環境を模した性能評価法開発する。(照度・温度変化に対応した測定プログラムの開発)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・KISTEC 海老名本部での屋外暴露試験開始し連続測定用プログラムの試験稼働を実施した。</li> </ul>	○	—

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成（あるいは2022年9月頃に達成が確実に見込まれる）、△：達成見込み（2022年度末までに達成が見込まれる）

中間目標についてはGI基金で継続して達成見込み

【J ロールトゥロール製造技術の研究開発】（積水化学工業株式会社）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方法
効率／高耐久性の両立	・約30cm×30cm程度のフィルムモジュール形態で変換効率18%以上の見通しを示す	・30cm角程度のフィルムモジュール形態で変換効率15%を達成。30cm面内バラツキ改善等により18%達成見込み	△	ペロブスカイト層の面内膜質分布改善、スクライブ加工の微細化等の改善検討をGI基金プロジェクトにて実施する予定
	・30cm角モジュール耐熱性試験（IEC TS 62876-2-1 ST3 85℃、相対効率低下10%以下） ：1000時間以上	・30cm角程度のフィルムモジュールにて耐熱性試験1000時間以上達成	○	
	・30cm角モジュール耐湿熱性試験（IEC TS 62876-2-1 ST3 85℃85%RH、相対効率低下10%以下） ：1000時間以上	・30cm角程度のフィルムモジュールにて耐湿熱性試験1000時間以上達成	○	
R2R 製造における広幅・長尺化技術開発	・量産時に製造コスト35円/W以下の見通しとなる材料・プロセスの構築	・量産時のコストダウンに向け、m幅レーザースクライブ装置導入し35円/W以下の見通しを得た	○	
	・架台を含めたモジュール重量5kg/m <sup>2</sup> 以下。	・架台含めないモジュール重量にて3kg/m <sup>2</sup> 達成	○	

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成（あるいは2022年9月頃に達成が確実に見込まれる）、△：達成見込み（2022年度末までに達成が見込まれる）、×：未達

【K ペロブスカイト太陽電池の新市場創出に向けた高効率化材料技術と製膜技術の開発】(国立大学法人東京大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
①単セルの性能向上に向けた新規ペロブスカイト材料の開発	フィルム基板小面積セル効率23%を与える材料の開発	ペロブスカイト組成改良した自作高分子薄膜基板セルで効率 23.8%を達成	◎	—
②低温プロセスによるペロブスカイト太陽電池の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%	全工程 140℃以下のプロセスで効率24.1%を達成	◎	—
③逆構造型ペロブスカイト太陽電池の性能向上	逆構造ガラス基板小面積セル効率23%	SnPb 混合ペロブスカイトによる逆構造ガラス基板小面積セル効率 23.3%を達成	◎	—
④大面積フィルムに適用可能な製膜技術の開発	フィルム基板小面積セル効率23%与える製膜技術確立	高分子薄膜基板を開発し、製膜条件を最適化した小面積セルで効率23.8%を達成。重量あたり発電量世界最高 46.9W/g	◎	—
⑤トップセル用ワイドギャップペロブスカイト材料の開発	透明対極トップセル用デバイスで Voc 1.4V	臭素系ペロブスカイトを用いたセルで Voc 1.55V を達成	◎	—
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%	ヨウ素・臭素混合系ペロブスカイトを用いたセルで、全工程 120℃以下のプロセスで、Voc 約 1.3V	△	低温プロセスでより高電圧のトップセルが作成できるように、②⑤で開発した材料を本項目に適用する。
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	ホール輸送層を代替する単分子混合膜を用いバルク欠陥抑制と Voc ロス低減(0.36V)。効率 23.3%	○	—
⑧蒸着法による製膜技術の開発	傾斜構造を導入した太陽電池の作製	高結晶性 CsSnBr <sub>3</sub> の蒸着製膜条件を確立。安定なヘテロ構造の成膜に成功	○	—
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たタンデム小面積セル作製	ナローギャップ SnPb 混合ペロブスカイトを用い2端子タンデムセル試作。K ドープペロブスカイトを用い、透明対極世界最高効率 19.5%	◎	—
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	グラフェントンネル接合層 5cm 角サイズで透過率85%、シート抵抗 300Ω/□。薄型フレキシブル結晶 Si セル効率 20%	グラフェン薄膜に酸化モリブデンを積層化。透過率 70%、シート抵抗 125Ω/□ フレキシブルタンデム用の 100μmSiセルで効率 20.5%を達成	○	—

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成（あるいは2022年9月頃に達成が確実に見込まれる）、△：達成見込み（2022年度末までに達成が見込まれる）、×：未達

### 1. 成果詳細

FF の向上を通じた高効率化には、高品質な接合形成が欠かせない。高効率 CIS 太陽電池の接合界面は、CIS 表面に化学析出法 (CBD) で  $Zn(O, S, OH)_x$  バッファ層を堆積することで形成されている。一方、CIS 太陽電池の研究開始当初から CdS がバッファ層として研究されており、CBD 法で CIS 上に CdS を形成した場合に、極めて良質な接合界面を形成できることが報告されている。CdS/CIS 界面では、再結合速度を増加させる界面欠陥そのものが少なく、また、光生成キャリアの輸送した伝導帯オフセット (CBO) が形成されている。つまり、CdS は高 FF 化に適している。一方で、禁制帯幅 ( $E_g$ ) が 2.4eV であるため 520nm より短波長の光が吸収されてロスになる。つまり、CdS は Cd を構成元素とすることと  $E_g$  が 2.4eV であり短波長感度向上に不利であるため、本質的にバッファとして不利である。ワイドギャップである  $Zn(O, S, OH)_x$  を用いつつ、界面欠陥を低減する、あるいは界面欠陥における再結合を CdS と同水準あるいは更に低減させることが、高効率化に重要である。本研究では、ワイドギャップのバッファ層と界面再結合を低減させるような表面改質を合わせた最適な「接合界面構造」を開発し、高効率化に貢献することを目的とした。さらに、CIS 太陽電池の開放電圧の上限値と FF の向上可能性、つまり、高効率化ポテンシャルを、デバイス解析 (デバイス内の再結合速度分離解析による接合部、CIS 表面層、バルクの品質の定量評価など) を通じて明確化し、CIS 太陽電池の性能向上に貢献することを目的とした。

本研究ではまず、出光興産で作製された CIS 基板の表面改質による高効率化技術開発を行った。CIS 基板に対して、大気中で 130°C のアニール処理を無し (CIS 成膜後に対応)、および、2~8 時間行い、CIS 表面に多く存在する In と S と大気中の酸素の反応によって、 $In_2(O, S)_3$  層の形成を試みた。図 III-2-(イ) -(i)-A-1 に示すように、イオン化エネルギーの測定手法である Photoelectron Yield Spectroscopy (PYS) を用いて CIS 成膜後 (アニール前) と 6 時間アニール後の CIS 基板を分析した結果、CIS バルクと表面層 ( $In_2S_3$  および  $In_2(O, S)_3$  層に起因すると考えられる) に対応する 2 つの信号が得られた。アニール前の CIS/表面層 ( $In_2S_3$  と推定) の価電子帯オフセット (VBO) が 1.09eV であるのに対して、6 時間アニール後では CIS/表面層 ( $In_2(O, S)_3$  と推定) の VBO が 1.41eV であり、アニールによって、界面再結合の抑制に有利な構造に変化したと考えられる。

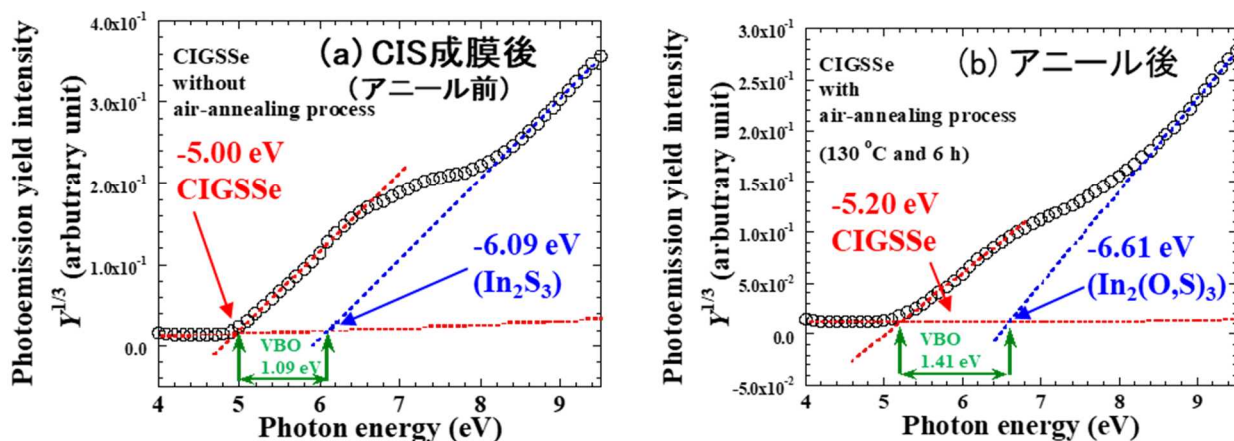


図 III-2-(イ) -(i)-A-1 (a) CIS 成膜後、(b) 6 時間アニール後の CIS 表面の PYS 測定結果

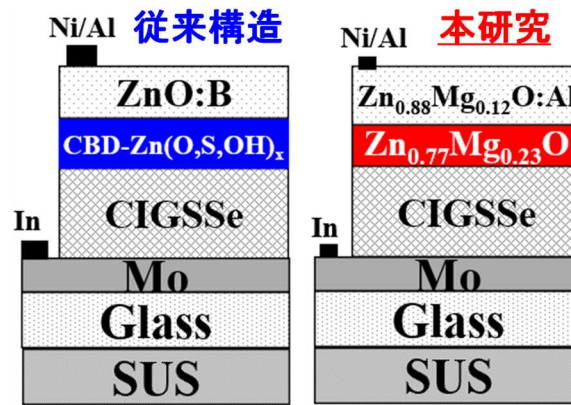
次に、CIS 基板に  $(Zn, Mg)O$  系のバッファ層と透明電極 (TCO) をスパッタで、グリッド電極を蒸着法で堆積し、オールドライプロセスによる小面積 CIS 太陽電池を作製した。外部量子効率 (EQE) 測定結果から、アニール前では短波長側の EQE が低いことがわかった。これはスパッタダメージによって、バッファ/CIS 界面、および、CIS の表面側 (空乏層付近) における再結合が顕著になったためであると考えられる。アニール処理を施すことによって、この短波長側での EQE が大きく改善された。電流密度-電圧 (J-V) 特性および太陽電池パラメータと再結合解析から、6 時間のアニールによって最も、界面と空乏層における再結合係数が改善され (具体的には、界面が  $9.5 \times 10^6$  から  $1.5 \times 10^6$  となり約 1/6 に低減、空乏層が  $5.6 \times 10^{12}$  から  $2.4 \times 10^{12}$  となり約 1/2 に低減。単位はいずれも  $cm^{-2}s^{-1}$ )、効率としては

10.0%から15.5%に大きく改善された。

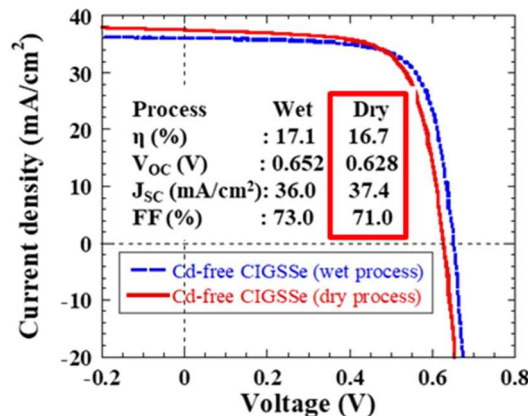
続いて、バッファ層である(Zn,Mg)OのMg濃度によって、CISとバッファ層のCBOを制御したCIS太陽電池を作製し、CBOの最適値を実験的に明らかにした。Mg濃度を变化させた(Zn,Mg)OとCISの価電子帯位置をPYS法によって実測し、また、バンドギャップを光学測定によって求め、CBOを実験的に求めた。その結果、CBO=0.2eV付近で効率が最大となり、これは実験値を組み込んだデバイスシミュレーションによっても同様な傾向が示され、実験と理論の両面から、CBOの最適値を示すことが出来た。

上記のような表面改質技術、Zn系バッファ層・透明電極層の伝導帯制御に加えて、Zn系バッファ層のスパッタダメージを極力低減するような成膜条件の最適化を行うことで、図III-2-(イ)-(i)-A-2に示すような、上記と同様な構造のオールドライプロセスを用いたCIS太陽電池を作製した。その結果、図III-2-(イ)-(i)-A-3の電流密度-電圧(JV)特性に示すように、効率16.7% ( $V_{oc} \times J_{sc} = 23.5 \text{ mW/cm}^2$ )を得た。この値は、同様なCIS基板を用いて作製したウェットプロセスを必要とする従来構造のCIS太陽電池の効率(17.1%)に対して98%であり、量産化に有利なオールドライプロセスにおいても、従来と同等の効率が達成可能であることを実証した。

このように、高効率化メカニズムを理論と実験の両面から明らかにすることで、CIS太陽電池の高効率化の指針を明確化した。今後は、産業技術総合研究所との連携を強化し、CISの高品質化と上記の高品質接合界面構造の形成技術を高度化させることで、中間目標を達成できる見込みである。



図III-2-(イ)-(i)-A-2 ドライプロセスのCIS太陽電池の構造



図III-2-(イ)-(i)-A-3 ドライプロセスのCIS太陽電池のJV特性

## 2. 実用化・事業化見通し

本研究で検討する表面改質技術と Zn 系バッファ層・透明電極層の設計・作製技術は、CIS 太陽電池の作製プロセスに多大な変更を加えることなく、高効率化を実現できる可能性がある。本開発技術は CIS 太陽電池の更なる高効率化に資するものであるため、製造プロセスに採用され、実用化されることが期待できる。

## 3. 波及効果

本研究は、太陽電池の高効率化に必須である高品質な接合界面構造の実現に関するものであり、CIS 太陽電池に適用されるだけでなく、ヘテロ接合を有するペロブスカイト太陽電池や  $\text{Cu}_2\text{O}$  などの化合物薄膜太陽電池、さらには、CIS 系材料、ペロブスカイト、 $\text{Cu}_2\text{O}$  などをトップセルとするタンデム型太陽電池への応用展開が期待できる。

## 4. 今後の展開

CIS 太陽電池はアメリカから研究が始まり、日米欧が競って、CIS の物性解明や高効率化技術開発に取り組んできた。結晶 Si においては中国が世界をリードしているが、この CIS 太陽電池については日米欧がリードしている。この観点から、結晶 Si が得意としない、軽量やフレキシブルが必要とされる応用展開分野において、CIS 太陽電池は有力であり、日本の技術を大いに活かすことができる。さらに、メイド・イン・ジャパンの太陽電池であるペロブスカイト太陽電池をトップセルとし、CIS 太陽電池をボトムセルに用いることで、軽量かつフレキシブルな効率 30%以上の超高効率タンデム薄膜太陽電池を実現できるため、今後の新たな応用分野（例えば、車・飛行体などの移動体）への展開が期待できる。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	2	1	3
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国際・審査有)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国内・審査無)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国際・審査無)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

## B ヘテロ界面制御による新型バッファレス CIS 太陽電池の開発 (国立大学法人東京工業大学)

### 1. 成果詳細

新規透明導電膜開発として、有機金属気相成長法による Zn-Ge-O 薄膜の作製を行なった。既存のジエチル亜鉛 (DEZn) と H<sub>2</sub>O による ZnO 製膜装置に Ge 原料としてテトラメトキシゲルマニウム (TMGe) を導入した。TMGe 流量を 1.51 mmol/min~12.1 mmol/min の範囲で変化させたところ、図 III-2-(イ) - (i)-B-1 に示すように膜中の Ge 組成が 1.1%~8.1% の間で変化し、Zn-Ge-O 薄膜の作製に成功した。得られた膜のバンドギャップを反射率・透過率測定により決定、イオン化エネルギーを光電子収量分光法により求めて両者の差分より膜の電子親和力を決定した。その結果、図 III-2-(イ) - (i)-B-2 に示すように Ge 組成 8.1% において Zn-Ge-O 膜の電子親和力は 4.06eV であり、ZnO の文献値 4.35eV より小さな値を示した。また、このときの禁制帯幅は 3.6eV であった。これにより中間目標である、ZnO より低電子親和力を有する透明導電膜の開発に成功した。次に膜厚 600nm のサンプルにおける膜の移動度およびキャリア濃度を評価した。その結果、移動度は Ge 組成に対して 0.8cm<sup>2</sup>/Vs から 0.2cm<sup>2</sup>/Vs まで徐々に低下、キャリア濃度は 1x10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup> から 1x10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup> まで減少することが明らかとなった。

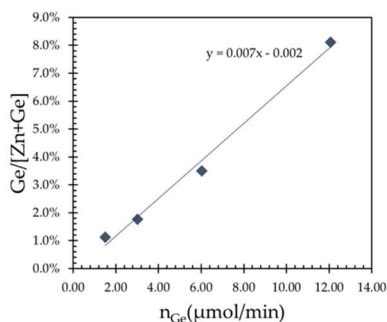


図 III-2-(イ) - (i)-B-1  
Ge 流量に対する膜の Ge 組成 (%)

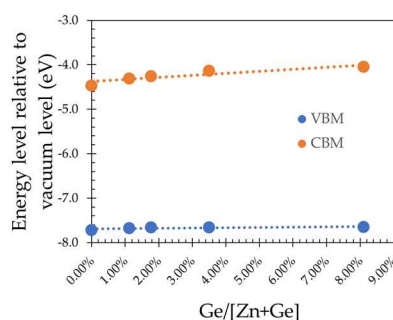


図 III-2-(イ) - (i)-B-2  
Ge の膜組成に対する価電子帯上端 (VBM) および伝導帯下端 (CBM) の真空準位からの位置

出光興産が作製した軽量基板上 CIS モジュールの断面 EBIC 評価を行なった。軽量基板を切断して断面 EBIC 評価を行なうことは困難であったため、CIS を基板から剥離、その後イオンポリッシングによる断面平滑化技術を適用、これにより再現性良く断面の EBIC 観察が行なえるようになった。軽量基板上 CIS の断面 EBIC 像は、図 III-2-(イ) - (i)-B-3 に示すように EBIC 信号が観察されず太陽電池として機能しない部分はなく、横方向に対して均一な膜が作製できていることが確認できた。また成長方向 (縦方向) の EBIC 信号強度は、3 段階法あるいは出光興産にてガラス基板上に作製した CIS モジュールと遜色なく、軽量基板上 CIS は高品質な膜であることが明らかとなった。これにより中間目標である、出光興産が開発する軽量モジュールの断面電子収集効率プロファイルの明確化に成功した。また曲線因子 (FF) 低下要因を明らかにするため透明導電膜評価を行なった。その結果、FF 低下の一要因は透明導電膜の抵抗率にあることが明らかとなった。そこで、Spice による CIS モジュールの回路シミュレーションとドルーデ・モデルによる物理モデルとを組合せてモジュールの最適構造を探索した。その結果図 III-2-(イ) - (i)-B-4 に示すように、現状の光吸収層の禁制帯幅 1.1eV 程度から禁制帯幅を 1.4eV 程度まで広げることで ZnO 透明導電膜の設計要求が緩和され、FF 向上が期待されることが示された。

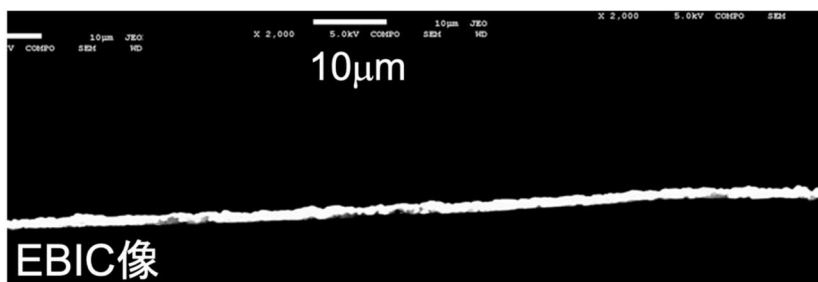
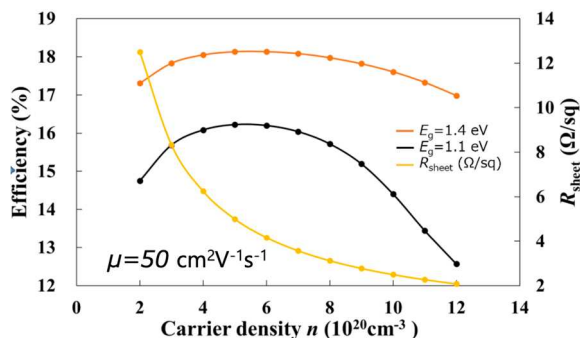


図 III-2-(イ) - (i)-B-3 軽量基板上 CIS の断面 EBIC 像

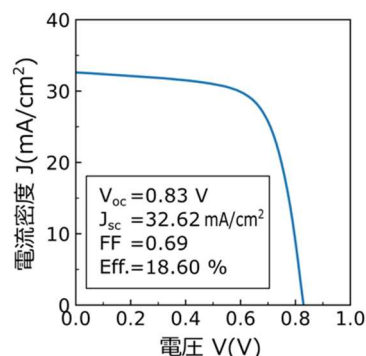


産業技術総合研究所が行なった出光興産製 CIS モジュールの評価から、Zn(S, O, OH)<sub>x</sub> バッファ層は表面処理の効果が大きいと考えた。そこで、Zn(S, O, OH)<sub>x</sub> バッファ層作製レシピから亜鉛と硫黄の原材料を除いてアンモニア水あるいは温水のみの処理を行なった太陽電池を作製した。その結果、アンモニア水処理のみでもバッファ層を有する太陽電池と同程度の変換効率が得られることが明らかとなった。現在 83°C、25 分間のアンモニア水処理を行なった p-CIS(出光興産製)/i-ZnO(40nm)/ZnO:B(0.6mm) 構造のバッファ・フリー太陽電池において、図Ⅲ-2-(イ) -(i)-B-5 に示すように変換効率 18.6% (V<sub>oc</sub>=0.83V, J<sub>sc</sub>=32.6mA/cm<sup>2</sup>, FF=0.69) が得られており、プロセスの簡略化による低コスト技術に繋がる成果が得られた。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-B-4

移動度を 50cm<sup>2</sup>/Vs と固定した場合の透明導電膜のキャリア濃度に対する変換効率。E<sub>g</sub>=1.4eV の方が設計のマージンが広い。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-B-5

出光興産の光吸収層を用いて、アンモニア水処理のみで作製したバッファ・フリー CIS 太陽電池

## 2. 実用化・事業化見通し

本研究では FF 制限要因を明確にするため、軽量 CIS モジュールに用いられている ZnO 透明導電膜の評価を行なった。その結果、ZnO に限らず移動度 10~50cm<sup>2</sup>/Vs を有する透明導電膜の特性として、自由電子吸収端がキャリア濃度の増加ともない 1.1eV 帯を横切ることが明らかとなり、1.1eV の禁制帯幅を持つ光吸収層ではモジュール設計時の自由度が大幅に狭められることを明らかにした。これが FF 制限要因の一つであり、より高効率な CIS を実用化して行くためには 1.4~1.5eV の禁制帯幅を有する光吸収層の開発が必要との指摘を行なった。このとき広禁制帯幅を有する光吸収層に適合するためには、現状の Zn(S, O, OH)<sub>x</sub> よりも小さい電子親和力を有する n 型バッファ層の開発が必要である。そこで本研究では、量産化に適した有機金属気相成長法による Zn-Ge-O を新たなバッファ層として開発、ZnO に Ge を添加することにより電子親和力を 4.0eV 程度まで減少させることに成功した。また実用化に向けた低コスト化技術開発としてバッファ・フリー太陽電池の開発に取り組み、出光興産製光吸収層を用いて、バッファ層を堆積せずにアンモニア水処理のみにて変換効率 18.6% を得た。以上、本研究では実用化を見据えた高効率・低コスト化技術開発を行なっている。

## 3. 波及効果

本研究が取り組む CIS 系太陽電池の高効率化要素技術開発は、軽量 CIS モジュールの開発ばかりではなく、ペロブスカイト、Si, III-V 族化合物太陽電池、あるいは今後必要とされる CIS 系タンデム型太陽電池への応用展開が期待できる。特に低電子親和力を有する透明導電膜は、発光波長の短い LED 等の発光素子においても必要とされる材料系である。

## 4. 今後の展開

CIS 系化合物薄膜太陽電池は日米欧が中心となり研究開発を牽引してきた太陽電池であり、研究開発において中国が後れを取っている唯一の太陽電池である。現在、太陽電池のマーケットシェアは中国産 Si 系太陽電池が圧倒的な強さを誇っており、米国のファーストソーラが CdTe 太陽電池において数% のシェアを占めるに過ぎない。この状況はエネルギー安全保障上も好ましい状態ではなく、研究開発における優位性をさらに上げるためにも CIS 太陽電池の高効率化技術開発が必要である。本研究で取り組む軽量基板上単接合 CIS 太陽電池の技術開発は、タンデム型太陽電池への応用展開が可能であり、安定性ならびに変換効率において他のタンデム型太陽電池と比較して優位性が期待できる。ま

た、本研究で開発を進めている低電子親和力を有する n 型透明導電膜は、タンデム型太陽電池において正に必要とされる材料系である。本研究の開発する CIS 太陽電池は、エネルギー安全保障上の観点、技術開発における国際的優位性の拡大、いずれの観点からも高効率 CIS 系タンデム型太陽電池への応用が今後の展開の一つと考えている。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内／国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	1	0	1
研究発表・講演 (国内・審査有)	2 (0)	5 (0)	0 (0)	7 (0)
(国際・審査有)	(0)	(2)	(0)	(2)
(国内・審査無)	(2)	(3)	(0)	(5)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

C 多様な基板上で実現可能な CIS 太陽電池高効率化要素技術の研究開発（国立研究開発法人産業技術総合研究所、（再委託）国立大学法人鹿児島大学、（再委託）国立大学法人筑波大学）

1. 成果詳細

産総研で三段階蒸着法により作製した CIS 太陽電池の外部発光量子効率（ERE）を測定することにより、ERE-電流特性結果を得た。測定した 8 試料平均の ERE 値は、注入電流 15 mA 時に 0.367%、また 20 mA 時に 0.396%であった。本事業における ERE 値の中間目標値は 0.3%であり、この結果により ERE の中間目標値を達成した。

産総研製三段階蒸着法 CIS 光吸収層において表面インジウム組成の高濃度化や、I-III-VI<sub>2</sub> 組成よりも広い禁制帯幅を有する表面銅欠乏相層（CDL）の形成などにより、硫黄を含まない CIS 系で出光興産製の CIS 光吸収層のエネルギーバンド構造を模倣し、産業界への貢献を見据えた実験検証を行った（CIS 系太陽電池における CDL は図 III-2-(イ)-(i)-C-1 に示される）。結果、太陽電池の変換効率向上には Rb 添加量と銅欠乏相の存在が密接に関わっていることが見出された。つまり、基本的には表面 CDL が厚膜化することにより太陽電池性能は低下するが、これに Rb を添加することで CDL 厚によって太陽電池性能パラメータは異なる変化を示し、CDL が厚い試料では太陽電池性能が向上することが分かった。CDL が薄いと少量の Rb 添加でも太陽電池性能は低下する。やや厚くすると、少量の Rb 添加で性能向上し、多量の Rb 添加では性能低下という結果が得られた。さらに CDL を厚くすると、Rb 添加量に関わらず性能が向上するという結果が得られた。バイアス印加外部量子効率測定により、CDL 厚が薄い（ほとんど無い）CIS 薄膜表面では、少量の Rb 添加でも界面欠陥が増加してしまうことがわかり、太陽電池性能の変化と一致する結果が得られた。CDL は三段階蒸着法では CIS 薄膜表面に半ば無意識的に形成され、他方セレン化・硫化法では形成されにくいと考えられる。しかし多結晶 CIS 粒界においては自然形成される可能性も示唆され、セレン化・硫化法によって得られた CIS 薄膜においても薄膜中の粒界に CDL が存在し、これが Cs など思いアルカリ金属添加による性能向上効果を誘発する可能性も示唆される。いずれにせよ、アルカリ金属添加によって性能向上効果を得るには、添加される CIS 光吸収層薄膜側の組成や表面状態などの制御が重要であることがわかった。

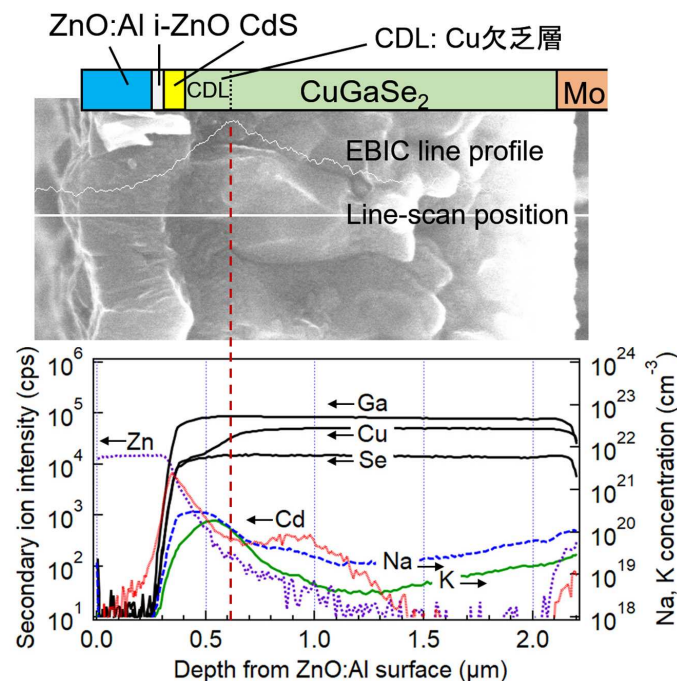


図 III-2-(イ)-(i)-C-1 CIS 系太陽電池の断面図と銅欠乏相層（CDL）の位置

本研究により得られた知見をもとに、軽量フレキシブル基板を用いた 17セル集積構造型ミニモジュール作製においてアルカリ金属添加制御を行い、同型ミニモジュールでは世界最高となる光

電変換効率 18.64%を達成した。

放射再結合式を用いたエネルギー損失の解析を実施し、開放起電圧約 100 mV の損失に界面ならびに空乏層再結合成分がかなりの割合で含まれていること、また、SUS 基板試料はガラス基板試料とほぼ同等のバルク特性、かつ界面が比較的優れることを明らかにした。

太陽電池構造の裏側領域の構成要素である CIGSSe 裏面、Mo 電極表面、Mo 電極金属領域の電子構造を決定し、CIGSSe 層内の伝導帯傾斜、CIGSSe 層裏面/Mo 電極表面/Mo 金属領域界面の価電子帯接続を推定した。Mo 電極表面に存在することが確認された Mo(S, Se)<sub>2</sub> 層はバルク結晶と異なる p 型、高い仕事関数を持つことが BSF 形成、逆ダイオード成分の抑制ひいては高い開放電圧発現の起源の一つであると考えられる。これらの電子構造の仕事関数の決定を含めての評価は本項目担当者が知る限り本事業が初めてである。

## 2. 実用化・事業化見通し

集積構造を有する超軽量 CIS 系太陽電池ミニモジュールでは世界最高となる変換効率 18.64%を達成した。実用化には基板材料や作製プロセスにおける低コスト化、大面積化技術などが必要であるが、基板材料やプロセスの見直し、および光吸収層等構成部材の高品質化によって小面積セルにおける変換効率をさらに底上げすることで、多様な基板に高効率な CIS 系太陽電池を形成する技術を実現し、超軽量型やタンデム型など新しい太陽電池市場形成に向けた応用展開が期待できる。

## 3. 波及効果

本事業で取り組んでいる CIS 系太陽電池高効率化のための要素技術の開発は、超軽量単接合型 CIS 系太陽電池はもちろんの事、ペロブスカイトやシリコン、III-V 族系化合物、もしくは禁制帯幅の異なる同じ CIS 系材料との組み合わせによるタンデム型太陽電池への応用展開なども期待できる。

## 4. 今後の展開

従来シリコン系太陽電池とは異なる事業展開に向けて、本事業で取り組まれる単接合型ナローギャップ CIS 系太陽電池の高効率化要素技術開発の成果を活かしたタンデム型太陽電池への応用展開が一つの構想となる。上述のように、多材料との組み合わせのほか、全無機材料による CIS 系/CIS 系タンデム型太陽電池は変換効率性能と安定性、コストなどで他との比較で優位性が期待でき、そのためにはトップセル用高性能ワイドギャップ CIS 系太陽電池の開発が必要である。ワイドギャップ CIS 系の変換効率性能は硫黄系 Cu(In<Ga)S<sub>2</sub> で 17%の変換効率が報告されているが、さらなる高効率化を実現する技術開発が期待され、ワイドギャップ CIS 系材料による光吸収層の高品質化とワイドギャップ n 型バッファ層材料の開発がその実現に向けた研究課題である。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	2	5	0	7
研究発表・講演 (国内・審査有)	8 (3)	10 (2)	1 (0)	19 (5)
(国際・審査有)	(4)	(1)	(1)	(6)
(国内・審査無)	(0)	(5)	(0)	(5)
(国際・審査無)	(1)	(2)	(0)	(3)
新聞・雑誌等への掲載	0	6	0	6
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	1	0	1
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	1	1

(2022 年 6 月 20 日現在)

D 多様な基板に適用可能な軽量 CIS 太陽電池 製造要素技術の開発 (出光興産株式会社)

1. 成果詳細

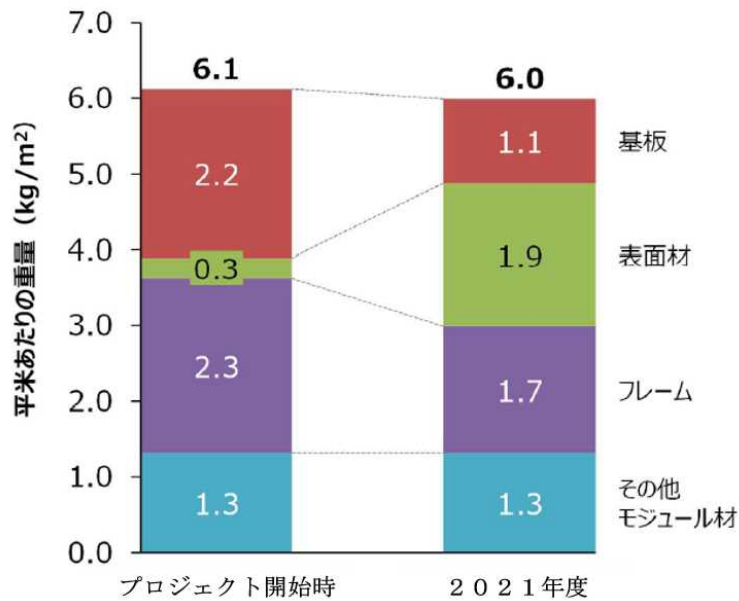
1.1 軽量モジュールの低コスト化

原材料費の大半を占める「基板」及び「表面材」の選定を重点的に実施した。モジュール構成部材の見直しにより、当初よりモジュール重量の軽量化は僅かであったが、原材料費は大幅な削減を実現した。本成果を一定の前提に基づき算出した製造コストは47円/Wであった。

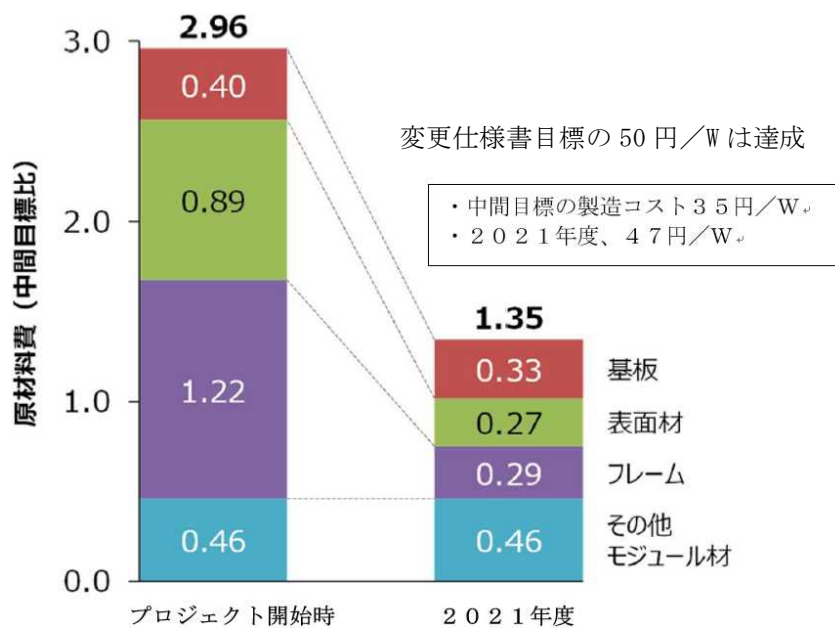
さらなる低コスト化・軽量化を目的とし、基板材質をSUS430から低炭素鋼板へ、絶縁層材料をガラス焼成膜からポリイミド樹脂膜への適用検討を行い、その課題を抽出した。

図III-2-(イ)-(i)-D-1にモジュール重量6kg/cm<sup>2</sup>の重量内訳を示す。

図III-2-(イ)-(i)-D-2に製造コスト47円/Wの原材料コスト比を示す。中間目標比1.35倍その他の項目に工場経費が含まれる。製造コスト50円/Wの見通しは得ることができた。中間目標値の製造コスト35円/Wを達成するには、更に▼35%が必要である。



図III-2-(イ)-(i)-D-1 部材毎の平米当たりの重量



図III-2-(イ)-(i)-D-2 部材毎のモジュール原材料費 (中間目標比)

### 1.1.1 低炭素鋼板の適用に向けた課題抽出

市販されている低炭素鋼板（ブリキ用の原板）が適用できれば、基板コストを従来比で75%程度削減できる。表Ⅲ-2-(イ)-(i)-D-1に抽出した低炭素鋼板課題を示す。

基板裏面の腐食、及び基板のそりが大きな課題であった。現行の裏面SiO<sub>x</sub>製膜では耐腐蝕性が担保できず、代替膜では製造コストが増加する。また、基板のそりは低炭素鋼板と絶縁層材料の線膨張係数が異なる為に発生しており、この2つの課題から適用は困難と判断した。

表Ⅲ-2-(イ)-(i)-D-1 低炭素鋼板での試作、検証での課題

工程	結果	コメント
洗浄	△	現行アルカリ洗浄では排水限界値の濃度でも防錆剤除去不可 界面活性剤での洗浄が必須となる
裏コート製膜	×	現行のスパッタ方式&腐食防止膜SiO <sub>x</sub> では、耐腐食機能を確保できない
絶縁層形成	×	現行の絶縁層材料では線膨張係数ミスマッチにより 絶縁層形成後に基材が大きく反ってしまう
裏面電極形成	○	現行のAlトレイ貼付け流動で問題なし シート抵抗が0.987Ω/□と少し高め(現行0.8~0.9Ω/□)
プリカーサー	○	現行のガラス貼付け流動で問題なし
RTP	△	今回は10cm角にて処理 CIGS剥離は発生無し
CBD	△	今回は10cm角にて処理
CVD	△	今回は10cm角にて処理
バタ,その他	-	今回は未検証

【定義】

○…鋼板特有の技術課題無し  
 △…調整で流動可能 追加検証要  
 ×…鋼板特有の技術課題有り

### 1.1.2 ポリイミド樹脂の適用に向けた課題抽出

金属基板とCIS層との中間に位置するガラス焼成膜絶縁層を耐熱ポリイミドフィルム（PI）に変更することで、工程中に発生する絶縁層のピンホール・クラック等に起因した絶縁不良の低減も可能となる。具体的には、PIを絶縁層としてSUS430板に貼り合わせた基板で、適用可否その課題を抽出した。

#### 課題

#### ① 光吸収成膜層でのPI膜の膨れ（剥離）

光吸収成膜の急速昇温工程中、基板とPI膜間の有機物が気化し、PI膜が膨れる。  
 事前に、500℃×60分のポストアニールすることで解決を確認。

#### ② モリブデン裏面電極層へのアルカリ金属添加

絶縁層をガラスからPI（樹脂）膜とすることで、アルカリ源が必要であるが、製膜ターゲットをMo-Na合金とすることで、アルカリドープされることが確認できた。

#### ③ 光吸収層成膜工程

PIの耐熱温度制約から、現行工程プロセス温度より▼100℃での処理が必要。  
 試作評価段階では、FF（曲線因子）が低く、カリウム添加必要性検証及び光吸収成膜工程の最適化が課題となる。本工程は、CIS太陽電池プロセス工程の心臓部であり、これまでのガラス基板、今回の金属基板の経験から、▼100℃でのセレン化、硫化プロセスの確立にはかなりの長期間が必要と見込む。

## 1.2 太陽光発電システムの軽量化

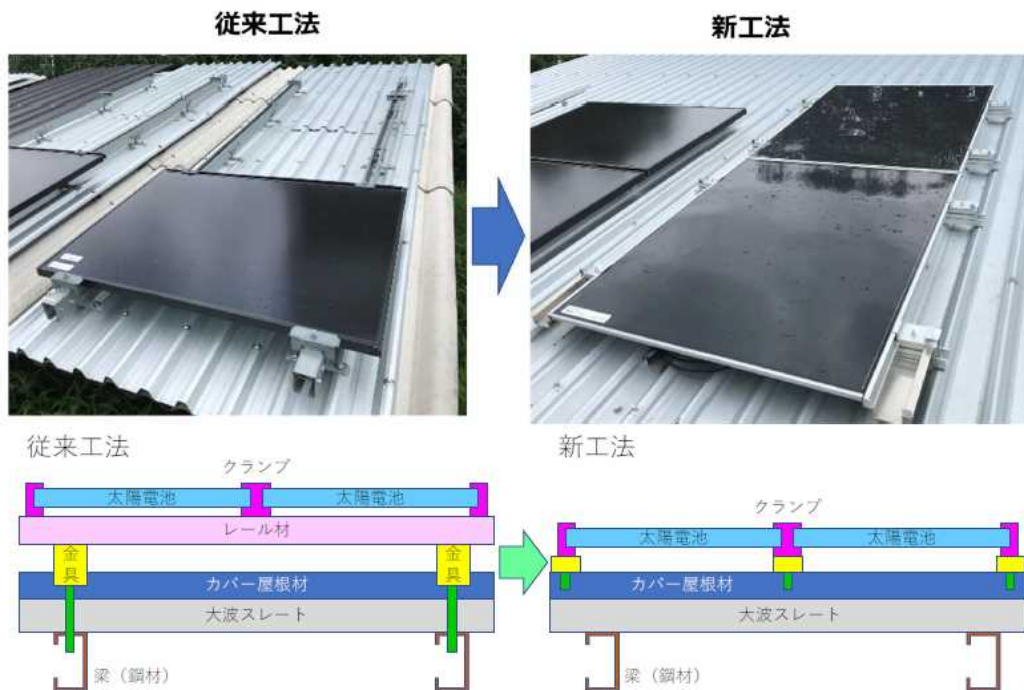
大波スレート屋根のカバー工法、及び陸屋根の防水シート工法について新工法を開発し、軽量化に成功した。それぞれ、11.2kg/m<sup>2</sup>から7.3kg/m<sup>2</sup>へ、陸屋根では同16.5kg/m<sup>2</sup>から8.3kg/m<sup>2</sup>までの軽量化を実現。

さらに、工期に制約がある屋根向けにモジュールの軽さを活かした新規施工法を開発し、従来工法と比べて約半減の工期で済む高速施工の開発に成功した。

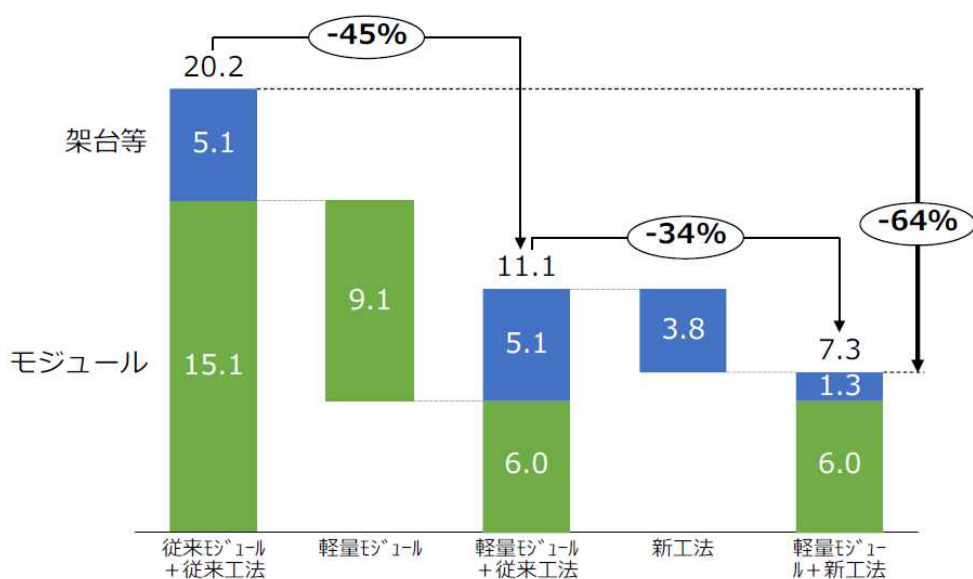
### 1.2.1 大波スレート屋根のカバー工法

従来の施工法では、強度が高い屋根の梁に直接ボルトで太陽電池モジュールを固定するが、梁

のピッチとモジュールサイズが合わない場合、レール材を使用した集中荷重方式が一般的である。図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-3に示す新施工法では、カバー屋根材との固定点数を増やしてカバー屋根材にかかる荷重を分散し、カバー屋根材への応力を軽減した。この新施工法の開発によって、付加重量、レール材などの部材コストおよび施工時間を削減できることを確認した(図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-4)。この工法の開発では、カバー屋根材の変形抑制に有効な「4点分散荷重方式の専用金具」の開発がポイントであった。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-3 大波スレート屋根のカバー工法（軽量化した新工法）



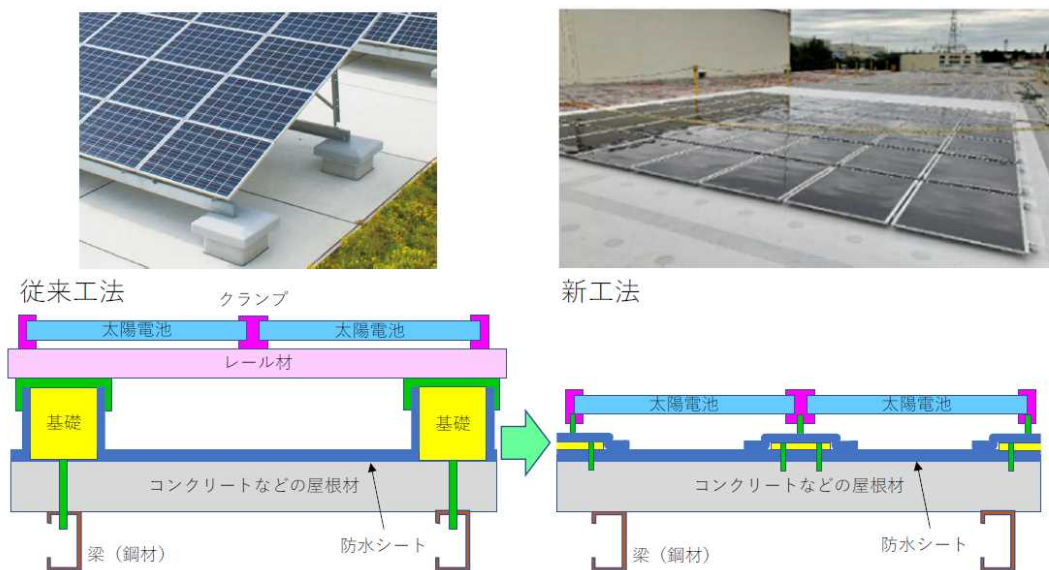
図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-4 新規カバー工法での軽量化効果（単位：k g / m<sup>2</sup>）

### 1.2.2 陸屋根の防水シート工法

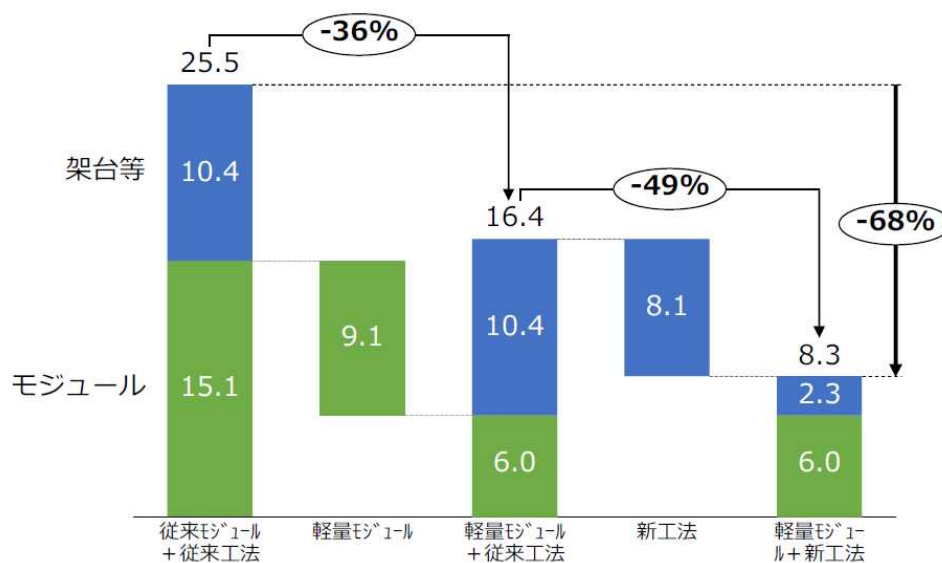
「陸屋根」は水勾配が緩い、もしくはないため、水が溜まりやすい屋根構造である。そのため、表面に防水加工を施す必要がある。その中で防水シートも用いた陸屋根に太陽光モジュールを設置する場合、防水シートに穴をあけて施工するため、防水シートメーカーによる保証対象外となってしまうことが課題であった。

本研究開発では、他社製太陽電池モジュールで屋根一体型の開発に実績があった住ベシート防水(株)との共同開発で、シート防水向けの新工法の開発に取り組んだ。

本研究開発では、コンクリートなどの屋根材に直接固定するための専用固定金具を新規に開発し、コンクリートへ直接固定できる工法を開発した(図Ⅲ-2-(イ)-(i)-D-5)。この工法では、局部的な応力集中の緩和だけでなく、コンクリート基礎とレール材の削減により、重量・部材コスト・施工時間が大幅に削減できることを確認した(図Ⅲ-2-(イ)-(i)-D-6)。なお、当該専用固定金具の開発にあたり、一連の試験を各種屋根下地材に対して実施し、防水シートメーカーと共に、開発した新規防水シート工法の実際の施工法としての蓋然性を確認した。



図Ⅲ-2-(イ)-(i)-D-5 開発した防水シート工法



図Ⅲ-2-(イ)-(i)-D-6 開発した防水シート工法での軽量化(単位: kg/m²)



### 1.2.3 高速施工方法の開発

鉄道会社へのヒヤリングで得た要求事項に「高速施工」の必要性に関するものが多かった。駅舎ホームの屋根の上に太陽電池モジュールを設置する場合、安全上、列車が動いていない時間帯での設置工事となるため、作業時間が限られる。

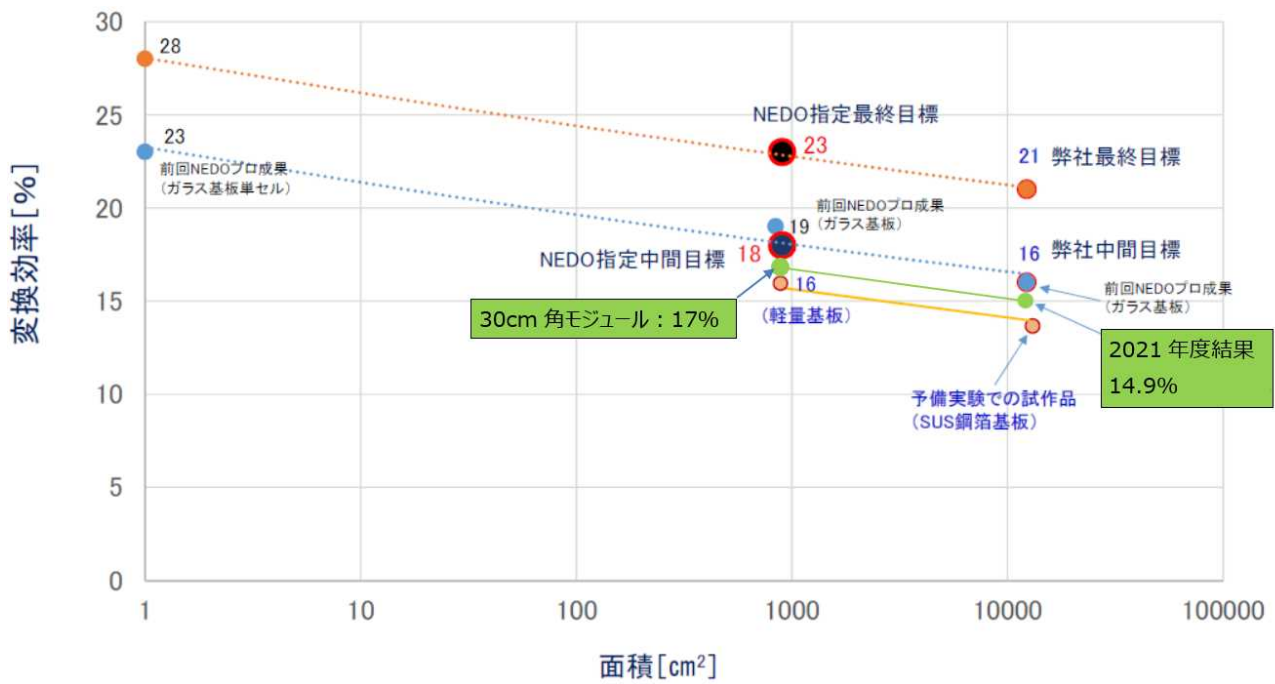
そこで、軽量化モジュールの特性を活かした4枚折り畳みワンセットモジュール、及びワンタッチで取り付けできる金具を試作した。施工時間を検証したところ、従来工法では4枚の取り付けに27分20秒要していたものが、新工法では15分28秒と11分52秒施工時間が短縮(▼44%)できた。作業の熟練で工数は半減できるものと推察する。



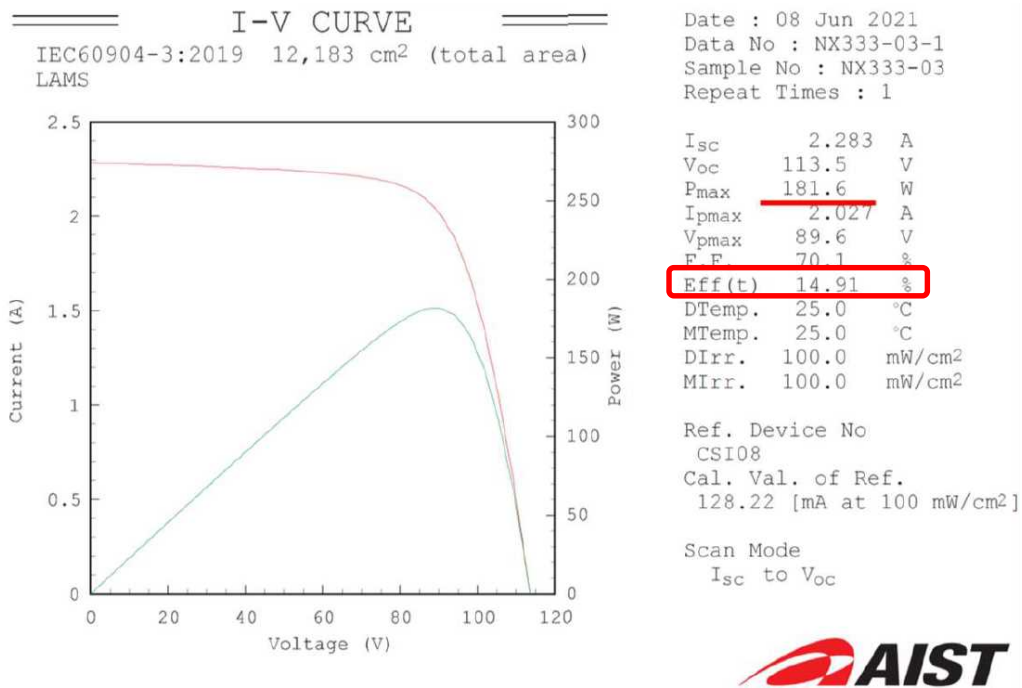
図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-7 折り畳み式軽量モジュールとワンタッチ金具を用いた作業

### 1.3 高効率化

ガラス基板で開発されてきた高効率化技術を金属基板へ適用し、さらに面内分布の改善といった生産技術面での改善を実施することで、モジュール変換効率を14.9%まで改善した。これは、中間目標30cmモジュール換算で17%に相当する。図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-8に記載。また、外部機関で測定した結果を図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-9に示す。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-8 変換効率と基板サイズの関係



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-D-9 外部機関での試作モジュール測定結果

## 2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクトで新規開発した軽量モジュールについては、 $6\text{ kg/m}^2$ （当社製品比：重量1/3）、及び47円/Wの見通しを得ており、且つ国内複数メーカーの工場に本軽量モジュールを実証設置、発電量をモニタリングし、その有効性は確認済み。

しかしながら、2020年12月に上市された海外製競合品が比較的平易な軽量化技術（適用カバーガラスの薄肉化など）で $8.7\text{ kg/m}^2$ となっており、また性能・販売価についてもこれまで国内で受け入れられなかった海外製軽量太陽電池と比べ大幅に改善されていることを確認した。

これまで、今回の共同研究開発と同時に、耐荷重制限のある工場屋根・商業ビル・壁設置などへ軽量太陽光パネルの用途開発を見込み、市場ポテンシャル・マーケティング調査を行ってきたが、価格競争力の観点で「軽量太陽電池パネル」事業化は困難と判断。

しかしながら、本プロジェクトで新規開発の軽量化した新施工法は、既存の太陽光モジュールにも適用ができ、今後活用していく予定。

## 3. 波及効果

本プロジェクトにて開発された軽量モジュール製造技術、材料技術、そして新施工技術は、設置場所を選ばない太陽光発電システム、という観点から再生可能エネルギーの主電源化に貢献しうる技術であると思われる。

## 4. 今後の展開

### ・軽量化モジュール

現時点で得られた成果を基に事業化、若しくは更なる軽量化・低コスト化の研究開発負担をもっても収益性に有意な貢献が期待できず事業化は断念となるが、本プロジェクトで開発された軽量モジュール製造技術、材料技術は、当社内でのCIS太陽電池の研究・他用途開発で活用していく。

### ・新規開発の軽量化した新施工法

既存の太陽光モジュールにも適用ができ、今後活用していく予定。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	0 (0/0)	1 (1/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

## E 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの研究開発（シャープ株式会社）

### 1. 成果詳細

#### ①高精密／高自由度パターンニング技術開発

大面積化プロセスに適したセル構造候補（P l a n a r型構造／多孔質多層型構造：M P L E型）の検討を進め、各セル構造での製造プロセスフローの策定と課題抽出を実施。また、フィルム上塗工プロセスでの課題抽出を行った。各種構造でのペロブスカイト塗液の濡れ性の結果を考慮して、適切な大面積塗工プロセス手法の選定を行う。また、乾燥結晶化プロセスの検討については、塗工後の所望の昇温シーケンス並びに乾燥雰囲気制御を実現する製造プロセス装置の開発を進めている。

ガラス基板上P l a n a r型セル構造において、A g裏面電極による変換効率16.4%を達成。また、ガラス基板上にフィルム基体貼付けによるP l a n a r型セル構造を作製、変換効率13.8%（ガラス基板在り状態）を達成。変換効率の改善・バラつきの抑制対策として、透明導電膜形成したフィルム上での各レーザスクライププロセス実施後のセル端面構造の適正化を行った。レーザスクライププロセス後のセル端面構造の後処理プロセスによる変換効率の改善・バラつきの抑制も試みている。

#### ②高信頼性封止技術及び信頼性評価技術開発

各セル構造（P l a n a r型構造／M P L E型構造）における製造コスト試算を実施、当初目標のコストに収まる試算を得た。また、高耐久性が期待されるM P L E型構造について変換効率13.4%を達成。M P L E型構造に用いられているカーボン電極構造とペロブスカイト層の界面構造分析を実施し、その高耐久性化の要因を明らかにし、P l a n a r型構造への要素技術導入を進めている。M P L E型構造セルで、高温高湿試験（85℃85%RH）で1500時間経過後もセル特性を確認。添加剤導入による耐久性改善効果の検証を進める。また、モジュール形成を行い水分侵入経路の分析を進め、その侵入経路の同定を行った。モジュール端部からの水分侵入について水分侵入量の経時変化量を数値化し、今後のモジュールデザインでの端部周辺構造並びに電極取り出し接合部設計に活用し、今後検討を進める簡便なモジュール設置施工も考慮したモジュール接合部設計を進める。

### 2. 実用化・事業化見通し

本NEDO委託研究開発において、モジュール変換効率18%で高耐久性を実現するフィルム型超軽量薄膜太陽電池の開発を行い、2025年度より研究開発で用いた製造装置を用いて、軽量屋根向けのテストサンプルの作製と実際の市場へのテスト導入を行う。これと並行して、研究開発で用いた製造装置をプロト生産ラインへの組み換えも進める。2026年度からは、プロト生産ラインでのモジュールの少量生産を開始、同年内に導入実績およびマーケティング結果により量産ライン増強（1000百万円）の判断を行う。2027年度に量産ライン立ち上げと増強ラインでの量産開始を目指す。

### 3. 波及効果

今回のコロナ禍に一国偏重したサプライチェーンの見直しが急務であり、国の指針として今後、工場の国内回帰が促されることから、今後、日本国内での工場立ち上げに関連する助成が活発に行われると予想される。また、少子高齢化による、就労人員の確保が難しくなっている昨今の動向と相まって、スマートファクトリー、物流などの工場、倉庫での自動化設備の投資が活発になると考えられる。弊社が進めている、無軌道搬送システムや生産ラインでの8K高精細カメラによる生産状況の管理システムや、大容量画像データ通信システムなど、工場、倉庫内での導入検討案件も増加傾向にあり、今後工場、倉庫での電力需要が逼迫し電気料金の削減のニーズが大きくなると考えられる。以上のような市場動向の予測から、従来重量制限により搭載が困難であった工場や倉庫等の屋根への太陽電池モジュールの搭載が可能になれば、弊社のエネルギーソリューションビジネスとファクトリーオートメーションビジネスを組み合わせた、電力供給から生産ラインの管理にかけて一連のファクトリーソリューションビジネスへ展開できると考えられる。

#### 4. 今後の展開

工場屋根の葺き替え工事の際に、透明ポリカーボネート製の屋根材に裏面側から貼付け施工可能な超軽量フィルム型薄膜太陽電モジュールを導入するケースを考えた場合、一般的な工場屋根（100 m<sup>2</sup>）への屋根葺き替えとPVシステム（蓄電池込み）の工事費用の概算を下記に示す。

工場屋根葺き替えとPVシステム設置費用400万円/100 m<sup>2</sup>

内訳：

軽量PVモジュール費用：90万円/100 m<sup>2</sup>

PVシステム費用（蓄電池込）：110万円/100 m<sup>2</sup>

工場屋根部材、施工費用：200万円/100 m<sup>2</sup>

工場屋根葺き替えとPVシステム設置費用を10年間の総発電量230,000 kWh（23 kWシステム/100 m<sup>2</sup>）で割った発電量コスト（円/kWh）は17.4円/kWhとなり、一般的な電気料金19円/kWhよりも安く、顧客側の導入メリットも十分得られる。さらに、PVシステムによる発電により、工場の電気料金の契約電力の上限（最大デマンド）を低く抑えることで、電気代を削減することが出来る。このように、工場屋根を所有する事業主に対してフィルム型超軽量薄膜太陽電池の導入メリットを強く訴求出来ると考えられる。また、事業主にとって工場屋根葺き替えとPVシステム設置費用の初期投資の負担を低減する施策として、PVの屋根貸しやPPA（Power Purchase Agreement）などが挙げられる。近年導入実績が増えているPPAは、メーカーが初期投資を負担することにより事業主の初期投資を抑え、さらには軽量屋根設置で得られる電力を事業主に対して電力市場価格よりも安い価格で供給することで、市場でのPV設置を後押しするビジネスモデルである。

このようなビジネスモデルにより、軽量工場屋根への太陽電池導入が加速されるものと考えられる。また、近年着実に増加しているESG投資やRE100への参加は、現在のところ比較的規模の大きい企業での広がりではあるが、この動向は将来的には中小企業にも広がってくると考えられ、工場屋根へのPVシステムの設置は大きな動機になってくると思われる。

以上のことから、NEDO提案での目標が達成されれば、発電効率、コスト力、重量面で他の軽量太陽電池を圧倒することが出来、軽量屋根向けの太陽電池モジュールを広く普及させることができると考える。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	0 (0/0)	1 (1/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	1	1
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	1	1
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

## F 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池のモジュール化要素技術研究開発（株式会社エネコートテクノロジーズ）

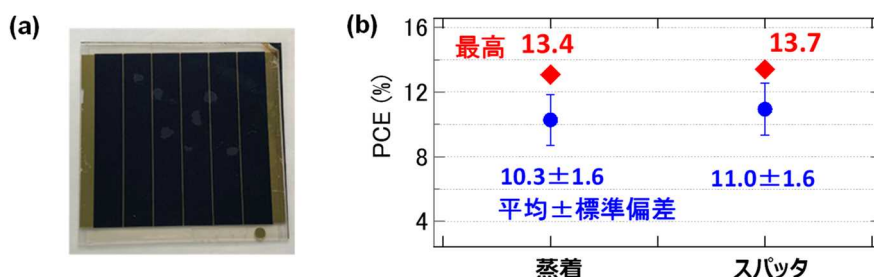
### 1. 成果詳細

#### 1.1 高効率ペロブスカイト太陽電池の製膜技術開発

##### ①電極材料開発

従来の研究開発ベースでのペロブスカイト太陽電池（Perovskite Solar Cells、PSCs）デバイスでは、依然として、金電極を使用するのが主流となっている。金は蒸着法により容易に製膜できることから、ペロブスカイト層やホール輸送層の材料評価のためには適しているが、大量生産、大面積モジュールの製品化という観点では、より高性能かつ低コストの電極材料および製法の開発が不可欠である。電極材料とホール輸送材料（HTM）との仕事関数のマッチングおよびオーミック接合がPSCs性能向上に関わる重要要素であるので、その点を考慮しながら、より低コストな金属系代替材料の選定を進めた。電極の製膜手法については、蒸着法よりも低コスト、量産性に優れたスパッタ法を用いて検証した。

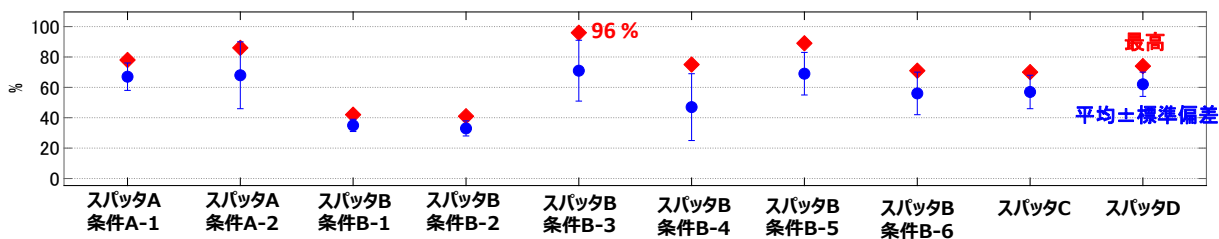
まず、3.8cm角6段ガラスモジュール（発電面積14.1 cm<sup>2</sup>、図Ⅲ-2-(イ)-(i)-F-1(a)）での電極作製において、現状標準電極として使っている金蒸着品と金スパッタ品を同ロット内（それぞれN=8）で性能比較した。6段ガラスモジュール作製の基本プロセスは、モジュール構造がパターンニングされたITO基板上に電子輸送層、ペロブスカイト層、ホール輸送層をスピコート塗布し、不要な部分のペロブスカイト層とホール輸送層をレーザー加工にて除去、そこへ金蒸着あるいはスパッタ法にて電極形成する。モジュール性能は、高照度1 SUN（AM-1.5G、100 mW/cm<sup>2</sup>）下でのIV特性を測定し、その短絡電流（Isc）や開放電圧（Voc）、曲線因子（FF）、変換効率（PCE、なお以下における変換効率は、全てdesignated areaにて計算している。）等々を評価した。図Ⅲ-2-(イ)-(i)-F-1(b)に示すように、同ロット内にて、金蒸着品での最高PCE13.4%、金スパッタで13.7%と同等性能が得られ、また、平均PCEだと金スパッタ品の方が高いPCEであったことから、電極作製方法による差異はないと判断した。



図Ⅲ-2-(イ)-(i)-F-1 (a) 14.1cm<sup>2</sup>-6段ガラスモジュール外観写真 (b) 電極作製方法（蒸着／スパッタ）での性能比較

次に、金以外のスパッタ電極材料について検討した結果一覧を図Ⅲ-2-(イ)-(i)-F-2に示す。電極材料とHTMとの仕事関数のマッチングなどを考慮して選んだ候補材料A～Dについてセルを試作し、1 SUNでのIV測定により性能評価した（N=5～8）。図Ⅲ-2-(イ)-(i)-F-2では、各ロットでの基準セル（金蒸着セル PCE 14～16%）の最高値を基準に規格化して比較しており、候補材料Bでのスパッタ条件（ガス圧、パワー等）を検討したうちのひとつ（条件B-3）で、金蒸着品とほぼ同等性能が得られることが確認できた。

今後はこの金電極品と同等性能を出せる暫定スパッタ電極材料を用いたモジュール化検証を行い、低コスト化・高効率化の両立を目指す。また、スパッタ電極を用いたデバイスの耐久性試験を進めていく必要がある。

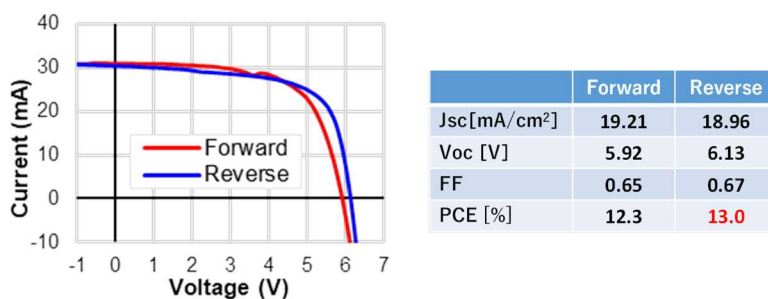


図III-2-(イ) -(i)-F-2 金以外のスパッタ材料での性能比較（金蒸着セルの最高値を基準に規格化）

### ②ホール輸送材料（HTM）開発

従来のペロブスカイト太陽電池では Spiro-OMeTAD などの低分子有機半導体材料や PTAA と呼ばれる高分子半導体材料が用いられてきた。本事業では、典型的なHTMである有機半導体材料Spiro-OMeTADの自動スピコートシステムによる安定塗布およびアニールの条件最適化を行い、現状での順型構造デバイスでの高効率化を図り、ガラス/フィルムモジュールにて 19.2/16.9 % を達成した（図III-2-(イ) -(i)-F-5 参照）。しかし、これらの材料は、電気伝導性を向上させるために、Li<sup>+</sup>TFSI<sup>-</sup> などの添加物とともに成膜して用いられるが、その添加物の Li<sup>+</sup> イオンなどのイオン移動が太陽電池デバイスの耐久性の低下の原因となっている。また、有機半導体材料自体のアモルファス膜安定性が十分でないことも太陽電池デバイスの耐熱性の低下の原因となっている。

単分子 HTM は逆型構造のペロブスカイト太陽電池において、従来のバルク有機層の弱点（光透過性、耐久性）を克服し、かつ、優れた光電変換効率の実現が期待される材料である。京都大学では、これまでに新規単分子 HTM を開発し、セルにて 20 % を超える変換効率を達成している。弊社においても、この単分子 HTM を用いた検証を実施し、ガラス基板ミニセル（2.5cm 角基板、発電面積 0.1 cm<sup>2</sup>）で 19.8 %、3.8cm 角 6 段ガラスモジュール（発電面積 14.1 cm<sup>2</sup>）にて 13.0 %（図III-2-(イ) -(i)-F-3）を確認した。今後は、単分子 HTM の大面積塗工条件の検討が必要である。

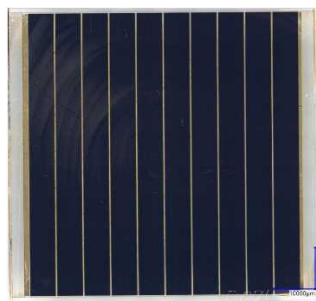


図III-2-(イ) -(i)-F-3 単分子 HTM を用いた逆構造型 6 段ガラスモジュールの性能特性

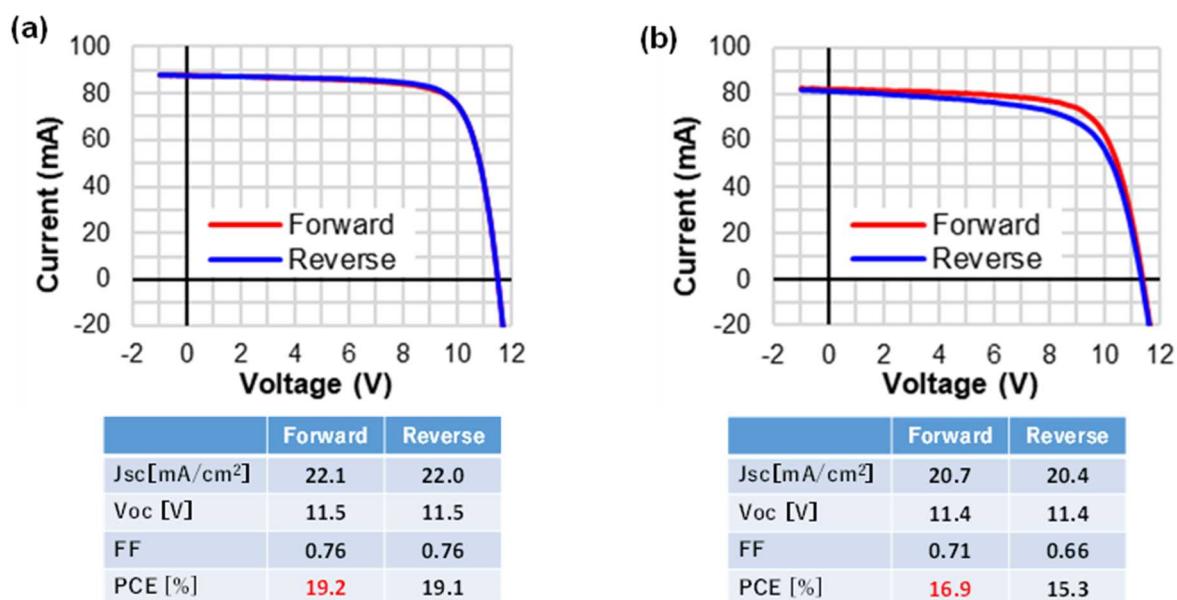
### ③塗工技術開発

これまで、スピコート塗布技術によるペロブスカイト太陽電池の高効率化とともに、その結晶化メカニズムを解明してきた。基板サイズは、2.5cm 角基板での評価を行ってきたが、モジュール生産の視点で、大面積化を指向し、7.5 cm 角基板を用いた 10 段モジュール（発電面積 40 cm<sup>2</sup>、図III-2-(イ) -(i)-F-4）の試作を主体に開発を進めた。モジュール作製プロセスとしては、レーザーパターニングによって 10 段モジュール加工した ITO 基板の上に電子輸送層、ペロブスカイト層、ホール輸送層をスピコート塗布し、不要な部分のペロブスカイト層とホール輸送層をレーザー加工にて除去した後、電極形成、電極レーザーパターニングを行った。大面積かつフィルム基板上への安定塗布技術の確立、再現性向上のため、弊社で独自開発した自動スピコートシステムを導入し、膜厚・膜質の均一化の検証を進めた。そして、各層材料の自動塗工機での塗工条件を最適化し、ペロブスカイト組成、結晶化速度、界面状態の改善を図ることで、7.5 cm 角 10 段モジュールのガラス基板で 19.2 %（図III-2-(イ) -(i)-F-5 (a)）を達成し、その最良塗工条件をフィルム基板モジュール作製へフィードバックすることにより、フィルム基板にて 16.9 %（図III-2-(イ) -(i)-F-5 (b)）を達成した。現状では、ガラス基板

からフィルム基板化することによって予想される性能低下、具体的には、透過率低下に伴う  $I_{sc}$  低下や、ガラス基板上ITOのシート抵抗 ( $10 \Omega/\square$ ) よりもフィルム基板上の方が高抵抗 ( $15 \Omega/\square$ ) であることに伴うFFの低下が見られるが、より高透過率で低シート抵抗のフィルム基材の探索やARコート等による光マネジメント対策により向上可能であると考えられる。また、ガラス基板で20%を超えるさらなる性能アップを図ることで、フィルム基板についても18%以上の変換効率が期待できる。



図III-2-(イ) -(i)-F-4 40 cm<sup>2</sup>-10 段モジュール外観写真

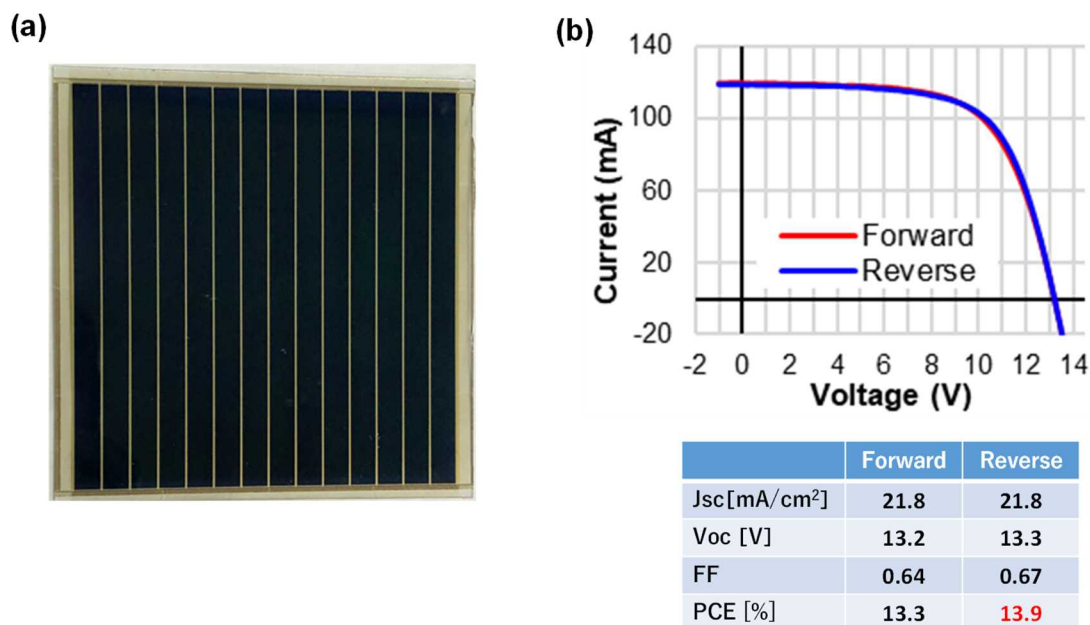


図III-2-(イ) -(i)-F-5 40cm<sup>2</sup>-10 段モジュールの性能特性  
(a) ガラス基板 (b) フィルム基板

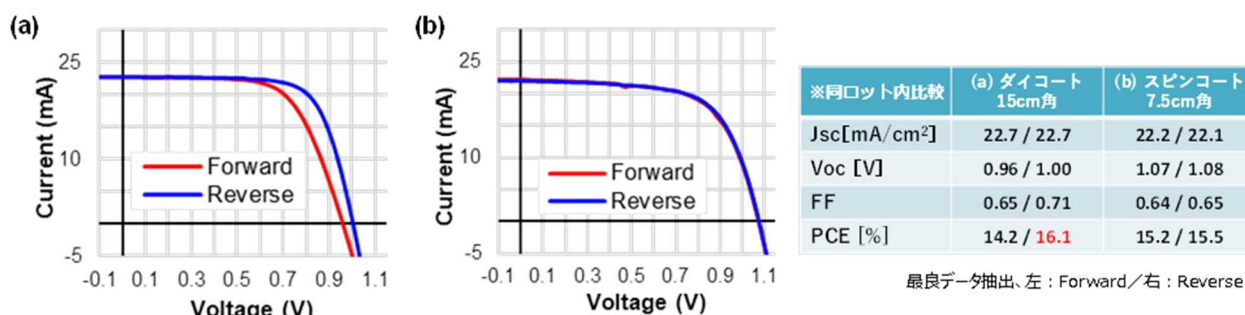
さらに、スピコート塗布技術によるモジュール高効率化、面積拡大への取り組みとして、15 cm 角基板への拡大を図り、大面積基板上への安定塗布を行うための要素技術開発を行った。10 cm 角 14 段ガラスモジュール (発電面積 76.5 cm<sup>2</sup>、図III-2-(イ) -(i)-F-6 (a)) の試作に着手し、13.9% (図III-2-(イ) -(i)-F-6 (b)) を確認した。また、現状の貧溶媒法に限らず、二段階法での均質な結晶成長および大面積塗布を目指し、ダイコートでの成膜検証を行った。15 cm 角基板の 10 cm 角領域に二段階法にてペロブスカイト層を塗布し、その後、7.5 cm 角基板に切断後、通常同様にホール輸送層をスピコート塗布、金蒸着で電極作製し、25 個 (5×5) のセル (1 cm<sup>2</sup>) を配置して、その各セルにおける性能評価を行った。テスト塗布のため一般環境でのダイコート塗布であったが、図III-2-(イ) -(i)-F-7 に示すように、その中の一部セルにおいて、PCE 16.1% を達成し、同ロットでのスピコート塗布セ



ル (PCE 15.5 %) と同等性能が得られることが確認できた。今後、ダイコートでの大面積基板への均一成膜技術を確認し、性能分布の均一化を図りながら、大型基板塗工方式を見極めていく必要がある。



図III-2-(イ) -(i)-F-6 76.5 cm<sup>2</sup>-14 段モジュール (a) 外観写真 (b) 性能特性



図III-2-(イ) -(i)-F-7 (a) ダイコート(一般環境) (b) スピンコート(N<sub>2</sub>環境) でのセル性能比較

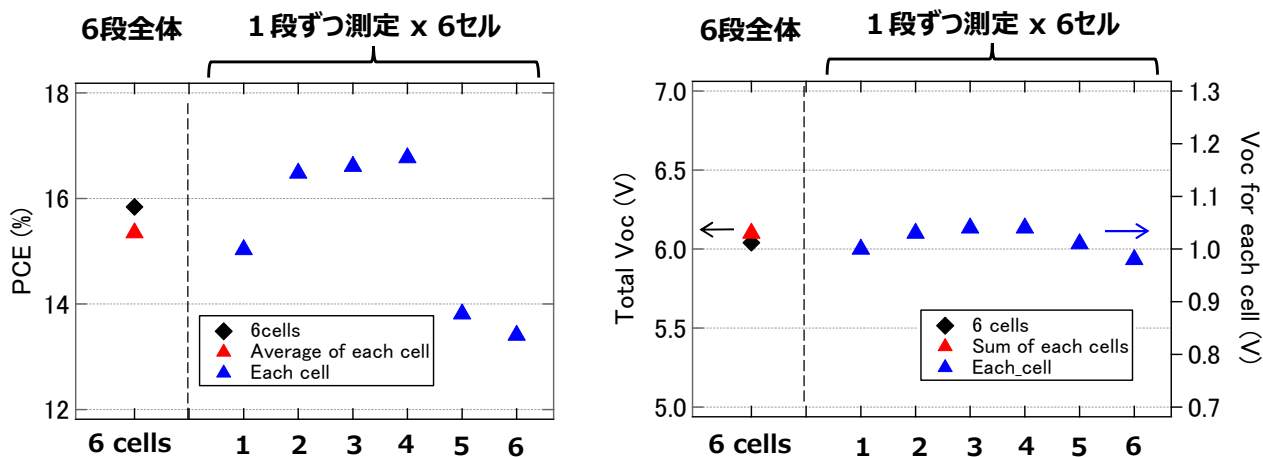
## 1.2 高自由度設計モジュール化要素技術開発

### ① パターニング技術開発

PSCs モジュールの高自由度設計を可能とし、かつ、高効率化していくためには、高精細で多様なパターニング技術が必要である。特に、ペロブスカイト層のパターニングを意図して設計したレーザー加工機を用いて迅速かつ高精度なパターン化技術の開発に取り組んだ。不活性ガス雰囲気下でもレーザー加工が行えるように、特殊加工ボックスを設計、そのボックス中にてパターニングができることも実証した。7.5 cm 角のガラス/フィルム基板それぞれについて、ITO 層/電子輸送層、ペロブスカイト層、ホール輸送層の除去に最適なレーザー加工条件の抽出を行った。レーザーパワーと加工線幅の関係を調べ、ITO 層をパターニングする条件 (P1 加工)、ITO 層を侵さずにペロブスカイト層とホール輸送層を切り取る (P2 加工) ようなレーザー掃引速度とパワーの範囲を確認し、さらに、電極パターニング (P3 加工) のためのレーザー条件についても検討した。レーザー加工痕の状態については、顕微鏡やレーザー顕微鏡、断面 SEM による観察やエネルギー分散型 X 線分光法 (EDX) による元素分析によって評価した。

モジュール化したときのセル間接続の仕様については、3.8 cm 角 6 段ガラスモジュールにおいて、6 段全体での性能評価結果と 1 段ごとの 6 つのセル性能を比較することで検証した。図III-2-(イ) -(i)-

F-8 において、(a) 変換効率と(b) Voc の測定結果を示しており、黒プロットが6段モジュール全体での測定値、青プロットが1段ずつでの測定値となっており、各セル平均変換効率、あるいは、各セルのVoc の和が赤プロットとなっている。Voc のグラフにて、黒と赤プロットの値がほぼ一致していることから、セル間接続部分でのロスのないレーザー加工幅、仕様であることを確認し、それを7.5 cm角あるいは10 cm角に拡大してモジュール化を進めた。これにより決定したモジュール仕様にて、7.5 cm角10段モジュールのガラス基板で19.2% (図III-2-(イ)-(i)-F-5 (a))、フィルム基板にて16.9% (図III-2-(イ)-(i)-F-5 (b)) を達成した。

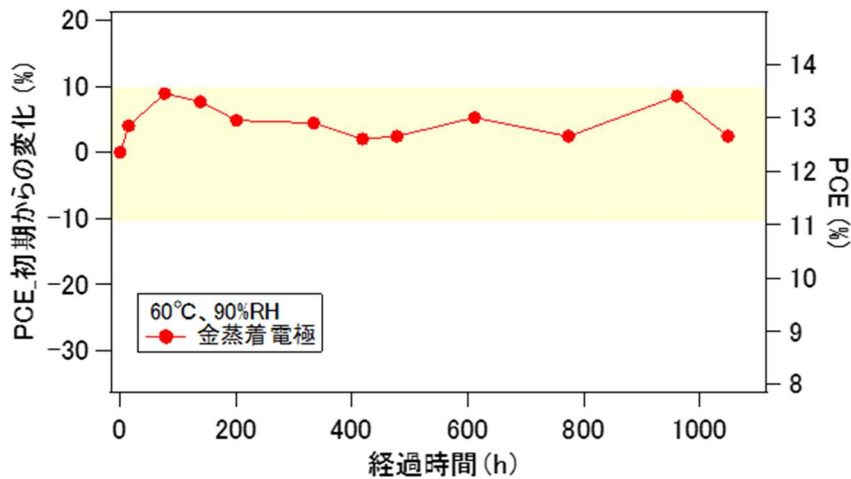


図III-2-(イ)-(i)-F-8 6段全体での測定値と1段ずつでの測定値の比較  
(a) 変換効率 (b) Voc (Forward, Reverse での平均値)

## ②封止技術開発

ペロブスカイト半導体は水分に対して耐久性が低いことが知られており、水分のバリア性に優れた材料探索を行ってきた。当初、ガラス等の無機系材料を中心に検討したが、封止構造を確立することはできなかつたため、京都大学と共同で樹脂材料での探索を進めた。候補材料（無溶媒の封止樹脂）を数種類に絞り、ガラスを用いて簡易封止構造での評価を行った結果、ガラス基板のペロブスカイト太陽電池では、加速試験においても1000時間（10年に相当）を超える耐久性を確認できている。本事業の目的である軽量モジュールの太陽電池の開発においては、ガラス基板での太陽電池と異なり、太陽電池両面（受光面及び裏面）にバリア性の高い封止材料が必要となる。

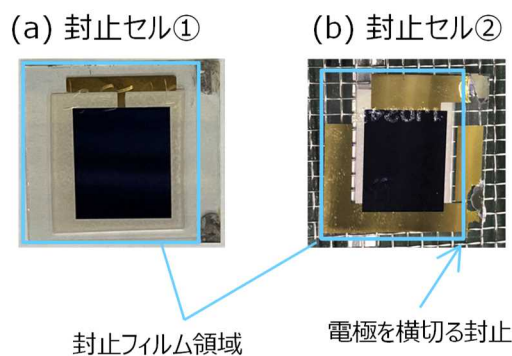
弊社ではその封止用バリアフィルムの評価、選定を進めており、事前の評価方法としてはカルシウム基板を用いた手法を利用した。この手法は、水分との反応に伴うカルシウム基板の変色、劣化を観察することにより封止性能を評価するもので、カルシウム基板をバリアフィルムで封止したものを60°C/90%RHや85°C/85%RHにて耐湿試験を実施し、その外観変化等から各バリアフィルムの評価、選定を行った。5社7種類のバリアフィルム（水蒸気透過度 $10^{-3} \sim 10^{-6}$  [g/m<sup>2</sup>/day]）を事前評価し、その中から85°C/85%RHにおいて100時間以上の封止効果が確認できたバリアフィルム一種（水蒸気透過度 $8 \times 10^{-4}$  [g/m<sup>2</sup>/day]）を、入手しやすさやコスト等も考慮した上で現状の標準バリアフィルムと決定した。この選定したバリアフィルムと耐湿性粘着樹脂を用いて封止したガラス基板セルについて、高温高湿試験（60°C/90%RH）を実施した結果を図III-2-(イ)-(i)-F-9に示す。PCEの初期からの変化量について、経過時間1000時間以上で低下率10%以内で推移しているのが確認できた。



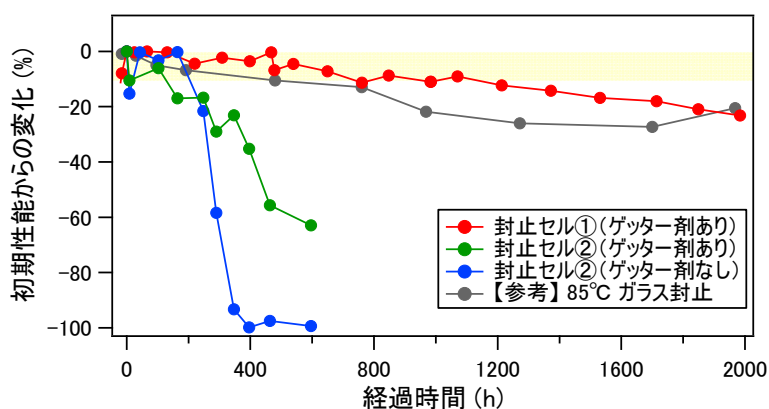
図III-2-(イ) - (i) - F-9 高温高湿試験結果 (60°C/90%RH)

さらに、85°C/85%RH 環境下での耐久性試験についても図III-2-(イ) - (i) - F-10 に示すような2種類のセル (a) ゲッター剤入りで電極を全面封止するセル、(b) 電極を横切る封止構造のセル (ゲッター剤 有/無)) で行った。電極の構造上、(a) のセルについては、200lux 下での性能評価、(b) のセルについては 1SUN 下での性能評価にて経時変化を調べた。なお、200lux 下での測定の方が、リーク (シャント抵抗) に敏感で劣化をいち早く検出できるため、より厳しい試験となっていると考えられる。図III-2-(イ) - (i) - F-11 に各条件での封止セルの 85°C/85%RH 試験の結果について示す。封止セル① (電極全面封止、ゲッター剤あり、赤プロット) では、1000 時間で初期値からの低下率10%程度で推移していることが確認できた。その後の出力低下は、灰色プロットで示した 85°C試験での低下傾向と類似しており、高温による HTM の劣化を反映していると考えられ、HTM の耐熱性の改善が必要であるとされる。また、封止セル②にてゲッター剤なしの場合 (青プロット) は、水分侵入による発電層の退色により 200 時間以降で劣化が始まり、約 400 時間で出力ゼロとなった。緑プロットで示すように、ゲッター剤を入れることで耐久性の改善は見られたが、電極部分に由来する別要因での劣化が生じていた。

封止プロセスや封止構造 (周囲の封止強化、全面封止など) および封止材料の改善を図り、さらに耐久性を向上させる必要がある。また、フィルム基板セル/モジュールでの両面封止プロセスの検討も行う必要がある。



図III-2-(イ) - (i) - F-10 封止セル外観図



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-F-11 高温高湿試験結果(85°C/85%RH)

## 2. 実用化・事業化見通し

エネコートにおけるペロブスカイト太陽電池の事業化見通しは以下の通りである。屋外で使用するペロブスカイト太陽電池は、高効率化、高耐久化、大面積化という大きな開発課題があり、今後も高効率化、高耐久化については継続して性能向上を検討して行く。

ペロブスカイト太陽電池の製品化は 2026 年を見込んでおり、最初のターゲットとしては、屋外で使用する防災用途や各種センサーを動作する電源としての用途を考えている。防災用太陽電池としては、普段は倉庫に保管しておき、有事の際にテントと共に倉庫から取り出して使用するものなどが考えられる。また、各種センサーを動作する電源用途としては、橋梁や法面などのコンクリート検査に応用するセンサー類、河川の水位を測定する超音波センサーなどが考えられる。

## 3. 波及効果

本事業にて開発した軽量・フレキシブルで高性能を有するペロブスカイト太陽電池は、プロジェクト提案時と同様、耐荷重が小さく既存の結晶シリコン太陽電池を設置できないような建物の屋根や壁、高速道路や鉄道の防音壁、道路の法面などへの応用が適している。製品化の最初のターゲットは上記のように防災用途ではあるが、早急に結晶シリコンが設置できない低耐荷重スペースへの設置を進めていく。特に市街地では、太陽電池を設置できる平地よりもビルの窓や壁の面積の方が広く、太陽電池の未設置スペースを有効活用することで、今後のカーボンニュートラル社会の実現へ貢献していきたい。

## 4. 今後の展開

今後は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／次世代型太陽電池実用化事業）にて本プロジェクトの継続開発を実施し、実用サイズとなる 300mm 角基板でのペロブスカイト太陽電池モジュールを作製可能な製造技術を確認する。そして、上述のように重量制限のため結晶シリコンが設置できない軽量屋根や壁面等のスペースへの展開を検討し、ペロブスカイト太陽電池の実用化、カーボンニュートラル社会の実現へ貢献していきたい。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	0 (0/0)	1 (1/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	1	3	0	4
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0


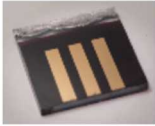


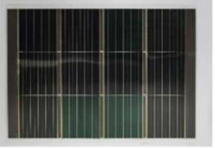
(2022年6月20日現在)

G 高自由度設計フィルム型ペロブスカイト太陽電池の基盤技術研究開発（国立大学法人京都大学、  
（再委託） 公立大学法人兵庫県立大学）

1. 成果詳細

ペロブスカイト太陽電池モジュールの高性能化のために、1) ペロブスカイト層の大面積の均一塗工技術開発と2) レーザー加工によるモジュールのパターン化技術開発に取り組んだ。まず、当グループで用いている標準的なペロブスカイト太陽電池について、これまでの検討結果を、デバイスのサイズと用いる基板の種類によって整理して示す（表Ⅲ-2-(イ)-(i)-G-1）。

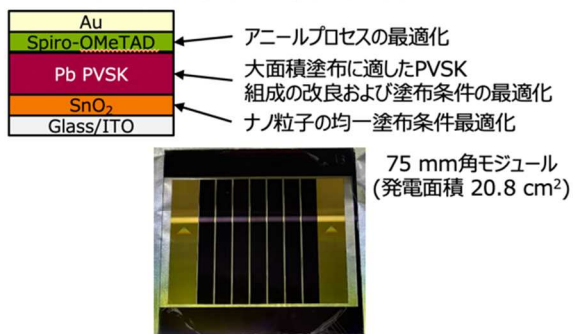
表Ⅲ-2-(イ)-(i)-G-1 ペロブスカイト太陽電池の特性まとめ。

	25 mm角セル (0.1 cm <sup>2</sup> )	25 mm角モジュール (発電面積 0.79 cm <sup>2</sup> )	75 mm角モジュール (発電面積 20.8 cm <sup>2</sup> )	300 mm角40段モジュール (発電面積 478 cm <sup>2</sup> )
				
Forward scan	25 mm角セル	25 mm角モジュール	75 mm角モジュール	A4 (300 mm角)モジュール
目標値	PCE 23%	PCE 21%	PCE 20%	PCE 20%
ガラス基板 (10 Ω)	<i>J<sub>sc</sub></i> 23.7 mA/cm <sup>2</sup> <i>V<sub>oc</sub></i> 1.11 V FF 0.78 PCE 20.6% <i>R<sub>s</sub></i> 5.0 Ω cm <sup>2</sup> <i>R<sub>sh</sub></i> 2.6 kΩ cm <sup>2</sup>	<i>J<sub>sc</sub></i> 23.0 mA/cm <sup>2</sup> <i>V<sub>oc</sub></i> 1.17 V/cell FF 0.71 PCE 19.0% <i>R<sub>s</sub></i> 4.6 Ω cm <sup>2</sup> /cell <i>R<sub>sh</sub></i> 3.3 kΩ cm <sup>2</sup> /cell	<i>J<sub>sc</sub></i> 21.9 mA/cm <sup>2</sup> <i>V<sub>oc</sub></i> 1.17 V/cell FF 0.76 PCE 19.5% <i>R<sub>s</sub></i> 4.7 Ω cm <sup>2</sup> /cell <i>R<sub>sh</sub></i> 4.3 kΩ cm <sup>2</sup> /cell	---
目標値	PCE 21%	PCE 19%	PCE 18%	PCE 18%
フィルム基板 (15 Ω)	<i>J<sub>sc</sub></i> 21.2 mA/cm <sup>2</sup> <i>V<sub>oc</sub></i> 1.14 V FF 0.76 PCE 18.5% <i>R<sub>s</sub></i> 8.8 Ω cm <sup>2</sup> <i>R<sub>sh</sub></i> 8.5 kΩ cm <sup>2</sup>	<i>J<sub>sc</sub></i> 20.7 mA/cm <sup>2</sup> <i>V<sub>oc</sub></i> 1.07 V/cell FF 0.68 PCE 15.0% <i>R<sub>s</sub></i> 5.9 Ω cm <sup>2</sup> /cell <i>R<sub>sh</sub></i> 4.7 kΩ cm <sup>2</sup> /cell	<i>J<sub>sc</sub></i> 21.1 mA/cm <sup>2</sup> <i>V<sub>oc</sub></i> 1.16 V/cell FF 0.70 PCE 17.1% <i>R<sub>s</sub></i> 7.0 Ω cm <sup>2</sup> /cell <i>R<sub>sh</sub></i> 14.5 kΩ cm <sup>2</sup> /cell	<i>J<sub>sc</sub></i> 21.3 mA/cm <sup>2</sup> <i>V<sub>oc</sub></i> 0.88 V/cell FF 0.62 PCE 11.4% <i>R<sub>s</sub></i> 10.6 Ω cm <sup>2</sup> /cell <i>R<sub>sh</sub></i> 0.2 kΩ cm <sup>2</sup> /cell

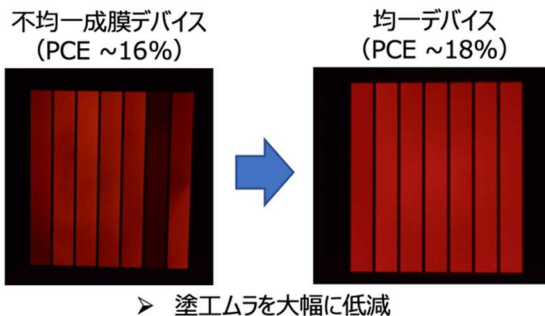
1) ペロブスカイト層の大面積の均一塗工技術開発に関して、ペロブスカイト層材料の組成を最適化した。また、ITO基板上に作製するSnO<sub>2</sub>層の材料の高純度化と表面処理を検討した。これらの改良により、ペロブスカイト層薄膜の欠陥を抑制することが可能になり、後述するパターン化技術開発と合わせて、75 mm角モジュールでは、ガラス基板で19.5%にまで光電変換効率を向上させることができた。

2) レーザー加工によるモジュールのパターン化技術開発  
 レーザー加工を用いたモジュールのパターン化について、実際に作製したモジュールのPL測定およびEL測定により、特性の低下をもたらしている不良箇所の選定とその加工法の改善に取り組んだ（図Ⅲ-2-(イ)-(i)-G-1）。その結果、ヒステリシスの低減とともに、75 mm角ガラスモジュールで1.17 V/cell、75 mm角フィルムモジュールで1.16 V/cellへと開放電圧も向上した。これにより、フィルム基板を用いた75 mm角モジュールでも17.1%の光電変換効率まで特性が向上した。

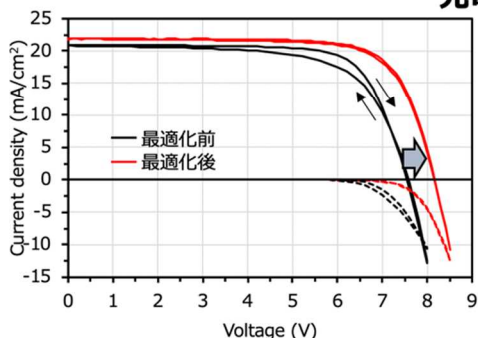
### デバイス構造と最適化項目



### デバイスのEL像



### 光電変換特性



最適化前		最適化後	
$J_{SC}$	21.0 mA/cm <sup>2</sup>	$J_{SC}$	21.9 mA/cm <sup>2</sup>
$V_{OC}$	7.54 V	$V_{OC}$	<b>8.18 V</b>
	<b>(1.08 V/cell)</b>		<b>(1.17 V/cell)</b>
FF	0.73	FF	0.75
<b>PCE 16.6%</b>		<b>PCE 19.1%</b>	

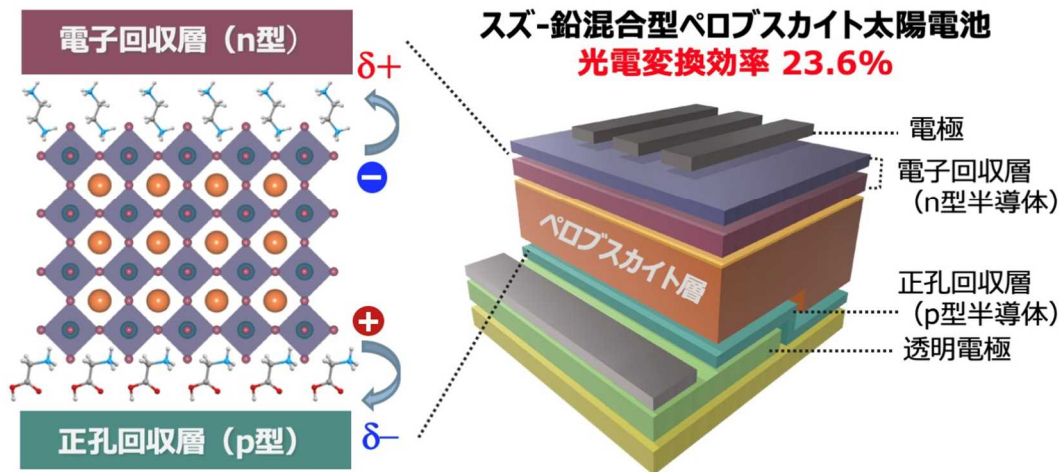
**$V_{OC}$ が向上し、ヒステリシスが少なくなった。**

図III-2-(イ) -(i)-G-1 レーザー加工を用いたパターン化技術開発。

### 3) ペロブスカイト半導体材料の開発

より長波長領域の太陽光を光電変換できるペロブスカイト半導体材料として、Pb-Sn 混合系の材料開発を行なった。これまでに当グループで見出している、Sn<sup>4+</sup>スカベンジャー法 (Nat. Commun. 2020) は Pb-Sn 混合系材料においても、有効に機能することを見出し、マルツールを用いた表面パッシベーション技術と組み合わせることで、7  $\mu$ s を超えるキャリア寿命を示すことを見出し、21.4%の光電変換特性を得た (Chem. Sci. 2021)。さらに、光電変換効率を向上させるためには、各電極へのキャリアの取り出し効率の向上の観点から、ペロブスカイト表面にダイポールを発現させた表面パッシベーションが有効であることに着目した (図III-2-(イ) -(i)-G-2)。前駆体溶液にグリシン塩酸塩 (GlyHCl) を添加すること、および表面をエチレンジアンモニウムのヨウ素塩 (EDAI<sub>2</sub>) で表面処理をすることで、ペロブスカイト薄膜の上面だけでなく、下面も選択的に、それぞれ EDA<sup>2+</sup> (上面) および Gly (下面) をパッシベーションできることを見出した (ToF-SIMS 測定結果)。これにより、1050 nm (1.25 eV) のバンドギャップに対して、0.91 V の高い開放電圧 (電圧損失 0.34 eV) が得られ、逆型構造および Sn を含む系では世界最高効率となる 23.6%の光電変換効率を得ること成功した (Energy Environ. Sci. 2022.)。

# ペロブスカイト薄膜の上下表面パッシベーション法の開発

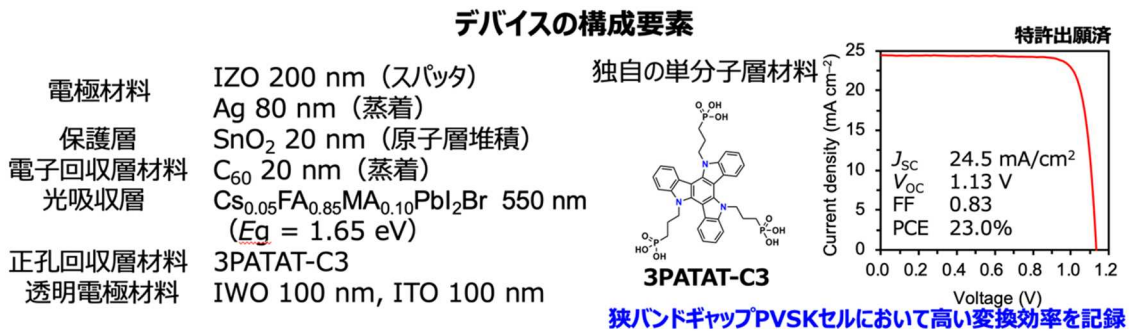


図Ⅲ-2-(イ) -(i)-G-2

Sn-Pb 系ペロブスカイト薄膜の上下表面パッシベーション法とデバイス構造：ダイポール戦略。

## 4) 単分子正孔回収層材料の開発

また、ペロブスカイト太陽電池の高性能化と高耐久性化を目的に、単分子層として用いることができる独自の正孔回収層材料の開発を進めた。マルチポッド型の材料として開発した PATAT を用いて、25 mm 角セルにおいて 23.0%の光電変換効率を達成し、AIST での測定でも 21.0%の認証値を得ることができた (図Ⅲ-2-(イ) -(i)-G-3)。MPPT 測定の結果、従来の正孔回収層材料に比べても、連続光照射条件下での耐久性が著しく向上することを見出している。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-G-3. PATAT を用いたペロブスカイト太陽電池の特性。



再委託（兵庫県立大学）

現行の透明導電性フィルムは、現行市販商品の PEN (or PET)/ITO フィルムは非常に高コスト（販売価格で 1 m<sup>2</sup> あたり数万円、製造価格は 1 m<sup>2</sup> あたり 5,000 円と見積り予想）となり、本プロジェクトにおける低価格フレキシブル太陽電池モジュールの作製には大きな障害となる。そこで兵庫県立大学グループでは、本プロジェクトにおいて低価格フレキシブル・ペロブスカイト太陽電池を作製のため、「印刷プロセス超低価格透明導電性フィルム」の作製を目標とした材料開発を実施している。研究目標は物性目標としてシート抵抗 15 Ω/sq.（低温プロセス）、価格目標として 500 円/m<sup>2</sup>（15 円/W 以下での太陽電池製造目標に貢献）としている。

兵庫県立大学グループではこれまでに印刷プロセス透明導電薄膜を形成するコロイド材料合成として、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系材料（In-Sn-O(ITO)含む）、SnO<sub>2</sub>、Al-Zn-O(AZO)、B-Zn-O(BZO)および IZO を合成した（図 III-2-(イ)-(i)-G-4）(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>系、TiO<sub>2</sub>系は次年度以降に合成予定)。ITO コロイド合成の最適化を行った結果、最適化によりシート抵抗 46 [Ω/sq.] の ITO 膜を得た（既報の印刷プロセス ITO としてはトップクラスの数値）（図 III-2-(イ)-(i)-G-5）。ただし、本材料は、塗布後に高温焼成プロセスが必要であり、その低温化が必要である。また、ZnO 系である AZO および BZO に関しては、合成を試みたものの酸・アルカリに弱く、吸湿劣化も高いことから最適化困難と判断し中止した。

原料：0.5M InCl<sub>3</sub> & 0.05M SnCl<sub>4</sub> in ethylene glycol (EG)

- ←0°Cで、攪拌(30分)
- ←1.5M NaOH in EG solution を攪拌しながら滴下
- ←0°Cで、攪拌(15分)
- ←オートクレーブ高圧反応器[右写真]で、加熱 (245°C、60時間)
- ←遠心分離、エタノールで2回洗浄、

合成ITO青色コロイド材料[右写真]



図 III-2-(イ)-(i)-G-4 透明導電性酸化コロイドの標準的合成スキーム

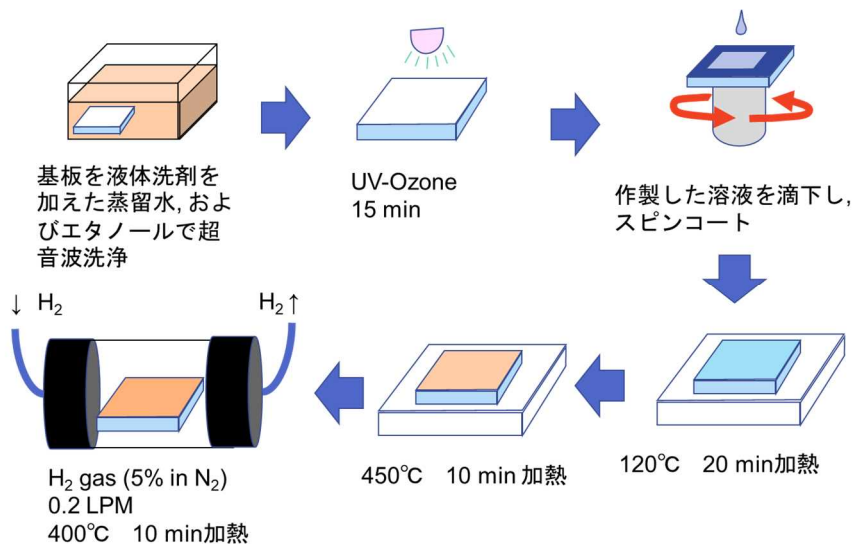
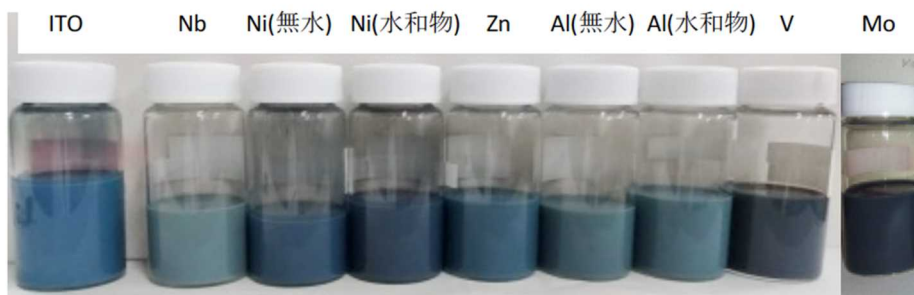
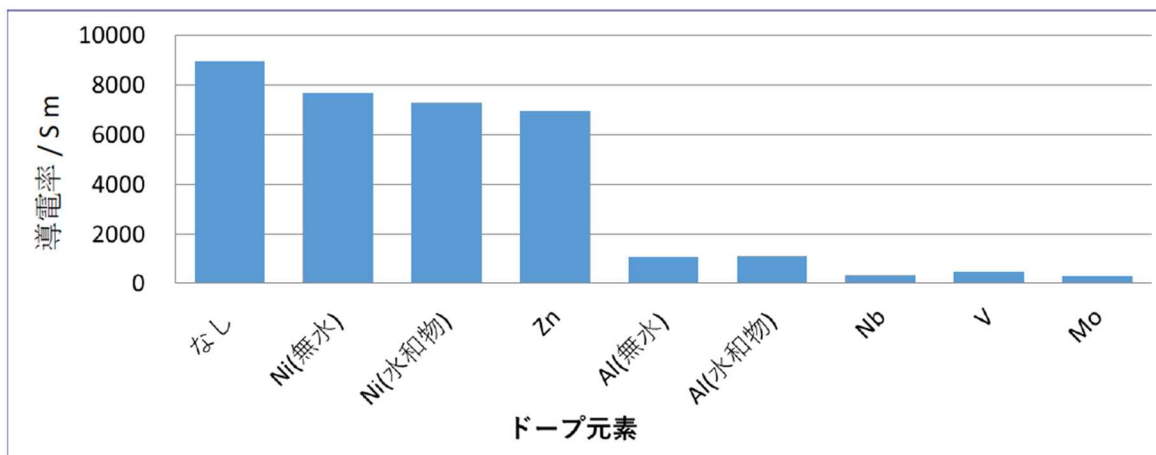


図 III-2-(イ)-(i)-G-5 透明導電性酸化薄膜の作製スキーム

さらに本研究では、ITO コロイドへの追加新規ドーパントの種類およびドーパ量の検討（4 原子材料「In-Sn-O-M 系」ナノ粒子合成）を行っている（図 III-2-(イ)-(i)-G-6）。現在、順次多種元素の

ドーピングを検討中である。今後、添加により伝導率が下がりにくい材料 (Ni および Zn) でドーピング量の最適化を検討予定している。結晶粒子径が大きく変化するドーピング元素 (Ni) も存在することを確認している。

今後は、ドーピングにより伝導率低下の原因解明および今後の電動伝導率の達成に向けた見通しのために、兵庫県立大学の放射光設備 NewSUBARU (日本の国内大学で最大の設備) を使用して、透明導電性薄膜材料の価電子帯・伝導帯エネルギー状態を決定し、高導電性透明材料の道筋を見出す予定である。



図III-2-(イ) -(i)-G-6 ITO ナノコロイドへのドーピングの影響。

上図：ドーピング元素と導電率の関係。ITO へのドーピング元素を変えると、大きく導電率が変化をする。

下図：ドーピング元素と得られた ITO コロイド溶液の写真。ドーピングでコロイド溶液の見た目が大きく変化する。

## 2. 実用化・事業化見通し

本研究で開発した高純度化ペロブスカイト半導体およびその成膜法は、結晶成長メカニズム制御の観点から、大面積塗工技術開発にも有用な知見を与えるものである。今後、グリーンイノベーション基金事業でのエネコートテクノロジーズでの製造技術開発に技術移転することで、軽量ペロブスカイト太陽電池モジュールの実用化に繋がる。

また、レーザー加工機を用いたパターニング技術開発および封止技術開発の成果も軽量大面積モジュールの実用化に貢献するものである。

## 3. 波及効果

本研究で見出した独自のペロブスカイト層の上下表面のパッシベーション技術により、SQ limit にわずか 0.06 V に迫る高い開放電圧を実現し、逆型構造での世界最高値 (23.6%) を得ることができた

(Energy Environ. Sci. 2022, 15, 2096. 発表、プレス発表)。今後、本手法は、「ダイポール戦略」という一般性の高い技術として学術分野のみならず産業面でも広く用いられるものと期待できる。

また、Sn-Pb系ペロブスカイトでは上記の手法を用いて、1050 nm (1.25 eV)のバンドギャップに対して、電圧損失が0.35 Vとなる0.91 Vが得られており、ペロブスカイトタンデムセルにおけるボトムセルの最適なデバイスとして、欧州の複数のグループから共同研究の依頼を受けるなど、世界中から注目を集めている。

さらに、単分子正孔回収層材料として開発したPATATは、23%の光電変換効率とAISTでも21%の認証値を得ることができた。2022年6月のAISTでの測定でも、高いデバイス安定性が認められ、AISTでの独自検討用の評価サンプルとして採用されている。従来のバルク層を用いた電荷回収層材料から、単分子膜電荷回収層材料へと変革し、本材料開発分野に新潮流をもたらす成果といえる。

#### 4. 今後の展開

これらの成果は、エネコートテクノロジーズおよびシャープなど関連企業に技術移転することで、軽量ペロブスカイト太陽電池モジュールの実用化に繋がるものと期待できる。軽量ペロブスカイト太陽電池の社会実装については、グリーンイノベーション基金事業での開発検討を進めて、実用化を実現したい。また、タンデム型太陽電池の開発研究に関しても、引き続き、企業および他研究機関と共同研究を進めて、その高性能化に取り組んでいきたい。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	1 (1/0)	2 (2/0)
論文	3	3	1	7
研究発表・講演 (国内・審査有)	27 (14)	25 (8)	1 (1)	53 (23)
(国際・審査有)	(9)	(3)	(0)	(12)
(国内・審査無)	(4)	(14)	(0)	(18)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	6	9	3	18
自機関からのニュース リリース、プレス発表	1	3	1	5
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	2	3	1	6

(2022年6月20日現在)

## H 超軽量モジュール技術の研究開発（株式会社東芝）

### 1. 成果詳細

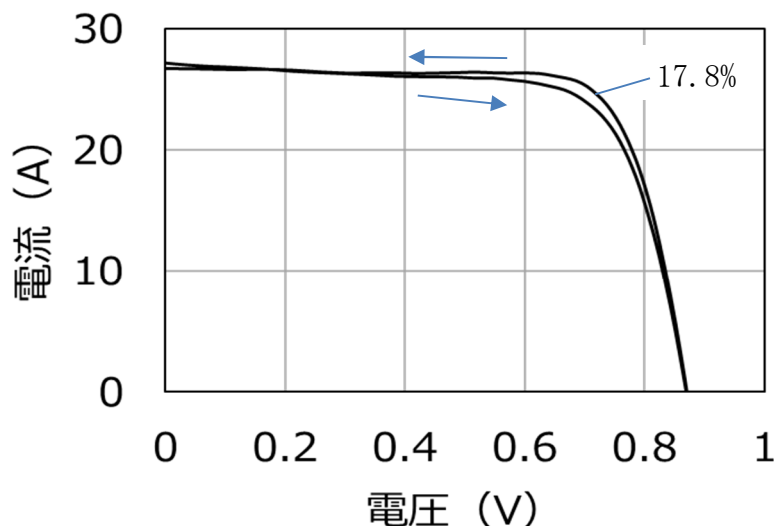
#### ①開発の目標

本開発では、超軽量ペロブスカイト太陽電池の研究開発を行った。中間目標は、5cm 角程度以上の超軽量モジュールにおいて、初期効率から相対効率低下 10%以下である耐熱試験時間を 1000 時間、光照射試験を 500 時間とする、30cm 角程度の大面積超軽量モジュール変換効率 18%以上とする、架台及びモジュール重量 5kg/m<sup>2</sup>以下とする、最終目標は、5cm 角程度以上の超軽量モジュールにおいて、初期効率から相対効率低下 10%以下である耐熱試験時間を 1500 時間、光照射試験を 750 時間とする、30cm 角程度の大面積超軽量モジュールで変換効率 23%以上とする、架台及びモジュール重量 3kg/m<sup>2</sup>以下とする、というものである。

#### ②変換効率向上を目的としたスズ鉛（SnPb）混合系ペロブスカイト太陽電池の開発

高効率の目標達成のために、フィルムモジュール 23%を達成するには、ガラスセル 27%を達成する必要があると考えているが、そのために、材料系を理論限界効率が 30%を超える Pb 系から、最も吸収端が長波長化して Shockley-Queisser limit のピークに近くなる SnPb 系を検討した(F. Hao, et al., J. Am. Chem. Soc. 2014, 136, 8094)。

同じコンソーシアムの参画メンバーである国立大学法人電気通信大学が SnPb 系ペロブスカイト太陽電池において世界トップの技術を持っており、20%を超える変換効率を出しているため、その技術を導入した。ただし、大面積での作製ができるように塗布方法はスピコートではなく、メナスカス塗布を用いて開発を進めた。メナスカス塗布においては、ペロブスカイト層の構造均一性が高い、後述する「1ステップメナスカス塗布法」において、SnPb 系ペロブスカイト太陽電池セルの試作に成功し、その結果、1cm×1cm サイズのガラス基板セル、ガラス/ITO/ホール輸送層/PVK（ペロブスカイト）/PCBM/BCP/Ag、SnPb 系において探索した元素組成比において、変換効率 17.8%まで向上した（図Ⅲ-2-(イ)-(i)-H-1）。低コスト化に直結する塗布速度は 5m/分以上の速度で塗布している。分光感度スペクトルでは、吸収端が長波長側へ伸びていることを確認した。



図Ⅲ-2-(イ)-(i)-H-1 1cm×1cm サイズのガラスセルの電流－電圧特性。  
ガラス/ITO/ホール輸送層/PVK/PCBM/BCP/Ag、  
SnPb 系ペロブスカイト材料使用。

#### ③ 2ステップ塗布法による大面積フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールの試作

大面積のフィルムモジュールとしては、受光面積 703cm<sup>2</sup> のモジュールを従来の Sn を含まない Pb 系ペロブスカイト材料、及び 2 ステップメニスカス塗布法を用いて試作を行い、特性評価を行ったところ、発電効率 14.1% という値を得た (図 III-2-(イ) -(i)-H-2)。

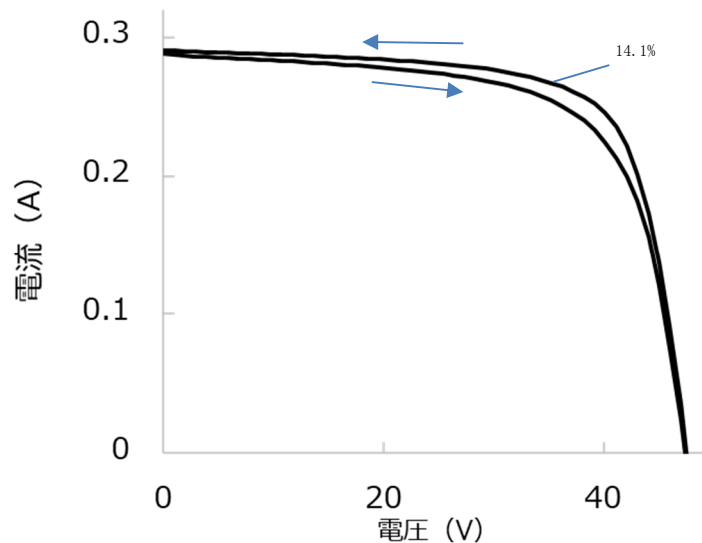


図 III-2-(イ) -(i)-H-2 703cm<sup>2</sup> サイズのフィルムモジュールの電流－電圧特性。  
Pb 系ペロブスカイト材料、2 ステップ法を使用。

#### ④ フィルム型モジュールの簡易降電試験

軽量化した場合、実使用可能かを確かめるために、簡易降電試験を行った。結晶シリコン太陽電池では電などの落下物衝突や設置時のひずみがあると割れてしまうため、厚いカバーガラスで保護し、重量のあるフレームでサポートしている。今回、フィルム型ペロブスカイトがフィルム状であっても機械的強度が保たれているか検証を行った。代表的な機械的試験は降電試験であるが、今回は直径 38mm の鋼球を用いた JIS-61215 の代替として簡易降電試験を行った。比較として、ガラスカバーの無い軽量フレキシブル結晶 Si 太陽電池モジュールも同試験を行った。試験方法はモジュール上に高さ 1m から鋼球を自然落下させる手法である。フィルム型ペロブスカイト太陽電池は、重量 1.5kg/m<sup>2</sup> のモジュールを用いた。ここで、割れ、あるいは著しく変換効率が低下する結果であれば、保護ガラスとひずみ／歪みが入らないようなフレームが必要になる。試験結果は、結晶シリコン太陽電池モジュールは試験後にひびが入り、手で持つと完全に割れ破損したが、試作したフィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールは破壊されず、発電自体は維持していた。ただし、変換効率は下がりその後やや回復して、最終的な相対変化は 15% 程度の減少となった。今回の結果により、保護ガラスを用いないペラの結晶シリコンモジュールに対する優位性が明らかになった。

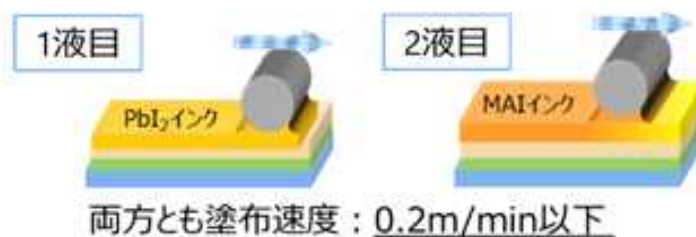
#### ⑤ 1 ステップメニスカス塗布法による大面積フィルム型モジュールの開発

当社が従来採用してきたペロブスカイト層の成膜法は、2 ステッププロセスと呼ばれる手法で、基板上に塗布したヨウ化鉛 (PbI<sub>2</sub>) 膜の上から、ヨウ化メチルアンモニウム (MAI) インクを塗布することで MAPbI<sub>3</sub> 膜を成膜する手法である (図 III-2-(イ) -(i)-H-3)。この手法では、PbI<sub>2</sub> と MAI の反応を制御することが難しく未反応物が残ること、工程数が多いこと、塗布速度が低速であることから、より量産に適した手法が求められていた。一方、あらかじめ MAI と PbI<sub>2</sub> を混合した MAPbI<sub>3</sub> インクを塗布して成膜する 1 ステッププロセスと呼ばれる手法があるものの (図 III-2-(イ) -(i)-H-4)、MAPbI<sub>3</sub> 結晶の成長を制御することが難しく、特に大面積に均一に塗布するのが困難であり、新たな塗布法の開発が必要

と考えた。

① 工程が多く、塗布速度が遅い

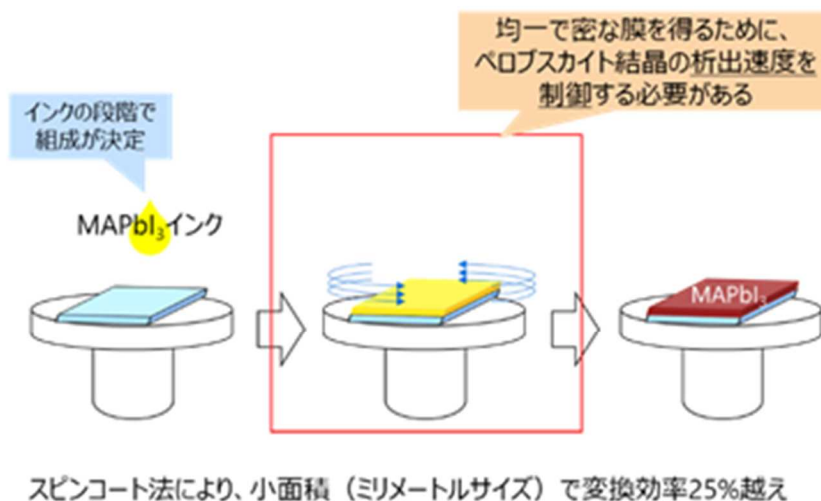
PbI<sub>2</sub>塗布 → 乾燥 → MAI塗布 → 乾燥の4工程



② 未反応物や組成の偏りが存在（更なる効率向上に課題）



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-H-3 従来の2ステップメニスカス塗布法とその課題

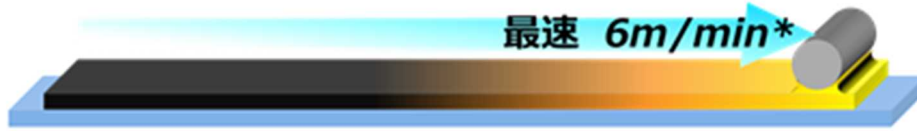


大面積に均一塗布することが難しい

図Ⅲ-2-(イ) -(i)-H-4 従来のスピコート法を用いた1ステップ塗布プロセスとその課題

そこで、当社は、フィルム型ペロブスカイト太陽電池のエネルギー変換効率向上と低コスト化への貢献が見込める新たなペロブスカイト層の成膜法として、MAPbI<sub>3</sub>結晶の成長を制御することができる1ステッププロセスのメニスカス塗布法（1ステップメニスカス塗布法）の検討を行った(図Ⅲ-2-(イ)-(i)-H-5)。

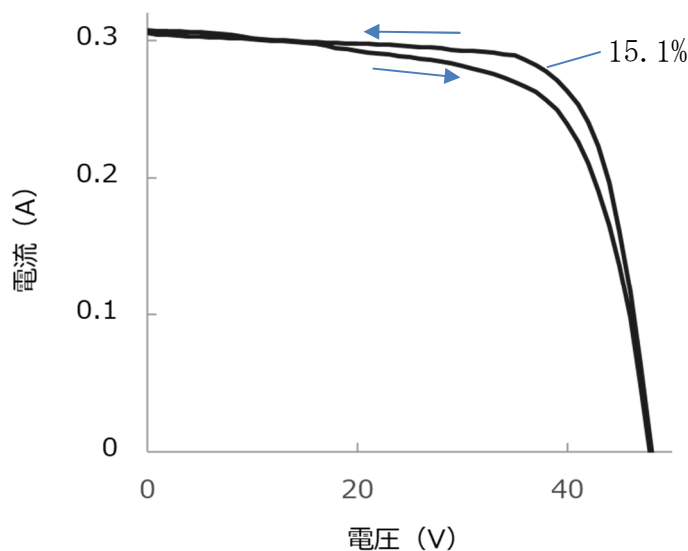
- ・ 2ステップのメニスカス塗布の最大**25倍以上**の塗布速度
  - ・ 塗布+乾燥の**2工程のみ** \* :5cm角での検証値
- ⇒ 塗布工程の合計時間が最大**50倍以上短縮** (当社比)



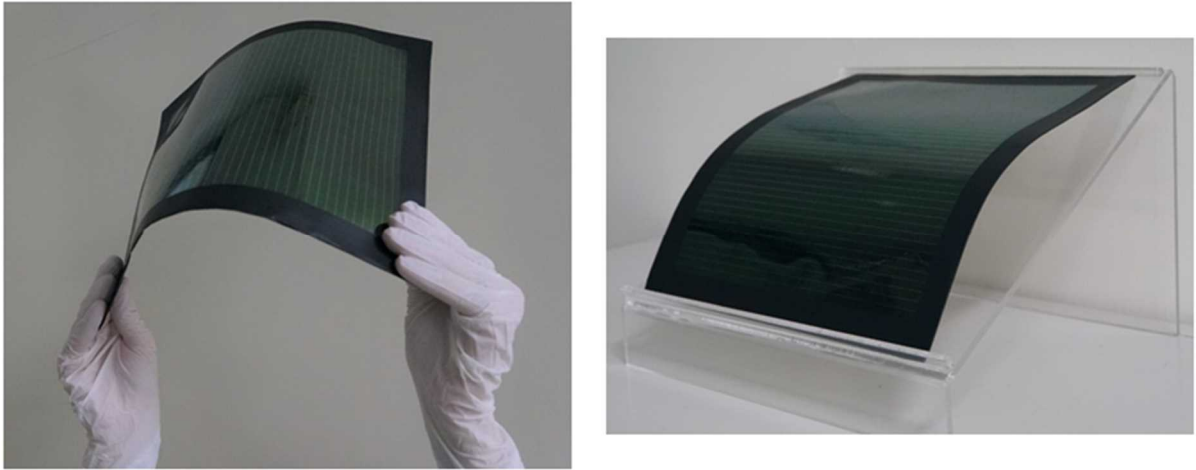
図Ⅲ-2-(イ) -(i)-H-5 1ステップメニスカス塗布法の概念図

新たに、MAPbI<sub>3</sub>インク、乾燥プロセス、装置の開発を行うことで、大面積均一塗布を実現した。成膜プロセスの工程が従来の半分となり、さらに、塗布速度の高速化が可能である。塗布速度においては、5cm角で量産時に必要と想定するスペックを満たす速度 6m/min を達成した。

大面積のフィルムモジュールとしては、受光面積 703cm<sup>2</sup> のモジュールを従来の Sn を含まない Pb 系ペロブスカイト材料、及び 1 ステップメニスカス塗布法を用いて試作を行い、特性評価を行ったところ、発電効率 15.1% という値を得た (図Ⅲ-2-(イ) -(i)-H-6)。本効率は、公表時 (2021 年 9 月時点) で、20cm 角以上のサイズの大面積フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールとしては世界最高効率であると考えている。また、普及型多結晶シリコン太陽電池の発電効率が 15%以上とされており、本発電効率は、大面積フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュールが実用レベルの効率を持ち得ることを検証した点に意味があると考えている。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-H-6 1ステップメニスカス塗布法で試作したフィルムモジュールの電流-電圧特性 (703cm<sup>2</sup> サイズ)

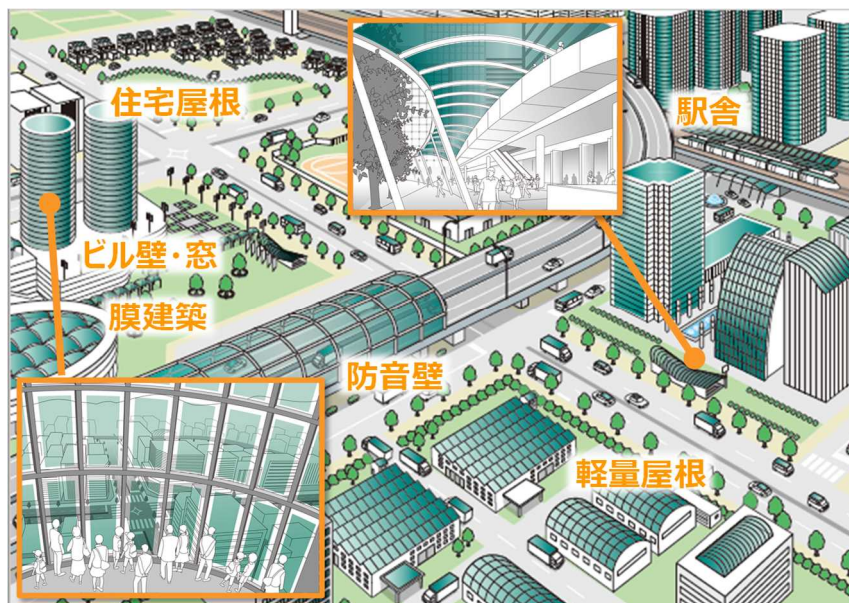


図Ⅲ-2-(イ) -(i)-H-7 1ステップメソカス塗布法を用いて作製した  
大面積フィルム型ペロブスカイト太陽電池モジュール(703cm<sup>2</sup>サイズ)

今回開発した新たな手法により作製したフィルムモジュールの外観写真を図Ⅲ-2-(イ) -(i)-H-7 に示す。エネルギー変換効率の向上と生産プロセスの高速化を両立することが可能となり、高効率かつ低コストのフィルム型ペロブスカイト太陽電池の実用化に向けて大きく前進したと考えている。

## 2. 実用化・事業化見通し

フィルム型モジュールの薄型、軽量、フレキシブル性等の特長を活かし、従来の結晶型シリコン太陽電池では設置が難しい、工場などの軽量屋根、ビルの窓、壁面、膜建築などへの導入を目指す。販売の対象としては、RE100 を目指す企業などを想定している。また、さらなる市場拡大のため、上記の特長を活かした、新たな用途探索も行う。市場規模の大幅な拡大に向けては、結晶型シリコン太陽電池に匹敵する発電コストを目指す必要があり、市場への導入と並行して、さらなる発電効率、耐久性の向上、製造コストの低減などに向けた開発を進める。





### 3. 波及効果

フィルム型ペロブスカイト太陽電池の社会への普及のためには、さらなる発電効率、耐久性の向上、製造コストの低減などが求められる。本技術の社会実装化を通じた国内の認知度と連動して、関連する、ペロブスカイト材料や電荷輸送材料、電極材料、フィルム材料、封止材料、配線部材、モジュール化の加工技術、成膜技術等々に関する学術面、産業面での研究開発が進み、ペロブスカイト太陽電池の生産量・導入量が増加する。その結果、国内産業や学術研究も活性化し、普及の最大化に必要な、さらなる高性能化、低コスト化もたらされる、といった好循環を生み出すことが期待される。またその好循環は、日本のカーボンニュートラルの実現にもつながると考えている。

### 4. 今後の展開

本開発は、グリーンイノベーション基金事業へ移行し、実用化に向けた開発を継続する。グリーンイノベーション基金事業では、ペロブスカイト太陽電池の普及に不可欠な発電コストの低減を目指し、さらなる高効率化、長寿命化、材料・プロセスにおける低コスト化、大面積化のための要素開発を行う。ペロブスカイト太陽電池は一般的に、素子間の特性ばらつきが大きいことが実用化に向けた課題である。そこで、開発においては、塗布成膜で用いる材料の溶液作製、および成膜についての、バラツキ低減、特性向上を両立する材料・プロセスのパラメータを見出すことを目的とした装置開発を行う。得られた知見を基に、量産化に向けた技術開発へ展開していく。

### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	1 (1/0)	3 (0/3)	0 (0/0)	4 (1/3)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演	0	4	1	5
(国内・審査有)	(0)	(2)	(1)	3
(国際・審査有)	(0)	(2)	(0)	2
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(9)
新聞・雑誌等への掲載	0	5	3	8
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	1	0	1
展示会への出展	0	2	0	2
受賞実績	0	2	0	2

(2022年6月20日現在)



# I 界面制御による高性能化技術と性能評価技術の開発（国立研究開発法人産業技術総合研究所、（再委託）学校法人立命館立命館大学、（再委託）国立大学法人京都大学、（再委託）地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所）

## 1. 成果詳細

界面制御による高性能化技術開発として、界面制御材料の開発を進めた。新規に開発した界面制御材料である SAM 材料を透明導電層/ペロブスカイト層間に導入したところ、変換効率で 4 ポイント向上することがわかり、SAM 構造が太陽電池性能に与える影響についても知見を得た。また FAPbI<sub>3</sub> 型のペロブスカイト層も導入し、小面積セルにおいて効率 21% を得た。FAPbI<sub>3</sub> 型のペロブスカイトにおいても、界面制御材料 F06 の導入効果を確認できた。さらに低分子アミン系パッシベーション材料を用いた太陽電池で効率 22.2% を得た。これらの技術は大面積化においても活用できる技術である。また、高性能化に向けた技術開発指針を与える成果として、再結合が起こる部位の特定に向けて電荷回収界面再結合と光吸収層全体で起こるバルク再結合の影響について区別して評価できる手法を確立し、太陽電池のエイジング効果の原因を明らかにした。

高効率化に向けた最適デバイス設計では、シミュレーションによりペロブスカイト層の少数キャリア拡散長  $L_n$  は効率 26% を得るためには実験値の 2.5 倍程度が必要であることがわかった。シミュレーションによりシングルセルにおけるペロブスカイト層の  $E_g$  分布最適設計を行い、表面側 2.45eV、中間部 1.50eV、裏面側 1.70eV で効率 29.9% が得られる事を試算した。さらに光劣化モデルの基礎となる欠陥密度と電子密度の増加が出力特性に与える影響を計算で模擬した。

性能評価技術では赤外吸収スペクトルによりペロブスカイト層の劣化状態を観察できることを確認し、インピーダンススペクトルにおいてセル内部のインピーダンス成分を抽出できることを確認した。劣化状況を検討するための封止セルを開発し、1000 時間以上の耐光性を確認した。さらにセル内部を非破壊で調べるための SHG 分光システムを構築した。これらは劣化要因の探索に活用できる技術である。また電流電圧特性にヒステリシスが見られるペロブスカイト太陽電池について、屋外においても正確な発電量を測定するための測定プログラムを作成した。また積水化学が作製したペロブスカイト太陽電池モジュールの屋外暴露試験も行った。

## 2. 実用化・事業化見通し

本事業において小面積セルでは変換効率 20% 以上が達成された。この値はすでに広く普及している結晶シリコン太陽電池と同等である。また耐久性については耐光試験において 1000 時間以上の効率を維持することが確認できた。他方、高温・高湿による影響も含めると現状においても不十分であり、実用化に向けて解決すべき課題は残る。すでに市場に普及しているシリコン太陽電池の寿命を考慮すると、屋外耐久性 20 年相当に対応する耐久性が必要であり、それらの性能を実験室サイズの小面積セルで想定すると初期変換効率 20% 以上において温度 85°C・湿度 85% の耐熱・耐湿試験、および 1 kW/m<sup>2</sup> の疑似太陽光連続照射による耐光試験で 1500 時間後の初期性能維持率 90% 以上の耐久性を得られる技術が必要であると考えている。加えて、低コスト化に必要な量産技術として従来の枚葉式成膜で得られたセルの初期変換効率と同等性能が得られる連続成膜技術の検討が必要であると考えられる。

## 3. 波及効果

ペロブスカイト太陽電池が超軽量太陽電池として社会実装した際には、工場屋根、体育館屋根などへの自家消費型太陽電池の普及が促進されるものと考えられる。例えば、2020 年における小中学校の体育館保有面積 27,746 平方キロメートルのうち 10% に導入されたと仮定すると 278MW 導入することが可能である（100 平方メートル当たり 10kW と仮定）。またペロブスカイト太陽電池の原料は化学素材産業分野が中心になると考えられ、日本の化学産業の強みを発揮することができると考えられる。

本事業で開発した界面制御材料はペロブスカイトとホール集電極の界面に吸着により導入することが可能であり量産プロセスにも適応可能な材料である。将来ペロブスカイトを大面積にて量産する際にピンホールの発生などによる歩留まり低下を抑制する材料として活用される。

また、高効率高耐久化の最適デバイス設計では目標効率に対して求められる材料物性と太陽電池内部の半導体のバンドギャップ構造を示したことで、材料やデバイス構造の開発指針を示すことができた。

さらに太陽電池の中でどのような非効率な電荷再結合が起きているか評価することはこれまで困難であったが、本事業において、主な再結合サイトを材料界面と材料内部で切り分けて評価することができた。これらの成果は実用化を目指す企業において有用な知見となる。

#### 4. 今後の展開

これまでの成果において、ペロブスカイト太陽電池の変換効率は研究レベルにおいてはシリコン太陽電池と同等のレベルに達した。今後は超軽量太陽電池の普及を見据え、発電コストを家庭用電灯のグリッドパリティ以下にすることを大目標とし、そのための技術開発にフォーカスする。モジュール効率をシリコン太陽電池同等の18%程度を想定し、小面積セルの効率20%で耐熱・耐湿・耐光の環境試験で1500時間の耐久性を維持できる技術開発を続ける予定である。具体的には耐久性向上に寄与する界面制御材料の開発を続けると同時に、劣化メカニズムを解明し、劣化箇所および劣化原因を特定できる評価技術開発も進める。劣化原因を特定することで、劣化を抑制する材料開発を効率よく進めることができると考えている。

さらに、ペロブスカイト太陽電池の事業化を想定している企業を支援する取り組みを続ける。対象は太陽電池製造企業に限らず、素材メーカーも想定している。研究用セルの作製・評価ノウハウの提供も想定している。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	3 (3/0)	0 (0/0)	3 (0/0)
論文	3	4	0	7
研究発表・講演 (国内・審査有)	7 (5)	10 (6)	0 (0)	17 (11)
(国際・審査有)	(2)	(4)	(0)	(6)
(国内・審査無)	(2)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(2)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	3	0	0	3
自機関からのニュース リリース、プレス発表	1	0	0	1
展示会への出展	0	1	0	1
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

## J ロールトゥロール製造技術の研究開発（積水化学工業株式会社）

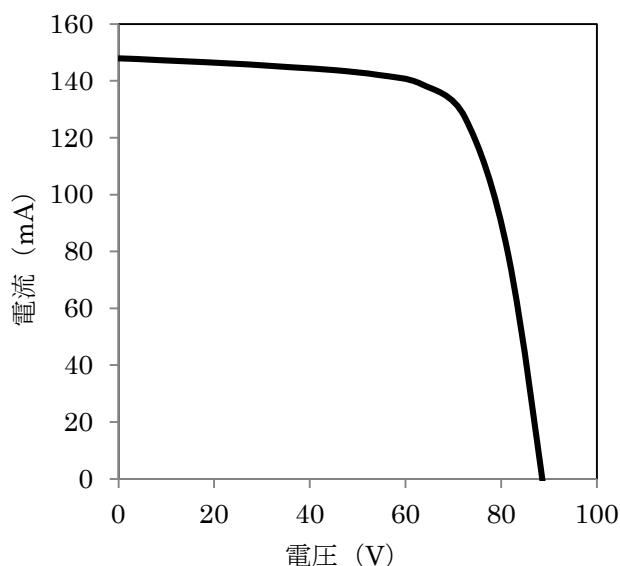
### 1. 成果詳細

#### ① 効率／高耐久性の両立

(i) 30cm×30cm 程度のフィルムモジュール形態で変換効率向上の検討

超軽量基板として PET フィルムを用いて、R2R プロセスにて 30cm×30cm 程度のペロブスカイト太陽電池モジュールを作製した。透明電極として ITO が成膜されている PET フィルムを用いて、レーザースクライブ装置を用いて P1 スクライブを行い透明電極のパターニングを行った。次に電子輸送層として緻密 TiO<sub>2</sub>、多孔質 TiO<sub>2</sub> を成膜し、その後光電変換層としてペロブスカイト層を成膜した。ペロブスカイト層は標準的な CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> という組成で、2 段階法を用いて成膜を行った。さらにホール輸送層として有機半導体層を成膜し、その後レーザースクライブ装置を用いて P2 スクライブを行った。そして上部電極を成膜した後、最後に P3 スクライブを行い、モジュールを完成させた。

各層の成膜プロセスを最適化した結果、30cm 角程度のモジュール変換効率 15.0% を達成した。



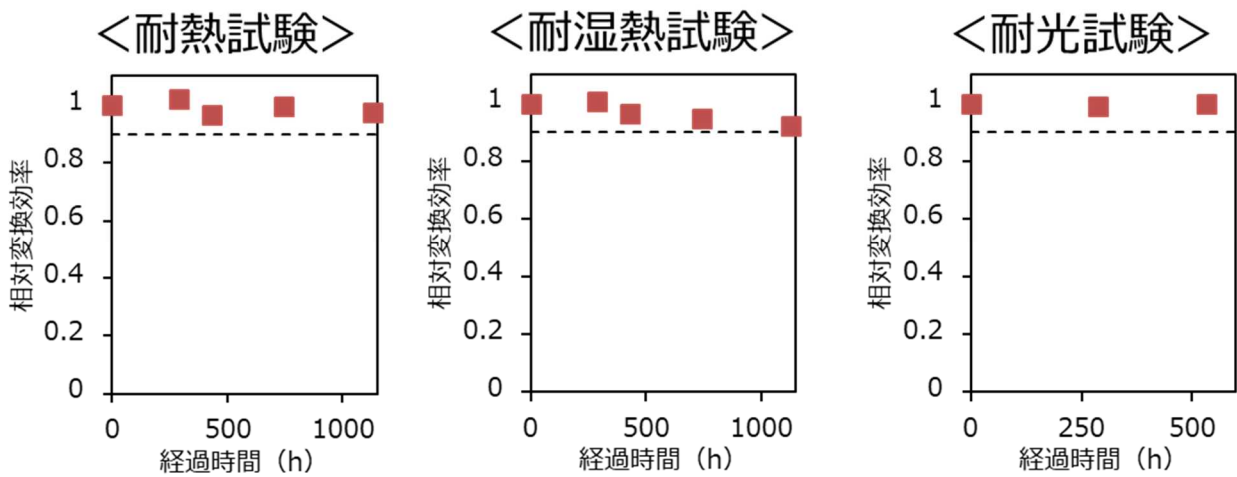
図Ⅲ-2-(イ) -(i)-J-1 変換効率 15.0% の 30cm 角モジュールの I-V 曲線

中間目標達成に向け、ペロブスカイト層の面内膜質分布改善、スクライブ加工の微細化、PET フィルム表面での反射防止等の改善検討により、30cm 角程度のモジュール変換効率 18.0% を達成する見込みである。

(ii) 30cm×30cm 程度のフィルムモジュール形態で耐久性評価

上記で作製した 30cm×30cm 程度のペロブスカイト太陽電池モジュールをバックシートとバリアフィルムにてパッケージングを行い、耐熱性評価、耐湿熱性評価、光照射試験を行った。耐熱性試験、耐湿熱性試験、光照射試験は IEC TS 62876-2-1 記載の条件にて性評価を実施した。

評価結果を図Ⅲ-2 に示す。耐熱試験、耐湿熱試験ともに 1000 時間後において、初期変換効率の相対低下率 10% 以下を維持している。また光照射試験についても 500 時間後において、初期変換効率の相対低下率 10% 以下を維持していた。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-J-2 30cm×30cm 程度のペロブスカイト太陽電池モジュールの耐久制評価結果

②R2R 製造における広幅・長尺化技術開発

(i) m 幅製造プロセス技術開発

R2R 製造における広幅・長尺化技術開発として、まず m 幅レーザースクライブ装置の装置導入・立ち上げを進めた。既に導入済みである 30cm 幅用レーザースクライブ装置に対して、幅広化による課題として、幅方向の加工バラツキが発生する可能性がある。この幅広化による加工バラツキを低減できる設備を選定し・導入を行った。

幅方向の加工バラツキを評価したところ、1m 幅全域にわたって、既設の 30cm 幅レーザースクライブ装置で加工したものと同等の加工状態を得ることができた。

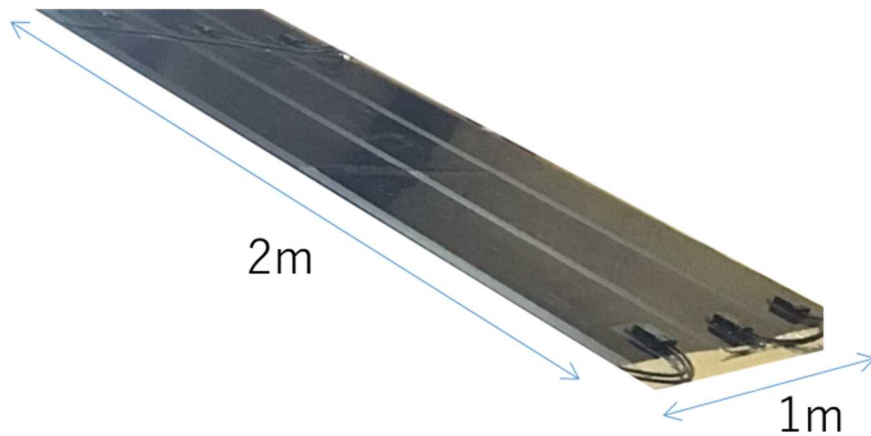
今後 m 幅塗工機を導入し、既設の 30cm 幅塗工機と同等の性能を発電できるようプロセス開発を進めていく予定である。

(ii) モジュール重量軽量化の検討

30 cm 幅 R2R 製造装置を用いて、1m×30cm のペロブスカイト太陽電池を 6 枚作製した。これらを前記① (ii) で各種耐久性試験をクリアしたモジュール構成と同じ材料・構成にてモジュール化を行い、1m×2m の超軽量モジュールを作製した。この超軽量モジュールの施工方法の検討として、一般的に屋根材として使用されているガルバニウム鋼板へ屋外用途向け接着剤を用いて、モジュールの貼り付けを実施した。外観写真を図Ⅲ-3 に示す。

1×2m のモジュール単体の重量を測定したところ 2.3kg であり、目標の 5kg/m<sup>2</sup> に対して 1.15kg/h m<sup>2</sup> と大幅な軽量化に成功した。

また屋根材として使用されるガルバニウム鋼板の厚みは 0.35mm が標準である。0.35mm 厚のガルバニウム鋼板の重量は 2.95 kg/m<sup>2</sup> であり、屋根材を含めたモジュール重量であっても 4.1 kg/m<sup>2</sup> と目標の 5 kg/m<sup>2</sup> を達成できている。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-J-3 ガルバニウム鋼板に貼り付けた超軽量ペロブスカイト太陽電池モジュール

## 2. 実用化・事業化見通し

2022年から開始した「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）」事業において、実用化に向けて必要な技術開発を進める。大学との密な連携により、高効率・高耐久化に向けた要素技術を開発し、また当社では大面積化に向けたプロセス技術の開発を進める。2023年頃より30cm幅モジュールを用いて実証実験をスタートさせ、2025年に1m幅モジュールの製品化を目指す。

## 3. 波及効果

近年の日本における太陽光発電を取り巻く環境は、気候変動への対応に伴う排出炭酸ガス削減への要請から再生可能エネルギーの利用率の向上に向けて強い期待が寄せられているが、電力買取制度の縮小→廃止に伴い、その普及率は鈍化の傾向にある。

電力買取制度がない状況において、国が目指す再生可能エネルギーの利用率を向上させていくためには、エネルギーの『地産地消』と設置費用も含めたコスト削減が不可欠である。太陽電池はエネルギーの『地産地消』には好適であるが、従来のシリコン太陽電池ではその重量のため、耐荷重がない設置場所や壁面への設置が困難な場合が多く、設置エリアに制約がある。また、設置できる場合でもコストが嵩むため普及は期待できない。

上記の課題に対して、シリコン太陽電池と同等、あるいはそれ以上の変換効率が期待できるペロブスカイト太陽電池を用いた超軽量太陽電池システムを開発することができれば、性能・コストともに大幅に改善でき、確実に再生可能エネルギーの利用率向上にもつながる。

一方、弊社では住宅事業に注力しており、太陽光発電累積搭載数は世界トップの実績があり、近年は自社製リチウムイオンバッテリーとともに、災害に強い住宅の提供など、住宅のエネルギー自給自足に向けた事業を展開している。超軽量太陽電池システムの開発により、住宅関連では壁を活用した発電量の大幅拡大が住宅事業強化にもつながることが期待できる。さらには昨年より開始したお客様所有の弊社製住宅（セキスイハイム）からの余剰電力を軸とした電力事業の発展にもつなげたいと考えている。

## 4. 今後の展開

2022年から開始した「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）」事業において、超軽量ペロブスカイト太陽電池の本格普及に向けた技術開発を行う。まず2025年までに発電コスト20円/kWhに向けた要素技術を開発し、ペロブスカイトの市場導入を目指す。その後2030年までに、さらなる性能向上、量産効果、及び施工方法等の改善により発電コスト14円/kWhを達成できる見込みである。

5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	1	0	1
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)



## K ペロブスカイト太陽電池の新市場創出に向けた高効率化材料技術と製膜技術の開発（国立大学法人 東京大学）

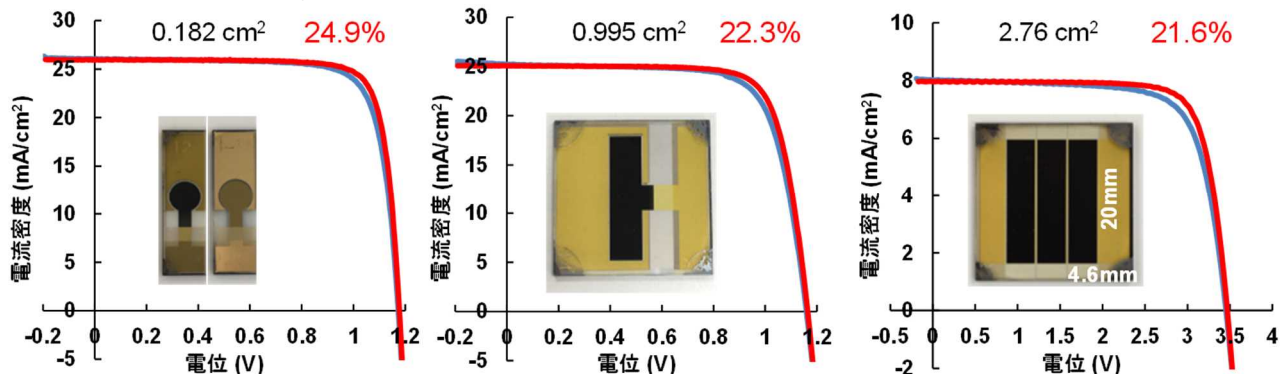
### 1. 成果詳細

「ペロブスカイト太陽電池の新市場創造に向けた高効率化材料技術と製造技術」について、以下に挙げる研究開発を実施した。本研究開発は、ペロブスカイト太陽電池の更なる高効率化に向けて、新たな材料開発とプロセス技術の開発を行っているが、これは、変換効率向上だけにとどまらず、劣化要因となる不純物や構造欠陥の低減により耐久性向上に寄与し、発電コスト低減にも貢献する。

#### ①単セルの性能向上に向けた新規ペロブスカイト材料の開発

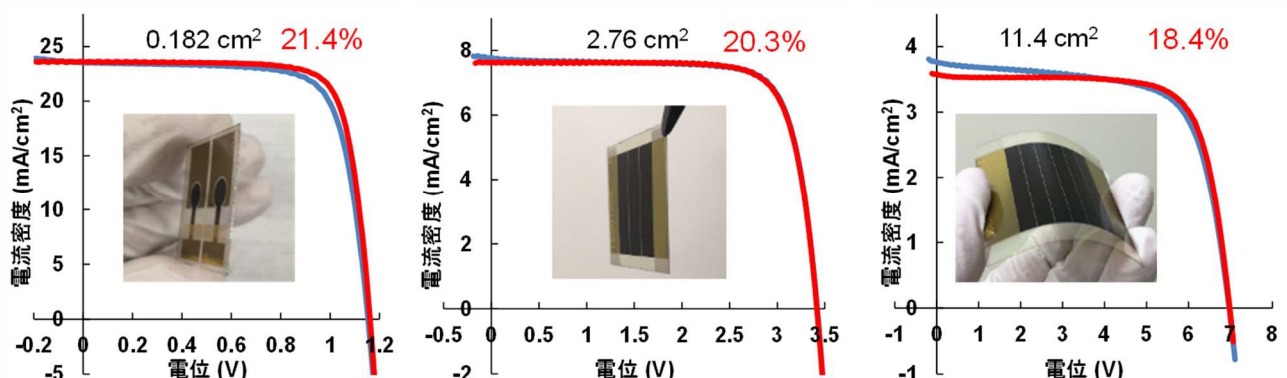
メチルアンモニウムフリーペロブスカイトの最適化を進めた。原料の仕込み組成比や各層の製膜条件、製膜後の後処理条件の調整などを行なった。また、得られたペロブスカイト膜やデバイスについて、誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)、高周波グロー放電発光分析(rf-GD-OES)などによる分析や、吸収スペクトル、XRD パターン、暗電流などのデータの詳細な解析により、層方向の元素分布や結晶性などについて知見を得て、さらなる改良の方向性を得た。最適化によりデバイス性能の再現性が向上し、安定して22%超の変換効率を得られるようになった。

並行して、デバイスの大面積化を検討した。有効面積  $0.18\text{cm}^2$  の小面積セルで変換効率 24.9% ( $V_{oc} : 1.18\text{V}$ ,  $J_{sc} : 25.9\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $FF : 0.816$ ) が得られた材料・デバイス構造を拡張し、有効面積  $0.995\text{cm}^2$  のセルで変換効率 22.3% ( $V_{oc} : 1.16\text{V}$ ,  $J_{sc} : 25.1\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $FF : 0.764$ ) が得られた。この値は、その時点での  $1\text{cm}^2$  級ペロブスカイト太陽電池セル世界最高値 21.6%を上回った。さらに、有効面積  $2.76\text{cm}^2$  の3直列ミニモジュールを作製し、変換効率 21.6% ( $V_{oc} : 3.47\text{V}$ ,  $J_{sc} : 7.97\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $FF : 0.783$ ) を得た。これは、ペロブスカイト太陽電池モジュールの変換効率として、その時点での世界最高値である。また、80mm 角基板上に有効面積  $43\text{cm}^2$  の12直列ミニモジュールを作製し、変換効率 16.3% ( $V_{oc} : 13.57\text{V}$ ,  $J_{sc} : 1.68\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $FF : 0.715$ ) を得た。



図III-2-(イ) -(i)-K-1 メチルアンモニウムフリーペロブスカイトを用いた小面積セル、 $1\text{cm}^2$ 級セル、ミニモジュールの外観写真および電流-電圧特性

デバイスの軽量フレキシブル化に向けて、薄層基板を用いてセルを試作した。基板以外の材料・プロセスは基本的に上記と同様のものを適用し、小面積セル変換効率 21.4% ( $V_{oc} : 1.16\text{V}$ ,  $J_{sc} : 23.6\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $FF : 0.780$ ) で、その時点でのフレキシブルペロブスカイト太陽電池の世界最高値を得た。その後の最適化により、22.04% ( $V_{oc} : 1.15\text{V}$ ,  $J_{sc} : 23.9\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $FF : 0.798$ ) まで向上した。

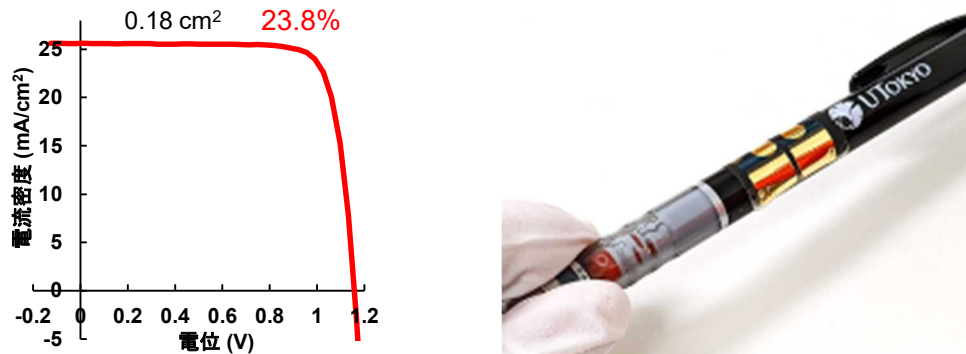


図III-2-(イ) -(i)-K-2 薄層基板を用いた小面積セル、ミニモジュール (3直列および6直列) の外観

## 写真および電流-電圧特性

この薄層基板を用いたデバイスについても大面積化を検討した。小面積セル 21.4%の材料・プロセス条件を基に、有効面積 2.76cm<sup>2</sup>の3直列ミニモジュールを作製し、変換効率 20.4%を得た。これは、軽量ミニモジュールでは世界唯一の20%を上回る効率である。有効面積 11.4cm<sup>2</sup>の6直列ミニモジュールでは変換効率 18.4%を得た。

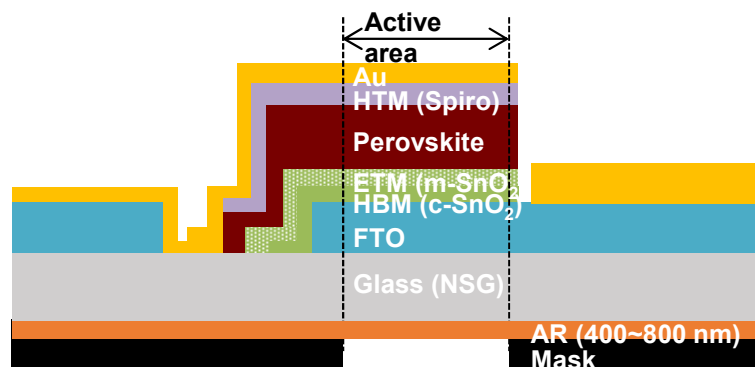
これらの検討を通じて最適化したペロブスカイト材料を自作高分子薄膜基板セルに適用し、変換効率 23.8% (Voc:1.16V、Jsc:25.6mA/cm<sup>2</sup>、FF:0.803) を得て中間目標効率 23%を達成した。



図III-2-(イ) -(i)-K-3 自作高分子薄膜基板セルの電流-電圧特性および同セルをペンに巻き付けた様子の写真

## ②低温プロセスによるペロブスカイト太陽電池の効率向上に向けた材料開発

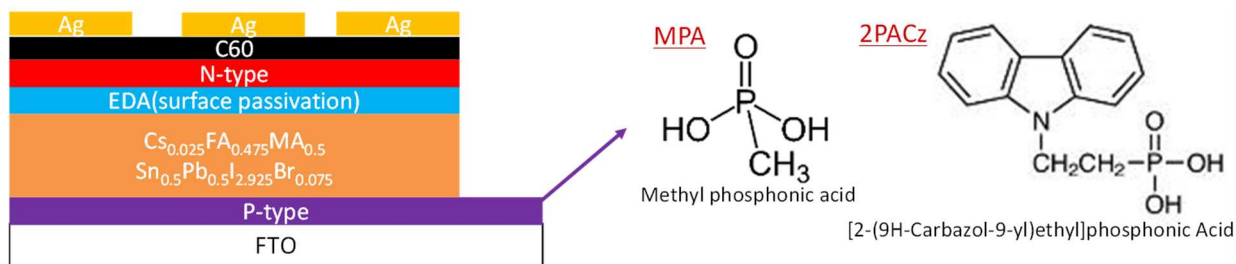
フィルム基板への対応に向けて、低温プロセスが可能な酸化スズ膜の作製条件を検討した。これまで酸化チタン層を作製する際に 450°C以上まで加熱していたが、酸化スズを用いることで 150°Cでも性能が出せるようになり、カリウム添加ペロブスカイトを用いた小面積セルで変換効率 24.4%が得られた。さらに PEN 基板を意識して 140°C以下での高性能化を検討した結果、酸化スズ膜表面を後処理する条件を改良することで、低温焼成したものの性能が向上した。これと併せ、これまで 160°Cでアニールしていたペロブスカイト層についても 140°Cアニールで性能を出せるように製膜条件を調整した。これらの改善により、全て 140°C以下のプロセス条件で作製したガラス基板小面積セルで、変換効率 24.1% (Voc : 1.13V、Jsc : 26.29mA/cm<sup>2</sup>、FF : 0.81) が得られ、中間目標の 23%を大きく上回った。



図III-2-(イ) -(i)-K-4 低温プロセスで作製したペロブスカイト太陽電池のデバイス構造の概略図

## ③逆構造型ペロブスカイト太陽電池の性能向上

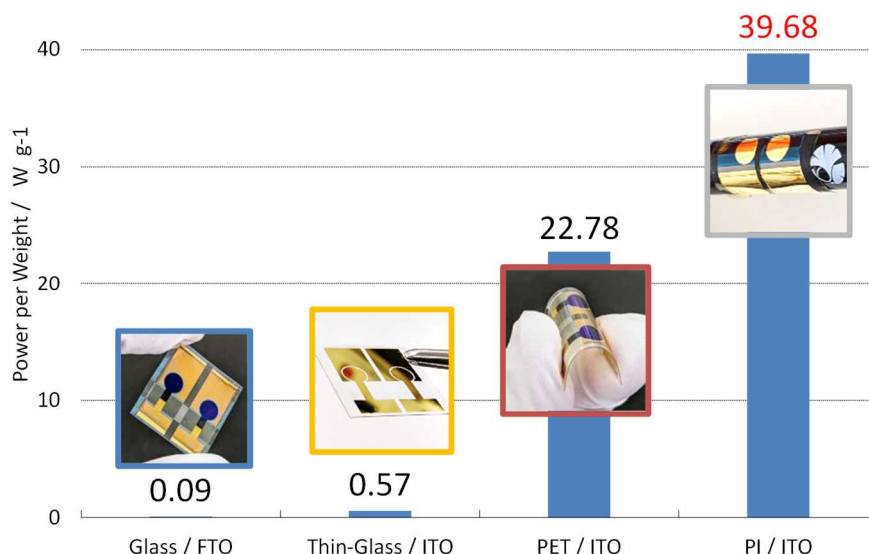
透明導電電極基板側に正孔輸送層があり、焼成プロセスがないためフィルム基板に適しているとされる逆構造型ペロブスカイト太陽電池の性能向上に向け、逆構造型の正孔輸送層材料として代表的なポリチオフェン誘導体 PEDOT:PSS の製膜条件最適化を検討した。さらに、正孔輸送層材料として混合 p 型単分子層を開発するとともにペロブスカイト層の後処理条件改良などを加えた Sn-Pb 混合ペロブスカイト系で変換効率 23.3% (Voc : 0.88V、Jsc : 32.77mA/cm<sup>2</sup>、FF : 0.80) が得られ、中間目標の効率 23%をクリアした。また、正孔輸送層の改良により、高温耐久性が向上した。



図III-2-(イ) -(i)-K-5 逆構造型ペロブスカイト太陽電池のデバイス構造と、混合 p 型単分子層に用いた分子の構造

④大面積フィルムに適用可能な製膜技術の開発

積水化学工業(株)から提供された PET/ITO 基板を用い、②で開発した材料・プロセスを適用してフィルム基板フレキシブルペロブスカイト太陽電池セルを試作した。フィルム基板に対応できるように、基板パターニングの条件やスピコート時のパラメーター設定などを変更したが、当初得られたデバイスは、電流電圧特性に現れるヒステリシスが大きく、 $V_{oc} \rightarrow J_{sc}$  方向の掃引では変換効率 19.6% ( $V_{oc} : 1.12V$ ,  $J_{sc} : 23.4mA/cm^2$ ,  $FF : 0.75$ ) なのに対し、 $J_{sc} \rightarrow V_{oc}$  方向の掃引では 16.6% ( $V_{oc} : 1.10V$ ,  $J_{sc} : 23.5mA/cm^2$ ,  $FF : 0.64$ ) となり、改善の余地が大きい結果となった。さらにプロセス条件を改良することで、変換効率 20.42%に向上した。さらに、フィルム基板の原料を調達して基板を自作し、その上に作製した K ドープペロブスカイト太陽電池小面積セルで変換効率 20.24% ( $V_{oc} : 1.096V$ ,  $J_{sc} : 24.22mA/cm^2$ ,  $FF : 0.76$ ) を得た。デバイス重量あたりの発電量を計算すると、当初の FTO ガラス基板セルでの 0.09W/g から、薄層基板化して 0.57W/g となり、PET/ITO 基板セルでは 22.78W/g、さらに自作基板セルでは 39.68W/g となり、既報の世界記録である 29.4W/g を大きく上回ることができた。



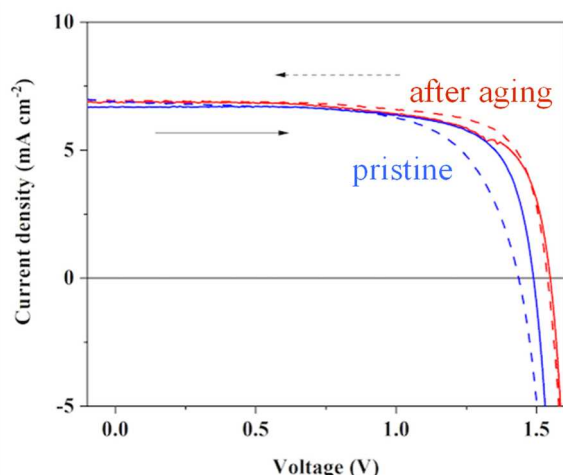
図III-2-(イ) -(i)-K-6 各種基板を用いたデバイスの重量あたり発電量の比較

自作高分子薄膜基板セルについて、さらなる最適化を加え、変換効率 23.8%を得て、中間目標 23%を達成した。このセルは、重量あたり発電量が 46.9W/g となる。

⑤トップセル用ワイドギャップペロブスカイト材料の開発

ペロブスカイト-ペロブスカイトタンデム太陽電池のトップセルに用いるワイドギャップペロブスカイト材料を得るために、ペロブスカイト中のヨウ素-臭素混合比率の最適化について検討した。ヨウ素-臭素混合ペロブスカイトは、光照射下でハロゲンの偏析による相分離を起こすため、これを抑制して結晶を安定化する必要が生じた。FAPbI<sub>2</sub>Br<sub>2</sub>をベースに、アルカリ金属イオンを添加することで相安定化を図ったところ、特定のイオン種の添加で相分離が抑制されることを見出した。また、アニール温度を低くすることで組成に関わらず相分離が抑制されることも見出した。これらの結果を用いて作製したデバイスで、 $V_{oc} 1.25V$  が得られた。さらに、フェネチルアンモニウムとアニオン系添加剤を組み合わせることによって、臭素比率の多いハロゲン混合ペロブスカイトで起こる光相分離の抑制と電圧低下の原因となる膜表面に存在する欠陥のパッシベーションを同時に行った。このペロブスカイトを用

いた逆構造セルでは、光相分離抑制効果が見られ、 $V_{oc}$  が向上した。さらに臭素比率を高めたペロブスカイトを用い、最適化された添加剤、エネルギーレベルが適切な正孔輸送材料と組み合わせ、エージングをかけることで、 $V_{oc}$  1.55V が得られた。



図III-2-(イ) -(i)-K-7 臭素系ワイドギャップペロブスカイトを用いたデバイスの電流-電圧特性

#### ⑥低温プロセスによるトップセルの性能向上

ペロブスカイト-ペロブスカイトタンデム太陽電池のボトムセルに用いる Sn-Pb 混合ペロブスカイトを用いたデバイスは逆構造型でほぼ確立されているのに対し、トップセルに用いるワイドギャップペロブスカイトを用いた逆構造型デバイスは基本的な構造から開発する必要がある。このため、逆構造型の高電圧デバイスを実現するための材料およびプロセス条件の探索を行なった。上記⑤で見出したアルカリ金属ドープワイドギャップペロブスカイト材料  $FAPbIBr_2$  に対応する正孔輸送材料を探索し、正孔輸送材料として一般的な PEDOT:PSS より深い HOMO レベルを有する材料を用いてデバイスを作製することで、逆構造型小面積セルで  $V_{oc}$  1.24V が得られた。さらに、上記⑤で見出した混合添加剤を加えたワイドギャップペロブスカイト材料  $FAPbIBr_2$  に合わせて新たな正孔輸送材料を用いてデバイスを作製することで、逆構造型セルで  $V_{oc}$  約 1.3V が得られた。また、本デバイスは全てのプロセスを  $120^\circ\text{C}$  以下で行っておりプロセス温度を低下させることにも成功した。上記図III-2-(イ) -(i)-K-7 に示したデバイスは酸化チタン層を用いており、これを置き換えることで、高電圧デバイスの低温プロセス化を図る。

#### 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

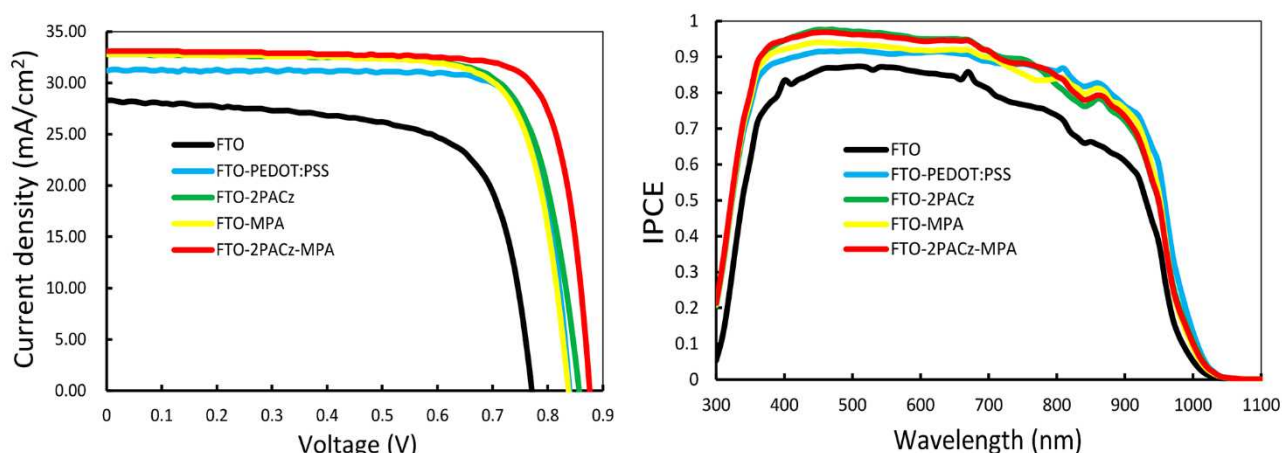
ペロブスカイト-ペロブスカイトタンデム太陽電池のボトムセルに用いる材料に求められるバンドギャップは、トップセルとの組み合わせによって決まる。このため、目標として  $V_{oc}$  ロス低減を設定した。また効率の低下をもたらさずバンドギャップを最適化できる指針を得ることを目指した。電圧のロスを大きくしている原因は、 $\text{Sn}^{2+}$  の欠損、 $\text{Sn}^{4+}$  の発生である。これらは格子内ばかりでなく粒界に存在する。そこで、それらの粒界欠陥密度を低減させるために、独自の粒界パッシベーションを行い、 $V_{oc}$  ロス 0.35V 以下を目指す。 $V_{oc}$  ロスの低減とともに、欠陥密度、キャリア寿命、キャリア移動度、キャリアダイナミクスをインピーダンス測定、ホール効果測定、発光寿命測定、時間分解スペクトル法、ケルビンプローブを用いて評価し、PDCA サイクル形式に効率向上指針を得ることを検討した。

Sn-Pb 混合ペロブスカイトの界面、粒界パッシベーションを行った。ペロブスカイト製膜後、ヨウ素イオンの欠損部 (undercoordinated Sn イオン) を補修するため、ルイス塩基であるエチレンジアミン稀薄溶液で表面処理したところ、 $V_{oc}$  が 0.56V から 0.76V に大幅に向上した。パッシベーション後、ペロブスカイト表面のフェルミ準位が浅くなって (より n 型になって) おり、この結果、伝導帯、価電子帯の band bending が起こり電子注入しやすくなっていた。さらに Br イオンを導入することによって結晶ひずみを小さくし、Urbach エネルギーを小さくしたところ、 $V_{oc}$  は 0.86V まで向上した。 $V_{oc}$  ロスが 0.39V であり、Pb ペロブスカイト太陽電池に肉薄した。

ドーピングは結晶欠陥を減らすアプローチの一つである。Sn-Pb 混合ペロブスカイトに RbI、KI をドーピングしたところ結晶サイズが大きくなり、キャリア寿命が 51nsec から 100-160sec に大きく向上した。未ドーピングと比較し、 $V_{oc}$  ばかりでなく  $J_{sc}$ 、FF も同時に向上した。Rb イオン、K イオンドーピングは Sn-Pb 混合ペロブスカイトにおいても有効であることがわかった。

これまで Sn-Pb 混合ペロブスカイトにはホール輸送層として PEDOT:PSS が用いられてきたが、より薄

膜化が可能で直列抵抗が少ない単分子膜 p 型層の検討を行った。大きなサイズの単分子膜形成分子とその隙間を埋める小さなサイズの単分子膜形成分子で p 型層を作製することにより、より緻密な p 型単分子層を形成した。PEDOT:PSS や一般的な単分子層薄膜では 21% 程度の効率であったが、混合 p 型単分子層では  $V_{oc}$  が 0.88V まで向上し 23.3% まで効率が向上した。このデバイスでは  $V_{oc}$  ロス 0.36V となり、中間目標の 0.35V を、ほぼ達成した。



図Ⅲ-2-(イ) -(i)-K-8 Sn-Pb ペロブスカイトと各種ホール輸送層を用いたデバイスの電流-電圧特性と分光感度特性

#### ⑧蒸着法による製膜技術の開発

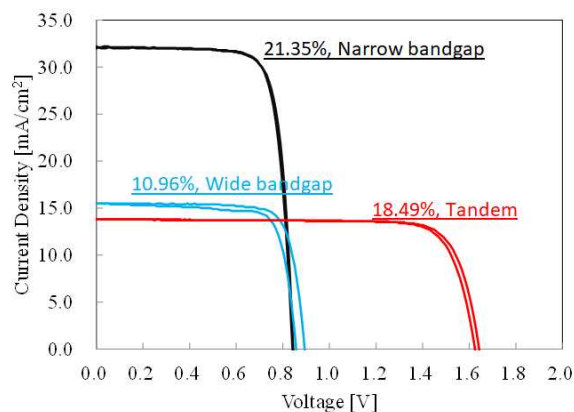
蒸着法を用いれば、蒸着ソースの設定を変化させることにより、ヘテロ積層や傾斜構造の形成などが容易にできることが期待される。しかし、例えば  $\text{MAPbBr}_3/\text{MAPbI}_3$  多結晶ヘテロ積層膜の作製を試みると、ヘテロ積層膜とはならず、イオン移動によって全体が一様な組成の混晶  $\text{MAPb(I/Br)}_3$  となってしまう。このようなイオン移動による構造均一化の起こらないペロブスカイトヘテロ積層膜の真空蒸着法による作製を検討した。まず A サイトカチオンを MA から Cs に替えることで自発的混晶化の回避を試みたが、ガラス基板上に蒸着した  $\text{CsPbI}_3/\text{CsPbBr}_3$  積層膜は完全に構造均一化してしまった。そこで、ハロゲンではなく、B サイト金属イオンを変更することによるヘテロ構造作製を検討した。ガラス基板上に蒸着作製した  $\text{CsPbBr}_3/\text{CsSnBr}_3$  積層膜はヘテロ構造を維持しており、構造均一化の回避に成功した。構造の安定な  $\text{Cs(Sn/Pb)Br}_3$  混晶の成膜の見通しも立ったので、傾斜構造形成に着手できる見込みである。

さらに、ハロゲンイオンが異なるヘテロ接合の場合でも、A サイトカチオンを併せて変えることでヘテロ接合を安定化するように試みた。 $\text{MAPbBr}_3$  単結晶上に A サイトカチオンが異なる  $\text{FAPbI}_3$  を蒸着した結果、ハロゲンイオンの拡散が遅くなり、数日間ヘテロ構造が安定であることが分かった。バンドギャップをハロゲンイオンによって制御することができるが、A サイトイオンを併せて変化させることでヘテロ構造を安定化させ得ることが示唆された。

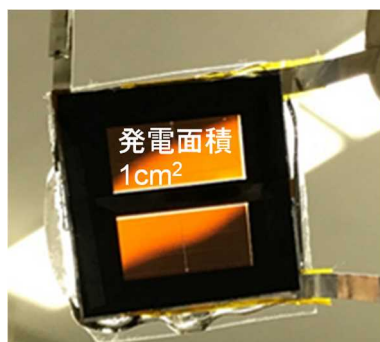
$\text{MAPbI}_3$  と  $\text{MAPbBr}_3$ 、 $\text{MAPbBr}_3$  と  $\text{MAPbCl}_3$  は全組成域で混晶を形成する。組成を調整することで、バンドギャップを近赤外-近紫外域をカバーするように変化させることができる。これらの傾斜組成薄膜を作製し、その安定性や作製した薄膜でのイオンの分布を評価するためには、組成と結晶格子定数の関係の情報が必要である。このため、まず  $\text{MAPb(I}_{1-y}\text{Br}_y)_3$  混晶単結晶を用いて、その格子定数と Br 組成の関係式を高精度に決定し Vegard 則が成り立つことを明らかにした。また、 $\text{MAPb(Br}_{1-x}\text{Cl}_x)_3$  の格子定数の Cl 組成依存性についても高精度な評価を行った。

#### 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

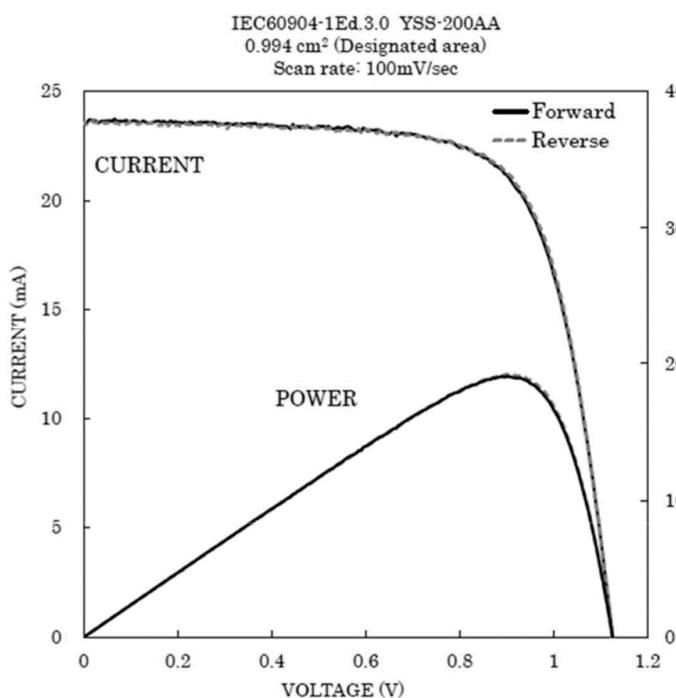
上記⑦で最適化したナローギャップ Sn-Pb 混合ペロブスカイトを、最適化前のワイドギャップ Pb ペロブスカイトに重ねて製膜し、2 端子タンデム太陽電池を試作したところ、18% 程度の効率が得られた。タンデム太陽電池が作製できることを実証できた。



図III-2-(イ) -(i)-K-9 Sn-Pb 混合ペロブスカイトを用いた 2 端子タンデム太陽電池の電流-電圧特性



I-V CURVE



Type : Perovskite solar cell  
 Sample No. MNP066-22-2 Front  
 Repeat Times : 1

	Forward	Reverse	
Isc	23.53	23.55	[mA]
Voc	1.126	1.125	[V]
Pmax	19.06	19.21	[mW]
Ipmax	21.18	21.11	[mA]
Vpmax	0.9000	0.9100	[V]
F.F.	71.9	72.5	[%]
Eff.(Da)	19.2	19.3	[%]
M.Temp	25.0	25.0	[°C]
D Irr.	100.0	100.0	[mW/cm²]
M Irr.	99.2	99.2	[mW/cm²]

Ref. Device No. JETp-A01W  
 Cal. Val. of Ref. 45.04 [mA at 100mW/cm²]

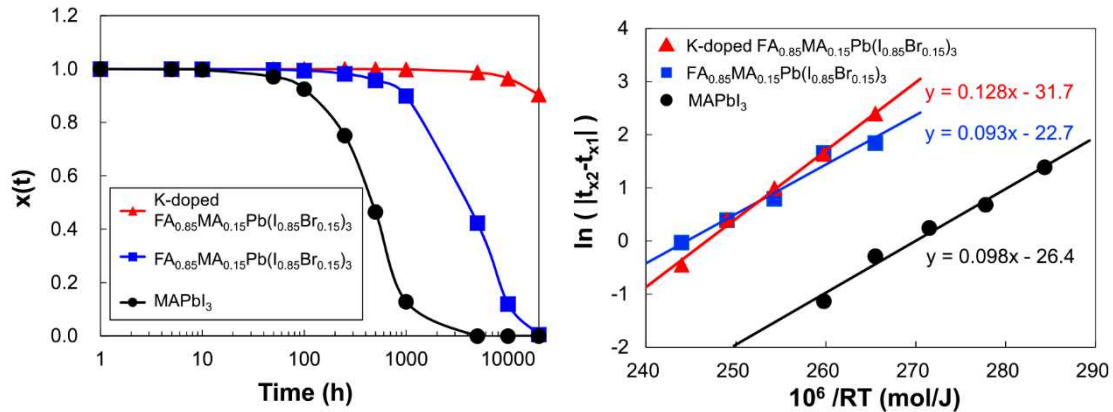


図III-2-(イ) -(i)-K-10 半透明ペロブスカイト太陽電池トップセルの外観と、その JET による認証測定結果

バンドギャップ約 1.6eV の K ドープペロブスカイト (K-doped  $\text{FA}_{0.85}\text{MA}_{0.15}\text{Pb}(\text{I}_{0.85}\text{Br}_{0.15})_3$ ) を用い、酸化チタン多孔質層上に作製したデバイスの対極として ITO をスパッタする条件を最適化し、変換効率 17.8% の半透明小面積セルを得た。この技術を用いて面積  $1\text{cm}^2$  ( $2\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ ) の半透明トップセルを作製したところ、効率 18.0% が得られた。また、上記①で開発したメチルアンモニウムフリーペロブスカイトに K ドープしたもの (K-doped  $\text{FAPbI}_3$ ) はバンドギャップが 1.55eV で、これと、上記②で開発

した低温プロセス酸化スズ系電子輸送層の技術を適用して作製した半透明トップセルは、変換効率が 19.5% ( $V_{oc}$ : 1.12V,  $J_{sc}$ : 23.4mA/cm<sup>2</sup>, FF: 0.741) で、透明対極ペロブスカイト太陽電池での世界最高値となった。JET (電気安全環境研究所) における認証値は 19.3%であった。参考のため CIGS とタンデム化した場合、前者では 25.5%、後者では 26.2%の効率が得られた。

なお、K ドープペロブスカイトについて、昇温下での劣化挙動を解析することで耐久性を検討したところ、上記で用いた組成の K-doped  $FA_{0.85}MA_{0.15}Pb(I_{0.85}Br_{0.15})_3$  は、温度 85°C の条件下で 10000 時間以上の耐久性を有することが示された。



図III-2-(イ) -(i)-K-11 K ドープペロブスカイトの 85°Cにおける耐久性の検討結果と、パラメーター算出過程の図

#### 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

本項目では、タンデム化のための要素技術として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を行った。本研究では、フレキシブル性に優れ、赤外領域まで高い透過率を示し、カーボンのみから成るグラフェンをトンネル接合層として採用した。2020 年度は熱化学気相堆積法で作製した大面積な高品質グラフェンの透明導電膜特性向上に取り組んだ。その結果、グラフェン薄膜に対して、酸化モリブデンを積層化してキャリアドーピングすることにより、透過率 70%、シート抵抗 300Ω/□を得た。また、フィルム型超軽量な高効率タンデム太陽電池を目指して、光学設計と電流整合などの観点から光学シミュレータを用いてデバイス設計を行い、最終的なタンデム太陽電池の設計指針が得られた。2021 年度はグラフェン薄膜に対して、酸化モリブデンを積層化して加熱処理することでキャリアドーピングを施し、透過率 70%、シート抵抗 125Ω/□を得た。また、100μm のシリコンウエハを用いてフレキシブルなボトムセルで開放電圧 0.73V、変換効率 20.5%が達成された。2022 年度は、最終的なフィルム型超軽量な高効率タンデム太陽電池を目指して、トップセルとボトムセルの接合界面を模擬した構造にグラフェントンネル接合層を挿入することでコンタクト抵抗を約 3 桁低減することに成功した。軽量フレキシブル結晶系太陽電池として、部分的異方性エッチングにより薄板部の厚みが 50μm の片側テクスチャ構造を有するシリコンウエハの作製プロセスを開発し、少数キャリア寿命が 1msec 以上の軽量フレキシブルなシリコンヘテロ接合構造を再現性良く作製できることが示された。

## 2. 実用化・事業化見通し

フィルム型ペロブスカイト太陽電池は、今後はグリーンイノベーション基金事業に移行して実用化に向けた開発を進める。企業では本格生産を見据えた準備を開始している。これらの企業の太陽電池製造に関し、東京大学において開発した新規組成のペロブスカイトや新しいデバイス構造は、高いデバイス性能を再現できる点が特長であり、技術移転によって実用化を加速できると考えている。再現性の高い作製条件は、自動化プロセスに適合しており、高効率大面積セルならびにモジュールの作成とその実用化に大きく貢献すると期待される。

一方、本事業では、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今後の開発を進める。ボトムセルに用いるナローギャップ Sn-Pb 混合ペロブスカイトを用いたデバイスや、フレキシブル結晶シリコン太陽電池では既に中間目標値を達成しており、これらと組み合わせるトップセル用材料の開発を急ぐ。最終目標である効率 30% (ペロブスカイト-ペロブスカイト) や 35% (ペロブスカイト-フレキシブル結晶シリコン) を小面積セルで達成すれば、モジュール変換効率が既存のものより高く、さらに軽量フレキシブルな特性を有するという、競争力の高い製品の実現が期待される。タンデムデ

バイスに興味を示している企業が複数あり、今後、共同開発などを進めていくことで、実用化が近づくことが期待される。既存の太陽電池より高い変換効率を実現できれば、事業化の動きがスピードアップすると期待される。また、低照度特性なども検討し、年間総発電量で既存太陽電池を上回ることが示されるレベルになれば、事業化を後押しできる。このような観点から、本事業において進めているタンデムセルでの技術をモジュール製造に繋げることは、事業化に向けた動機づけとして大きな意味を持つものと考えられる。本プロジェクトの成果として得られたペロブスカイト太陽電池は、安価な材料と塗布などの簡便な方法により製造できるため、高性能かつ低製造コストの太陽電池の実用化に道が開けた。加えて、特殊な溶剤処理により材料を容易に分離しリサイクルできることもわかった。これらの特徴を活かして実用化を進める予定である。

### 3. 波及効果

本事業で開発したフィルム基板セルは、重量あたり発電量が従来より飛躍的に高くなっており、その実用化によって、太陽光発電の設置可能な場所が大きく広がることが期待される。

ペロブスカイト太陽電池の発電層の厚さは、一般的シリコン太陽電池と比べて僅か500分の1以下であり、超薄膜化を実現できる。このため、従来の太陽電池では設置できなかった、ビルの壁面、窓、工場の屋根等への設置が可能になり、市場拡大の波及効果は大きい。

ペロブスカイト太陽電池の製造に必須なキーマテリアルのヨウ素は日本が生産量世界2位で、そのシェアは約3割である。またもう一つの、キーマテリアルの鉛は極めて少量であり、普通乗用車に使われる標準的鉛蓄電池1個分の鉛(約8kg)で1ha(100m×100m)のペロブスカイト太陽電池が製造できる。こうした観点で、エネルギー資源に関わる資源戦略上も波及効果が大きい。

また、日本企業は潜在的に高い塗布プロセス技術を持っており、数nmの精度が必要なペロブスカイト太陽電池の製造に必要な塗布の技術は、厳格な知財管理で他国の追随を許さないものにでき、製造設備企業への波及効果も大きい。

さらに、ペロブスカイト太陽電池の材料は、特殊な溶剤を使用することで、容易かつ完全に分離することができるため、その廃棄とリサイクルのコストは、シリコン系太陽電池に比べると極めて低くでき、太陽光発電設備のバックエンドコストの低減に大きな波及効果がある。

このような、ペロブスカイト太陽電池の実用化が達成されれば、メガソーラー向けPV、住宅向けPV・BIPV、車載・移動体PV、IoT向け超小型PVなど、大きな市場形成が期待できる。

### 4. 今後の展開

今後はタンデム太陽電池の開発を中心に展開する。単接合デバイスには理論的に効率の上限があり、特に小面積セルでは既に効率向上の余地が小さくなっている。一方、タンデム太陽電池であれば、効率をさらに大きく伸ばすことができ、特に日本のように設置面積の制約が大きい市場では、高い変換効率は大きなアドバンテージを有することが期待できる。特に、ペロブスカイト太陽電池をベースにしたフレキシブルタンデム太陽電池は重要である。

### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	1 (0/1)	1 (1/0)	0 (0/0)	2 (1/1)
論文	8	11	5	24
研究発表・講演 (国内・審査有)	30 (12)	52 (19)	11 (4)	93 (35)
(国際・審査有)	(8)	(15)	(5)	(28)
(国内・審査無)	(6)	(10)	(2)	(18)
(国際・審査無)	(4)	(8)	(0)	(12)
新聞・雑誌等への掲載	2	19	12	33
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	2	2
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	1	0	1

(2022年7月19日現在)



(ii) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

【A 赤外光を有効利用する量子ドット太陽電池の開発】 (国立大学法人東京大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	今後の課題と 解決方針
開発項目① ナノ凹凸構造光閉 じ込め機能を導入 した量子ドット中 間バンド太陽電池	MBE 法によるドライ プロセスで作製し た量子ドット太陽 電池において、近 赤外波長域の光閉 じ込め係数を 12 倍 に高めるためのナ ノ構造光閉じ込め 構造を開発し、5mm 角セルで実証して ウェットプロセス への技術応用を検 討する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ファブリーペロー (FP) 共振器 による光閉じ込め構造により、量 子ドットの光吸収波長での光電場 増強度 (≡光閉じ込め係数) が最 大 13 倍に増大することをシミュ レーション計算により示した。</li> <li>・厚さ 1.8mm の量子ドット光吸収層 と FP 光閉じ込め構造を実装した薄 膜量子ドットセルを ELO 法により開 発し、5mm 角のセルにおいて、FP 効 果により量子ドットの量子効率が 5 ~6 倍増大することを実証。</li> </ul>	△	量子ドット密 度(層数)を現 状の 2 倍以上 にすることで 中間目標を達 成見込。
開発項目② ウェットプロセス 中間バンド太陽電 池用コロイド量子 ドット	光マネジメント技 術を利用した量子 ドットセル(5mm 角) で、可視透過性 (550nm において 20%以上)を維持し つつ中間バンド太 陽電池のホスト材 料の吸収端より長 い波長領域で 10mA/cm <sup>2</sup> を達成す る。	コロイド量子ドット溶液中でリガ ンド交換を行い、ディップコート 法で、膜厚の精密制御(5 nm 程度) を行うことで、IQE が全波長領域で 向上することを確認した。透過率 20%程度(550nm)で、Jsc (>800 nm の 場合)=5.0 mA/cm <sup>2</sup> を達成。	△	開発項目①の 光閉じ込め技 術を利用して、2 倍以上 の光閉じ込め 構造を実装す ることで、中 間目標を達成 見込。
開発項目③ 薄膜太陽電池・塗 布型作製装置の評 価・解析技術開発	コロイド量子ドッ トセル、ペロブス カイトセルを用い た複合量子ドッ トセルの評価方法 の確立と試作評価装 置を製作する。	3 波長レーザーを搭載した LBIC 装 置を開発し、0.1mm~25mm エリア で、ミクロンレベルの高分解能か らミリメートルの広視野までの発 電マッピング解析を可能とした。 画像の取り込み時間は、200x200 ピ クセルで 3 分~20 分程度であり、 実用上十分である他、I-V 測定機能 を付加し、レーザーを X-Y 走査して マッピング測定することで各電気 特性の面内分布を可視化すること を実現した。また 400~1600nm の広 範囲な波長感度のエリアカメラを 搭載しており、PL 及び EL 画像を撮 像することができ、サンプルス テージを LBIC と共通にして座標リ ンクすることで、同じ箇所の発電 ムラ、欠陥などを異なる測定方法 で画像化して評価することが可能 である。	○	測定データを 蓄積し、評価 方法を確立す る。

\*1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、 ○ : 達成、 △ : 達成見込み、 × : 未達

【B AI 予測最適化手法を用いたシースルー量子ドット太陽電池の逆設計と開発】  
 (国立大学法人電気通信大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
開発項目① グラフ CNN を用いたコアシェル型半導体量子ドットの逆設計と最適化	CNN と数理最適化手法を用いてコアシェル型半導体量子ドットの最適化構造を逆設計し、励起子エネルギー、吸収係数、エネルギー準位の実験測定値との誤差約 10% 以内を達成する。	(i) コアシェル量子ドットにおける励起子エネルギー、エネルギー準位の計算誤差は、中間目標の 5% を大幅に上回り実験値との誤差約 5% 以内まで達成できている。光吸収係数の誤差に関する制御は 2022 年 6 月現在 20% である。(ii) DFT 電子構造計算から Type-II 型コアシェル量子ドットを確認することができた。(iii) コアシェル量子ドットにおける電子逆流防止効果を理論的に確認することができた。	○	光吸収係数の誤差については、学習データベースの拡充やアンバランスの改善を図ることで 2022 年 10 月には 10% 以内まで制御できる見込みである。
開発項目② FDTD 近似型ニューラルネットワークと深層強化学習を用いた光閉じ込め構造の逆設計	FDTD 近似型ニューラルネットワークと深層強化学習を用いた光閉じ込め構造を設計し可視光透過率 20% かつ赤外光の光閉じ込め係数を約 12 倍に高めるための最適化光学構造を確立する	(i) 我々は、光学構造とデバイスの発電特性を相互的に考慮した 3 次元中間バンド太陽電池のドリフト拡散モデル構築に成功した。特に、再結合割合律速条件を満たしたモデルのシミュレーションについては世界で初めて成功した。(ii) ドライブプロセスで作製した量子ドットの光閉じ込め係数は最大 13 倍まで達成できた。溶液法による量子ドットペロブスカイト型太陽電池において裏面金属の有無を条件とし、AI 逆設計を用いて最大 3.23 倍の光閉じ込め係数が得られた。(iii) 光電場との相関を考慮した量子ドットの差し込みの最適位置を探索できた。	△	20% の可視光透過率を設けることにより 10% 前後の光閉じ込め係数の低減が起きる。裏面に光強度がさらに増強する光ナノ散乱体を設計・最適化する必要がある。
開発項目③ 電子構造の時間追跡における第一原理分子動力学計算	量子ドットと量子ドットペロブスカイト界面における電子構造の変化を時間追跡する。輸送経路の方位変化に伴い、キャリアの再結合が分布する様子を時々刻々と局所的にマッピングする	(i) FA リガンド付き PbS 量子ドットの電子構造の理論解析の結果から量子ドット間に強いカップリングがあることが確認でき、中間バンドの形成が確認された。(ii) FA リガンド付き PbS 量子ドットの光吸収係数は従来の Cl と I のリガンド付きの量子ドットの不連続な光吸収スペクトルと違い、バルク材料に類似し連続的に変化していることが確認できた。この結果は「FA リガンドを用いるとキャリアの移動度が速くなる」という実験結果の理論的な裏付けとなった。	○	

<p>開発項目④ 実験的高速スクリーニング・キャリア緩和ダイナミクス解析</p>	<p>輻射再結合と無輻射再結合によるキャリア緩和ダイナミクスを分離できる高速評価実験手法を開発する</p>	<p>(i)量子ドット光吸収層と電子輸送層の界面パッシベーションによるデバイス低欠陥化を実現した。太陽電池におけるキャリアの寿命の増加および電子移動度の向上が確認できた。 (ii)アーバックエネルギーと量子ドット太陽電池の開放電圧との定量相関が確認できた。</p>	○	
--	---	--	---	--

\* 1 達成度

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×未達

【C ウェットプロセスを用いた中間バンド太陽電池の開発】(花王株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	今後の課題と 解決方針
中間バンド太陽電池に最適な量子ドットおよびバルク半導体の開発	1) タイプII構築に適した粒子径(5nm以下)、バンドギャップ(1.5~1.8eV)、価電子帯(-5.6~-5.8eV vs. 真空準位)の量子ドットを開発する。 2) キャリアの量子ドットへの捕獲抑制を目指し、上記に準ずる量子ドットにワイドギャップシェルを被覆した量子ドットを開発する。 3) タイプII構築に適したバンドギャップが2.0~2.3eV、価電子帯準位-5.6~-5.8eV以上のペロブスカイト組成物を開発する。	1) 目標物性を有する新規量子ドットの合成を達成。 2) ワイドギャップ半導体をシェルに有するコアシェル量子ドットの合成を達成。 3) 目標物性を有するペロブスカイト組成の開発を達成。	○	特記事項なし
発電コスト16円/kWhに向けたウェットプロセスによる高効率中間バンド太陽電池の作製技術	1) 可視光透過率20%以上、変換効率10%以上のウェットプロセスで作製した中間バンド太陽電池を開発する。 2) 量子ドットを高濃度に複合化した光電変換層の形成に必要な量子ドットを20wt%以上含んだ塗工液を作製し、量子ドットを25vol%含有する光電変換層の形成技術を開発する。 3) 耐久性を加速評価可能な技術を確立し、加速試験において10年相当の耐久性(例えば屋内連続照射試験において出力低下10%以下)を有するセルを開発する。	1) 透過率は目標を達成したが、変換効率は4%未満と目標未達。 2) 目標濃度で量子ドットを安定に複合化した塗工液、及び光電変換層の製膜技術を確立。 3) 耐久性評価装置の導入、評価系の確立は達成したものの、耐久性目標は未達。	△	1) 新規塗工法を用いて成膜した光吸収層ではバルク結晶中の欠陥が少なくなっていることが明らかとなったため、性能低下の要因は主に量子ドットへのキャリア移動であることが分かった。したがってこれまでに開発した新規量子ドットの複合化を行い、評価を進めることと、その量子ドットの分散性を高めることで目的が達成できると考えている。 3) 新規塗工法で採用した組成は従来よりも高耐久性であることが知られているため、開発中の量子ドットの耐久性が高ければ達成可能と推測している。

\*1 達成度

◎: 大きく上回って達成、 ○: 達成、 △達成見込み、 ×: 未達

【D 多機能・高品質薄膜の利用による壁面太陽電池モジュールの長寿命化】

(国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
①SiN <sub>x</sub> 自体の屈折率安定性の確立	初期屈折率 2.0 程度を有する SiN <sub>x</sub> の屈折率変化率 1% 以内 (35 年相当の高温高湿試験下)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 100 °C 程度の基板温度において Cat-CVD により製膜した SiN<sub>x</sub> 膜の、85 °C, 85%RH の環境での屈折率変化を調査</li> <li>・ ラミネートしていない SiN<sub>x</sub> 単膜を高温高湿環境に 7000 時間以上曝露した後も、屈折率変化を 1% 以内に維持</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ラミネート試料の 35 年相当の高温高湿試験との加速係数明確化</li> <li>・ 他の条件で堆積した SiN<sub>x</sub> 膜に対する高温高湿試験</li> </ul>
② トップセル材料の劣化抑止	トップセル材料の単接合太陽電池モジュールの光電流密度の劣化率 10% 以内 (35 年相当の高温高湿試験下) とするガスバリア性能を有する SiN <sub>x</sub> 製膜条件の明確化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 堆積時の実基板温度が 100 °C 程度であれば、透過率スペクトルを大きく変化させることなく膜堆積可能であることを確認</li> <li>・ 封止材に UV 高透過型 TPO を用いたダブルガラスモジュール構造で、ペロブスカイト膜のラミネートに成功</li> <li>・ ペロブスカイト膜を含む積層膜構造への窒化 Si 堆積により大気下での劣化減速確認</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ セルの電流での劣化評価法の確立</li> <li>・ エッジシールも含めたラミネート法の確立</li> <li>・ 堆積条件の改良による SiN<sub>x</sub> 膜のガスバリア性能のさらなる改善</li> </ul>
① 防汚性能・反射低減機能を有する SiO <sub>x</sub> 膜の製膜条件の確立	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 耐光性、光学特性を確保した SiO<sub>x</sub> 系混成材料開発と塗布プロセスの確立</li> <li>・ SiO<sub>x</sub> 系混成材料に複数の機能付与を実現</li> <li>・ カバーガラスおよび表面コート膜による色度の変化 10% 以内 (35 年に相当する紫外線照射・耐候性試験後)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ SiO<sub>x</sub> 作製条件を策定し、製膜温度による膜の密度を変化させて SiO<sub>x</sub> の光学特性を調整し、反射率低減を確認、紫外線連続照射実験を開始し、連続 200 時間で着色がない事を確認</li> <li>・ 防汚性機能付与を目的として、TiO<sub>2</sub> 粒子混成 SiO<sub>x</sub> 膜を作製し、粒子径に対する光透過性を明確化、同構造にて光触媒反応を確認</li> <li>・ TiO<sub>2</sub> 粒子径数 25nm 以下で光透過性向上</li> <li>・ MgO の粒径を破碎処理により 200 nm まで低減することに成功し、拡散透過率向上に向けた指針を確立</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 紫外線照射装置を用いた加速試験によりコート膜の色度変化計測を実施する。</li> </ul>
② 放熱機能の付加	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 熱伝導性粒子を利用した SiO<sub>x</sub> 系混成材料を開発し、放熱性機能付与を実現</li> <li>・ 放熱性の変化 10% 以内 (35 年に相当する紫外線照射・耐候性試験後)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ サブミクロンサイズ MgO 粒子を用いた SiO<sub>x</sub> 混成膜を試作し、従来からの緻密化および放熱性付与能力向上を確認</li> <li>・ MgO 粒子混成 SiO<sub>x</sub> の太陽電池モジュール構成部材上への製膜が可能であることを確認の上、単セルモジュール構造を形成し、開放電圧にて温度上昇抑止効果を示した。</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 紫外線照射装置を用いた加速試験、および試験後の放射性変化を計測する。必要に応じて混成条件を見直し、耐性 35 年を実現する。</li> </ul>

\* 1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、 ○ : 達成、 △ 達成見込み、 × : 未達

【E 壁面設置タンデム太陽電池モジュールの構造最適化と屋外性能評価技術の開発】  
 (国立大学法人新潟大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度* 1	今後の課題と 解決方針
①タンデム太陽電池の生涯発電量最大化設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>・青山学院大学でのシミュレーションの結果もふまえ、トップセル、ボトムセル、タンデム化プロセス等を検証し、2端子構造と4端子構造(場合によっては3端子構造)のいずれが、発電性能・寿命・意匠性・コスト等の観点から優位か総合的に判断する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2端子・4端子のいずれが優位かを判断するために、2端子・4端子ともにシミュレーションを実施し、その結果をふまえて準備の整った2端子の試作を先行して実施</li> <li>・ボトムセルのSi太陽電池の表面テクスチャがトップセルのペロブスカイト層の形成に悪影響を与えることを懸念し、フラットセルで試作</li> <li>・フラットセルでの電流増強を目的に、Auナノ粒子による表面プラズモン共鳴の効果を検証し、550 nm近傍に局在プラズモン励起に起因する吸収を観測するとともに、外部量子効率の向上も確認</li> <li>・ボトムセル受光面のミラー化、トップセル受光面側透明導電膜形成時のスパッタダメージの低減等により、2端子タンデムセル(0.1 cm<sup>2</sup>)でエージング後の効率19.9%、開放電圧の最大値1.75 Vを達成</li> <li>・正孔輸送層にSAM膜の3PATAT-C3を導入することにより、再現性良く18%以上の効率の2端子タンデムセルを試作</li> <li>・ボトムセル裏面用RPD-IWO膜の製膜条件最適化により、ボトムセルにおいて近赤外域の裏面反射率向上に起因するEQEの向上を確認</li> <li>・トップセル表面、トップセルとボトムセルの中間層として期待されるInZrO膜、低コストTCOであるAZO膜の作製に着手</li> </ul>	△	シミュレーションは2端子・4端子ともに概ね完了した。2端子については実験も順調に進捗し、最適化を図っている。4端子についてはシミュレーション結果を踏まえ、優位性を検証可能な実験を実施する。シミュレーション結果と実験結果をもとに、2端子・4端子のいずれが優位かを総合的に判断することで、中間目標を達成見込みである。

<p>② 壁面設置モジュールの封止材最適化の検討</p>	<p>各種封止材を加速試験等で検証することにより、発電性能・寿命・意匠性・コスト等の観点から壁面設置太陽光発電システムに最適な封止材を選択する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ペロブスカイト太陽電池の信頼性向上・寿命延伸実現のため、両面ガラス構造とPVB封止材を用いたモジュールの試作条件を探索</li> <li>・試作したモジュールに対して温度サイクル試験を実施</li> <li>・モジュール化工程の最高温度を80℃まで低下することにより、ペロブスカイト太陽電池の電流値の低下が生じないことを確認</li> <li>・低温ラミネートに優れるシリコン封止材での検証開始</li> <li>・エッジシール用ゲッターリング材の使用による湿熱耐性を確認</li> </ul>	<p>△</p>	<p>PVB封止材での試作を概ね完了し、従来使用してきたEVA封止材、北陸先端大で検討中のPOE封止材と比較検証している。さらに、低温封止可能なシリコン封止材での検討を本格的に開始。シリコン封止材での検討結果も踏まえ、最適な封止材を選択することで、中間目標を達成見込みである。</p>
<p>③ 壁面設置モジュールの防汚検討</p>	<p>・各種防汚コート材料、防汚コート法を加速試験等で検証することにより、発電性能・寿命・意匠性・コスト等の観点から壁面設置太陽光発電システムに最適な防汚コート技術を選択する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・屋外曝露試験による防汚コートの性能検証のためのデータ取得システムを整備</li> <li>・屋内加速試験による防汚コートの性能検証のため、試験前後の親水性評価が可能な方法を構築</li> <li>・Hansen溶解度パラメータが防汚コートの親水性評価に有効であることを確認</li> <li>・最適な防汚コート材の選択のため、SiO<sub>x</sub>系コート膜の高温高湿試験を実施</li> <li>・屋外での防汚コート膜の実証試験を開始</li> </ul>	<p>△</p>	<p>防汚コート処理を施した太陽電池モジュールの屋内加速試験と屋外曝露試験は順調に進捗しており、年度末までの試験結果を踏まえて最適な防汚コート技術を選択することで、中間目標を達成見込みである。</p>

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×：未達

【F 壁面設置太陽発電システムの生涯発電量最大化技術の研究開発】

(学校法人青山学院 青山学院大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度* 1	今後の課題と 解決方針
壁面設置タンデム太陽電池モジュールの構造最適化	色調均一および高効率が両立するタンデム太陽電池モジュールで南面垂直設置において年間発電量が最大化するモジュール構造を提案する。	トップセルおよびボトムセルをペロブスカイト太陽電池、結晶シリコン太陽電池としたタンデム太陽電池において、2端子～4端子接続した場合の素子構造最適化を進めた。2端子型では、トップセルのバンドギャップが1.67 eVの時、南面垂直設置時の年間発電量が165.5 kWh/m <sup>2</sup> が期待できることが示された。また、年間発電量を最大化するためには、トップセルのバンドギャップ1.72 eVにすること必要であり174.7 kWh/m <sup>2</sup> が期待できることが分かった、北陸先端科学技術大学院大学で開発のSiN <sub>x</sub> 膜をトップセルの上面に付加したタンデム太陽電池の構造最適化も試み、屈折率1.91のSiN <sub>x</sub> 膜に対してはその上面にMgF <sub>2</sub> 膜を更に付加させることが高効率化に有効であることを示した。	△	色調変化を少なくする2重反射防止膜を有したタンデム太陽電池に対して年間発電量を最大化する構造を求める必要あり。年間発電量を最大化する構造を求めた手法は開発したので、同様に2重反射防止膜構造を有したタンデム太陽電池に対して実施予定。
屋外性能評価の基盤技術開発	エレクトロルミネッセンス法によるタンデム太陽電池モジュールの不良診断を実現する。また、屋外照度3万lux以上でも不良検知を可能にする。	結晶シリコン太陽電池モジュールに対するエレクトロルミネッセンス法による撮像において、光学フィルタおよび撮像条件の最適化を行うことで、屋外照度、約10万luxでの撮像および欠陥の検知に成功した。また、取得した像から開放電圧値を高精度で推定することに成功した。ボトムセルとなる結晶シリコン太陽電池だけでなく、トップセルとなるペロブスカイト太陽電池に対してもエレクトロルミネッセンス像を取得することに成功した。	○	

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×：未達



【G 壁面設置太陽電池モジュールの高性能化技術開発】（国立研究開発法人産業技術総合研究所）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
壁面設置 PV の高出力化に関する技術開発	幅 5mm 以下のストライプセルの発電効率 13% 以上および幅 3mm 以下のストライプセルの実現可能性を検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>幅 5mm 以下のストライプセルを開発し、発電効率 16% 以上を達成した。</li> <li>幅 3mm 以下のストライプセルの切断加工が実現可能であることを確認した。</li> </ul>	◎	特記事項なし
	45 度以上の斜入射光に対して反射損失を半減させる技術の開発	45 度以上の斜入射光に対して反射損失を 70% 低減させる技術を開発した。	○	特記事項なし
壁面設置 PV の色調制御に関する技術開発	2 つ以上の異なる色相で太陽電池の出力低下 5% 以内を実現	青や緑に着色したモジュールで効率低下 5% 以下を実現した。	○	特記事項なし
	垂直および 30 度傾けた方向からの色調が同等となる技術の開発	構造色による色調の角度依存性を緩和できる設計指針を見出した。	○	特記事項なし

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×：未達

【H 壁面設置太陽光発電システムの効率向上、長寿命化技術開発】(株式会社カネカ)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
① 非開口部太陽電池モジュール外観制御技術開発	通常のカバーガラスを使用する従来モジュールと比べて、変換効率低下が5%以下の色調均一性を有するモジュール構造を開発する。	非開口部向けモジュールのストリング設備を導入。耐久性の高い接合状態が得られる設計技術開発を実施。今後、長期信頼性を確認する。また、変換効率低下が5%以下の色調均一性を有するモジュール設計、試作を実施。	○	特記事項なし
② 非開口部太陽電池モジュール長寿命化技術開発	建築物としての寿命35年相当の性能を確認する。	高温高湿試験および、温度サイクル試験にて、IEC規格の5倍以上である、5,000時間、温度サイクル試験1,000cycleを実施し、出力特性の低下が5%未満、絶縁抵抗が規定値以上であることを確認した。(IEC基準の1,000時間、200cycleを10年相当とした場合、50年相当)	◎	特記事項なし
③ 非開口部太陽電池モジュール可換性設計技術開発	設置コストは建築用ガラス施工に対して同等以下を達成。 電気配線コストは地上設置時のコストに対して同等以下を達成。	既設建築物に実装されているサッシ及び窓を活用し、可換性を考慮した技術開発を実施し、可換性実証を行い、設置方法は、建築用ガラス施工と同様の手法で実施可能であった為、建築用ガラスの交換費用と同等であることを検証した。	◎	特記事項なし
④ 開口部太陽電池モジュール出力向上要素技術開発	半透明モジュールで可視光透過率20%以上、変換効率10%以上の性能を達成する要素技術を開発する。	開口部太陽電池を製作し、可視光透過率20%換算で、モジュール効率10%以上を達成した。継続して、最終目標の13%以上を達成するための要素技術開発を実施する。	○	特記事項なし
⑤ 開口部太陽電池モジュール窓代替性能長寿命化技術開発	窓の代替として用いる際の性能について、通常の建築用ガラス及び複層ガラスと比べて同等以上及び10年相当の寿命を確認する。	窓の代替として用いる際の性能について、ガラスと太陽電池規格の複合シーケンス試験を検討した。また、窓代替性能として、太陽電池の複層構造にて、建築用複層ガラスの耐結露10年相当のJIS R3209試験を実施し、合格した。今年度、新規設備導入により複合シーケンス試験の確認を実施する。	○	特記事項なし

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×：未達

I 壁面設置太陽光発電システム市場拡大のための共通基盤技術の開発とガイドライン策定  
（太陽光発電技術研究組合）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度* 1	今後の課題と 解決方針
テーマ1 壁面設置PVの設計ガイドラインの策定	国内市場向けガイドライン策定。	建築、太陽電池両業界が関心を持つ項目を抽出し目次案と執筆担当を2021年度中に決定。各項目担当者が執筆中。一部項目は初稿を回収済み。	△	各項目担当者による執筆を継続し、並行して全体編集、図表作成を進める。2022年度中にガイドライン完成見込み。 （着色モジュール外観・色調の客観的・定量的評価の実証データを収集し、2024年度改訂版に記載予定。）
テーマ2 壁面設置PV能評価技術の開発とガイドライン策定 テーマ2-1) 高精度低コスト環境性能評価技術の開発と実証（省エネ評価）	壁面設置PV用SHGC測定設備の運用および高精度評価の実証。	SHGC測定設備の設置を完了し、試運転を開始した。SHGC測定の誤差要因を抽出し、装置改良を進めている。2022年6月中旬にSHGC装置の熱漏れ原因を特定して対策を施すことで測定精度をさらに改善した。	△	各種壁面設置PVモジュールのSHGC測定を開始し、2022年度中にSHGC高精度評価技術を実証する見込み。
テーマ2-2) 壁面設置太陽光発電システムの発電量評価のガイドラインの策定	各種壁面設置PVモジュール発電量データを継続取得し、データ分析、誤差要因の解析結果をもとにガイドライン原案作成	壁面設置PVの屋外暴露試験実施。防眩モジュールおよび両面発電モジュールの発電量データからそれぞれの優位性を実証した。	△	屋外暴露試験を継続し、シミュレーションツールを用いて、データ分析、誤差要因解析を実施。2022年度中にガイドライン原案完成見込み。
テーマ3 壁面設置PVのための安全性調査	事例の収集と整理を行った結果をまとめた報告書の一次案作成	海外の安全性・火災対策情報収集（IEA PVPS Task15の活動、公開情報調査など）および国内事故事例調査を実施した。	△	国内、海外の事故・安全性に関する情報収集を継続し、2022年度中に調査報告書を作成予定。
テーマ4 壁面設置PVの社会受容性向上のための方策	Task 15 活動報告書作成	IEA PVPS Task15 会議、Task15 内サブタスクミ会議に参加。BIPV 信頼性に関するサブタスクでは日本メーカーの事例を紹介した。	△	IEA PVPS Task15 会議参加を継続し、2022 年度中に活動報告書を作成予定。

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×：未達

【J ペロブスカイト BIPV モジュールの研究開発】(パナソニックホールディングス株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
I. 高効率化技術開発	1. 30cm 角サイズの半透明モジュールで透過率 20%以上, 効率 10%以上	1. 15cm 角の半透明モジュールで透過率 20%, 効率 10.1%を実現	△	30cm 角基板に形成して実証予定
	2. 0.1cm <sup>2</sup> の小面積ペロブスカイト・タンデム太陽電池セルで変換効率 25%	2. トップセル、ボトムセルそれぞれの高効率化により、0.1cm <sup>2</sup> のペロブスカイト・タンデム太陽電池セルで変換効率 20.8%を実現	△	光学設計 (セル間の屈折率調整層、透明電極のキャリア濃度制御) により達成見込み
II. 高耐久化技術開発	3. 高温高湿試験合格	8 直列 50cm <sup>2</sup> モジュールで耐熱性と耐光性の両立を確認。	○	(封止材・封止構造を設計済。高温高湿試験実証中)
	4. 屋外曝露 60kwh で目視欠陥なし (耐久 10 年相当)	屋外曝露試験 280kWh においてデバイスの顕著な劣化および目視欠陥無いことを確認	○	*達成済
III. 低コスト化技術開発	5. 塗布系材料により 100 円/m <sup>2</sup> 以下の低コスト電極	100 円/m <sup>2</sup> 以下のカーボン電極を使用し、動作実証済 (金属補助電極あり)。	△	カーボンインクの配合比最適化および厚膜化により達成見込み
	6. ペロブスカイト工程の製造速度 3m/分以上	ペロブスカイトの塗布、結晶化工程に対し、目標を大きく上回る 10m/分で構築完了	◎	*達成済

\*1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、 ○ : 達成、 △ : 達成見込み、 × : 未達

【K 高性能化に向けた BIPV 材料技術開発】(学校法人早稲田大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	今後の課題と解決方針
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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ BIPV用タンデム型トップセルで用いるワイドギャップ・ペロブスカイト層に適合したHTMの設計指針(適切なHOMO準位, ホール移動度 <math>10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}</math>, 波長550 nmでの透過率 70%以上)を明確化するとともに、候補HTM材料の合成経路、反応条件を迅速に確立し、1cm角をはじめとする小面積の単独トップセルで変換効率18%を実現できる要素技術を開発する。</li> <li>・ 耐久性として85° C, 85%試験及び連続光照射1000 hで構造劣化、物性変化がないHTM材料を開発する。</li> <li>・ 上記性能を満たすHTM材料を低コスト(&lt;80円/m<sup>2</sup>)で製造できる合成法を確立する。</li> </ul>	<p>トップセル用の HOMO 準位の異なる 15 種の HTM 高分子材料を低コスト・簡便な化学酸化重合で合成し (&lt;80 円/m<sup>2</sup> 達成)、セル初期特性を検証、3 種を絞り込み、パナソニックでも検証。耐久性の高い無ドーブ HTM 単独層でセル効率 14%。</p>	<p>△</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 共平面性を改善したポリ(ジチエニル-チエノチオフェン)にて単独 HTM 層としてセル効率14%まで明らかにした。今後はペロブスカイト-HTM 界面の配向制御、アニーリング条件の最適化、界面パッシベーション技術との組み合わせ等により、ホール移動度の改善による <math>V_{oc}</math> の向上を目指す。</li> <li>・ パナソニック(株)が開発するワイドバンドギャップ組成への適合性を評価するとともに、微ドーブ、セルの作り込みと反射防止フィルムの活用によるセル改良で中間目標を達成する。</li> <li>・ 選定された HTM 材料の長期耐久性をパナソニック(株)にて評価する</li> <li>・ 安価な化学酸化重合による製造法を確立済み(&lt;80 円/m<sup>2</sup>)。収率などをさらに改善する。</li> </ul>
高速製造プロセス適合塗布材料の開発	<p>耐久性高いワイドギャップ・ペロブスカイト層組成を明らかにするとともに、5cm角の基材に均一に一段塗布、5-15分の加熱で形成可能なインキ組成(溶媒、濃度、添加剤)を明らかにする。</p>	<p>5cm角の基材にバーコート塗布、2段階の加熱処理により15分で800nm厚の無機ペロブスカイト層の形成法を確立済み。トップセルのセル効率13%超</p>	<p>◎</p>	<p>達成済み。スピコートでは達成できない800nmかつ高品質な無機ペロブスカイトを形成できる。パナソニックで進めるペロブスカイト組成のインキ化も検討する。</p>
透明導電膜作製用塗布材料の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ タンデムセルでの変換効率25%を実現できる要素技術(トップセルHTM、ペロブスカイト組成・厚み、塗布法、TCO代替材料)を開発する</li> <li>・ 85° C, 85%試験及び連続光照射1000 hで抵抗増加なく、材料コスト1000円/m<sup>2</sup>以下を満たすTCO代替材料を開発する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ トップセル HTM、ペロブスカイト塗布法に関する要素技術は第 1, 2 項目で実施。</li> <li>・ TCO 代替材料候補として気相重合 PEDOT, CNT ナノシートを形成し、30 Ω/Sq を達成。材料コストは PEDOT で 1000 円/m<sup>2</sup> 以下を達成。分散性向上により膜厚依存性を改良中</li> </ul>	<p>△</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ タンデムセルでの変換効率25%を実現できる要素技術については、パナソニックではトップセル18%未達でもセル間の光学調整と部材の最適化でセル効率23.6%まで到達しており、第2項の塗布法で <math>J_{sc}</math> を向上し達成見込み。</li> <li>・ シート抵抗の要件を満たす TCO 代替材料として PEDOT, CNT を検証済み。透過率をさらに改良し、耐久性を合わせて評価する。</li> </ul>

\* 1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、 ○ : 達成、 △ : 達成見込み、 × : 未達

【L ZEB 達成に向けた同時同量を実現する太陽光発電システムの実証】(株式会社カネカ)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
I. 高効率モジュール広角化による壁面 PV 発電量向上と意匠改善	色調の均一化、広角化技術を盛り込んだ意匠改善された太陽電池モジュールの建築物壁面等への設置検証を通じて、大量設置する際の課題抽出および解決を図る。	色調の均一化および広角化技術を盛り込んだ太陽電池を製作し、意匠評価を実施した。 反射性能評価によって、入射角 60° での反射率が 5%以下になることが確認されており、低反射化による出力電流の向上を見込む結果が得られた。 東京大学の西門にて 3 種の意匠サンプルを設置し、周辺住民に対して、設置許可を得られる意匠を抽出した。	○	特になし
II. 建物電力需要に対する同時同量制御システム実証 (運用コスト評価)		東京大学先端科学技術研究センターの壁面への太陽光発電システム設置について詳細検討し、大量設置時の課題を抽出した。 東京大学 3 号館の年間電力消費の解析を実施し、シミュレーションによって、西側壁面 PV 設置の夕刻時の創エネによる消費電力量の削減見通しを得た。今後、実証データにて解析を行い、有効性を検証する。	○	特になし
III. PC 一体型 PV による低コスト工法開発		今後の既築建物への壁面 PV 設置に関する潜在需要と、波及性の大きさから東京大学 3 号館壁面への高効率広角化モジュールの設置を計画した。 外壁構造の異なる 2 棟の壁面に対して、設置工法を検討した。太陽電池パネルの故障時又は、将来的な高効率モジュールへの可換性を想定したサッシ構造にて設計を行った。同工法の標準化により、大部分の既築建物に適用が可能となる。今後、東大壁面で以上の開発内容を実装検証する。	○	特になし

\*1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、 ○ : 達成、 △ : 達成見込み、 × : 未達

【M デザイン性を考慮した後付け可能な新築・既築向け BIPV システムの実証】(株式会社 LIXIL)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度* 1	今後の課題と 解決方針
デザイン性を考慮した後付け可能な新築・既築向け BIPV システムの実証	デザインや施工性に配慮した屋内日射遮蔽装置に PV を組み合わせた屋内設置型多機能 BIPV システムを開発する。	デザインや施工性に配慮した屋内日射遮蔽装置としての BIPV ロールスクリーンシステムを開発できた。	○	
	既築建物の窓部に設置し、発電性能の評価を実施する。	既存建物の窓部に設置し、発電性能の評価を実施開始。2023 年 1 月末頃まで評価。	△	データ取得機器で一部データ欠損有り。健全な取得済データでデータ補間する。
	既築建物の窓部を模して、環境性能の評価を実施する。	断熱性能や日射熱取得率に関して第三者試験機関で評価を実施した。その結果、断熱性能は 44.1% 向上し、日射熱取得率は 19.1% 向上した。	○	

\* 1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、 ○ : 達成、 △ : 達成見込み、 × : 未達



## A 赤外光を有効利用する量子ドット太陽電池の開発（東京大学、（再委託）タカノ株式会社）

### 1. 成果詳細

「赤外光を有効利用する量子ドット太陽電池の開発」

本研究開発では、可視透過性と高効率赤外光電変換の両立を可能とする量子ドット中間バンド太陽電池の技術開発を行うことを目標とする。中間バンドを介した薄膜太陽電池の発電効率を上げるためには、エネルギーバンド構造の精密制御や量子ドットの高濃度複合化に加え、赤外光の吸収効率の増大が必要である。そこで本テーマでは、①ナノ凹凸構造を用いた光閉じ込めと III-V 族中間バンド太陽電池での原理実証、②ウェットプロセスによる薄膜量子ドット太陽電池のプロセス開発、を組み合わせ、可視透過性と高効率赤外光電変換の両立を目指す。さらに、③コロイド量子ドットセル、ペロブスカイトを用いた複合量子ドットセルに対して、フィルム塗布後の面内均一性評価、また変換効率との相関がとれる画像化手法の開発を行う。

#### ① ナノ凹凸構造光閉じ込め機能を導入した量子ドット中間バンド太陽電池(東京大学)

本開発項目では、InAs 量子ドット太陽電池において、近赤外波長域の光閉じ込め係数を 12 倍(中間目標)に高めるためのナノ構造光閉じ込め構造を開発し、5mm 角セルで実証するとともにウェットプロセスへの技術応用を検討することを目標とする。

##### (1) ファブリーペロー共振器によるコヒーレント光閉じ込め構造の検討

多重積層 III-V 量子ドットにおける光吸収を増大させるために、ファブリーペロー (FP) 共振器による光閉じ込め効果の検討を行った。転送行列法を用いた数値解析によってデバイス層厚を最適化することで、図 III-2-(イ)-(ii)-A-1(a)に示すように InAs 量子ドット基底状態に相当する 1.2  $\mu\text{m}$  において、約 13 倍の光電場増強が得られることを見出した。また膜厚方向に複数の増強場が得られており、この位置に量子ドットを作製することで光吸収の増大が期待されることを明らかにした。

##### (2) ファブリーペロー共振器による光閉じ込め構造の実装と検証

多重積層 InAs/GaAs 量子ドットにおいて、FP 共振器構造の有無によるフォトルミネッセンス (PL) 発光スペクトルを比較することで、光閉じ込め構造による光電場増強の検証を行った。基板除去前後における室温 PL スペクトルを図 III-2-(イ)-(ii)-A-1(b)に示す。転送行列法で求めた共振波長と一致した複数の発光ピークが確認でき、一次元光閉じ込め構造による光電場増強を実証することができた。

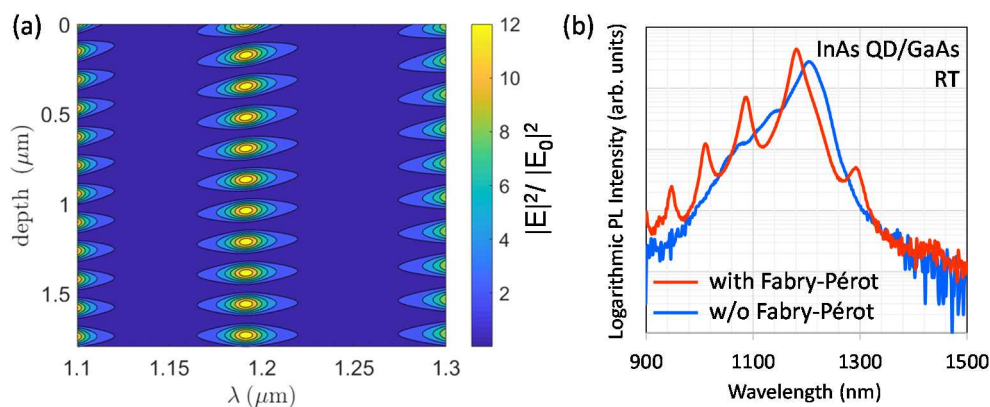
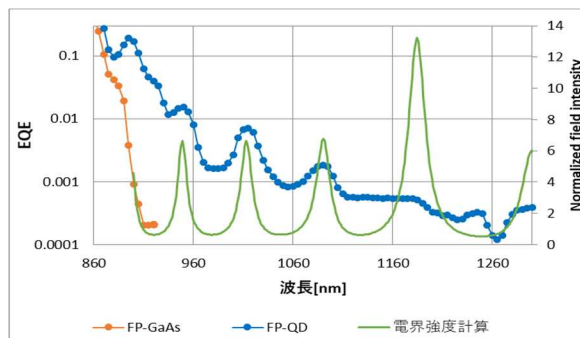
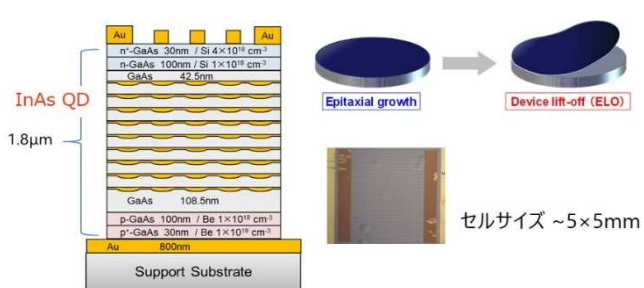


図 III-2-(イ)-(ii)-A-1 (a) ファブリーペロー共振器による光電場増強の理論計算結果、  
(b) 基板除去前後の InAs/GaAs 量子ドットの PL スペクトル測定結果。

(3) FP 共振器光閉じ込め構造を搭載した多重積層 InAs/GaAs 量子ドットの試作と評価を行った。裏面に Au 反射ミラーを配置した厚さ 1.8 mm の GaAs 光吸収層に波長 1192nm の光が入射したとき、界面から深さ方向に 173.5nm の間隔で光電界強度の共振ピークが計 10 個現れる。そこで計 9 個の共振ピークの位置に量子ドット層を挿入した太陽電池構造 (FP-QD) を作製した (図 III-2-(イ)-(ii)-A-2)。分子線エピタキシー法 (MBE) を用いて、GaAs 基板上に AlAs リリース層、n-GaAs 層、InAs/GaAs 量子ドット層、p-GaAs 層の順に成長を行い、Au を蒸着後、エピタキシャル・リフトオフ法 (ELO) により太陽電池構造をフレキシブル支持基板側に剝離した (セルサイズ: 5mm 角)。上記 PL 測定の結果と同様、EQE 測定でも FP 共振波長と一致する波長位置に量子ドットの吸収ピークが明瞭に観測された (図 III-2-(イ)-(ii)-A-3)。

従来構造の量子ドットセル(基板有り)と比較したとき、FP 構造を持つ薄型量子ドットセルの方が、量子ドットの EQE が 5~6 倍増大することを実証した。量子ドット密度(層数)を現状の 2 倍以上にすることで中間目標達成が見込める。今後、以上の成果を花王(株)他が取り組むコロイド量子ドットセル向けに展開する予定である。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-2 ELO 法を用いて作製した量子ドットセルの構造 (InAs 量子ドットを含む GaAs 光吸収層の厚さ 1800 nm, FP 共振波長  $\lambda = 1192$  nm)。

図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-3 FP 構造量子ドットセル (FP-QD) と量子ドットを含まない GaAs 層のみの参照セル (FP-GaAs) の EQE 測定結果、及び FP 共振器構造における共振波長と電界強度増強度の計算値。

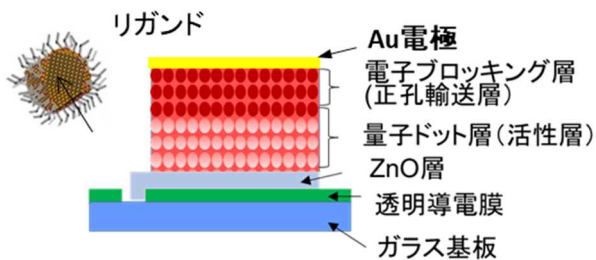
② ウェットプロセス中間バンド太陽電池用コロイド量子ドット(東京大学)

中間バンド動作に資する赤外光の光閉じ込め構造の研究開発の一環として、ウェットプロセス量子ドット太陽電池 (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-4) と組み合わせて、中間バンド動作の第一段階となる価電子帯から中間バンドへの光吸収および励起電子密度を高めるための要素技術開発に取り組んだ。本研究開発の目標である可視領域での透過率(550 nm において 20%以上)を維持しつつ、短絡電流密度で 15 mA/cm<sup>2</sup> を達成するために、具体的には、(1) 第一段階の電子励起を行わせる熱線領域の光のみを使い、ウェットプロセス量子ドット太陽電池の光電流の外部量子収率を向上 (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-5) させるために、薄膜量子ドット太陽電池の最適な吸収特性を示す赤外吸収量子ドットインクを開発を行った。(2) 量子ドット太陽電池の構築技術を確認した上で、中間バンド太陽電池のホスト材料の吸収端よりも長波長域で、項目①の光マネジメント技術と組み合わせることで、赤外光電変換特性の向上を行った。

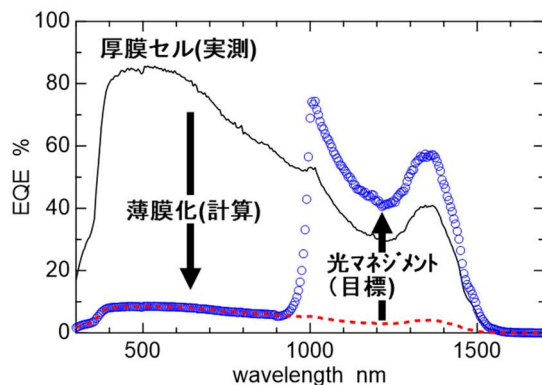
本研究開発項目では、薄膜化と高光電流が可能な赤外量子ドットセルを実現させるための量子ドット開発およびセル作製技術の構築を行い、これらの成果を花王(株)へフィードバックすることに重点を置いている。以下にこれまでの主な成果を示す。

(1) 通常の太陽電池では、活性層の膜厚は 500 nm から 1 μm 程度であるが、本研究開発では、可視透過性を高めるために、150 nm 程度まで低減する必要がある。そこで、膜厚制御方法について、検討をし、ディップコート法により、5nm 程度のレベルで膜厚制御を行えるようにした。

(2) 次に、均質かつ緻密な薄膜量子ドット層を形成するための成膜手法を検討した。従来法では、長鎖アルキルをリガンドとしたコロイド量子ドット溶液から固体膜を形成し、その後適当な小分子やイオンでリガンド交換を行うことで、量子ドット同士のカップリングを高める手法をとってきた。しかしながら、固相状態でのリガンド交換は、膜欠陥を生成する可能性が大きかった(図Ⅲ-2-(イ)-



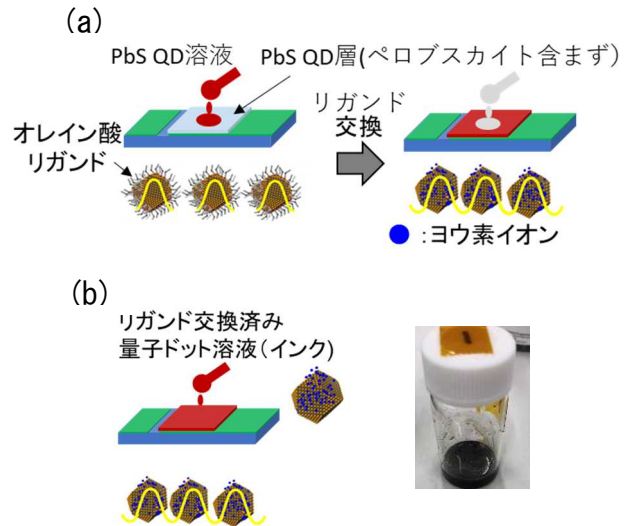
図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-4 量子ドット層の評価に用いるセル構造



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-5 可視透過性と光電流値の両立を目指した外部量子効率(EQE)のイメージ

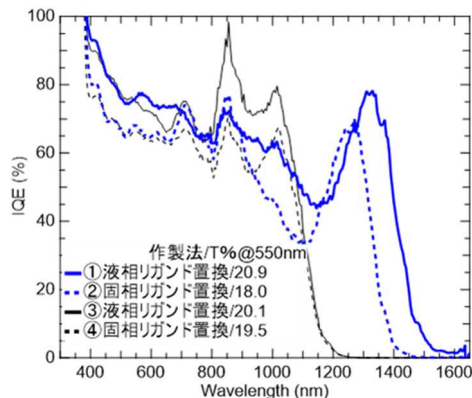
(ii)-A-6(a))。そこで、予め適当なイオンで量子ドット表面のリガンド交換をし、乾燥させた後に、有機溶媒に再分散させてコロイド量子ドット(量子ドットインク)を調製した。まずは、950nm 付近に第一励起吸収を示すコロイド PbS 量子ドット(オレイン酸リガンド)を用いて、液相で  $I^-$  と  $Br^-$  リガンドに置換した(図III-2-(イ)-(ii)-A-6(b))。その後、*t*-ブチルアミンに溶解して量子ドットインクを調製し、ZnO を成膜した透明導電性ガラス基板に塗布した。量子ドット膜は、透過率が 20%(@550nm)となるように膜厚に調整した。断面 SEM 観察より、膜厚は 185nm 以下であることが分かった。この量子ドット層を活性層として太陽電池を作製したところ、従来の固相リガンド交換法を用いた場合と比較して、 $V_{oc}$ ,  $J_{sc}$ , FF を改善できることが分かった(表III-2-(イ)-(ii)-A-1)。特に、800 nm よりも長波長領域の光に対する  $J_{sc}$  は、2.86 から 3.64  $mA/cm^2$  に向上した。また、外部量子効率(EQE)の改善も確認できた。光電変換特性の主な改善要因は、液相リガンド交換法を使うことで、量子ドットカップリングの改善と欠陥低減が関係していると考えられる。

(3)  $J_{sc}$  の更なる向上を目指し、第一励起吸収位置を、1250nm まで拡張したコロイド量子ドットを合成し、量子ドットインクの調製を試みた。オレイン酸リガンドを有する PbS コロイド量子ドットのオクタン溶液に  $PbI_2$  と  $PbBr_2$  を溶解した DMF 溶液を混合して、液相リガンド交換をし、DMF 相に分散した PbS 量子ドットを乾燥固化した。更に量子ドットインクを調製するために、第一励起吸収を 950nm に有する量子ドットのインクと同様に、*t*-ブチルアミンで溶解を試みた。しかしながら、溶解性が著しく低下して、量子ドットインクを得ることができなかった。そこで、DMF を 10vol%程度 *t*-ブチルアミンに添加したところ、量子ドットの溶解が進んだが、成膜した量子ドット固体膜には、凝集や欠陥が多く確認された。この原因として、DMF と *t*-ブチルアミンの沸点が、それぞれ 153°C と 78°C であり、その差が大きいため、乾燥過程が不均一になったものと考えた。そこで、DMF



図III-2-(イ)-(ii)-A-6 異なる2種類のリガンド交換法

(a)固相リガンド交換、(b)液相リガンド交換(写真：量子ドットインク)



図III-2-(イ)-(ii)-A-7 異なるリガンド交換法で成膜した量子ドット層を用いた太陽電池の内部量子効率スペクトル

と同等な沸点を有する種々のアミン類で混合溶媒を検討した。その結果、ヘキシルアミン(沸点: 132°C)とDMFの混合溶媒で量子ドットインクを調製することで、良好な量子ドット固体膜を成膜することが可能となった。

(4) 本量子ドットインクを用いて、可視光透過性を有する太陽電池を作製したところ、近赤外領域(>800 nm)において  $J_{sc}$  が 3.64  $mA/cm^2$  から 5  $mA/cm^2$  に改善し、吸収領域の拡張効果を確認することができた(表1)。各手法を用いた作製したセルの IQE を図III-2-(イ)-(ii)-A-7 に示す。本検討で作製した太陽電池は、対極として透過性の無い Au 電極を用いているため、量子ドット層を透過し、Au 電極で反射

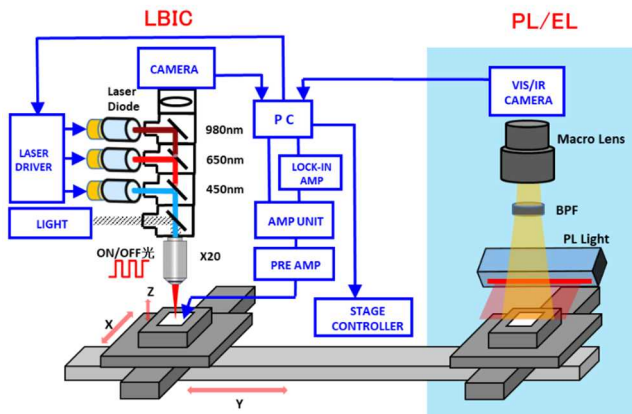
表III-2-(イ)-(ii)-A-1 異なるリガンド交換法で成膜した量子ドット層を用いた太陽電池の光電変換特性

リガンド交換	セル (Auなし) 透過率 (@550nm)	$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ )	$V_{oc}$ (V)	FF (%)	PCE (%)	$J_{sc}$ ( $mA/cm^2$ ) >800nm
① 液相法 1280nm	20.9	21.6	0.370	59.5	4.8	5.0
② 固相法 1240nm	18.0	17.4	0.450	45.9	3.6	3.4
③ 液相法 950nm	20.1	21.0	0.564	62.3	7.4	3.64
④ 固相法 950nm	19.5	17.9	0.463	57.0	4.7	2.86

した光を、量子ドット層で再吸収できる太陽電池構造になっている(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-4)。そのため、入射光の光閉じ込め効果としては、単純に2倍程度と考えられる。現状レベルの量子ドット層に7、8倍程度の光閉じ込め技術と組み合わせることで、15 mA/cm<sup>2</sup>以上の短絡電流密度が見通せる。本研究開発項目で検討している量子ドット層をゲストとして、ペロブスカイトホスト層にうまく組み込むことで、量子ドットカップリングにより中間バンド形成ができ、さらに中間バンドとして要求される一段目の光吸収能を実現できることが期待される。

③ 薄膜太陽電池・塗布型作製装置の評価・解析技術開発(タカノ株式会社:再委託)

3波長レーザーを搭載したLBIC (Light Beam Induced Current)、及びPLとエレクトロルミネッセンス(EL)画像を撮像可能な装置を開発した。全体ブロック図(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-8)及び装置の外観写真(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-9)を示す。

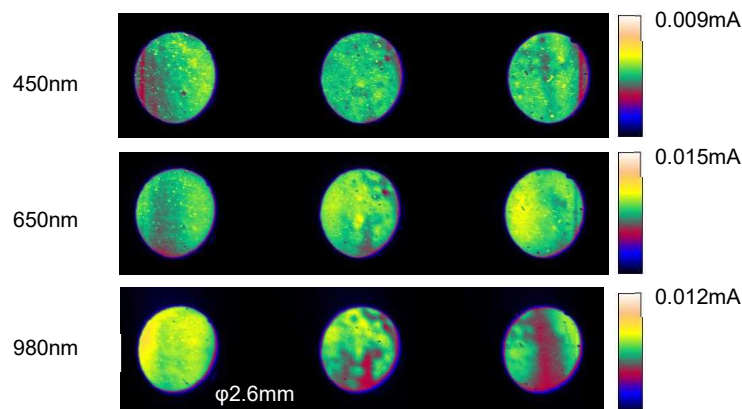


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-8 開発した評価装置の全体ブロック図

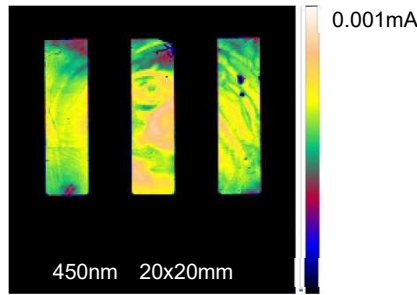
図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-9 外観写真

LBICには450nm、650nm、980nmの3波長レーザーを搭載し、数ミクロンメートルまでのスポットサイズ調整、出力パワー調整が可能である。X-Yステージは0.1~25mmエリアまで走査でき、ミクロンメートルレベルの高分解能測定からミリメートルの広視野までを網羅することができる。

画像の取り込み時間は走査域によるが、200x200ピクセルで3分~20分程度であり十分に実用的な待ち時間である。以下にLBIC測定画像の例として、コロイド量子ドット(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-10)およびペロブスカイト(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-11)を示す。各レーザーの出力は平均値で50mWである。

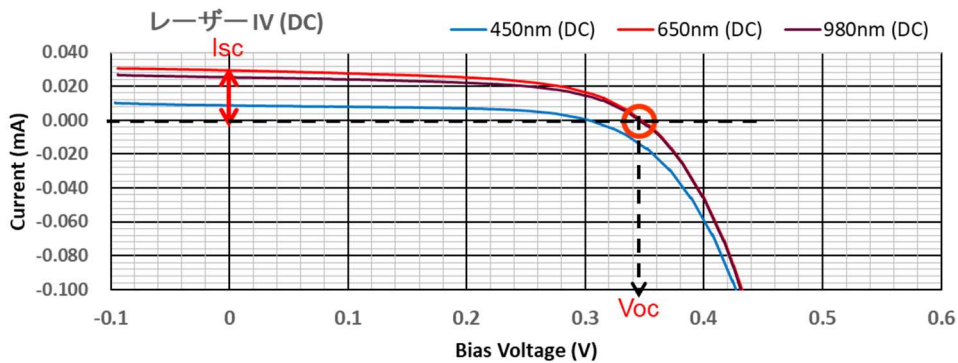


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-10 コロイド量子ドット試料のLBIC画像例(測定範囲2.6mmφ)

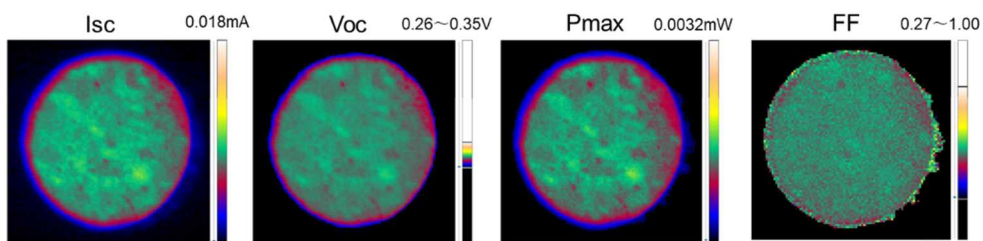


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-11 ペロブスカイト試料のLBIC画像例(測定範囲20mm角)

本装置ではレーザーを光源としたI-V測定機能を付加していることから、レーザーをX-Y走査して各ポイントのI-V測定結果で得られた電気特性をマッピングする機能があり、本装置の特徴の一つである。これはLBICと同様に、選択した波長のレーザースポットをX-Y走査しながらポイント毎にI-V測定を行い、得られた電流電圧カーブから $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $P_{max}$ 、FFの各電気特性を算出して各々画像化するものである。なお画像の全ピクセルのI-V測定を行うため、これには通常数時間以上の時間を必要とする。またI-V測定には通常のDC測定以外に、レーザーをON/OFFさせて出力電流をロックインアンプで検出するAC測定モードがある。ペロブスカイトのDC特性はバイアス電圧に大きく左右されて不安定であるが、交流出力成分だけを検出するAC測定モードが評価に有用な可能性がある。このI-Vマッピング測定機能は他に類がなく、発電ムラの解析や改善に新たな知見が得られる可能性がある。今後サンプル評価を行い発電不良との関連性などを調査していく必要がある。以下の参考例は、コロイド量子ドットサンプルの3波長レーザー光源によるI-Vカーブ(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-12)、および450nmにおけるI-Vマッピング画像(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-13)の取得例である。

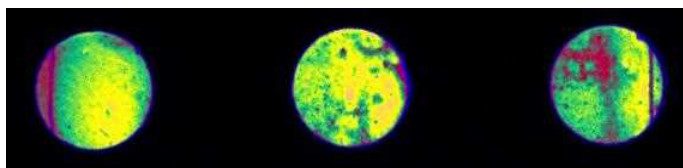


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-12 3波長レーザー光源を用いて得られたI-Vカーブ測定例



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-13 I-Vマッピング画像の取得例

また本装置にはPL/EL用に波長感度400~1600nmのエリアカメラを搭載している。LBICとサンプルステージを共用し座標をリンクさせることで、同一エリアをLBIC/PL/ELの各測定方式で画像化することが可能である。コロイド量子ドットセル試料から得られたEL画像例を図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-14に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-A-14 コロイド量子ドット試料から取得したEL画像例

発電ムラなどの解析には、このような異なる方式で視覚化できるツールは有用であると思われ、今後サンプルテストを蓄積して評価方法を確立していく予定である。なお現時点ではPL撮像用の励起光源が搭載されておらず今後準備することを計画している。さらにソフトウェアは測定サンプル、測定条件毎の設定をレシピ登録できるなど、定量的な測定再現性と操作性を考慮している。

以上のように発電ムラや欠陥などを異なる方法で画像化することにより、他の測定器だけでは得られない情報を視覚的に把握することが可能になり、作製した太陽電池セルの性能向上にフィードバックできることが可能になり、中間目標を9ヶ月程度前倒して達成した。

## 2. 実用化・事業化見通し

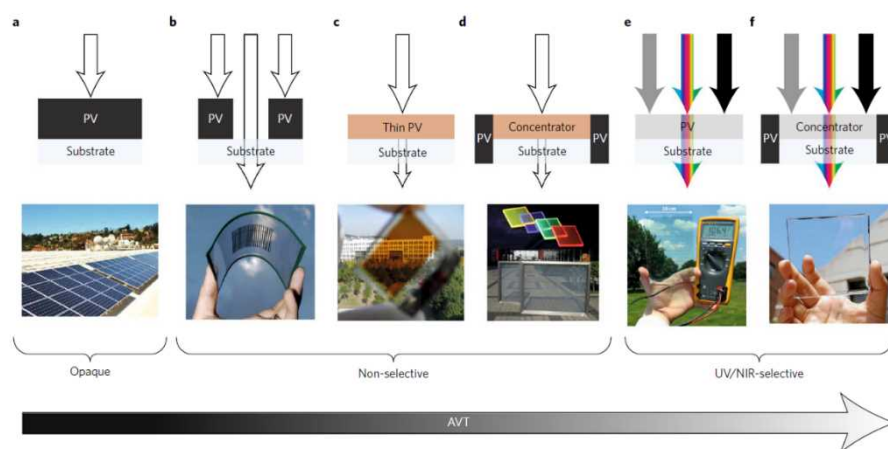
本研究テーマ「赤外光を有効利用する量子ドット太陽電池の開発」の最終目標は、可視光透過率 20%以上、かつ変換効率 13%(モジュール効率)以上のシースルー太陽電池の実現に向け、ウェットプロセスを用いた量子ドット中間バンド太陽電池を開発することである。ここで、中間バンドを介した薄膜量子ドット太陽電池の発電効率を上げるために、エネルギーバンド構造の精密制御や量子ドットの高濃度複合化に加え、赤外光の吸収効率の増大が必要である。本テーマでは、①ナノ凹凸構造を用いた光閉じ込めと III-V 族中間バンド太陽電池での原理実証、②ウェットプロセスによる薄膜量子ドット太陽電池のプロセス開発、を組み合わせ、可視透過性と高効率赤外光電変換の両立を目指した研究開発を進めている。さらに③コロイド量子ドットセル、ペロブスカイトを用いた複合量子ドットセルに対して、フィルム塗布後の面内均一性評価、また変換効率との相関がとれる画像化手法の開発を進めている。他の測定装置では得られない情報を視覚的に把握することが可能になるため、太陽電池セルの作製プロセスに効率良くフィードバックすることでセルの性能向上に繋げることができる。

中間バンド動作による赤外光利用率を飛躍的に向上させるために、まずファブリーペロー (FP) 共振器による光閉じ込め構造により、量子ドットの光吸収波長での光電場増強度 (≡光閉じ込め係数) を最終目標の 20 倍程度まで増大させるような光閉じ込め構造を実証できれば、量子ドットセルに限らず様々な薄膜太陽電池セルの高効率化において有用である。汎用性も高く、高効率・低コスト技術として実用化が期待できる。またコロイド量子ドットについては、最終目標 (15mA/cm<sup>2</sup>, >800 nm) を実現できれば、壁面開口部での太陽光発電に資する特筆すべき成果であり、実用化レベルに近づくものと考えられる。なお、量子ドット合成や量子ドットインク製造においては、花王(株)のナノ粒子分散液製造技術などの強みが活用できるため、大面積化技術としての展開が期待できる。

薄膜太陽電池・塗布型作製装置の評価・解析装置開発においても、当初の計画通りに順調に進捗しており、良好なサンプル測定結果、また空間分解能・測定データ取得時間等の性能が得られている。今後は種々のサンプル測定を積み重ねて評価方法を確立し、特に電気特性が不安定で解析が難しいとされるペロブスカイトセルの評価ツールとして非常に有用である。

## 3. 波及効果

本事業の主目的達成のために開発する要素技術の中には、下記の通り種々の応用に波及効果を有するものが多く存在する。



図III-2-(イ)-(ii)-A-15 可視光透過率、変換効率を用途に合わせてチューニングしたシースルー型太陽電池の可能性

(C.J. Traverse 他, “Emergence of highly transparent photovoltaics for distributed applications”, Nature Energy, Vol.2, 849-860 (2017))

高効率赤外吸収量子ドットを実現させることで、可視光透過性を維持しつつ光電変換効率を高めることが可能となる。赤外領域の光を吸収して高効率な発電が可能になると、太陽光の熱線遮蔽機能により、夏場の空調負荷低減など省エネ効果が期待できる。また、従来市販されている太陽電池に加え、材料合成や製造工程をはじめ、複数の産業分野の技術の利用が必要となるため、太陽電池産業界の裾野を拡大する効果が期待できる。可視光透過性、光電変換、省エネ性などの機能を有することで、本事業のシースルー型太陽電池の新市場の開発(参考資料)、ならびに新規分野の創製などの効果が期待できる。

中間バンド太陽電池の高効率化を目指して開発している面内超高密度量子ドット及び超格子の作製技術は、これまでにない量子ドット層の物性や機能性を活用した新規デバイスへの応用の波及効果が期待される。なかでも軽量・フレキシブル光検出器・センサーなどの受光素子への応用が期待される。

一方、開発した薄膜太陽電池・塗布型作製装置の評価・解析装置は、LBIC、PL、EL 機能を全て搭載している。異なる方法での発電ムラ画像が得られる他、レーザーを光源としたI-V測定による電気特性のマッピングなど本装置特有の測定機能を持つことから、ペロブスカイト、コロイド量子ドット材料といった新規太陽電池・材料の評価解析を系統的に行うことを可能とした。従来の結晶系・薄膜系太陽電池、さらには太陽電池以外の発光ダイオード(LED)やレーザーなどの種々の光電デバイスにも広く適用可能な手法であり、本装置の製品としての価値は高い。

#### 4. 今後の展開

開発を目指す中間バンド量子ドットセルには、最終目標の達成に向けてこれまで培ってきた技術を融合させ、花王(株)の開発するセル技術に早期適用することを目標とする。光閉じ込め技術と高密度量子ドットの合成技術を組み合わせて光吸収量の増大を図り、室温での赤外光フォトンの2段階光吸収レートを向上させることが共通の課題である。そのためには、量子ドットセルでの赤外光フォトンの2段階光吸収の増大と開放電圧低下の抑制を図るため、これらに競合する物理過程の時定数や構造依存性を明らかにする必要がある。そこでデバイスシミュレータによりこれらの機構の寄与を量子効率やI-V特性の測定で得られるデータに基づいて解析を進め、高効率化実現への設計指針、特に鍵となる光閉じ込め構造の最適設計を行う。

さらに並行して開発を進めているコロイド量子ドット、ペロブスカイト等の次世代太陽電池セルの不良解析や性能改善に有効な評価分析装置の完成度を上げ、解析技術の信頼性向上ならびに手法の確立に取り組んでいく予定である。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	1	4	0	5
研究発表・講演 (国内・審査有)	9 (0)	9 (0)	2 (0)	20 (0)
(国際・審査有)	(3)	(5)	(0)	(8)
(国内・審査無)	(6)	(4)	(1)	(11)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(1)	(1)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

## B AI 予測最適化手法を用いたシースルー量子ドット太陽電池の逆設計と開発（電気通信大学）

### 1. 成果詳細

「AI 予測最適化手法を用いたシースルー量子ドット太陽電池の逆設計と開発」

本研究開発項目は AI 予測最適化技術を活用し、中間バンド太陽電池に適したコアシェル型半導体量子ドットの探索、量子ドット/ペロブスカイト界面におけるキャリア移動過程の解析各要素技術の構築、電磁場解析による光マネジメント構造の逆設計などの要素技術の確立を目指す。目的関数（耐久年数 + 透過率 + 変換効率 - 発電コスト）を構成するパラメータの相関を能動的に学習させ、「①赤外光の光閉じ込め係数を約 25 倍に高めるための最適化光学構造の実現、②透過率 20%以上且つセル変換効率 15% のコアシェル中間バンド太陽電池の実現」という目標に向けて研究開発を進めている。

#### 1) グラフ CNN を用いたコアシェル型半導体量子ドットの逆設計と最適化

##### ● 機械学習手法を用いた光吸収・発光スペクトルの予測

コアシェル型 CdTeSe 量子ドットの基本構造を変化させ、Gaussian16 時間依存密度汎関数法 (TDDFT) を用いて機械学習用の 240 個の光吸収と 208 個の発光スペクトルデータベースを構築した。また、結晶構造をグラフ表記するためのクーロンマトリックス手法を適用した。図 III-2-(イ)-(ii)-B-1 は、量子ドットのクーロンマトリックスを示している。このクーロンマトリックスを入力データとして 4 種類の

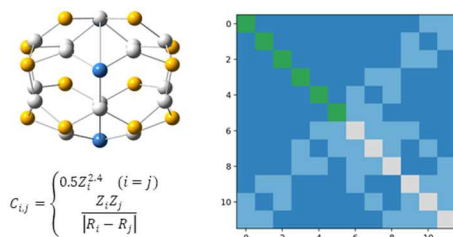


図 III-2-(イ)-(ii)-B-1 クーロンマトリックスの計算と表記。

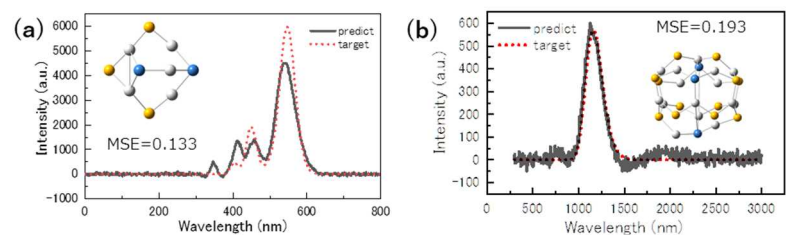


図 III-2-(イ)-(ii)-B-2 (a) ランダムフォレスト法を用いた光吸収スペクトル予測例；(b) 自己符号化器 NN を用いた発光スペクトル予測例。

機械学習手法：ニューラルネットワーク (NN)、ドロップアウト NN、自己符号化器 NN とランダムフォレスト法を用いて学習モデルを構築した。さらに、学習済みのモデルを用いて 10 回の予測テストを行い、得られた 10 個の MSE (平均 2 乗誤差) の平均値から予測精度を評価した。その結果、光吸収スペクトルの予測に関しては、ランダムフォレスト法が最も低い MSE 値を持ち、発光スペクトル予測においては、自己符号化器 NN 法が最も低い MSE 値を持つことがわかった。図 III-2-(イ)-(ii)-B-2 は光吸収スペクトル (a) と発光スペクトル (b) の予測結果の一例を示している。ランダムフォレスト法と自己符号化器 NN 法による光吸収と発光スペクトルから算出した励起子エネルギー、エネルギー準位の計算誤差は、実験値との誤差約 5% 以内まで達成できており、既に中間目標を上回る成果を達成している。光吸収係数の誤差の制御は 20% であるが、現在、学習データベースの拡充やアンバランスの改善を図ることで予測精度が向上しつつあり、2022 年 10 月の中間評価 (2022 年 10 月時点) までには、中間目標である誤差 10% 以内を達成できる見込みとなっている。

##### ● 密度汎関数法と非平衡グリーン関数法を用いたコアシェル量子ドットの電荷輸送解析

量子ドット (QD) は体積に対する表面の割合が大きく、コロイド上の QD の光学特性やキャリア輸送特性に影響を与えるため QD の表面処理が不可欠である。その有力な候補技術として QD の全表

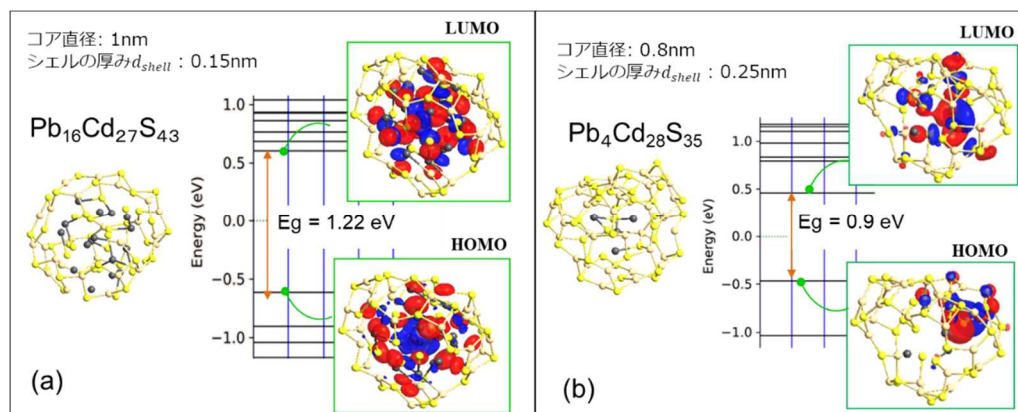


図 III-2-(イ)-(ii)-B-3 (a)  $\text{Pb}_{16}\text{Cd}_{27}\text{S}_{43}$  QD と (b)  $\text{Pb}_{16}\text{Cd}_{27}\text{S}_4$  QD の HOMO と LUMO の電子状態。



面を覆うコアシェル量子ドット構造が提案され、フォトルミネッセンス(PL)、光安定性とキャリアの移動度が劇的に向上すると報告されている。本研究では、実験的に解析することが難しいコアシェル量子ドットの電子輸送について、密度汎関数法(DFT)と非平衡グリーン関数法(NEGF)を組み合わせることで解析を行なった。まず、コア直径とシェルの厚みが異なった2種類のCdS/PbS コアシェル QD :  $\text{Pb}_{16}\text{Cd}_{27}\text{S}_{43}$  と  $\text{Pb}_4\text{Cd}_{28}\text{S}_{35}$  を作成し、DFT により構造最適化と電子物性解析を行った。図 III-2-(イ)-(ii)-B-3(a), (b) は2種類のコアシェル QD の HOMO と LUMO の電子状態を示している。図 III-2-(イ)-(ii)-B-3(a) からコア直径が 1nm、シェルの厚みが 0.15nm の  $\text{Pb}_{16}\text{Cd}_{27}\text{S}_{43}$  QD は、HOMO と LUMO へのシェルの電子の寄与が少なく、コアの電子の寄与が大きいことがわかる。これはコアシェル  $\text{Pb}_{16}\text{Cd}_{27}\text{S}_4$  QD が TypeI の特徴を有することを示唆している。一方、コア直径が 0.8nm、シェルの厚みが 0.25nm の  $\text{Pb}_4\text{Cd}_{28}\text{S}_{35}$  QD は、HOMO にシェルの電子の寄与が大きく、LUMO にはコアの電子の寄与が大きいことがわかる。この結果から  $\text{Pb}_4\text{Cd}_{28}\text{S}_{35}$  QD が TypeII の電子構造の特徴をもつことが確認できた。

また、バンドアライメントを検証するために、上記の2種類のコアシェル量子ドットの部分状態密度(PDOS)のDFT計算を行い、その結果を図 III-2-(イ)-(ii)-B-4(a) と図 III-2-(イ)-(ii)-B-4(b) に示している。PDOS は元素ごとにコアとシェルの電子構造に対する寄与度を評価することができ、それによってコアとシェルのエネルギー位置を決めることができる。図 III-2-(イ)-(ii)-B-4(a) からわかるように TypeI 構造を持つ  $\text{Pb}_{16}\text{Cd}_{27}\text{S}_{43}$  QD は PbS (コア) と CdS (シェル) のエネルギー順位は概ね同じであることがわかる。一方、図 III-2-(イ)-(ii)-B-4(b) に示しているように、TypeII の電子構造を持つ  $\text{Pb}_4\text{Cd}_{28}\text{S}_{35}$  QD は CdS (シェル) が PbS (コア) より高いエネルギー準位に位置することがわかる。それゆえ、同図のバンドアライメント模式図に示すように、CdS (シェル) がエネルギーのバリアとして働き、量子ドットに励起された電子の PbS (コア) への逆流を阻止することができる。この結果から、本プロジェクトの中間目標の一つであるコアシェル量子ドットにおける電子逆流防止効果が理論的に確認できたことがわかる。今後、花王チームと緊密に連携しながら、逆流防止効果を有するコアシェルの量子ドットの実験作製と性能評価を行っていく。

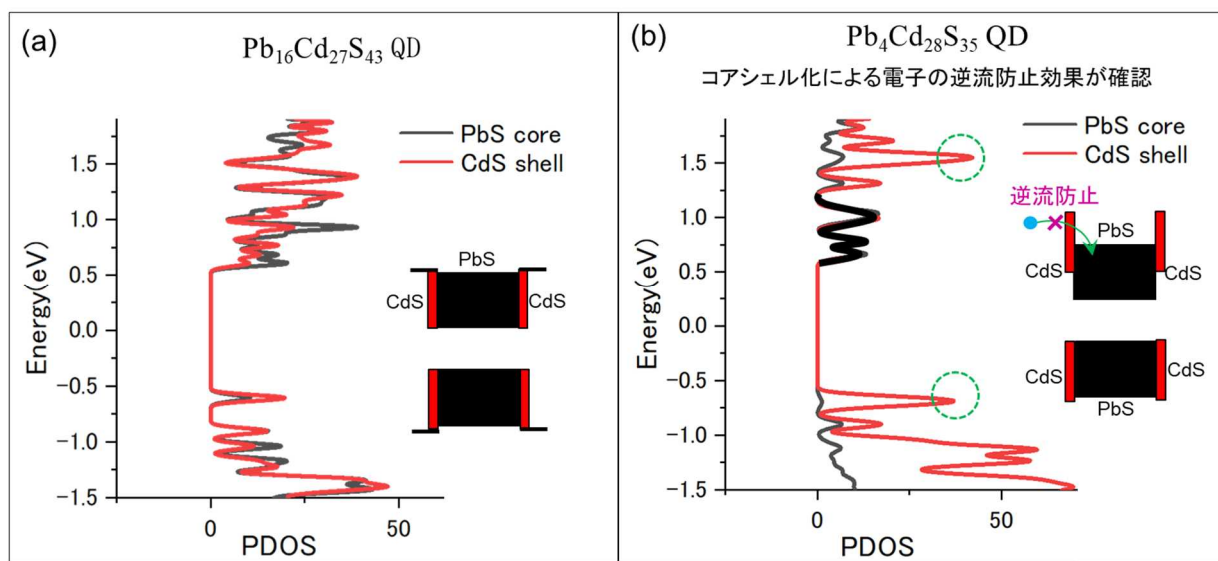
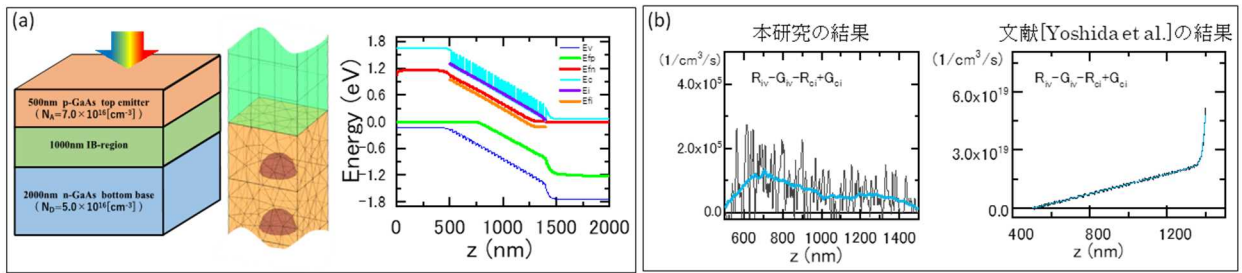


図 III-2-(イ)-(ii)-B-4 (a)  $\text{Pb}_{16}\text{Cd}_{27}\text{S}_{43}$  コアシェル量子ドットの部分状態密度(PDOS)の結果とバンドアライメント模式図; (b)  $\text{Pb}_4\text{Cd}_{28}\text{S}_{35}$  量子ドットの部分状態密度(PDOS)の結果とバンドアライメント模式図

## 2) FDTD 近似型ニューラルネットワークと深層強化学習を用いた光閉じ込め構造の逆設計

- 3次元中間バンド太陽電池(IBSC)のドリフト拡散モデルの作成。

本プロジェクトの挑戦点として、透過率と比例するシースルーの特徴を実現するために可視光を透過させる必要がある。そのために中間バンドデバイスの短波長と長波長の吸収、特に長波長の吸収が肝心となる。また作製可能なデバイスの条件から、透過率の高い 1200nm 以上の長波長を効率よく吸収する必要があるため、最適な光閉じ込め構造を設計しないと行けない。さらに作製可能な光の閉じ込め構造を設計するために、デバイスシミュレーターの3次元化、光学構造の計算とデバイスの変換効

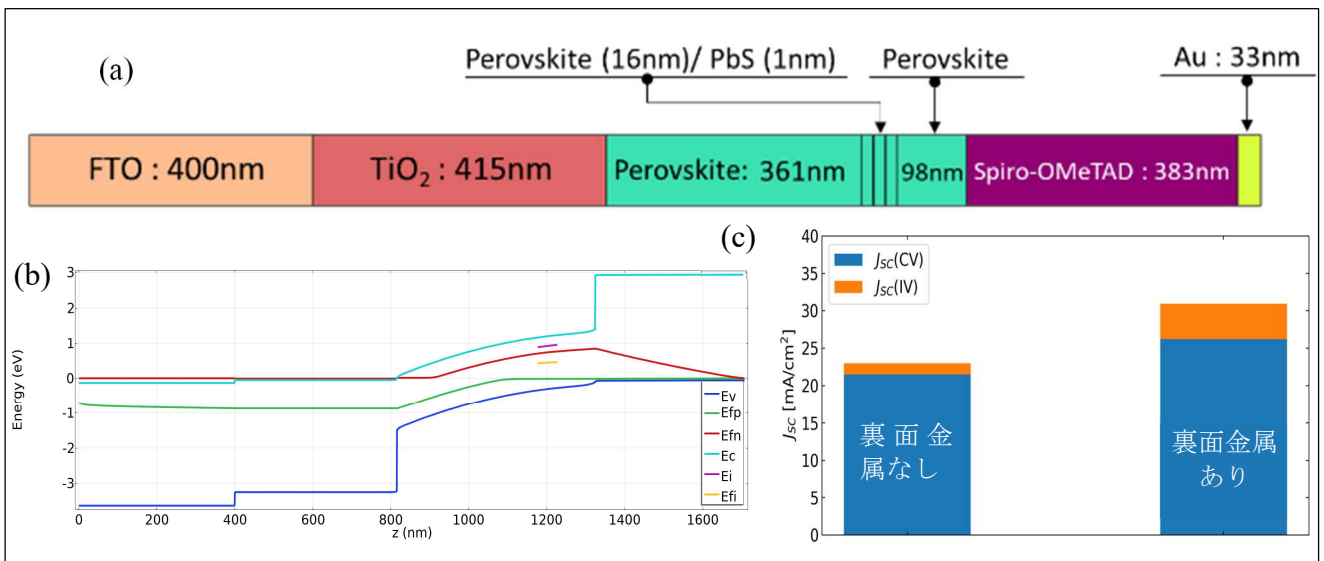


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B-5 (a) 探索前の初期構造における有限要素モデルと3次元ドリフト拡散モデルで計算したバンドダイアグラム; (b) 再結合割合律速条件における文献[Yoshida et al., J. Appl. Phys. 112, 084510 (2012)]との比較。

率の計算を連動した光学構造の設計が不可欠である。以上の条件を考慮しながら研究を進め、有限要素法計算パッケージ COMSOL 上で3次元中間バンド太陽電池 (IBSC) のドリフト拡散モデルの作成に成功した (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B-5)。ちなみに、これまで汎用性のある3次元 IBSC のデバイスモデルは存在していなかった。さらに、中間バンドにおいて最も重要な生成割合  $G_{IV}$ ,  $G_{CI}$  と再結合の割合  $R_{IV}$ ,  $R_{CI}$  間の再結合割合律速条件:  $(R_{IV} - G_{IV}) - (R_{CI} - G_{CI}) = 0$  についても、我々は初めてモデルのシミュレーションに成功した。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B-5(b)は、引用頻度の高い文献[Yoshida et al., J. Appl. Phys. 112, 084510 (2012)] で使用されているシミュレーターの結果と我々の結果の比較を示している。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B-5(b)から本研究における律速条件は、計算が進むにつれて概ねゼロに向かって収束しているのに対して、文献のシミュレーターの結果は  $10^{19}$  まで大きくずれていることがわかる。

● FDTD 近似型ニューラルネットワークと深層強化学習を用いた光閉じ込め構造の逆設計

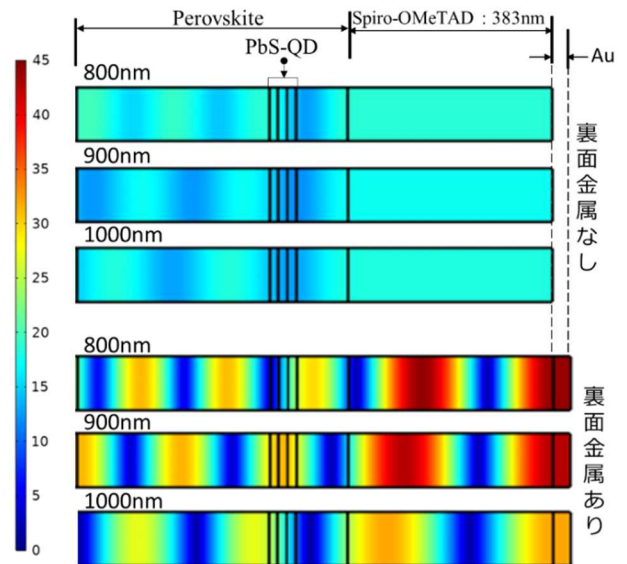
MBE 法によるドライプロセスで作製したファブリーペロー (FP) 共振器による光閉じ込め構造により、量子ドットの光吸収波長での光電場増強度 ( $\equiv$  光閉じ込め係数) が最大 13 倍に増大することをシミュレーション計算により示した。本研究では溶液法で作製する PbS 量子ドットペロブスカイト型中間バンド太陽電池において、前項で開発した 3 次元 IBSC デバイスシミュレーターと、予測と最適化機能を備える深層強化学習アルゴリズムを用いて、中間バンドの形成に関わる光吸収層での光閉じ込め構造の逆設計を行った。遂行した課題は、裏面金属からの反射によって増加する長波長域の光電流密度の増加割合の最大化、すなわち近赤外波長域の光閉じ込め係数を最大化することである。今回は、短絡電流密度  $J_{sc}$  のうち、中間バンドを介して生じた分の電流密度  $J_{sc}(IV)$  において、裏面金属がない場合の値に対する裏面金属がある場合の値との割合を光閉じ込め係数と定義し、この割合が 6 倍となることを目標とした。また逆設計では、中間バンドを形成する光吸収層、透明導電膜や電子輸送層、正孔輸送層を含めた全ての層の幅を逆設計学習パラメータとした。強化学習の報酬は探索した光閉じ込め係数と目標値との差とした。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B-6(a)と図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B-6(b)は逆設計で得られた最適なデバイスの構造とバンドダイアグラムを示している。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B-6(c)は、今回の逆設計中に得られたデバイス構造の中



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-B-6 (a) 逆設計により得られたデバイス構造; (b) 逆設計により得られたデバイスのバンドダイアグラム; (c) バルクと中間バンドそれぞれにおける光電流密度。

で最も光閉じ込め係数が高かった結果を示しており、裏面金属の有無それぞれの場合における短絡電流密度 $J_{sc}$ に中間バンドを経由する電流 $J_{sc}(IV)$ と伝導帯と価電子帯間に生じる電流 $J_{sc}(CV)$ の数値を示している。図III-2-(イ)-(ii)-B-6(c)から今回の量子ドットペロブスカイト型太陽電池における裏面金属の有無を条件とした逆設計で得られた最大の光閉じ込め係数は 3.23 倍であることがわかる。

また、光電場の最大値を量子ドットの差し込み位置とする場合、デバイスの最大効率が得られていなかったため、光電場との相関があることがわかった。そこで、AIを用いた量子ドットの差し込み位置の逆設計最適化を試み、最も高い変換効率の向上を達成した。図III-2-(イ)-(ii)-B-7 は今回の逆設計で得られた構造における、裏面金電極がない場合と裏面金電極がある場合の光干渉効果の比較を示している。近赤外領域の光が裏面の電極に反射し、強く干渉が起きている様子が確認できる。また 900nm 付近の励起波長において、量子ドットを差し込む領域と干渉パターンの強め合う領域が概ね一致していることから、量子ドットの差し込みの最適位置を探索できたと考えられる。今後は目標値の性能を示す逆設計に向けて、報酬関数の設定の見直しや強化学習アルゴリズムの変更などを検討し改善を行う。



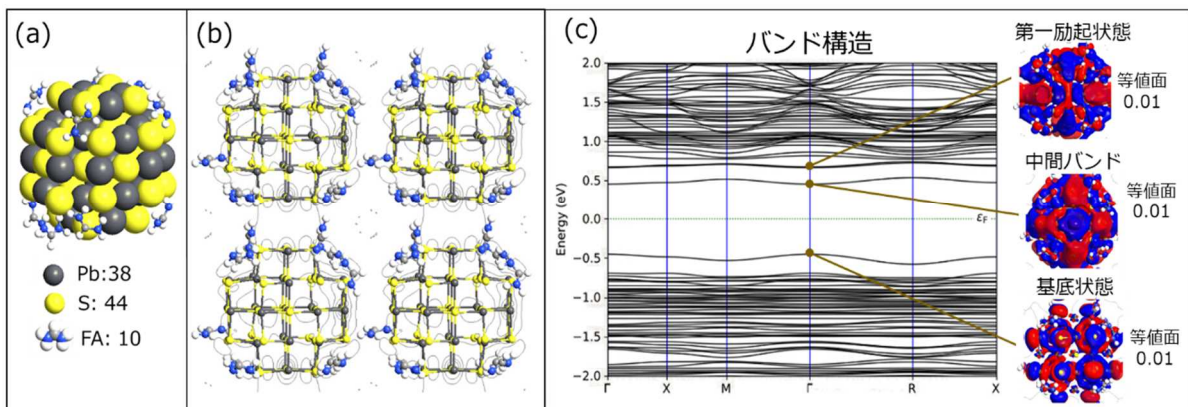
図III-2-(イ)-(ii)-B-7 最適化した量子ドットの差し込み位置における裏面電極がない場合と裏面電極がある場合の光干渉効果の比較。

### 3) 電子構造の時間追跡における第一原理分子動力学計算

#### ● ペロブスカイト型リガンド付き PbS 量子ドットの電子物性と光学特性の解析

量子ドットの表面のパッシベーションは、電子特性や光学特性に対して大きな影響を与えることが知られている。しかし、リガンド付き量子ドットの構造、理論的な物性、光学特性などの解析は行われていない。ここでは、近年、高い移動度を示すことでリガンドとして注目を集めているペロブスカイト型の  $\text{FA} \rightarrow \text{CH}(\text{NH}_2)_2$  リガンド付き PbS 量子ドットの電子物性と光学特性の解析を行った。また、従来のハロゲン型 Cl と I の 2 種類のリガンド付き量子ドットにおいても比較検証を行った。

今回、直径 1.6nm の PbS 量子ドットを用いて、図III-2-(イ)-(ii)-B-8(a)で示す FA リガンド付き PbS 量子ドットの作成を行った。FA はカチオンであるため、Pb に比べて S が多い量子ドットを用いて電荷中性条件を満たした。量子ドット間でカップリングがある場合の解析を行うために量子ドット間同士の距離を調整し、第一原理計算ソフト Quantum ATK<sup>®</sup>を用いて量子ドット超格子の電子特性と光学特性について計算を行った。図III-2-(イ)-(ii)-B-8(b)で示すようにドット間の距離



図III-2-(イ)-(ii)-B-8(a)作成した FA リガンド付き PbS 量子ドット ; (b) カップリングした FA リガンドつき量子ドットと波動関数の断面図; (c) カップリンした FA リガンド付き量子ドットのバンド構造と基底状態、中間バンド、第一励起状態の波動関数マッピング (Γ点)。

が 2.0nm の際に、隣接する量子ドットの波動関数がリガンドを通してカップリングしている。図 III-2-(イ)-(ii)-B-8(c)は FA リガンド付き量子ドットのバンド構造とそれぞれの状態の波動関数の計算結果を示している。バンド構造に E-k 分散があるため、量子ドット間に強いカップリングがあることが確認できる。また、FA リガンド付き量子ドットの中間バンドが確認された。基底状態の波動関数に比べ、中間バンドの波動関数は非局在化され、量子ドット全体に波動関数が広がっており、中間バンドにおける電子が移動しやすくなると考えられる。

図 III-2-(イ)-(ii)-B-9 は FA リガンド(a)と比較検証用の Cl, I の 2 種類のリガンド(b), (c)付き量子ドットの部分状態密度、光吸収係数の計算結果を示している。図 III-2-(イ)-(ii)-B-9(a)から FA リガンドが付いている量子ドットの光吸収係数は吸収波長とともに連続的に変化していることがわかる。この特徴は 3次元バルク材料と非常に類似している。これは FA リガンドによる強カップリング効果で量子ドットの閉じ込め効果が弱まり、電子が動きやすくなることを示唆している。この結果はペロブスカイトをリガンドとして用いるとキャリアの移動度が速くなるという実験結果と一致している。また、図 III-2-(イ)-(ii)-B-9(a)の FA リガンド付き量子ドットの部分状態密度から、伝導帯に FA の p 軌道(黒い線)の関与によりこの現象が起きたのではないかと考えている。一方、図 III-2-(イ)-(ii)-B-9(b), (c)からわかるように従来の Cl と I の 2 種類のリガンド付きの量子ドットの光吸収スペクトルにおいて、特定の波長領域に不連続変化が起き、孤立量子ドットに類似した吸収ピークが現れ、キャリアの低移動度の要因になると考えられる。今後は、移動度や量子ドット内の電子の波動関数などを計算し、さらに FA リガンドによる量子ドットの特性的変化を解析していく。

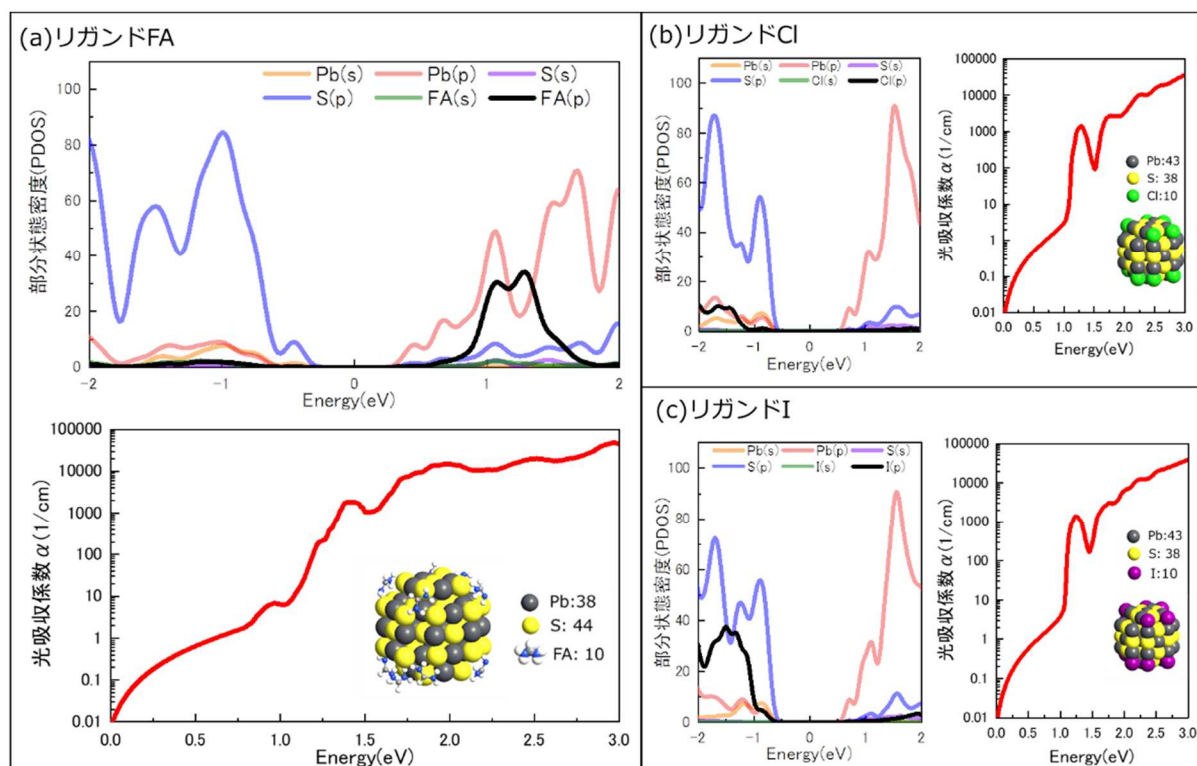


図 III-2-(イ)-(ii)-B-9 (a)リガンド FA、(b)リガンド Cl、(c)リガンド I のそれぞれのリガンド付き量子ドットのカップリングがある場合の部分状態密度(PDOS)と光吸収係数。

#### 4) 実験的高速スクリーニング手法の開発

##### ● 量子ドット太陽電池の高効率セル技術開発

表面パッシベーションによる II-VI コロイド量子ドット太陽電池の高効率化技術の開発を行った。モデルデバイスとしてコロイド PbS 量子ドット太陽電池(セル構造: FT0/ZnO/PbS QD/Au)を用いた。量子ドットの表面欠陥を低減させることは量子ドット太陽電池の高効率化を実現するための鍵である。今回は、量子ドット膜と電子輸送層の界面(図 III-2-(イ)-(ii)-B-10(a))におけるパッシベーションを行い、光電変換性能を著しく向上させることに成功した。具体的には、電子

輸送層である ZnO と PbS 量子ドット光吸収層の界面を 4 種類の条件 (PMMA, PMMA:PCBM=1:3, PMMA:PCBM=1:7, PCBM) で修飾した。この界面パッシベーションで、デバイス低欠陥化を実現したことにより、太陽電池における光励起キャリアの寿命の増加および電子移動度の向上 ( $0.009 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  から  $0.024 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  まで) (図 III-2-(イ)-(ii)-B-10(b)) が実現できた。それによる光電変換特性、特に短絡電流の向上 ( $30 \text{ mA}/\text{cm}^2$  から  $32 \text{ mA}/\text{cm}^2$  まで) とエネルギー変換効率の向上 (12.4% から 13.4% まで) が実証できた。

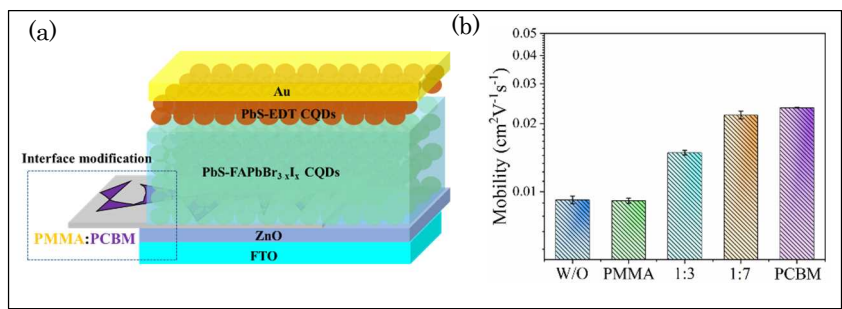


図 III-2-(イ)-(ii)-B-10 (a) PbS 量子ドット光吸収層と電子輸送層との界面でのパッシベーションの模式; (b) 界面パッシベーションに電子移動度の変化。

● 光音響分光 (PA) 法によるアーバックエネルギーと開放電圧の相関評価

花王グループに依頼されたサンプルの PA スペクトルを測定し、アーバックエネルギー ( $E_U$ ) を評価し、モデルデバイスとする PbS 量子ドット太陽電池における  $E_U$  と開放電圧の相関について検討した。今回は、PbS 量子ドット/PbS 量子ドットの界面に対して、2 種類のパッシベーション ( $\text{PbX}_2$  と  $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbX}_3$  ( $\text{FAPbX}_3$ ) ( $X: \text{I}, \text{Br}, \text{Cl}$ )) を行い、量子ドット光吸収層の  $E_U$  を評価した。図 III-2-(イ)-(ii)-B-11(a) に 2 種類のパッシベーションによる量子ドット光吸収層の光吸収スペクトルと  $E_U$  の変化 (挿入図) を示す。従来の  $\text{PbX}_2$  による表面パッシベーションと比べて、 $\text{FAPbX}_3$  のパッシベーションにより  $E_U$  が 37 meV から 24 meV まで顕著に小さくなったことが判明した。さらに、 $\text{FAPbX}_3$  パッシベーションによる量子ドット光吸収層の電子のトラップ準位密度の低下 (図 III-2-(イ)-(ii)-B-11(b) (右図)) の実現により、電子と正孔の移動度の向上 (図 III-2-(イ)-(ii)-B-11(b) (左図)) ができた。それによって光電変換特性の向上、特に図 III-2-(イ)-(ii)-B-11(c) に示すような開放電圧の向上 (平均値: 0.61 V から 0.64 V まで) が実証でき、アーバックエネルギーと量子ドット太陽電池の開放電圧との定量相関が確認できた。

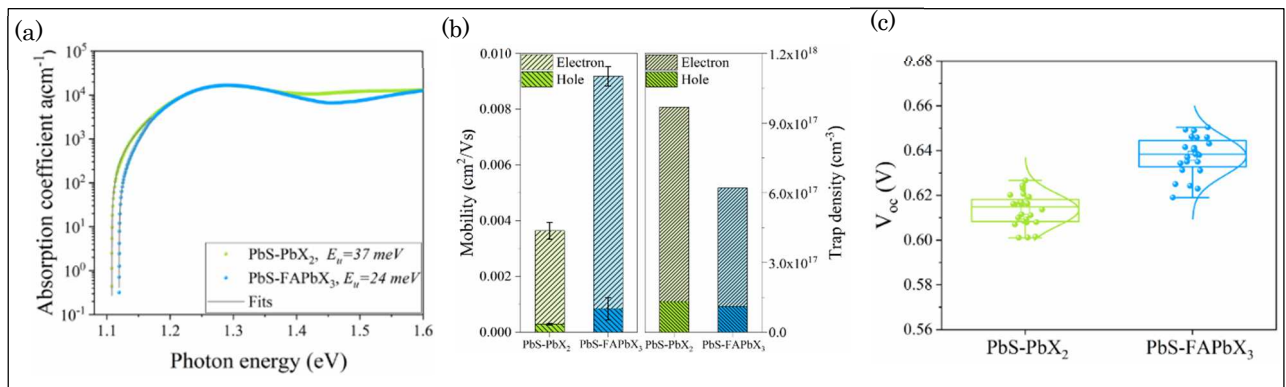


図 III-2-(イ)-(ii)-B-11 (a) 2 種類のパッシベーションによる量子ドット光吸収層の光吸収スペクトルとアーバックエネルギー ( $E_U$ ) の変化; (b) 2 種類のパッシベーションによる量子ドット光吸収層の電子と正孔の移動度およびトラップ準位密度の変化; (c) 2 種類のパッシベーションによる PbS 量子ドット太陽電池の開放電圧の変化。

2. 実用化・事業化見通し

本事業では、ウェットプロセスで中間バンド量子ドット太陽電池を製造することを計画しており、ZEB への導入が期待される可視光透過率 20%以上、変換効率 13%以上のシースルー薄膜太陽電池の実現に必要な要素技術を花王株式会社、東京大学と連携して研究開発を行うもので、花王株式会社の事業化計画に貢献することを目指すものである。電気通信大学のグループでは、現在四つのテーマ①グラフ CNN を用いたコアシェル型半導体量子ドットの逆設計と最適化、②FDTD 近似型ニューラルネットワークと深層強化学習を用いた光閉じ込め構造の逆設計、③電子構造の時間追跡における第一原理分子動力学計算そして④実験的高速スクリーニング・キャリア緩和ダイナミクス解析を同時に進行し、着実に NEDO の中間目標に向かって技術の確立が進んでいる。一方、これから花王(株)のナノ粒子分散

液製造技術などの強みを活用し、商品の実用化と事業化に向けた大面積化製造技術、高耐久製造技術そして低コスト製造技術を並行して実施することが必要である。そこで本プロジェクトで構築した AI 予測最適化による逆設計技術を用いれば、大面積実用デバイスの性能スペックに適した、材料の組成そしてデバイスの作製条件をシミュレーション技術により低コスト高精度で設計し、迅速かつ高効率な商品開発に貢献できる。これらの技術はシースルー型太陽電池の実用化と事業化のフェーズにおいては、さらに大きな役割を果たすことが期待できる。

### 3. 波及効果

本事業の主目的達成のために開発する要素技術の中には、様々な分野の応用に波及効果を有するものが多く存在する。高効率赤外吸収量子ドットを実現させることで、可視光透過性を維持しつつ光電変換効率を高めることが可能となる。本プロジェクトで挙げた建物の開口部での発電効果以外に、同じ様なシースルー効果と熱吸収効果を備えることが必要とされるスマート農業などの産業分野においても利用が期待できる。

さらに本プロジェクトで開発した AI 予測最適化技術は現在、大いに注目されているマテリアルインフォマティクス (MI) とデバイスインフォマティクス (DI) 分野の中核技術と深くかかわっている。本プロジェクトで最も力を入れている AI 予測最適化による逆設計技術は、材料設計とデバイス設計の全自動化を実現するためのゲームチェンジングテクノロジーと位置付けられている。量子ドットの光物性の高精度予測とそれに基づく量子ドットの組成と幾何構造の最適化ができれば、量子ドットに限らず新規半導体材料の開発、高機能高分子材料、生物分子そして薬の開発にも応用可能である (図 III-2-(イ)-(ii)-B-12 参考)。

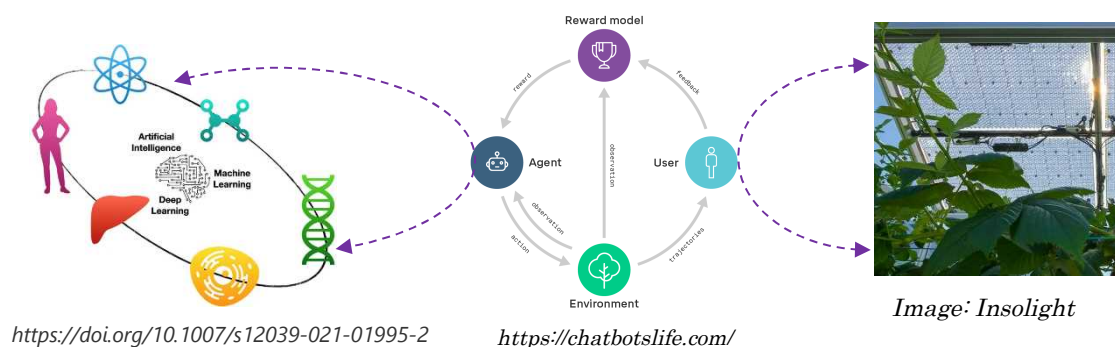


図 III-2-(イ)-(ii)-B-12 AI 予測最適化技術を応用した材料探索・開発及びデバイス設計の模式図

### 4. 今後の展開

開発を目指す AI 予測最適化によるシースルー中間バンド量子ドット太陽電池は、最終目標の達成に向けてこれまで培ってきた技術を融合させ、花王(株)の開発するセル技術と東大の光閉じ込め技術に早期適用することを目標とする。また東大チームで蓄積してきた光閉じ込め技術と高密度量子ドットの合成技術を量子ドット/ペロブスカイト太陽電池セルに適用し、赤外光閉じ込め係数 20 倍への最適な光学構造を確定することによって、赤外光の吸収による発電効率 2%を寄与する光閉じ込め構造を構築する。

さらに並行して開発した光音響分光 (PA) 法、過渡吸収と過渡回折格子法という実験手法を用いて、花王(株)と連携しながら、キャリアダイナミックスの高速評価実験手法と高速スクリーニング実験手法を確立し、最終目標の達成に向けたデバイスの試作周期を大幅に短縮しデバイスの開発プロセスを加速させる。

5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内／国際)	0 (0／0)	0 (0／0)	0 (0／0)	0 (0／0)
論文	1	0	2	3
研究発表・講演 (国内・審査有)	7 (0)	6 (0)	0 (0)	13 (0)
(国際・審査有)	(5)	(0)	(0)	(5)
(国内・審査無)	(2)	(5)	(0)	(7)
(国際・審査無)	(0)	(1)	(0)	(1)
新聞・雑誌等への掲載	0	3	0	3
自機関からのニュース リリース、プレス発表	1	1	0	2
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

## C ウェットプロセスを用いた中間バンド太陽電池の開発(花王株式会社、(再委託)名古屋大学)

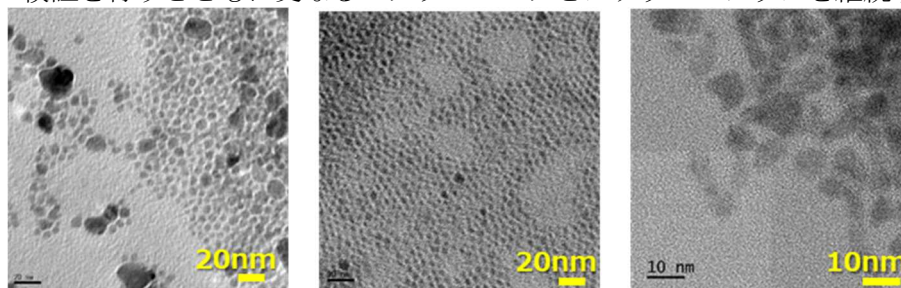
### 1. 成果詳細

#### I. 中間バンド太陽電池に最適な量子ドットおよびバルク半導体の開発

本テーマにおける中間目標は、以下の通りである。1. タイプ II 構築に適した粒子径(5nm 以下)、バンドギャップ(1.5~1.8eV)、価電子帯(-5.6~-5.8eV vs. 真空準位)の量子ドットを開発する。2. キャリアの量子ドットへの捕獲抑制を目指し、上記に準ずる量子ドットにワイドギャップシェルを被覆した量子ドットを開発する。3. タイプ II 構築に適したバンドギャップが 2.0~2.3 eV、価電子帯準位-5.6~-5.8 eV 以上のペロブスカイト組成物を開発する。

#### ① タイプ II 構築に適した量子ドットの開発

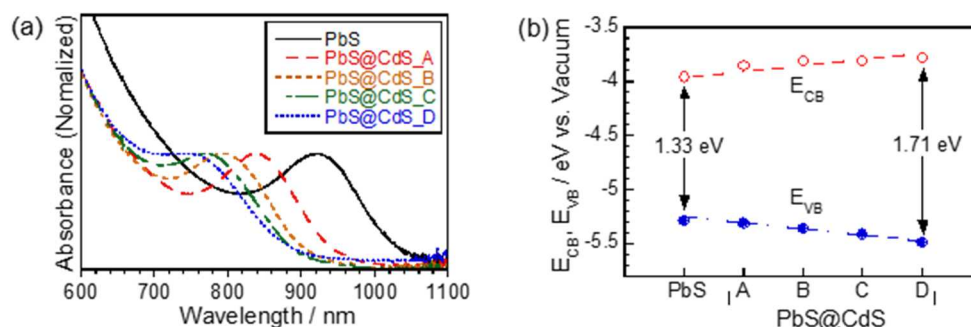
低価電子帯量子ドットの開発を目標に組成スクリーニングを行った結果、3 種の量子ドット(量子ドット 1、量子ドット 2、量子ドット 3 (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-1))を見出した。それぞれの価電子帯準位は、-5.65eV、-5.7eV、-5.75eV とバルクの価電子帯準位(-5.6eV)と比較し同等以下であること、さらに粒子径、バンドギャップも目標を満たすことが確認できた。今後、中間バンド太陽電池の作製を行い、効果の検証を行うとともに更なるスクリーニングとブラッシュアップを継続する。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-1 プロジェクトにて開発した量子ドットの TEM イメージ  
左) 量子ドット 1、中) 量子ドット 2、右) 量子ドット 3

#### ②ワイドギャップシェルを被覆したコアシェル量子ドットの開発

既報 [*J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 4879 (2008).] に従い、PbS 量子ドットにカチオン交換を施すことで、CdS シェルが被覆された PbS@CdS 量子ドットの作製に成功した。この手法は、加熱条件に応じて、CdS シェル厚を制御できる。加熱条件は、(A) 40°C, 10 min、(B) 70°C, 10 min、(C) 70°C, 30 min、(D) 70°C, 45 min とした。加熱温度の上昇や時間の増加により、PbS コアのサイズが減少し、励起子吸収が短波長シフトした (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-2a)。このとき、PbS の励起子吸収ピークの波長から PbS コア径を算出し [*ACS Nano*, **3**, 3024 (2009).]、TEM により求めた PbS@CdS 量子ドットのサイズとの差から CdS シェル厚を求めたところ、0.2 ~ 0.4 nm 程度であった。また、大気中光電子収量分光により価電子帯上端のエネルギー ( $E_{VB}$ ) を求め、光学的なバンドギャップから、伝導帯下端 ( $E_{CB}$ ) を算出し、電子エネルギー準位を決定した (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-2b)。CdS シェル厚は太陽電池特性に大きく影響すると考えられるため、今後はこれらの合成条件最適化と実際のデバイスへの適用を検討する予定である。



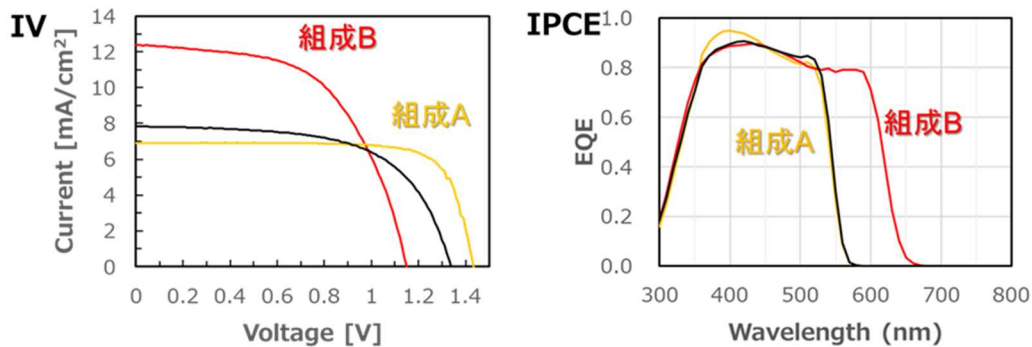
図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-2 PbS 及び PbS@CdS 量子ドットの (a) 吸収スペクトルと (b) 電子エネルギー構造。PbS@CdS の加熱条件: (A) 40°C, 10 min、(B) 70°C, 10 min、(C) 70°C, 30 min、(D) 70°C, 45 min



### ③ 中間バンド太陽電池に適したバルク素材の開発及び評価

中間バンド太陽電池は、バルク半導体による短波長側の発電と量子ドットが関与する長波長側の発電から成り立っており、それぞれの領域での発電効率の向上が必要である。バルク側の目標変換効率は7~9%であり、同時に視感透過率20%以上を維持する必要がある。本年度はペロブスカイト組成や周辺材料の最適化について検討を行った。代表的な成果として複数のカチオンを併用した組成 A、透過率の許容範囲内での長波長化を行った組成 B の電池特性を図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-3、表Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-1 に示す。

組成 A、組成 B の視感透過率はそれぞれ 64%、27%であり、目標を満たしていた。また変換効率はそれぞれ 7.68%、8.07%と大きく改善することができ、組成 A では開放電圧の向上、組成 B では吸収波長範囲の拡大が確認された。今後、量子ドットとの複合化や耐久性について検証及び改善を進めていく。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-3 開発セルの電池特性 (左) IV 特性、(右) IPCE

表Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-1 開発セルの諸物性

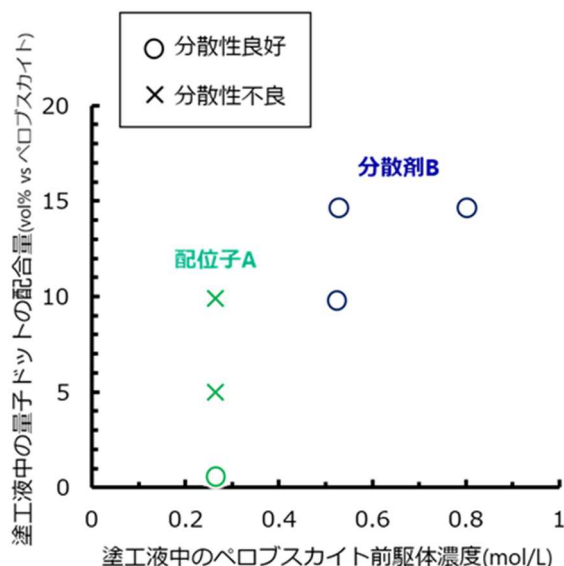
	Jsc mA/cm <sup>2</sup>	Voc (V)	FF	PCE (%)
従来	7.84	1.34	0.610	6.40
組成 A	6.91	1.43	0.775	<b>7.68</b>
組成 B	12.40	1.15	0.566	<b>8.07</b>

## II. 発電コスト 16 円/kWh に向けたウェットプロセスによる高効率中間バンド太陽電池の作製技術

本テーマにおける中間目標は、以下の通りである。1. 可視光透過率 20%以上、変換効率 10%以上のウェットプロセスで作製した中間バンド太陽電池を開発する。2. 量子ドットを高濃度に複合化した光電変換層の形成に必要な量子ドットを 20wt%以上含んだ塗工液を作製し、量子ドットを 25vol%含有する光電変換層の形成技術を開発する。3. 耐久性を加速評価可能な技術を確認し、加速試験において 10 年相当の耐久性 (例えば屋内連続照射試験において出力低下 10%以下) を有するセルを開発する。

### ① 量子ドットを高濃度配合した安定な塗工液の開発

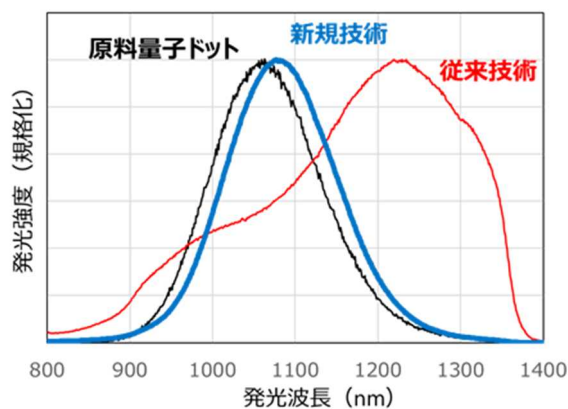
ペロブスカイト前駆体が溶解した光電変換層形成用塗工液中での中間バンド形成用量子ドットの分散性を向上させる技術として、①分散安定化配位子及び②分散剤の開発を行った。配位子は量子ドットへの配位性、及び溶媒とペロブスカイト結晶への親和性の観点より探索を実施し、配位子 A を見出した。しかし配位子 A を用いた場合においても、ペロブスカイト前駆体の濃度や溶媒組成によっては分散性が悪化し、凝集沈殿が発生することが分かった(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-4)。そこで塗工液の調製スキームの見直しを行い、配位子としては従来のハロゲン化物イオンを用い、塗工液中に分散剤 B を添加する新たな分散化技術を開発した。本技術によりペロブスカイト前駆体濃度が高い塗工液中でも量子ドットの安定化を達成することが可能となった。今後、電池の作製・評価、および光電変換層中での量子ドットの分散状態の確認を行う。



図III-2-(イ)-(ii)-C-4 2週間相当の遠心分離処理後の分散状態  
○分散性良好(沈殿なし) ×分散性不良(沈殿生成)

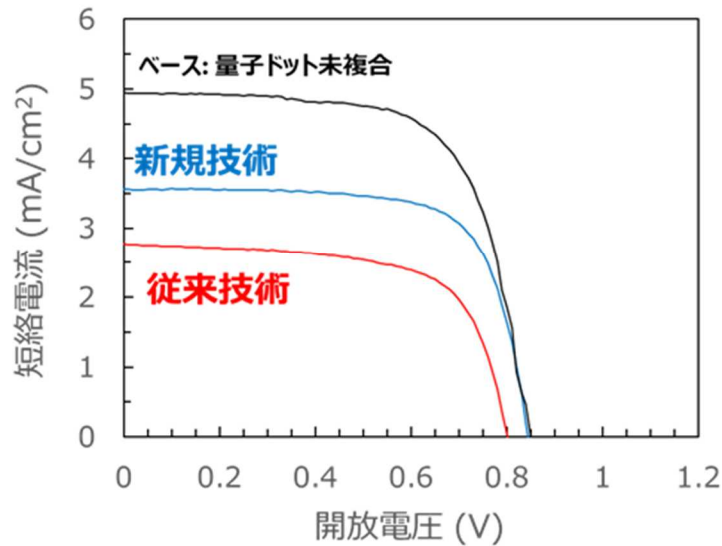
②ウェットプロセスによる高効率な中間バンド太陽電池の作製方法の開発  
(量子ドットを高濃度に複合化した光電変換層の開発)

本コンソーシアムにおける目標変換効率は、中間 10%/最終 15%であるのに対し、20 年度は量子ドットの複合化割合を増加させることで変換効率をわずかに向上できることを確認できたが、その後の分析により光電変換膜中での量子ドットの分散性が悪いことが分かった(図III-2-(イ)-(ii)-C-5 原料量子ドットの発光ピークに対し、光電変換層中の量子ドットの発光ピークは長波長化していることから、量子ドットの凝集が発生していると推測)。



図III-2-(イ)-(ii)-C-5 製膜プロセスの違いによる量子ドットの発光スペクトルの変化  
黒：原料量子ドット、赤：従来技術、青：新規技術

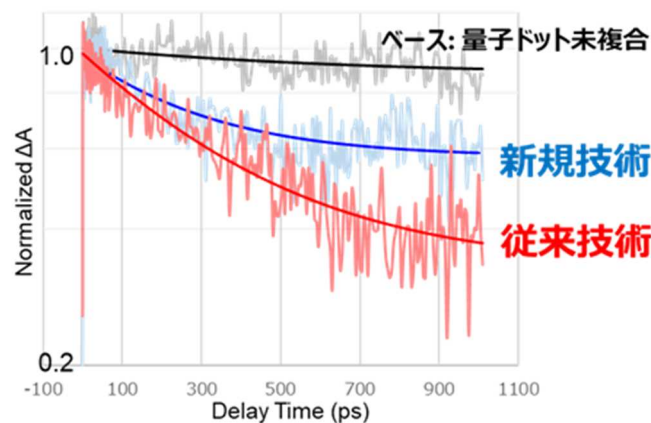
そこで量子ドットの凝集因子の解析を行ったところ、光電変換層製膜時の加熱工程で凝集が生じていることが明らかとなったため、凝集を回避する新規プロセスの開発を行った。新規プロセスで作製した光電変換層中の量子ドットの発光ピークは原料量子ドットの発光ピークと同等であることが確認され、量子ドットの分散性向上を達成した。次に新規プロセスを用いセルを作製した。その結果、旧プロセスに対し1.5倍の向上が確認された(図III-2-(イ)-(ii)-C-6)。今後中間バンドの形成状況や量子ドットの複合化状態の確認を行う。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-6 製膜プロセスの違いによる発電性の変化  
 黒：原料量子ドット、赤：従来技術、青：新規技術

③新規プロセスにより作成した中間バンド太陽電池のキャリアダイナミクスの解析(電気通信大学協業)

新規プロセスにより量子ドットを複合化した中間バンド太陽電池セルは旧プロセスに対し変換効率の向上が確認された。そこで電通大の協力のもとセル内のキャリアダイナミクスの解析を行った。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-7 にペロブスカイト内で励起された電子の寿命を示す。励起電子の寿命は、ベースセル>新プロセス>旧プロセスの順に長く、新規プロセスで変換効率が向上した原因はキャリアの長寿命化であることが明らかとなった。一方、ベースセルと比較した場合、量子ドットを複合化したセルで短寿命化が見られ、これは量子ドットによるキャリア再結合の促進またはペロブスカイトと量子ドットの界面欠陥が原因と推測されることから双方の改善を進めていくことで変換効率の改善を進めていく。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-C-7 ペロブスカイトに励起された電子の減衰曲線

## 2. 事業化見通し

まずは本プロジェクトでの検討によりシースルー太陽電池の基本性能となる透明性と発電性を両立できる基礎技術の完成を急ぐ。特に発電性については量子ドットを複合化した際のネガティブ要因の特定と解消に取り組み、さらに今後は東大グループおよび電通大グループとの技術融合により、変換効率の大幅向上を狙う。一方、中間目標レベルの発電性を担保できる技術の達成が見通せた段階で、コンソーシアム外との協業も開始し、一層実用化に近い製造検討（大面積化、高耐久化、低コスト化）を並行実施することで実装を早期に達成できる予定である。

## 3. 波及効果

ビル窓用シースルー太陽電池の実証により、壁面を含めたビル未活用外壁部での発電の価値が認められ、ZEB の普及拡大に大きく貢献することが期待できる。また学術的にはウェットプロセスによる中間バンド太陽電池の技術は、現在までドライプロセス中心で進められてきた中間バンド太陽電池研究の研究領域の拡張に寄与すると予想されており、コロイド量子ドットやペロブスカイト太陽電池との複合分野として次世代高性能太陽電池開発をけん引できると考えている。

## 4. 今後の展開

最終目標である変換効率 15%の達成に向け、東大グループの光マネジメント技術との融合、さらには電通大グループの AI 駆動の計算技術によるセルの逆設計法を確立し、迅速に開発を進めていく。同時に大面積化、耐久性向上、キーマテリアルである量子ドットの量産技術の開発を遂行し、PJ 終了時には実用化の基礎技術の完成を目指す。また変換効率の向上がある程度見通せた段階で他企業との協業を開始し生産に向けた技術開発を並行することで事業化を加速する。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	0 (0/0)	1 (1/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	3 (0)	1 (0)	4 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(3)	(0)	(3)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(1)	(1)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

## D 多機能・高品質薄膜の利用による壁面太陽電池モジュールの長寿命化

(北陸先端科学技術大学院大学、(再委託) 岐阜大学)

### 1. 成果詳細

本事業において、北陸先端科学技術大学院大学は、タンデムセル上に形成する  $\text{SiN}_x$  の屈折率安定性の確立とトップセル材料の劣化抑止を、岐阜大学(再委託先)は、カバーガラスへの防汚性能・反射低減機能を有する  $\text{SiO}_x$  膜の製膜条件の確立と放熱機能の付加を検討する。以下に、これまでに得られた結果の概要を示す。

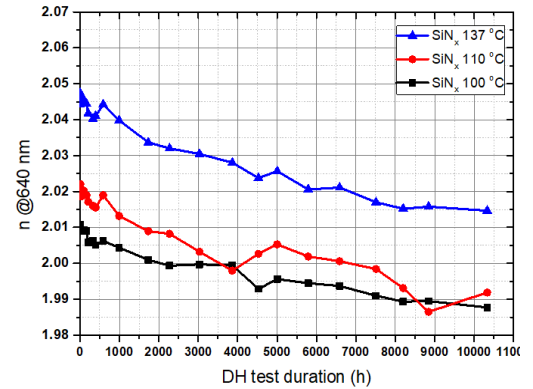


図 III-2-(イ)-(ii)-C-1  $\text{SiN}_x$  膜の DH 試験時間依存性

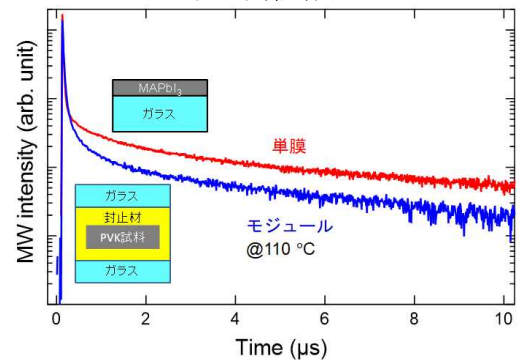


図 III-2-(イ)-(ii)-C-2 PVK 膜の  $\mu$ -PCD 測定結果

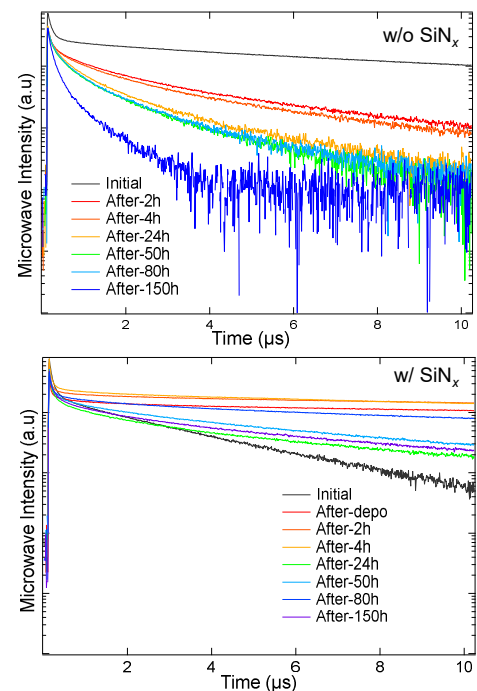


図 III-2-(イ)-(ii)-C-3  $\text{SiN}_x$  堆積無しおよび有りの PVK 膜の  $\mu$ -PCD 測定結果

## 【北陸先端科学技術大学院大学】

果

長期にわたる色調安定性が求められる壁面設置モジュールで、色調を決定するセル表面の反射防止膜の屈折率安定性は重要である。触媒化学気相堆積(Cat-CVD)法は、低温でも高密度の  $\text{SiN}_x$  膜を形成でき、高い屈折率安定性が期待される。図III-2-(イ)-(ii)-C-1に、100-137 °Cで堆積したラミネートを行っていない  $\text{SiN}_x$  膜の、85 °C、相対湿度 85%の湿熱(DH)試験による屈折率変化を示す。いずれの試料も、高い屈折率安定性を示しており、特に、最も低い温度で堆積した  $\text{SiN}_x$  膜において、7000 h以上のDH試験で、目標値である±1%以内の屈折率変化を維持している。今後、ラミネート後の試料との加速係数を明確化する。

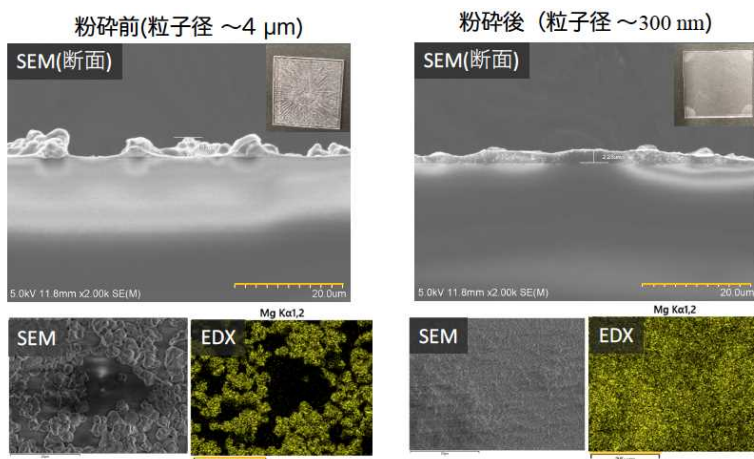
$\text{SiN}_x$  膜には、トップセルとして想定するペロブスカイト(PVK)層を水分から保護するガスバリア膜としての役割も持たせる。そのため、PVK膜の劣化の様子を、モジュール化後も簡便に評価する手法が求められる。結晶Siの少数キャリア寿命評価に広く用いられているマイクロ波光導電減衰( $\mu$ -PCD)を、PVK膜の劣化評価に適用することを試みた。図III-2-(イ)-(ii)-C-2に、ラミネート前後のPVK膜の、 $\mu$ -PCDでの測定結果である反射マイクロ波強度の時間変化を示す。PVK単膜において、減衰曲線が観測される。使用した $\mu$ -PCD装置は、余剰キャリア生成用のパルスレーザー照射を行った箇所と行っていない箇所の信号の差分を取る差動 $\mu$ -PCD機構を備えており、これを用いることで測定が可能となった。さらに、モジュール化を行った試料でも減衰曲線が得られており、 $\mu$ -PCDにより、ラミネート後のPVK膜を簡便に評価できることを明らかにした。ラミネート後の試料でわずかにマイクロ波反射強度が低減しているのは、ラミネート時の熱によるPVK膜の劣化が要因として考えられる。

図III-2-(イ)-(ii)-C-3に、 $\text{SiN}_x$ 堆積無しおよび有りのPVK膜の $\mu$ -PCD測定結果を示す。暗所、大気曝露環境での劣化挙動を調査した結果である。 $\text{SiN}_x$ 膜が無い場合は減衰曲線が急激に変化しており、大気曝露によるPVK膜の劣化が示唆される。一方、 $\text{SiN}_x$ 膜を堆積した試料では、減衰曲線に変化はあるものの、 $\text{SiN}_x$ 堆積を行っていない試料に対して緩やかになっている。 $\text{SiN}_x$ 膜がガスバリア膜として機能し、大気中の酸素や水蒸気の侵入を抑制した結果であると考えられる。

## 【岐阜大学】

岐阜大学における研究課題は、防汚性能・反射低減機能を有する  $\text{SiO}_x$  膜の製膜条件の確立および放熱機能の付加である。壁面設置モジュールに必要な寿命延長のために、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  粒子を混入した  $\text{SiO}_x$  膜を必要箇所に形成することにより防汚・放熱機能を得ることを目的とする。粒子混入  $\text{SiO}_x$  膜は、機能の付加可能な粒子状の材料を液体ガラス中に混入し、塗布・形成プロセスを経て作製する。放熱機能付加を果たす  $\text{MgO}$  粒子混入  $\text{SiO}_x$  (以下、 $\text{MgO}/\text{SiO}_x$ ) 膜の高品質化、及びモジュールへの適用を実施した。

スピコート法を用いて作製した  $\text{MgO}/\text{SiO}_x$  膜は、拡散透過率において高い光透過率を示していたが、5  $\mu\text{m}$  程度の平均粒子径であったため散乱が多いという課題があった。そこでビーズミルによる機械的破碎により、粒子径の 300 nm 程度までの減少を実現した。破碎処理後の粒子を用いた  $\text{MgO}/\text{SiO}_x$  膜をスピコート法にてガラス基板上に作製し、拡散透過率を計測した結果、波長 600 nm における粉碎後の拡散透過率は、粉碎前の場合と比較して 1%程度向上を果たした。また図III-2-(イ)-(ii)-C-4には、破碎処理前後の  $\text{MgO}$  を用いた  $\text{MgO}/\text{SiO}_x$  膜における断面 SEM 像および同膜の表面 EDX 像を示す。断面 SEM 像から、各膜とも膜厚は 3  $\mu\text{m}$  程度であるが、破碎した  $\text{MgO}$  粒子を用いた場合には、破碎前と比較して凹凸が低減し、表面 EDX 像でも  $\text{MgO}$  が均一に分布している。粒子による膜状の構造は、大面積モジュールにおける縦、および横方向への放熱機能付与には重要な要素である。数  $\mu\text{m}$  程度の粒子を用いた場合には塗布法による数十  $\mu\text{m}$  程度の膜厚を有するのに対し、粒子の微小化は必要膜厚



図III-2-(イ)-(ii)-C-4 破碎前後  $\text{MgO}$  粒子を用いた  $\text{MgO}/\text{SiO}_x$  膜における SEM(断面(上)、表面(下))像と表面 EDX 像

の減少が期待できる。

太陽光照射というモジュール内温度の上昇が発生する環境下では、十分な放熱機能付与を確保する目的で、セルより底部の部分には塗布法による膜厚増加の研究を導入した。塗布法による製膜では、スピンコート法と同様、塗布回数により膜厚が増加し、MgO: 300 mg、液体ガラス 2000  $\mu$ l の溶液により 1 回あたりの MgO/SiO<sub>x</sub> の膜厚は、約 10  $\mu$ m 程度となる。塗布法により作製した MgO/SiO<sub>x</sub> 膜に対し、端部加熱時のサーモグラフィによる表面温度計測により、従来の縦方向の放熱性に加え、横方向への熱伝導性を有することを示した。また熱伝導性フィラーの一種である Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いた Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>x</sub> も、膜厚数十  $\mu$ m の試作にて熱伝導機構を有することを確認し、熱伝導性フィラーの別なく SiO<sub>x</sub> 膜への混入で放熱機能が付与できることを示した。

上記をもとに MgO (粒子径 5  $\mu$ m)/SiO<sub>x</sub> 膜をモジュール構造のカバーガラス、封止材、バックシートの各所に適用し、ラミネート時の温度を変化させて作製した各モジュールに対し、発電性能への影響を開放電圧 ( $V_{oc}$ ) 低下量にて評価した。適用した MgO/SiO<sub>x</sub> の膜厚は 20 $\mu$ m 程度である。結果を図 III-2-(イ)-(ii)-C-5 に示す。この図より、底部に MgO/SiO<sub>x</sub> 膜を用いた場合では、同膜を用いない場合と比べ連続光入射による  $V_{oc}$  の低下が抑止されている傾向が見える。この傾向は低減低温ラミネートを実施することで  $V_{oc}$  の低下抑止効果は大きくなる。光照射開始 3 h 後における  $V_{oc}$  の差において、90°C で作製した場合には結晶 Si 太陽電池の温度特性から推定される両モジュール間の温度差は 3.5° C 程度となり、MgO/SiO<sub>x</sub> 膜によるモジュール構造での放熱機能付与を果たした。

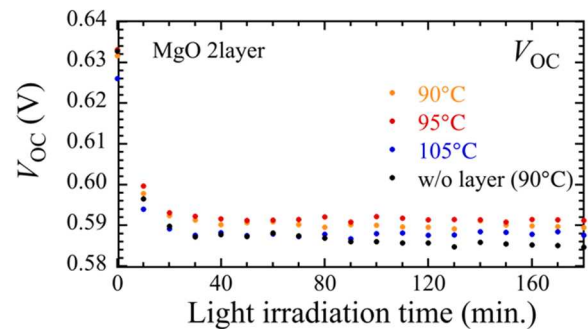


図 III-2-(イ)-(ii)-C-5 MgO/SiO<sub>x</sub> をモジュール底部に用い、低温にてラミネートした c-Si モジュールに対する連続光入射時間に対する  $V_{oc}$  変化

## 2. 実用化・事業化見通し

北陸先端科学技術大学院大学で検討中の、 $\text{SiN}_x$ 膜の利用については、すでに量産技術として確立している Cat-CVD を製膜手法として用いていることから、優れた意匠性維持、およびガスバリア性能付与が本研究開発により実現されれば、ペロブスカイト/Si タンデム壁面モジュールに標準的に使用される構造としての確立が期待される。

岐阜大学で検討している、 $\text{MgO}$  や  $\text{TiO}_2$  粒子を用いた  $\text{SiO}_x$  膜は市販品による組み合わせで構成されている。また、既に作製方法が確立している太陽電池モジュールを想定し、各部材の適用を行っており、非真空・簡易プロセスで作製していることから、十分に実用化が可能を考える。

## 3. 波及効果

北陸先端科学技術大学院大学で開発中の  $\text{SiN}_x$  膜は、その高い屈折率安定性から、汎用の結晶 Si 太陽電池セルを用いた壁面モジュールへの利用も期待される。また、ペロブスカイト/Si タンデムセルのみならず、ペロブスカイト単接合セルのガスバリア層としての応用も可能である。

防汚・放熱作用は温度昇温の抑止技術は、広く普及が進められているモジュールに対して使用可能であり、壁面モジュールへの利用が期待される。また同技術はモ、 $\text{SiO}_x$  膜の付着性能次第では多くのモジュール構造に適用可能と考えられる。

## 4. 今後の展開

北陸先端科学技術大学院大学の  $\text{SiN}_x$  膜、岐阜大学の  $\text{SiO}_x$  膜とも、ペロブスカイト/Si タンデム壁面モジュールを開発する国内モジュールメーカーと、プロジェクト実施期間中から連携を取りつつ、本モジュールの量産品に実装されるべく開発を継続する。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	1	1
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	5 (5)	0 (0)	5 (5)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)



## E 壁面設置タンデム太陽電池モジュールの構造最適化と屋外性能評価技術の開発 (新潟大学、(再委託)明治大学)

### 1. 成果詳細

#### ① タンデム太陽電池の生涯発電量最大化設計

2020年度から前倒して開始したタンデム太陽電池の試作を繰り返し、最適化に取り組んだ。トップセルに京都大学で作製したペロブスカイト太陽電池、ボトムセルに明治大学が豊田工業大学の試作ラインで作製した結晶シリコン太陽電池を用いて、2端子タンデム太陽電池を試作した。ボトムセルの結晶シリコン太陽電池には、通常は入射光の反射を抑止し、光を有効活用するために表面テクスチャ構造が形成されるが、凹凸形状がペロブスカイト層の形成に悪影響を与えることが懸念されるため、特別仕様のフラットセルを試作に用いた。トップセルの光吸収層の層厚やバンドギャップについては、青山学院大学で実施したシミュレーションにより最適化を図り、ペロブスカイト層厚 525 nm、バンドギャップ 1.67 eV が最適値として得られた。この知見をもとに、組成を  $\text{Cs}_{0.05}\text{FA}_{0.85}\text{MA}_{0.10}\text{PbI}_2\text{Br}$  としたバンドギャップ 1.65 eV のペロブスカイト層を用いた。ペロブスカイト層はスピノコートで作製した。ボトムセルにはリアエミッタ構造のシリコンヘテロ接合太陽電池を用いたため、トップセルのペロブスカイト太陽電池は逆構造とした。正孔輸送層にはスピノコートで作製した MeO-2PACz、電子輸送層には熱蒸着で作製した  $\text{C}_{60}$  と原子層堆積で作製した  $\text{SnO}_2$  を用いた。また、透明導電膜に関しては、トップセルの表面電極は InZnO 膜、トップセルとボトムセルの中間層ならびにボトムセルの裏面電極（裏面 p 型アモルファスシリコン層と金属電極の界面に適用）は InWO 膜とした。試作したタンデム太陽電池の断面構造の模式図を図 III-2-(イ)-(ii)-E-1 に示す。この太陽電池はエージング特性を示し、作製後に時間を経ると特性が向上した。エージング後ではあるが、面積  $0.1 \text{ cm}^2$  のタンデム太陽電池において、図 III-2-(イ)-(ii)-E-2 に示すように、短絡電流密度  $16.4 \text{ mA/cm}^2$ 、開放電圧 1.59 V、曲線因子 0.76、変換効率 19.9% を得ている。

この構造においてエージング後に 20% 近い変換効率は得られたものの、エージング特性を示すこと自体、安定性の観点から望ましくない。そこで、正孔輸送層に用いられる自己組織化単分子膜を、これまでに用いてきた MeO-2PACz から、京都大学で開発した 3PATAT-C3 に変更した。3PATAT-C3 もスピノコートで作製した。この場合のタンデム太陽電池の特性は、一例として、短絡電流密度  $15.6 \text{ mA/cm}^2$ 、開放電圧 1.66 V、曲線因子 0.72、変換効率 18.6% であるが、高い再現性で効率 18% を超えた。現時点では正孔輸送層に MeO-2PACz を用いた場合よりも変換候補は若干低いものの、エージング特性は示さず、安定性に優れていると考えられる。また、トップセルの開放電圧が 1.12 V、ボトムセルの開放電圧が 0.70 V であることから、タンデム太陽電池の電圧は、最適化により 1.8 V を超えることが期待される。なお、4 端子についてもシミュレーションは概ね終了しており、4 端子ならでは技術的課題の検討を進めることにより、2 端子と 4 端子のいずれが優位か総合的に判断可能と考えており、中間目標は達成見込みである。

Tandem cell



図 III-2-(イ)-(ii)-E-1 ペロブスカイト／結晶シリコンタンデム太陽電池の断面構造の模式図

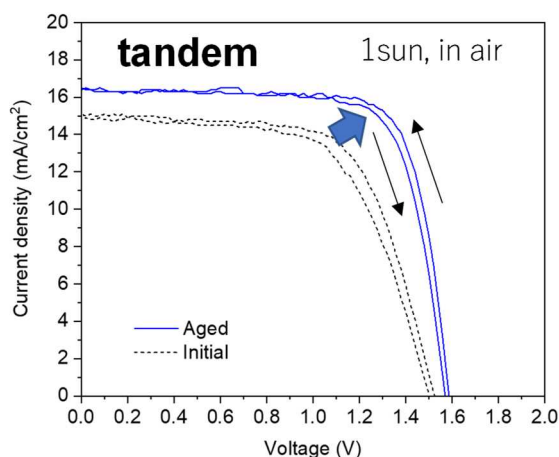


図 III-2-(イ)-(ii)-E-2 エージング後に変換効率 19.9% を示したペロブスカイト／結晶シリコンタンデム太陽電池の電流密度－電圧特性

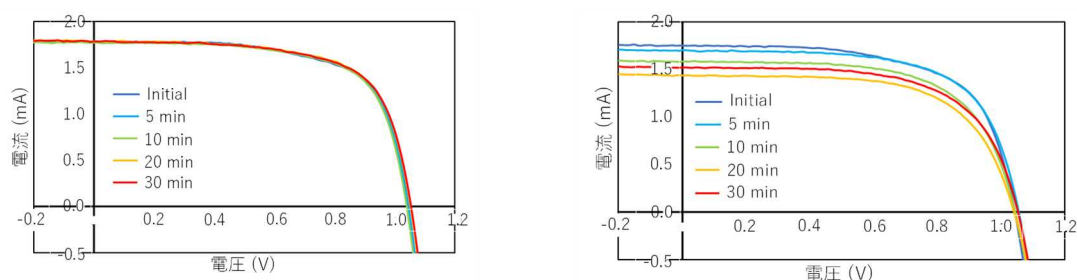
本研究では、ペロブスカイト層の成長を妨げないために、ボトムセル表面はフラット化している。フラット化による電流値の低下を補うため、ボトムセル上に金微粒子層を形成して局在表面プラズモン

共鳴を励起し、その散乱・電界増強効果による光キャリアの増大についても検討した。シリコン太陽電池上に真空蒸着法により金微粒子を 3 nm、6 nm、9 nm の膜厚（水晶振動子膜厚計での測定値）で蒸着し、続いて楕型銀電極を 150 nm 蒸着した。金微粒子を 3 nm 蒸着した場合において、550～900 nm の波長域の外部量子効率が増加していることが確認され、金微粒子による散乱効果により光閉じ込め効果が向上したと考えられる。一方、金膜厚を 6 nm 以上にすると金微粒子層による光吸収量が増加することも確認された。

## ② 壁面設置モジュールの封止材最適化の検討

本研究で試作するタンデム太陽電池では、トップセルにペロブスカイト太陽電池を用いているため、モジュール化の際のラミネート工程でのペロブスカイト太陽電池への熱損傷が懸念される。このため、ラミネート工程に必要とされる温度でのペロブスカイト太陽電池の熱耐性を検証した。実験に使用したペロブスカイト太陽電池は金沢大学で作製したものであり、電子輸送層に  $\text{TiO}_2$ 、正孔輸送層に Spiro-OMeTAD を用いた順構造である。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E-3 に示すように、温度を 100℃とした場合にはラミネート時間を長くするにつれて、1 sun 光下での電流－電圧特性が変化した。温度を 80℃とした場合には、電流－電圧特性の変化は観測されなかった。また、図には示していないが、暗時の電流－電圧特性はいずれの場合も改善していることから、ラミネート時のアニール効果も期待できる。この結果から、低温ラミネートが可能なシリコンを封止材の候補としてラミネート条件の最適化を図っている。また、エチレン－酢酸ビニル共重合樹脂 (EVA) ならびにポリオレフィン (POE) で封止した場合であるが、ブチルゴム系のエッジシール材を用いない場合には温度 85℃、相対湿度 85% の高温高湿試験 24 h でペロブスカイト層の脱色が観測されたが、エッジシール材を用いた場合には脱色は生じなかった。これらのことから、ペロブスカイト／シリコンタンデム太陽電池では、両面ガラス構造とともに、端面シールの重要性も示唆された。

なお、これまでに得られた実験結果をもとに、2022 年度以降は 80℃以下での低温封止が可能なシリコン封止材の適用に集中的に取り組んでおり、これまでに使用してきた EVA、POE 等との比較をもとに、最適な封止材を選択するとの中間目標は達成見込みである。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E-3 80℃（左）ならびに 100℃（右）に保持した場合のペロブスカイト太陽電池の電流－電圧特性の変化

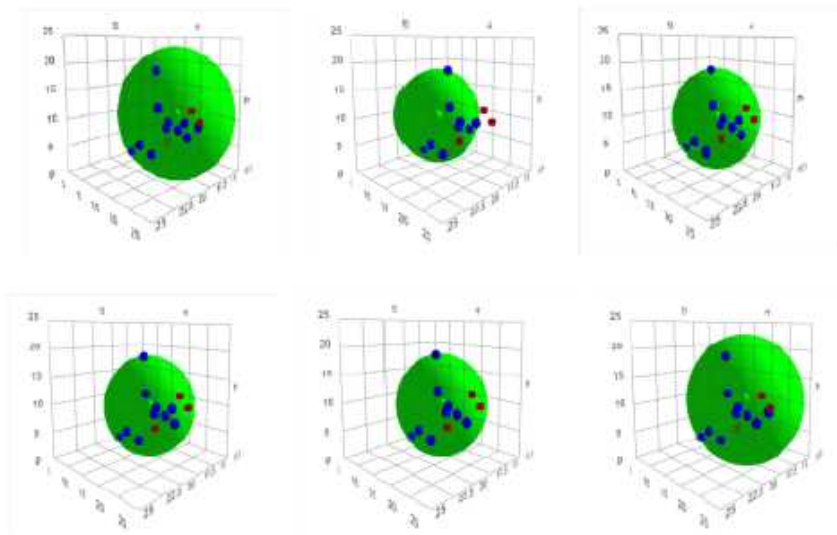
## ③ 壁面設置モジュールの防汚検討

壁面設置モジュールの生涯発電量最大化のためには、カバーガラス表面の汚れ（ソイリング）の対策技術も重要になる。その対策として各種防汚コートが施される場合があるが、防汚コート自体の信頼性の検証も重要である。本研究ではモジュールカバーガラス表面に親水性または疎水性の 2 種類の防汚コートを施し、コートの有効性を加速試験により検証した。試験前後のコート膜に各種有機溶剤を滴下し、接触角を計測するとともに、接触角から得られた Hansen 溶解度パラメータ（物質の凝集エネルギー密度の平方根で与えられる溶解度パラメータを分子間に働く 3 つの相互作用エネルギーに分割した値、以下 HSP 値）の防汚コート膜評価に対する有効性も検証した。コートを施したガラスサンプルに対して、温度 85℃、相対湿度 85% の高温高湿試験を、親水性コートには 100～500 h、疎水性コートには 100～300 h 実施した。高温高湿試験後に、それぞれのサンプルへ最大 15 種類の有機溶剤を滴下し、滴下から 1 s 後の接触角を測定した。測定した接触角の大きさを 3 つに区分し、接触角の小さいよく濡れる有機溶剤におけるデータ点を内包する Hansen 球を描き、HSP 値を決定した。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E-4 には、親水性コートサンプルに対する高温高湿試験による Hansen 球と HSP 値の変化を示す。Hansen 球の中心値が変化していることから、高温高湿試験によりコート膜の物性値が変化していることが示唆される。また、高温高湿試験に対する水の接触角と HSP 値の一つである London 分散力項  $\delta_D$  の変化を

図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E-5に示す。両者の振る舞いが似ていることから、HSP 値によってコート膜の特性変化を評価できる可能性が示唆された。

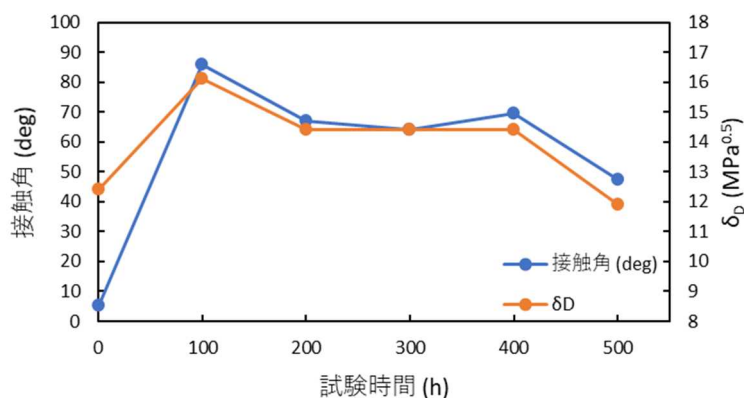
また、2020 年度に鹿児島県工業技術センター内に設置した屋外曝露試験施設において、太陽電池モジュールのカバーガラス表面に親水性防汚コートを実施した。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E-6 には、2021 年 5～9 月において収集した発電量と雨量のデータを示す。現時点では、防汚コートの有無による顕著な差異を観測するには至っておらず、データ取得を継続していく。

なお、防汚コート膜の特性変化を HSP 値で評価可能との新たな知見の獲得や、屋内加速試験、屋外曝露試験を予定どおり進めていることより、最適な防汚コート技術を選択するとの間目標は達成見込みである。

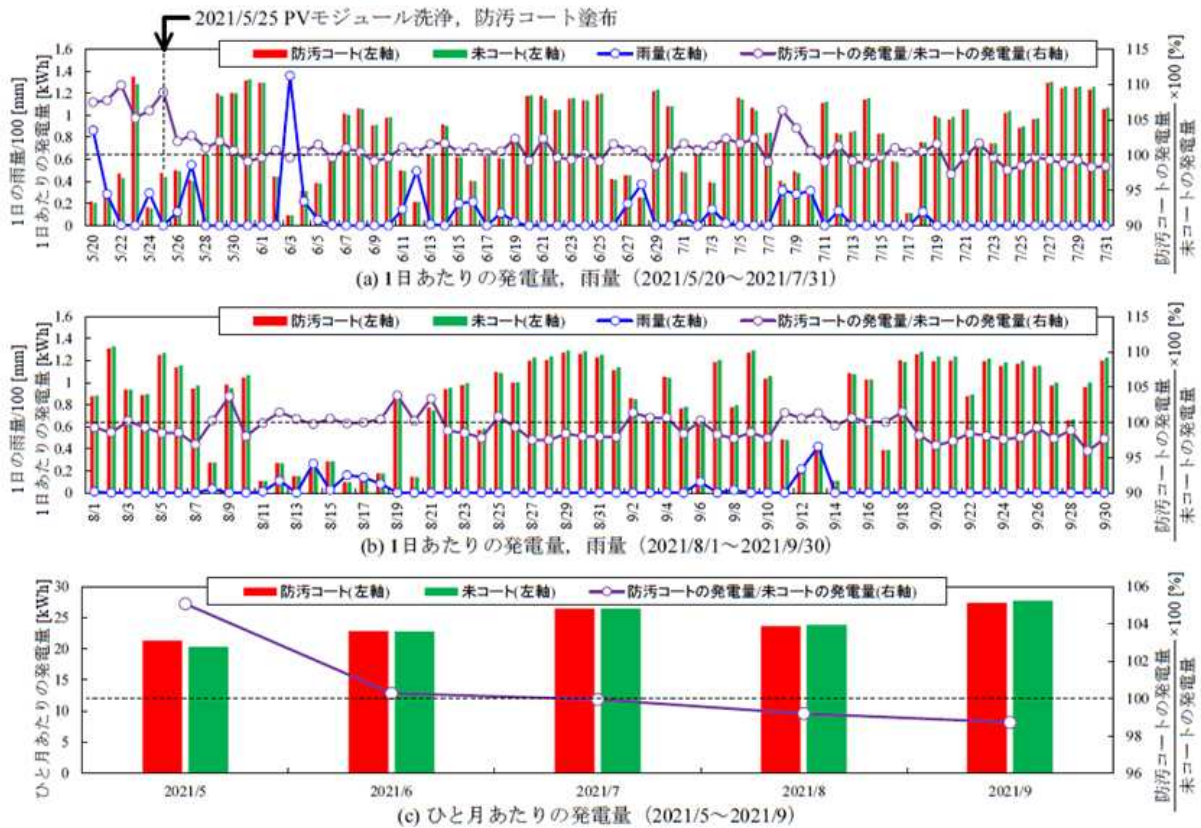


"inside"2	0 h	100 h	200 h	300 h	400 h	500 h
$\delta D$	12.4	16.1	14.4	14.4	14.4	11.9
$\delta P$	8.5	8.6	7.4	7.5	7.5	8.4
$\delta H$	7.2	4.5	6.1	6.2	6.2	7

図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E-4 親水性防汚コート膜における Hansen 球と HSP 値の高温高湿試験による変化  
青と赤のデータ点は、それぞれ Hansen 球の内側および外側に位置することを示す  
試験時間は左上から右下の順に 0 h、100 h、200 h、300 h、400 h、500 h である



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E-5 親水性防汚コート膜における水の接触角ならびに London 分散力項  $\delta_D$  の高温高湿試験時間依存性



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-E-6 鹿児島県に設置したモジュールにおける防汚コートの有無による発電量データの比較と雨量のデータ (2021年5~9月)

## 2. 実用化・事業化見通し

タンデム太陽電池の高効率化の指針（トップセルとボトムセルの各層の組成や層厚、タンデム太陽電池に使用される各種透明導電膜に要求される特性等）、壁面設置に適したモジュール材料の指針（各種封止材の封止特性、動的弾性率等の物性値、端面封止特性等）、防汚コートの指針（防汚コート性能の新規評価法、防汚コートの信頼性等）を提供することで、これらの技術の実用化可能性を示すことができた。連携機関や協力機関をはじめとする民間企業が壁面設置用太陽電池を事業化するに際して、本研究を通じて提供する上記指針は、民間企業が各種技術や材料を選択する際の判断基準となり、事業化の加速に貢献する。

## 3. 波及効果

ペロブスカイト太陽電池と結晶シリコン太陽電池のタンデム化技術を、結晶シリコン太陽電池の理論限界効率を打破する要素技術と捉えて研究を進めている。研究代表者がこれまでに明確化してきた結晶シリコン太陽電池の劣化メカニズムに加え、各種信頼性向上技術や屋外評価技術をペロブスカイト／結晶シリコンタンデム太陽電池の研究開発に取り入れることは新しい発想であり、学術面での発展が期待される。

## 4. 今後の展開

今回のプロジェクトを通じて得られた知見を基盤として、特にモジュール信頼性の観点から、ペロブスカイト／結晶シリコンタンデム太陽電池のみならず、多用途展開可能な新構造モジュールを考案し、太陽光発電の普及拡大に資する内容の研究開発を拡充する。新潟大学においても、2022年4月にカーボンニュートラル融合技術研究センターを発足した。当該研究センターの中心的研究テーマである太陽光発電について、本プロジェクトならびに新規提案予定のプロジェクトを基軸とし、学内の体制も強化することで、研究を強力に推進する。

5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内／国際)	0 (0／0)	0 (0／0)	0 (0／0)	0 (0／0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演	5	15	3	23
(国内・審査有)	(1)	(1)	(0)	(2)
(国際・審査有)	(2)	(6)	(2)	(10)
(国内・審査無)	(1)	(8)	(1)	(10)
(国際・審査無)	(1)	(0)	(0)	(1)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

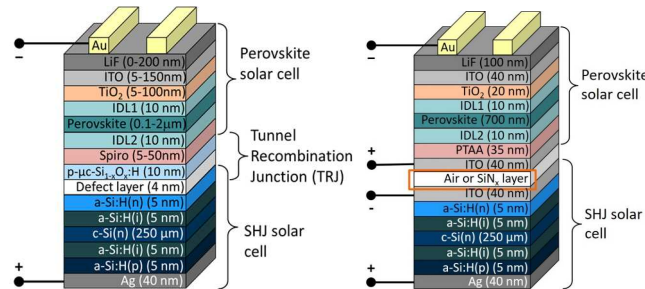
(2022 年 6 月 20 日現在)

## F 壁面設置太陽発電システムの生涯発電量最大化技術の研究開発（青山学院大学）

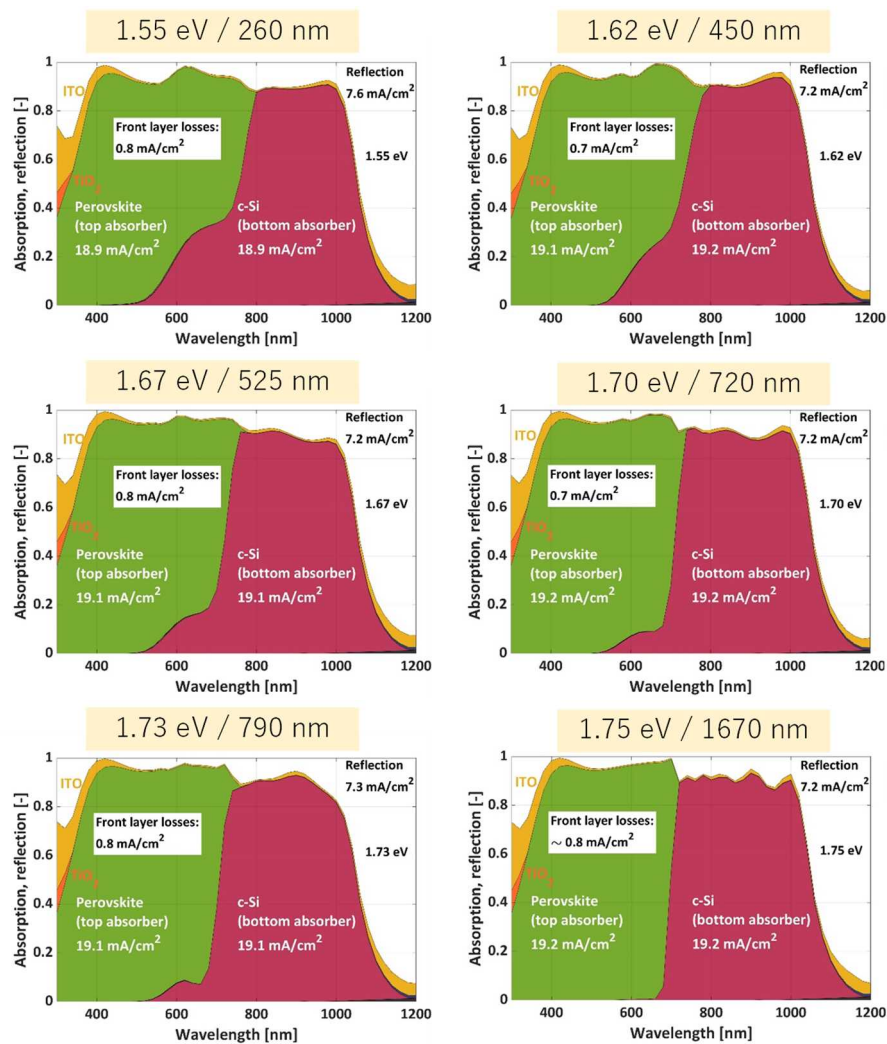
### 1. 成果詳細

#### (1) 壁面設置タンデム太陽電池モジュールの構造最適化

タンデム太陽電池の出力最大化には、トップセルとボトムセルでそれぞれ光吸収させる波長領域のバランスを考慮しなければならない。また、セルの端子数には、2端子～4端子型がある。これらの構造を最適化することが、次世代の壁面設置太陽電池モジュールには必要となる。ただし、それぞれの端子構造で、最適化条件は異なる。まず、2端子型および4端子型タンデム太陽電池の数値解析方法の構築を進めた（図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-1）。トップセルとしてペロブスカイト型太陽電池、ボトムセルとしてヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池を利用した。数値解析では、例えば2端子型では、光学的数値解析により光起電流が最大となるようトップセルの各層膜厚を決定



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-1 2端子型（左）および4端子型（右）のタンデム太陽電池構造図

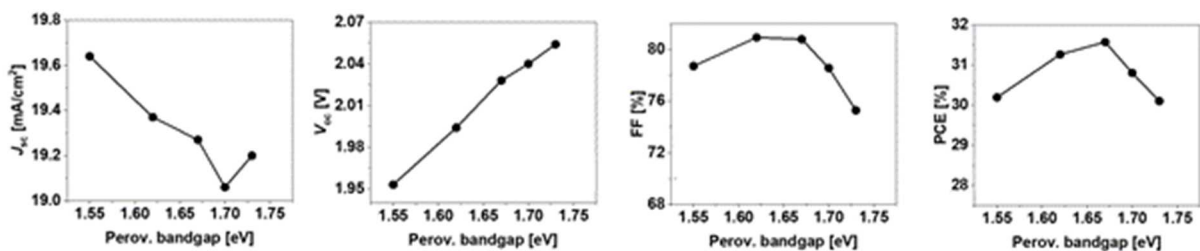


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-2 ペロブスカイト膜の各バンドギャップでの膜厚バランス最適化後の2端子型タンデム太陽電池の分光感度特性（ITO、TiO<sub>2</sub>部分は吸収損失、白い部分は反射損失を示す）  
Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F[1]

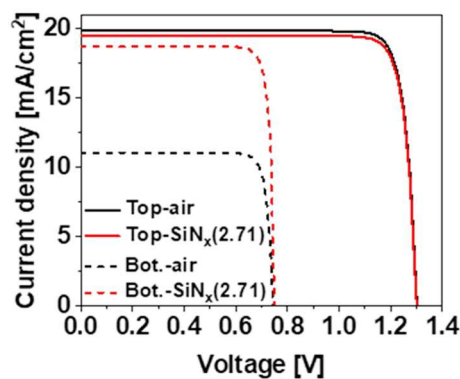
し、また、各端子構造で光起電流が最適となるようトップセルの光吸収層となるペロブスカイト膜厚の最適化を行った。尚、ペロブスカイト層のバンドギャップは 1.55 eV~1.75 eV と変更させた。光学的数値解析にはソフトウェア GenPro4 を利用した。GenPro4 の利用報告は、単接合・多接合太陽電池に対してこれまでにあり、入射光角度も変更できる。算出した膜厚バランスを元に、電気的数値解析を行った。電気的数値解析にはソフトウェア AFORS-HET を利用した。AFORS-HET によるタンデム太陽電池の数値解析報告例はほとんど見られないが、ペロブスカイト太陽電池、ヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池それぞれの解析がすでに報告されており、入力パラメータの確認が容易である。以上から電気的特性を算出し、タンデム太陽電池の膜厚バランス・トップセルのバンドギャップ最適化を行った。

2 端子型タンデム太陽電池の構造で数値解析を行った結果を示す (図III-2-(イ)-(ii)-F-2)。ペロブスカイト膜の各バンドギャップで膜厚を最適化した時に最大光起電流が得られる場合のトップセル・ボトムセルの分光感度である。本計算をする際、各層の屈折率・消衰係数の波長依存性データが必要となる。本検討では、既報論文からデータを取得した。本計算で得られた膜厚バランスを AFORS-HET に代入し、電気的特性を求めた (図III-2-(イ)-(ii)-F-3)。バンドギャップ 1.67 eV で 31.4%の変換効率が得られることが分かった。ただし、本検討は、AFORS-HET のプログラム制約上トップセルとボトムセルを繋げるトンネル接合が設定できず、最適バンドギャップなどは変化する可能性がある。また、光が太陽電池に垂直に入射している場合であり、入射角度や入射スペクトルを変更した場合の変換効率を計算する必要がある。

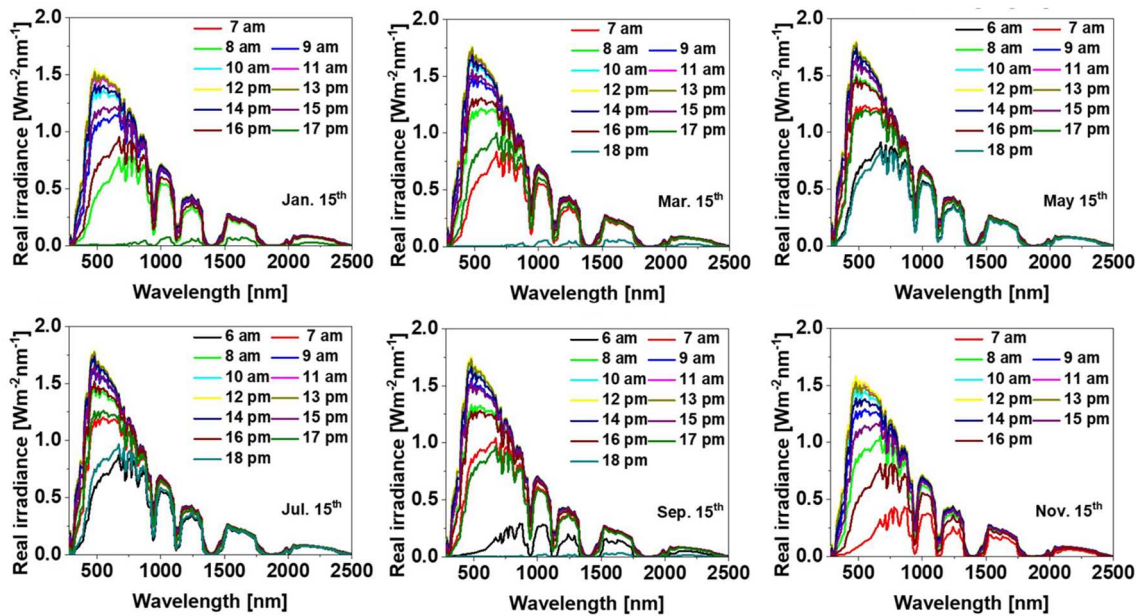
続いて図III-2-(イ)-(ii)-F-4 に 4 端子型タンデム太陽電池の中間層 (図III-2-(イ)-(ii)-F-1 (右内に図示) を  $\text{SiN}_x$  膜にした場合の数値解析結果を示す。ペロブスカイトセルのバンドギャップは 1.67 eV とした。同コンソーシアム内機関である北陸先端科学技術大学院大学が検討している、耐湿性を有する  $\text{SiN}_x$  に対して屈折率を変化させ、それぞれの屈折率の場合での膜厚最適化を行った。屈折率が 2.71 で膜厚が 40 nm の時に、効率が最大化し、 $\text{SiN}_x$  膜を入れない場合が 29.52%の効率だったのに対して、 $\text{SiN}_x$  膜を挿入すると 34.23%が期待できると計算された。



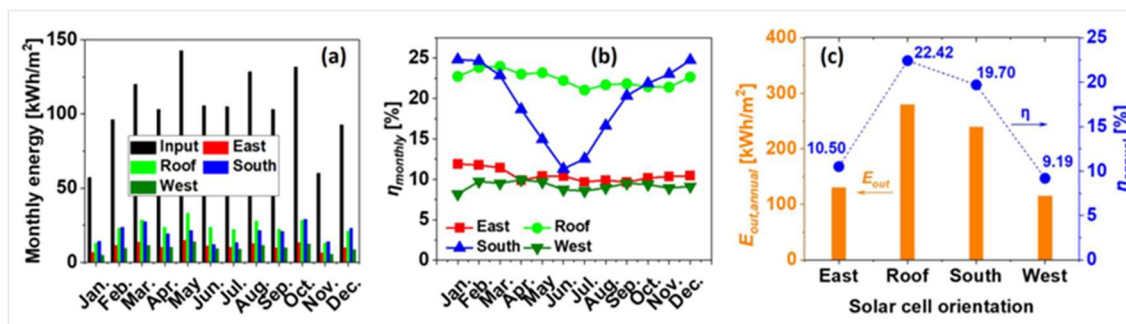
図III-2-(イ)-(ii)-F-3 ペロブスカイト膜の各バンドギャップを適用した 2 端子型タンデム太陽電池の特性



図III-2-(イ)-(ii)-F-4 中間層屈折率が特性に与える影響



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-5 利用した実測スペクトルデータ  
(代表例として奇数月 15 日のものを図示)

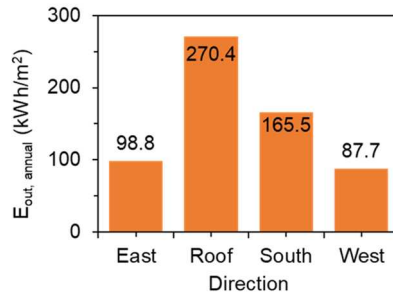


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-6 (a) 2 端子型タンデム太陽電池を屋上平面設置 (傾斜無し)、東面・西面・南面に垂直設置した場合の各月の推定出力、(b) 各月の推定効率、(c) 各設置方位での推定年間発電量

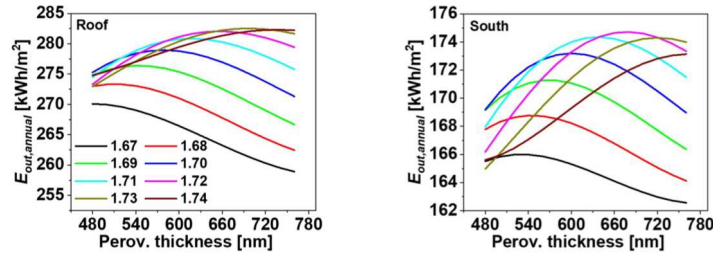
以上は、標準状態かつ基準光である AM1.5 をセル面に対して垂直入射させた場合の計算結果である。本事業では、南面垂直設置した場合の年間発電量推定を行うため、実際の入射スペクトルの入射角度を変更させて検討する必要がある。電気的数値解析ソフトの AFORS-HET では、入射角度依存性を算出するのが困難であるため、GenPro4 による光学的数値解析で入射条件を変え、図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-1 に示すタンデム太陽電池構造をベースとしたダイオード特性から太陽電池特性の算出を行った。実測入射スペクトルデータベース (VER3) の岐阜における 1 年間の時刻毎 (6 時～18 時) のスペクトルを利用した (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-5)。更に、建物の南面に垂直設置した場合の太陽光入射角度を算出し、年間発電量を求めた。なお、比較として屋上平面設置だけでなく、東面および西面垂直設置の場合も求めた。

図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-6 に結果を示す。屋上平面設置 (「傾斜なし」) の場合が最も出力が高くなり季節変動が少ないことが示されたが、東面・西面設置時は、太陽光の入射時間が限られることから他設置面に比べて出力が半分程度となり、東面の方が西面より有利であることが明らかとなった。本数値解析では、気温から太陽電池モジュールの温度を推定するモデルも入れて温度の影響も考慮しているが、その効果が出ていると思われる。南面設置時は、4 月～8 月で出力が低下することが分かった。太陽光の入射角度がより浅くなることによる表面反射損失の影響やセル温度上昇の影響が出たものと思われる。一方、本発電量推定には 1 次元光学数値解析を利用しているため、光の多重反射の影響を正確に計算できていない可能性が有る。Transfer Matrix 法や 2 次元数値解析の利用が有効な手段であるが、本検討では 2 次元数値解析法により更に解析を進めた。

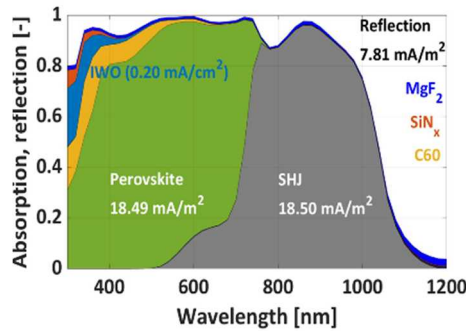




図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-7 2次元数値解析による推定年間発電量



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-8 2次元数値解析による年間発電量推定（トップセルのバンドギャップ・膜厚も変化）



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-9 色調均一効果が期待される2重反射防止膜構造によるタンデム太陽電池の分光感度

図 III-7 に 2 次元数値解析プログラム（デバイスシミュレータ TCAD-ATLAS）による年間発電量を示す。出力変化の傾向は図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-6 と同様であったが、より精度の高い算出がなされたと考えられる。

利用した 2 次元数値解析法においてはトンネル接合も定義でき、高精度な計算が可能である。そこで、ペロブスカイト太陽電池のバンドギャップも最適化パラメータに入れて、2 端子型における年間発電量の最大化構造を検討した。その結果、実測スペクトル下での南面垂直設置の場合、トップセルの最適バンドギャップ、最適膜厚はそれぞれ 1.72 eV、680 nm となり、年間発電量 174.7 kWh/m<sup>2</sup> が期待できることが分かった（図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-8）。一方、基準光下・標準状態での最適バンドギャップ、最適膜厚はそれぞれ 1.73 eV、1090 nm となり、素子設計で大きな違いが発生することが明らかとなった。本結果は、壁面設置用タンデム太陽電池設計に大きく寄与するものである。

色調変化を少なくするには、ペロブスカイト太陽電池表面に耐湿性に優れる SiN<sub>x</sub> 膜を付加するのが効果的である。一方、SiN<sub>x</sub> 膜は一般的に屈折率が高いため、より屈折率の低い膜を最上面に付加し、反射防止構造を採る必要がある。そこで、最上面の反射防止膜を MgF<sub>2</sub> とし、SiN<sub>x</sub> 膜との 2 重反射防止膜構造を設置した場合の 2 端子型タンデム太陽電池構造最適化も進めた。その結果、18.5 mA/cm<sup>2</sup> の短絡電流密度 ( $J_{sc}$ ) が期待できることが明らかとなった（図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-9）。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-7 の年間発電量を推定した際の 2 端子型タンデム太陽電池の  $J_{sc}$  は 19.49 mA/cm<sup>2</sup> であり、 $J_{sc}$  の差はボトムセルの起電流が律速していることも判明した。本構造での年間発電量類

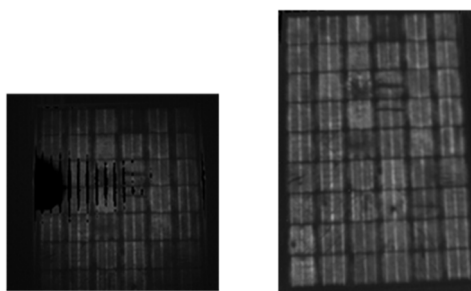
推はまだ詳細に検討できていないが、図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-7に比べ約5%低い年間発電量になると思われる。色調変化が少ないことが期待されるタンデム太陽電池において、年間発電量最大化に向けた構造最適化を更に進め、その際の年間発電量算出が必要であるが、特に透明導電膜の最適化、ボトムセルの厚み依存性が今後の重要な課題であることも明らかとなった。

## (2) 屋外性能評価の基盤技術開発

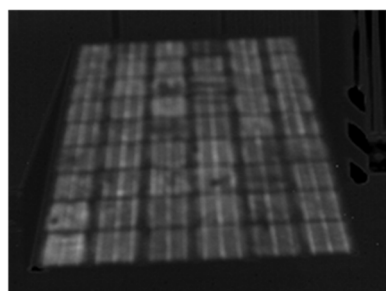
従来のエレクトロルミネッセンス (EL) 法は、屋内環境下で太陽電池品質管理に主に利用されてきた。例えばシリコン (Si) からの発光波長は近赤外領域であり、かつ発光強度が微弱であるため、Si-CCD カメラや CMOS カメラでは、暗室などの特殊環境下でなければ鮮明な画像が取得できなかった。屋外での EL 評価には近赤外領域に感度の良い InGaAs カメラを用い、更に撮像条件を精査する必要があった。本研究開発担当者は、どのような測定環境下でも EL 評価が実現できるよう InGaAs カメラを組み込んだ差分型 EL 評価システムを開発してきた。しかし、屋外照度が高くなると EL 像が不鮮明となり、欠陥や断線が検知できなかった。光学フィルタや撮像条件を検討し屋外照度が高い時の EL 像取得を目指した。

図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-10 に屋外照度が約 6 万 lux の時の EL 像を示す。左は従来フィルタによる EL 像であり、不明瞭な部分が見られた。一方、今回検討したフィルタにより、クラックや欠陥が視認可能な EL 像が得られることが分かった。中間目標値である屋外照度 3 万 lux 環境下を大幅に上回る照度環境下での EL 撮像に成功した。続いてカメラ撮像条件を更に検討した。屋外照度が 9.6 万 lux の時の EL 撮像結果を図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-11 に示す。晴天時のお昼と同等の、照度が高い状況においても EL 像取得に成功した。本成果は最終目標値である屋外照度 8 万 lux 条件も上回っている。

次に、屋外環境で撮像した EL 像から太陽電池モジュールの特性を抽出できるかは定かではなかったため、屋外環境で取得した EL 像を用いて、太陽電池特性の一つである開放電圧 ( $V_{oc}$ ) 値の算出を試みた。算出精度の向上のためモジュール温度も同時に測定した。モジュール温度により太陽電池特性が変化するためである。また、 $V_{oc}$  値の算出には、被測定太陽電池モジュールの他、既に  $V_{oc}$  値が判明している参照太陽電池モジュールが必要である。本検討では、p 型単結晶シリコンの PERC 型太陽電池を利用したミニモジュールを用いた。本ミニモジュールの太陽電池特性、温度による太陽電池特性の変化および EL 強度の変化を予め測定した。被測定太陽電池モジュールの標準状態での太陽電池特性も別途測定し、算出精度を検討した。ここで、被測定太陽電池モジュールと参照太陽電池モジュールは同程度の変換効率であり単結晶 Si ウエハによる PN 接合を有した太陽電池であるので、太陽電池特性の温度係数は同程度であると仮定した。参照太陽電池



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-10 (左) 従来フィルタによる EL 像。(右) 検討したフィルタによる EL 像。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-11 EL 撮像条件を更に最適化した際の EL 像。屋外照度は 9.6 万 lx。

モジュールにおける EL 強度の温度特性から、温度 1°C あたり EL 強度が 0.21% 低下することが明らかとなった。また、 $V_{oc}$  の温度係数は 0.32%/°C であった。これらの係数を  $V_{oc}$  算出時の補正時に利用した。なお、EL 像に示されるセルの領域内の各ピクセルの平均値を各セルの EL 強度とした。

EL 撮像時の被測定太陽電池モジュールの温度は、60.1°C であった。取得した EL 強度から各太陽電池の  $V_{oc}$  を算出した結果を図 III-2-(イ)-(ii)-F-12 に示す。EL 像において強度の高いところと低い所で 20 meV 程度の  $V_{oc}$  の差が出ていることが判明した。本モジュール内で得られた  $V_{oc}$  値の総和は、30.98 V であった。太陽電池モジュールは 60.1°C であるので、ソーラーシミュレータによる電流電圧特性から類推される  $V_{oc}$  値は、30.96 V となる。以上示すように、屋外で取得した EL 像からでも高い精度での  $V_{oc}$  値の算出に成功した。屋外 EL 評価技術は他企業でも開発されているが、定量評価まではできておらず、本技術開発で大きな機能向上実現に至った。

タンデム太陽電池の EL 評価には、各コンポーネントセルそれぞれの EL 像を取得する必要がある。トップセルとなるペロブスカイト太陽電池は、そのバンドギャップからボトムセルとなる結晶シリコン太陽電池からの EL 光を透過する。そのため、本構成のタンデム太陽電池においては、ペロブスカイト太陽電池の EL 像を取得する条件を軸軸に条件検討を進めた。ここで、ボトムセルとなる結晶シリコン太陽電池は、単接合型の場合、 $J_{sc}$  の 20% 程度までは注入電流と発光強度に直線関係があることから、タンデム太陽電池の評価としては、4 mA/cm<sup>2</sup> 以上の注入電流密度であれば、その後の特性定量化にも有利である。ペロブスカイト太陽電池に対して、タンデム太陽電池の  $J_{sc}$  相当の 20 mA/cm<sup>2</sup> を注入電流の上限とした。

$J_{sc}$  相当 (20 mA/cm<sup>2</sup>) を注入した場合、ペロブスカイト太陽電池からの EL 像を取得することはできたが、太陽電池特性が急激に劣化した。そこで、その 1/3 程度の 7 mA/cm<sup>2</sup> で検討を行った結果 (図 III-2-(イ)-(ii)-F-13)、EL 評価後も太陽電池特性が大きく劣化しないことが分かった。ここで利用したペロブスカイト太陽電池は、CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> を光吸収層とした変換効率 11~14% 程度のものである。ペロブスカイト太陽電池からの EL スペクトルも評価した。評価したペロブスカイト太陽電池においては、バンドギャップエネルギー相当にピーク波長を持っていることが分かった (図 III-2-(イ)-(ii)-F-14)。以上成果は、屋外 EL 評価技術の実用化に向けての基盤技術として極めて重要なデータである。

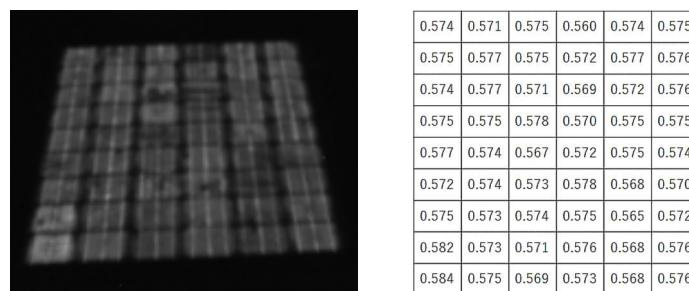


図 III-2-(イ)-(ii)-F-12 (左) 照度 7.4 万 lx で撮影した EL 像。(右) EL 像から算出した開放電圧値 (単位: V)。

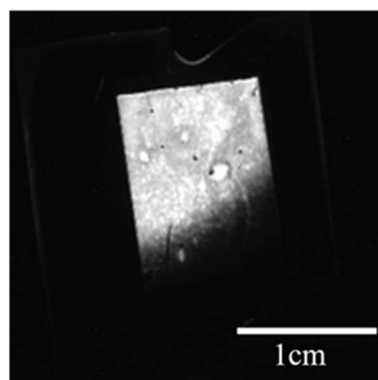
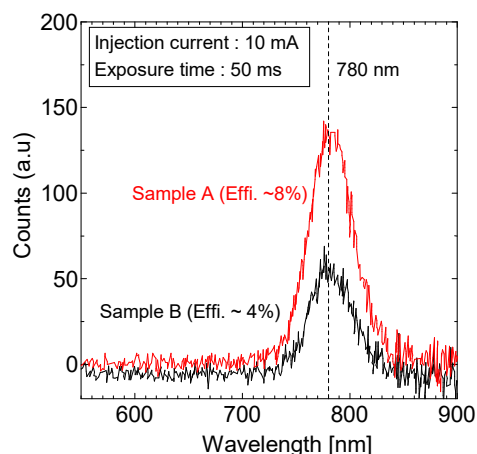


図 III-2-(イ)-(ii)-F-13 取得したペロブスカイト太陽電池の EL 像



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-F-14 ペロブスカイト太陽電池からの EL スペクトル

## 2. 実用化・事業化見通し

素子構造の最適化手法は論文で公開されるため広く利用が進むことを期待する。一方、屋外環境における EL 法による発電性能診断については、欠陥の視認だけでなく定量的診断が実現できており、算出過程の自動化を行うことで実用化が期待できる。また、メガソーラーにも対応したシステム構成になっているため、実際のメガソーラーでの検証が実用化には有効である。小規模の太陽光発電設備での検証から始め、検証結果をフィードバックしてシステム改良を進める必要がある。

## 3. 波及効果

壁面設置したタンデム太陽電池の素子構造が最適化され、また年間発電量も予測したことで、壁面設置の電力見積が可能となり、BIPV の促進が更に期待できる。また、屋外環境でも EL 法による欠陥像取得および定量測定ができるようになったため、屋外性能評価がより高機能化し、O&M ビジネスでの信頼性向上が期待できる。

## 4. 今後の展開

壁面設置したタンデム太陽電池の年間発電量最大化を行ったが、発電性能は経時劣化する。経時劣化特性を踏まえた生涯発電量の推定をすることで、BIPV の設計精度が格段に向上する。また、屋外環境での EL 法による素子性能診断では、定量化評価が開放電圧値だけと限定的であり、より多角的な診断ができるよう技術構築を進める必要がある。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	2	2
研究発表・講演	0	6	2	8
(国内・審査有)	(0)	(4)	(0)	(4)
(国際・審査有)	(0)	(2)	(1)	(3)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(1)	(1)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

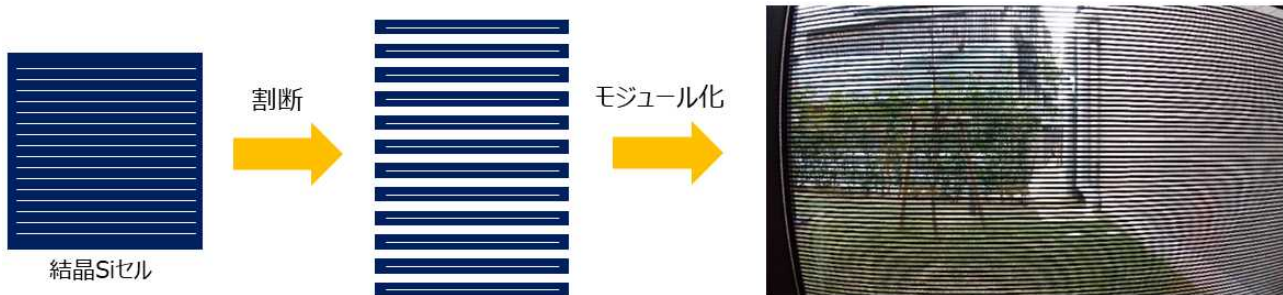
(2022 年 6 月 20 日現在)

## G 壁面設置太陽電池モジュールの高性能化技術開発（産業技術総合研究所、（再委託）東京工業大学）

### 1. 成果詳細

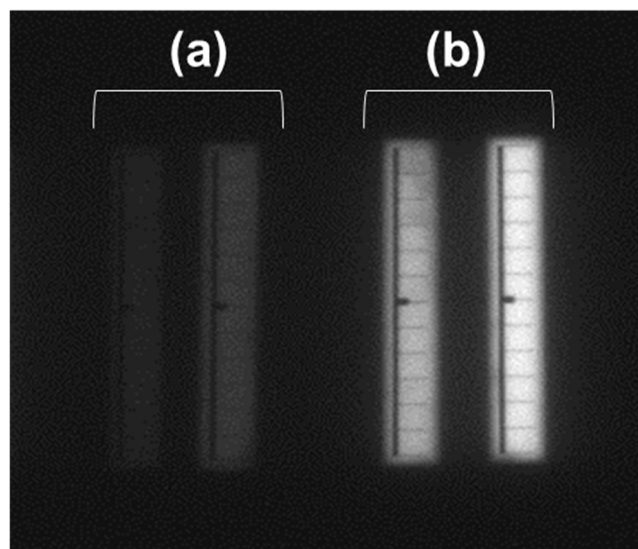
#### （1）壁面設置 PV の高出力化に関する技術開発

本テーマで想定する開口部向けモジュールは、幅数mm程度の細い短冊（ストライプ）状に切断加工した結晶シリコン太陽電池（セル）を一定の間隔を設けて配置したシースルー構造モジュールであり、発電性能と透光性を同時に実現する（図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-G-1）。切断したセル端部には、切断に伴う欠陥が形成されており電氣的パッシベーションも施されていないため、新たな漏れ電流が生じ発電性能の低下を招く。本事業では、これを解決するために、低ダメージ切断技術、ストライプセル設計技術、セル端面パッシベーション技術等を開発してストライプ型セルの高効率化を図り、コンソーシアム目標（効率13%）の達成に貢献する。



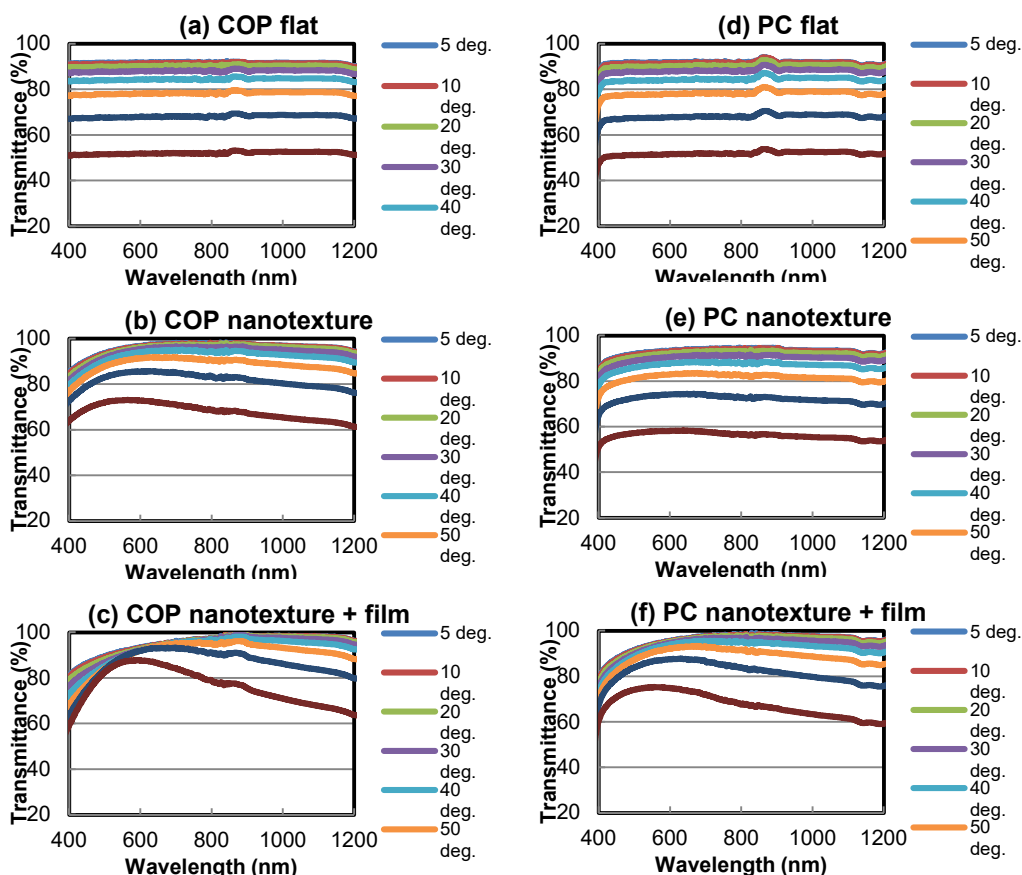
図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-G-1：短冊状に加工した結晶シリコン太陽電池を用いた開口部向け PVモジュールのイメージ

ストライプ型セルの高効率化を目指して、デバイス構造の検討を行った。デバイスとしては産総研で作製したシリコンヘテロ接合型（SHJ）太陽電池を用い、ストライプ形状への切断は紫外線（UV）レーザー加工機を用いて行った。様々な検討を行った結果、SHJ 太陽電池の素子構造制御がスクライプ加工後のセル特性に大きな影響を与えることが確認された。一般に Si 太陽電池を切断すると端面再結合の効果で特性が低下するが、開放電圧や曲線因子の良否は、切断前後のフォトルミネッセンス（PL）強度の変化から推定できる。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-G-2に示すように、素子構造制御を施すことで、PL 強度に明瞭な差が確認された。これは、切断した端面の処理のみならず、素子構造の設計により切断面付近の少数キャリア再結合が抑制できることを示唆しており、開放電圧や曲線因子が向上する可能性があることを確認した。こうした開発により、幅 5mm のストライプ型セルで発電効率 16%以上を達成し、中間目標を大幅に上回る結果を得た。また、最も細いもので、幅 3mm のストライプ型セルを得ることに成功した。加えて、原子層堆積装置（ALD）を導入するとともに、ALD 製膜したアルミナ膜（AlO<sub>x</sub>）によってシリコン表面が良好にパッシベーション出来ることを確認した。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-G-2. 幅 3mm ストライプ型セルの PL 像。  
(a) 素子構造制御なし、(b) 素子構造制御あり。

壁面設置 PV モジュールは、多くの場合地上に対して垂直に設置されるため、南中時には太陽光入射角が浅くなり出力が低下する課題がある。これに対応する光マネジメント技術として、広い角度範囲に対して反射率を低減可能なナノ構造体の開発を行った。壁面設置 PV モジュールを想定しているため、まず構造体として野外の使用に耐える素材としてポリカーボネイト(PC)フィルムとシクロオレフィン(COP)フィルムを選定し、PC と COP フィルムに反射率を低減させるナノ構造体形成技術を開発した。ナノ構造体を形成した COP フィルムにおいて、入射角度が 70 度の時の透過を 130%以上改善出来ることを確認し、中間目標を達成した。さらなる透過率の向上を実現するため、ナノ構造体表面に柱状のナノ構造体が自己形成できる自己柱状製膜の適用を試みた。図 III-2-(イ)-(ii)-G-3 に、PC フィルムと COP フィルム両面にナノ構造体を転写成形したフィルムの透過率スペクトルおよび各入射角度による平均透過率を示す。PC および COP いずれの場合もナノ構造体により透過率が向上し、追加で柱状製膜を施すことによってさらに透過率が向上できた。例えば、COP フィルムの場合、入射角度 70 度の時の透過率は、ナノ構造体形成で 30%、柱状製膜により 45%向上した。同様に PC フィルムの場合も、柱状製膜によって透過率が 30%向上した。夏至の太陽光入射角度 (78.4 度) を考慮すると、今回開発した反射防止構造により夏季の発電効率向上が期待できる。



### COP

COPフィルム					
入射角	平板フィルム	ナノ構造付フィルム	透過率向上率	ナノ構造付フィルム(成膜)	透過率向上率
5度	91.7	95.4	104%	94.3	103%
10度	91.3	95.1	104%	94.1	103%
20度	90.2	94.5	105%	93.6	104%
30度	88.1	93.4	106%	92.8	105%
40度	84.5	91.6	108%	91.6	108%
50度	78.4	88.1	112%	89.6	114%
60度	68.2	81.4	119%	85.6	126%
70度	52.1	68.1	131%	75.9	146%

冬至  
31.6度  
春分  
55度  
秋分  
55度  
夏至  
78.4度

### PC

PCフィルム					
入射角	平板フィルム	ナノ構造付フィルム	透過率向上率	ナノ構造付フィルム(成膜)	透過率向上率
5度	90.0	91.1	101%	93.2	104%
10度	89.6	90.8	101%	92.9	104%
20度	88.4	89.8	102%	92.4	104%
30度	86.3	88.0	102%	91.4	106%
40度	82.6	85.0	103%	89.7	109%
50度	76.6	79.8	104%	86.5	113%
60度	66.6	70.6	106%	80.0	120%
70度	50.6	55.0	109%	66.4	131%

図 III-2-(イ)-(ii)-G-3 : (上) PC フィルムと COP フィルム両面にナノ構造体を転写成形したフィルム、さらにナノ構造体表面に柱状製膜した時の透過率スペクトル。星印は入射角度 45 度における透過率スペクトルを示す。(下) 各サンプルの波長 360~1000 nm の範囲の平均透過率の比較。

(2) 壁面設置 PV の色調制御に関する技術開発 (再委託：国立大学法人東京工業大学)

本テーマでは、壁面設置 PV モジュールの建築物への受容性を高めるため、魅力的な外観と高い変換効率を両立可能な色調制御技術を開発する。本目的のためには、高い透過率と良好な色調制御性を両立でき、さらに角度依存性が小さい色調制御技術が必要とされる。本研究開発では退色等の懸念が少なく制御性に富むと考えられる光学多層膜を用いた構造色に着目して開発を進めた。

光学シミュレーションの結果に基づき、多層膜を設計し物理堆積法の一つであるスパッタリング法によって多様な構造色を有するガラス基板およびそれを用いたミニモジュールの試作・評価を行った。実験的に作製した光学多層膜は  $\text{SiO}_2$  と  $\text{TiO}_2$  を交互に積層したものであり、両者の膜厚や繰り返し数を調整することによって反射・透過スペクトルを制御した。製膜条件を適正化することにより、光学シミュレーションの結果を実験的に再現することができ、図 III-2-(イ)-(ii)-G-4 に示すように PV モジュールの色調を様々に制御できることを確認した。色調を発現させるための反射率ピークを可視域に限定し、太陽電池への入射光量を出来るだけ確保することにより色調制御後の発電効率低下は 20%以内と小さな値に留めることが出来た。更なる設計改善により、青や緑色に着色したモジュールでは効率低下 5%以内を達成し、中間目標を達成した。また、ガラス表面に凹凸構造 (テクスチャ構造) を設けることにより、表面光沢を抑えた仕上がりとなり、色調の角度依存性も緩和できることを確認した。

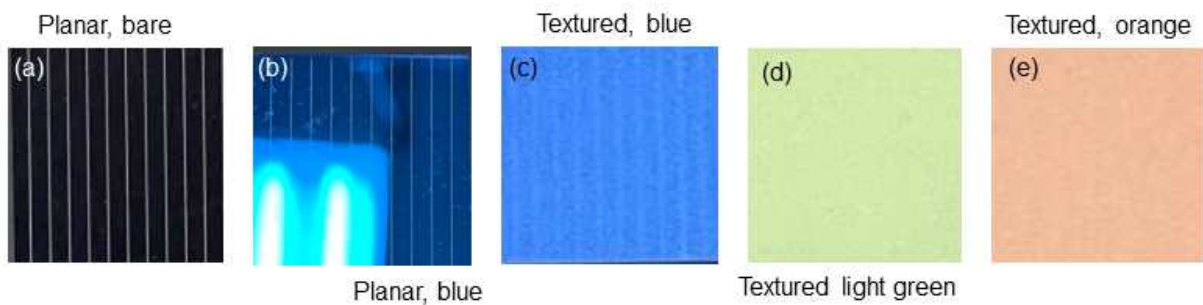


図 III-2-(イ)-(ii)-G-4. 作製した色調制御モジュールの外観写真。平坦ガラス (planar) では天井の電灯の映り込みが見えるが、テクスチャガラス (textured) では映り込みのない均一な色調が得られた。

誘電体多層膜によって白色系の色調制御の可能性を検討した。誘電体多層膜は、吸収損失がないため発電効率の低下を抑制できる利点があるが、光学干渉に基づくため、光の入射角度によって色調が変化する課題がある。まず、白色化による太陽電池の発電効率の低下を抑制するために、2つの反射波長幅が狭い反射ピークの合成光が白色になる様に配置したところ、図 III-2-(イ)-(ii)-G-5 の色度図に示すように白色を得ることができた。次に、入射角度による色調変化の抑制を検討した。一般に、光の入射角度が太陽電池に対して垂直な 0 度から斜め方向に大きくなると、誘電体光学薄膜の反射ピークは短波長側に青方偏移する。この際、色度図上では、波長 510 nm 以上では上方に移動し、波長 510 nm 以下では下方に移動する。これらのピーク移動を相殺できるように反射ピークを配置する設計を行った結果、図 III-2-(イ)-(ii)-G-5 に示すように、入射角が 0 度から 30 度まで色度図上で殆ど移動しない (色調が変化しない) 多層膜を得ることに成功し、中間目標を達成した。この誘電体多層膜をガラス基板上に製膜し、これを太陽電池上に配置したところ、発電効率の低下を 5.9% 程度に抑制できた。

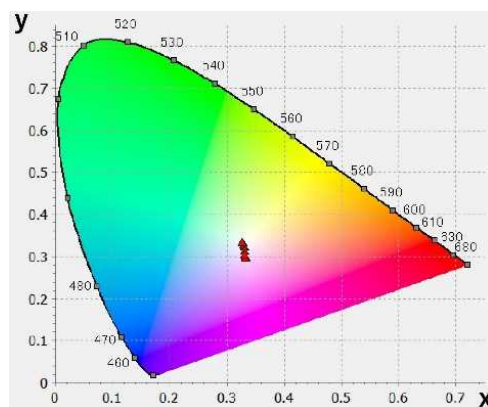


図 III-2-(イ)-(ii)-G-5. 白色誘電体多層膜で得られた色調と入射角依存性を示す色度図。図中の赤いシンボルが 0~30 度の範囲における色度を表す。角度に依らず色度に変化が無いことが分かる。あ

## 2. 実用化・事業化見通し

壁面設置 PV の高出力化に関する技術開発（開口部向け）に関しては、ストライプ型セルの効率向上につながる構造制御技術等により、ストライプ型セルとして目標を大きく上回る効率 16%を達成した。コンソーシアム全体目標である「可視光透過率 20%の半透明モジュールで発電効率 10%相当）以上を得る」に大きく寄与する成果であり、さらに高い効率や可視光透過率を実現する要素技術として、実用化が期待される。また、垂直設置形態が増える BIPV では、特に南中時付近で入射光角度が大きくなり、反射損失が増大する傾向があるが、今回開発した反射損失低減技術は、そうした損失を大きく抑えることが可能である。耐久性に関する検討も進め、実用化を目指す。

色調制御技術は、BIPV の適用範囲を広げるために重要な技術であるが、外観と発電効率のトレードオフが課題であった。今回開発した技術は光学損失を小さくしつつ色調制御を実現するものであり、BIPV の普及拡大に大きく貢献できるものである。また、色調制御技術の角度依存性の緩和に関する知財出願も行っている。現状は真空製膜技術に基づいた製膜を活用しているが、より安価な非真空製膜法を検討し、実用化を図る。

## 3. 波及効果

今回開発した壁面設置太陽電池モジュール技術は、連携先企業の BIPV 製品の高効率・高性能化および適用範囲拡大に貢献し、BIPV 市場の拡大につながる。これにより、太陽光発電をもとにしたエネルギー自立型建築（ZEB）の普及が進み、特に都市部における建造物由来のカーボンエミッションを削減することに貢献する。

## 4. 今後の展開

中間評価までに様々な要素技術を開発してきたが、以降は各要素技術のブラッシュアップを進めるとともに、連携先企業と密に連携しながらコスト低減につながる技術開発に注力し、早期の実用化に貢献する。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	0 (0/0)	1 (1/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演	0	3	0	3
（国内・審査有）	(0)	(2)	(0)	(2)
（国際・審査有）	(0)	(1)	(0)	(1)
（国内・審査無）	(0)	(0)	(0)	(0)
（国際・審査無）	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	2	0	2
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)



## H 壁面設置太陽光発電システムの効率向上、長寿命化技術開発（株式会社カネカ）

### 1. 成果詳細

非開口部向けの太陽電池モジュールにおいて、色調均一性モジュールの意匠バリエーション確認の為、色調技術を使用した多様な意匠を有する太陽電池モジュールを作製した(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-1)。



### 【非開口部モジュールの製作】

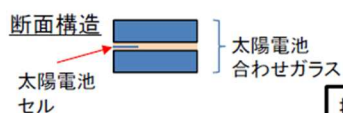
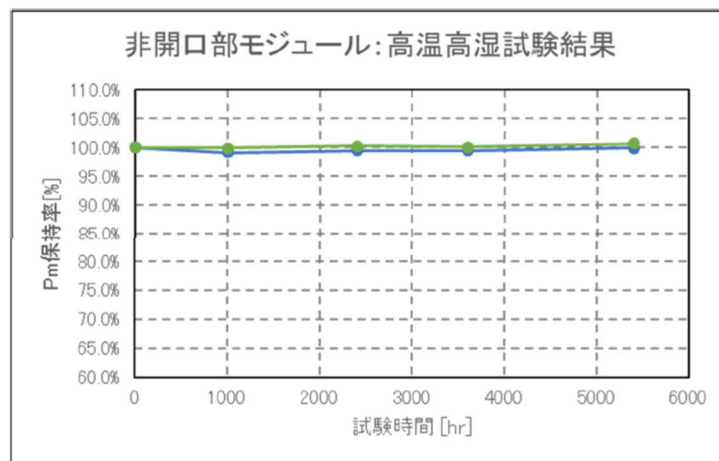
結晶Siセルシングリング接続構造により配線が視認できない意匠と色調均一性を有するモジュールを実現した。

#### Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-1 (非開口部モジュール試作品)

確立した配線方法を用いて作製したモジュールにて、高温高湿保存試験および、温度サイクル試験にて、IEC規格の5倍以上である、5,000時間、1,000サイクル試験を実施し、出力特性の低下率がそれぞれ1.4%、1.5%と5%以下であること、絶縁抵抗が1GΩと、規定の40MΩ・m<sup>2</sup>以上で十分な耐久性があることを確認した。(IEC基準の1,000時間、200cycleを10年相当とした場合、50年相当)

高温高湿保存

出力低下 1.4% < 5%、絶縁抵抗 1,000MΩ > 39.2MΩ (40MΩ・m<sup>2</sup>)

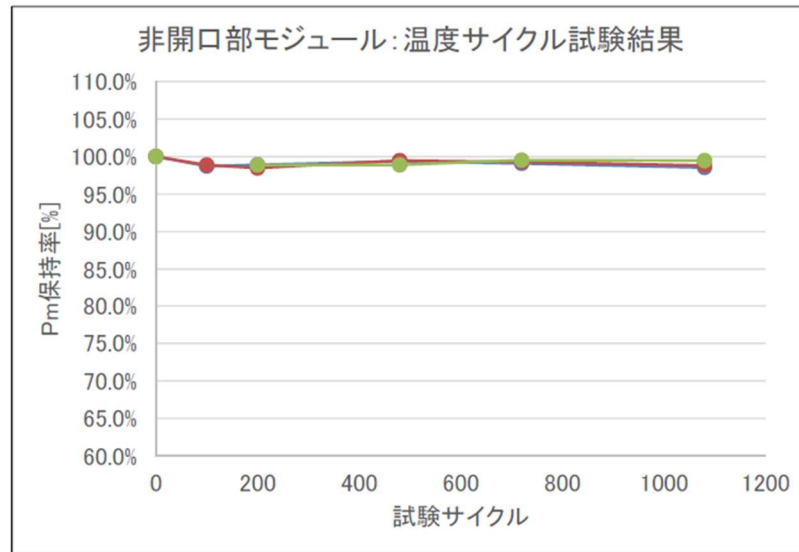


接続方式：新規開発方式(セル表面塗布)

図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-2 (非開口部モジュール：高温高湿保存試験)

温度サイクル

出力低下 1.5% < 5%、絶縁抵抗 1,000M $\Omega$  > 37.2M $\Omega$  (40M $\Omega$ ·m<sup>2</sup>)



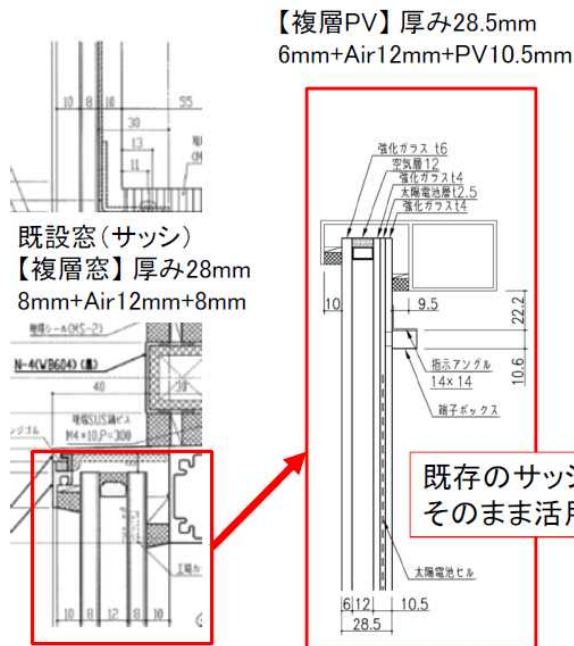
接続方式: 新規開発方式(セル裏面塗布)

### 図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-3 (非開口部モジュール: 温度サイクル試験)

ガラス封止構造（合わせガラス構造）を用いた可換性構造モジュールにて、基本サッシ構造を変更することなく、故障個所の特定、故障モードの想定、可換性を考慮し、意匠性にも考慮したガラス裏面取出し端子 BOX 構造を開発した。大成建設技術センター建屋にて、5mm+5mm の太陽電池合わせガラス構造に、6mm のガラスを複層化（空気層 12mm、ガラス総厚 28.5mm）して製作した幅 2,320mm×高さ 1,772mm、重量約 150kg の複層ガラス構造の太陽電池モジュールを、建屋に既設置のガラスと交換し、通常の建材ガラス同様の工法にて交換が可能であることを実証、交換コストが同等であることを確認した。配線工事についても地上用太陽電池モジュールと同様、コネクタ付きケーブルを有した端子 BOX をモジュール裏面に設置した構造としており、電気配線工事コストが地上用太陽電池と同等であることを確認した。

可換性検証工事

既築非開口部・開口部への適合設計開発



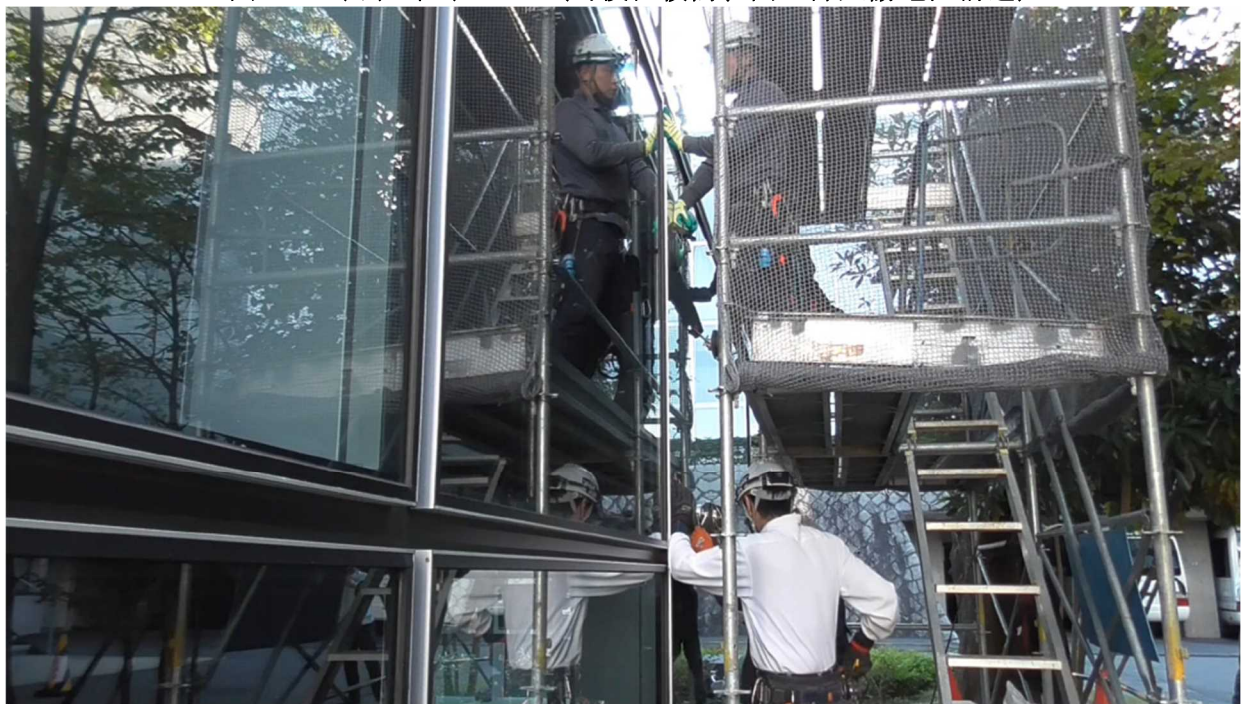
この窓を、既設窓から  
開口部太陽電池へ  
交換検証実施

2,320mm×1,772mm  
重量:150kg

室内側より  
(配線はカバーで  
見えない)



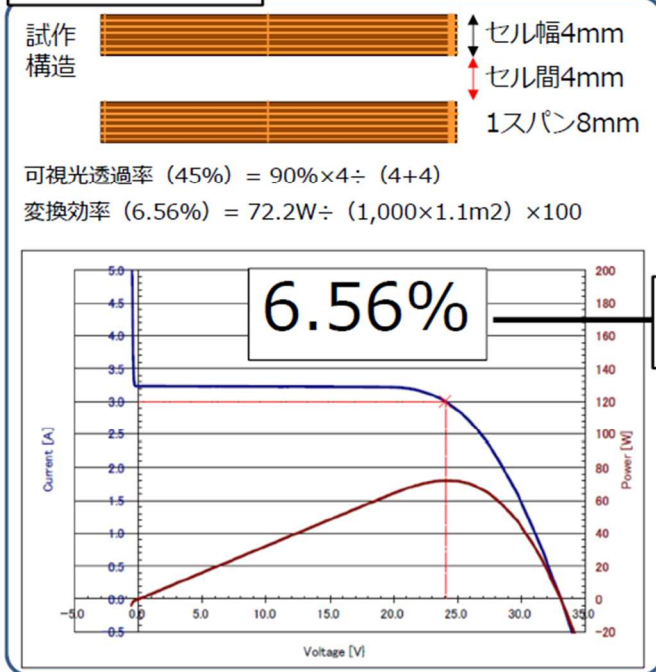
図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-4 (可換性検討、開口部太陽電池構造)



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-5 (開口部太陽電池交換工事風景)  
(通常の建材窓ガラスと同じ工法)

切断加工条件の検討を実施し、2022年度目標である、可視光透過率20%換算で、モジュール効率10%以上を達成した。AISTでは、開口部太陽電池用セルの高効率化を進め、再結合損失抑制技術開発により、PL強度の改善を確認し、セル(40mm×5mm)効率で16.6%(事業目標換算効率:16.9%以上に対して)を得た。

### 試作品測定結果



可視光透過率 (20%) =  $90\% \times 1.2 \div (4+1.2)$   
変換効率 (10.1%) =  $72.2W \times (8 \div 5.2)$

目標値換算 1.54倍 → 10.1%  
≥ 10% (中間目標値)

【可視光透過率20%換算】

最終目標13%以上を達成するための要素技術開発を進める。

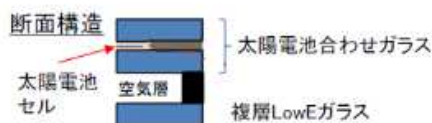
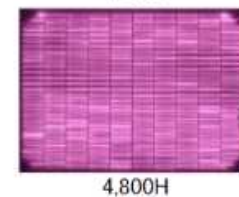
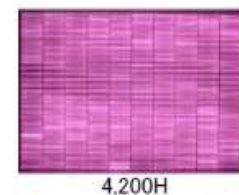
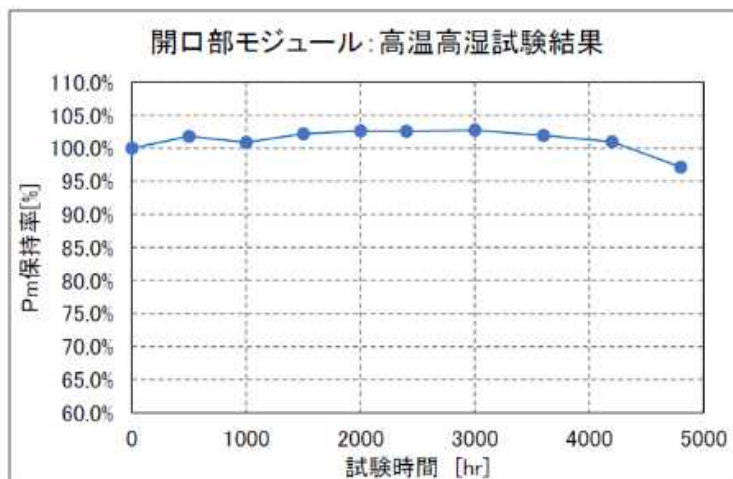
図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-6 (試作品効率 (可視光透過率 20%相当))

開口部向け長寿命化設計構造にて、2020年度までに選定した部材を用いて作製したモジュールにて、高温高湿保存試験、温度サイクル試験を IEC の 4.8 倍である、4,800 時間、960 サイクル実施し、出力特性の低下率がそれぞれ、2.8%、1.7%と、5%以下であることを確認した。この時の絶縁抵抗は、それぞれ700MΩ、1GΩと、規定の40MΩ・m2以上であった。引き続き、IECの5倍相当試験を継続実施する。また、窓代替機能としての、耐結露性能や断熱性能について、通常の建築用ガラス、複層ガラスとの比較検証を実施し、太陽電池の IEC 規格である、IEC C61215 (JIS 61215) の拡張試験案を策定した。2022年度中に試験案の妥当性を検証する。

高温高湿保存

出力低下 2.8% < 5%、絶縁抵抗 700MΩ > 39.6MΩ (40MΩ・m2)

面積: 1,218 × 903mm

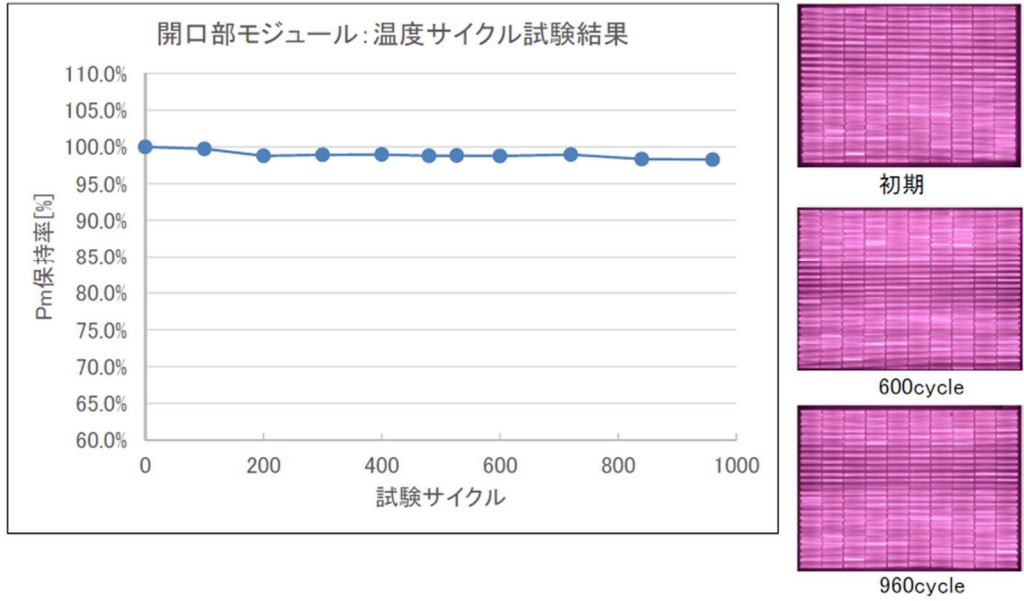


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-7 (開口部モジュール (複層構造): 高温高湿保存試験)

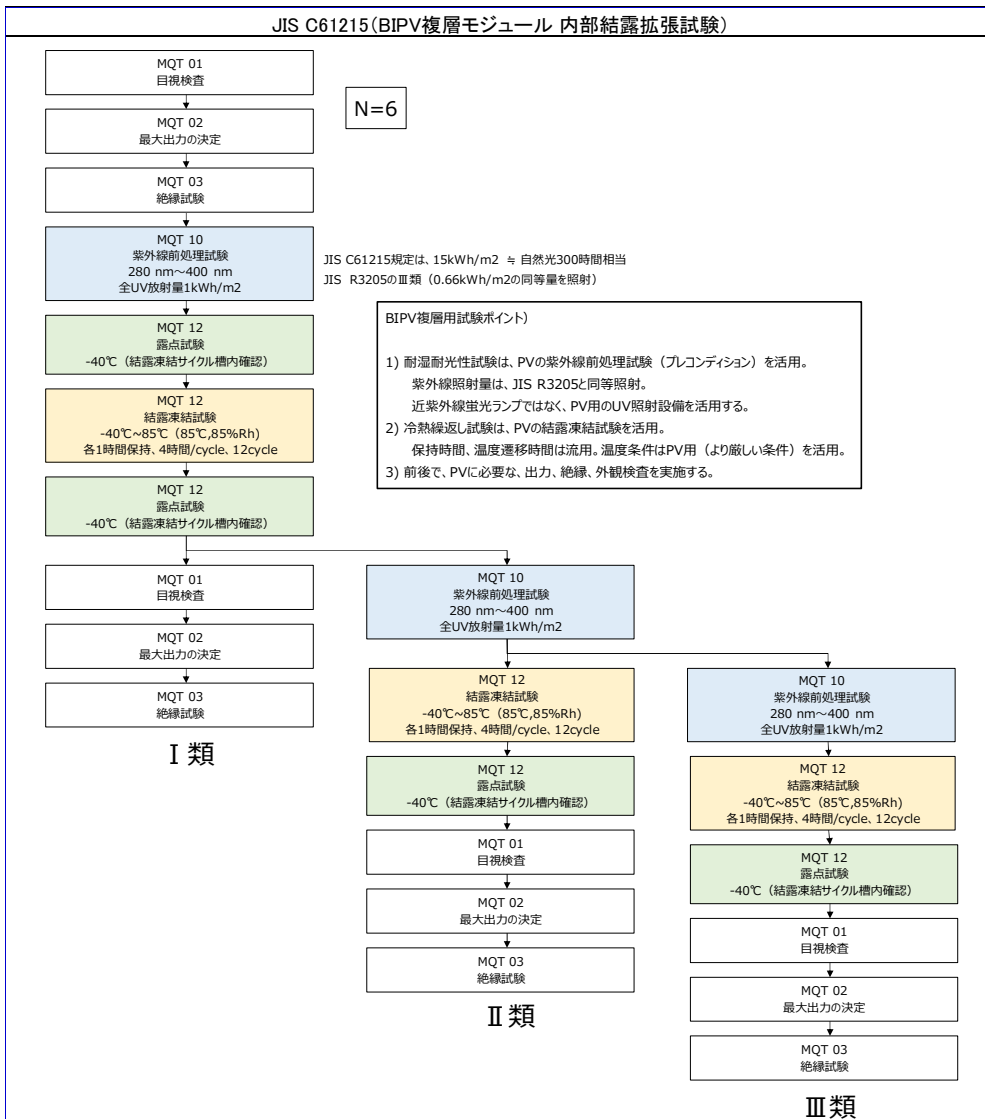
温度サイクル

出力低下 1.7% < 5%、絶縁抵抗 1GΩ > 39.6MΩ (40MΩ・m<sup>2</sup>)

面積: 1,218 × 903mm



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-8 (開口部モジュール (複層構造): 温度サイクル試験)



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-H-9 (窓代替性能 JIS C61215 拡張試験案)

## 2. 実用化・事業化見通し

技術開発は順調に推進しており、課題を達成しつつある。また、得られた技術開発について、技術検討委員会に建築の専門家である大成建設株式会社の有識者に参加いただく等、事業化に向けても並行してすすめており、中間目標を達成、最終目標を達成した後に事業化できる見込みである。

## 3. 波及効果

既存の太陽電池では技術的に制約のある壁面等に設置可能な次世代型太陽電池の実用化と新市場創出を図るための次世代型太陽電池や関連商品の事業化により、BIPV 市場の拡大が見込める。意匠とコスト課題を解決することで、大手ゼネコン、各設計会社、デベロッパーでのビル壁面への太陽電池設置が標準設計に組み込まれる。

## 4. 今後の展開

壁面への太陽電池設置標準化に向けて、ビル設計への標準化に向けて取り組む。太陽電池モジュールは特殊で扱いづらいという概念を一掃する為に、建材ガラスと同様の取り扱いにて、設計・施工が可能であることを示す、取扱説明書や施工マニュアルの整備を進め、大手ゼネコン、設計会社が窓や壁の代替品として容易に BIPV モジュールを選択できるよう推進する。窓ガラスの特性としては、熱貫流率や日射熱取得率等、建物の環境性能を評価する必要がある為、BIPV モジュールについても、同様の技術資料を準備し、容易に設計に組み込めるように取り組む。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	2 (2)	1 (1)	0 (0)	3 (3)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	1	0	1
受賞実績	0	1	0	1

(2022 年 6 月 20 日現在)

# I 壁面設置太陽光発電システム市場拡大のための共通基盤技術の開発とガイドライン策定 (太陽光発電技術研究組合、(再委託) 国立研究開発法人産業技術総合研究所)

## 1. 成果詳細

本プロジェクトの個別テーマの成果を以下に記す。

### テーマ1：壁面設置 PV の設計・施工ガイドラインの策定

本テーマでは、外壁に適用する BIPV (BAPV も含む) モジュールおよび BIPV システムを対象とし、建材と太陽電池が融合することによって生じる課題に焦点を当て、建築、太陽電池両業界にとってわかりやすい設計ガイドライン作成を進めている。2021 年度はガイドラインの目次案を作成し各項目の執筆担当者を決定し、2022 年度中に作成し中間目標を達成する見込み。

また、壁面設置 PV 意匠性の検討について、着色モジュールの外観・色調の経時変化を測色計によって客観的かつ定量的な評価技術を実証したので、当該知見を 2022 年度ガイドラインに含めることで中間目標を達成する見込み。

### テーマ2：壁面設置 PV 能評価技術の開発とガイドライン策定

#### テーマ2-1：高精度低コスト環境性能評価技術の開発と実証 (省エネ評価)

本テーマでは、壁面設置 PV の建築材料としての付加価値を定量的に評価する目的で、建材の重要な省エネ評価指標である日射熱取得率 (SHGC) を壁面設置太陽電池モジュールに適用して高精度省エネ指標評価技術の開発に取り組んでいる。太陽電池の計測において世界最高水準の技術補を保有する産業技術総合研究所を中核とし、SHGC 測定装置の設計および計測技術の確立を目指している。2020 年度に新規導入した SHGC 測定装置の試運転を 2021 年度に開始し、夏、冬それぞれの日射条件下で SHGC データを測定した。冬条件では SHGC 装置内に結露が発生することが分かったが、この問題をドライエア封入で解決し、計測の再現性と精度を向上させるよう測定装置に改良を施した。2022 年度は太陽電池分野で世界最高水準の SHGC 測定精度を実証し、中間目標を達成する見込み。

表Ⅲ-2-(イ)-(ii)-I-1. 山形県新庄市 測定精度向上策

1. 熱収支一致	配線孔コーキングによる配線孔からの気流漏れ対策 ドライエア注入による結露対策
2. 試験体枠	試験体着脱対応可能木製枠導入

測定設備設置場所：山形県新庄市 (ケミトックス社)

校正機器設置場所：茨城県つくば市 (国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

#### テーマ2-2：壁面設置太陽光発電システムの発電量評価のガイドラインの策定

本テーマでは、太陽光発電システムの最重要指標である発電量について、壁面設置の特徴 (垂直設置であること、デザイン上の理由で曲面上に設置されることがあること、ビルの庇などの部分影の影響を受けやすいことなど) を考慮し、壁面設置 PV の発電量を精度よく評価するための技術開発を実施している。2021 年度は各種壁面設置 PV モジュールの屋外発電量データの継続取得を開始した。モジュールのカバーガラスの表面処理による発電量の相違、太陽の角度による発電量の相違などについて解析し、非防眩型 PV モジュール、両面発電型 PV モジュールの発電量優位性を検証した。当該評価技術のガイドライン原案を 2022 年度に作成し、中間目標を達成する見込み。

表Ⅲ-2-(イ)-(ii)-I-2. 屋外発電量データ取得状況

1. 着色モジュール	4 種類の着色モジュールの屋外発電特性を測定
2. 垂直設置モジュール	4 種類の垂直設置モジュールの屋外発電特性を測定
3. 曲面モジュール	3 月に一週間、測定サイトに設置して測定

屋外試験サイト：山梨県北杜市長坂町夏秋 (ケミトックス社)

### テーマ3：壁面設置 PV のための安全性調査

地上設置以外の太陽光発電における安全性について、従来、主に住宅用の屋根設置を対象としてきた。建築物壁面の設置を考えると、開口部(窓部)では PV モジュールと居住者の距離が近い、過熱したモジュールによる火傷など異なる観点からの安全性確保が要求される。そこで、本テーマでは、壁面設置の安全性にかかわる事故、対策などを調査し、報告書にまとめることを目的とした。2021 年度は国内の状況について消費者庁事故データベースから事例収集を実施し、海外状況については、学会や出版物から事例収集を図った。現国内外のいずれの調査からも明確なビルの壁面(BIPV/BAPV)の火災事例は確認できない。壁面にはダブルガラスモジュールの採用が多いことから、火災事故発生は多くないことが推測される。2022 年度にはこれらの情報を纏めて安全性調査報告書を作成し、中間目標を達成する見込み。

### テーマ4：壁面設置 PV の社会受容性向上のための方策

PVTEC では、2015 年から開始された IEA PVPS Task15 に参加してきたが、2020 年から開始された Phase2 についても、本事業の建築、太陽電池双方の委員が参加し、BIPV の多機能性評価、ガイドライン作成、BIPV 設計へのデジタル活用などの幅広いテーマで、意見交換、情報提供、上表収集などを実施している(2022 年度末に活動報告書作成予定)。Task15 は、オーストラリア、オーストリア、ベルギー、カナダ、中国、デンマーク、フランス、ドイツ、イタリア、日本、ノルウェイ、シンガポール、韓国、スペイン、スウェーデン、スイスの 16 か国により、下記 5 つのサブタスクに分かれ活動が進められている。2022 年度には IEA PVPS Task15 活動報告書を作成し、中間目標を達成する見込み。

表Ⅲ-2-(イ)-(ii)-I-3. IEA PVPS Task15 のサブタスク

Subtask A	TIS Analysis for BIPV
Subtask B	Cross sectional analysis - learning from existing BIPV
Subtask C	BIPV Guidebook
Subtask D	Digitalization for BIPV
Subtask E	Pre-normative international research on BIPV characterization method

2021 年 4 月および 11 月に開催されたジェネラルミーティングに、本事業委員や PVTEC 事務局がウェブで参加したことをはじめ、上記の各サブタスクミーティングにも適宜出席している。また、下記の貢献をした。

- ・ Subtask C のガイドライン、Subtask E3 (BIPV の火災安全性) の火災試験所のマッピングの活動については本事業委員が執筆、情報提供を行った。
- ・ 2022 年 1 月に開催された Subtask E4 (BIPV の信頼性規格に関する活動) ミーティングでは、BIPV の認証について BIPV 企業に対するヒヤリングを実施した。サブタスクリーダーから「日本企業からも情報提供を」との要請があり、国内企業を代表して AGC 社から BIPV 事例を報告してもらうよう本事業委員が調整した。

着色モジュールの社会受容性について、国内の建築物の外観色のガイドライン(景観法、景観条例)と、海外各国の状況調査を実施し、7 か国から回答を得た。



## 2. 実用化・事業化見通し

壁面設置 PV の普及阻害要因の解決策となり得る本プロジェクトのガイドラインを広く公開することで、各種壁面設置 PV (①BIPV カーテンウォール(CW)開口部(すなわち窓部)及び②腰部、③BIPV 水平ならびに鉛直ルーバー、⑤BAPV 壁面取り付け、⑥BAPV 水平ルーバー) の普及加速に寄与する。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-I-1 建築物とPVが融合した様々な例。  
(2016年度NEDO「BIPVに関する調査・検討」報告書より)

## 3. 波及効果

壁面設置 PV 分野において世界最高水準の性能計測装置および評価技術を開発し、世界の標準化をリードするとともに国内企業の競争力強化に寄与する。

## 4. 今後の展開

「壁面設置 PV の設計・施工ガイドライン」については、中間目標として策定した国内市場向けガイドラインを発展させて国際市場向けガイドラインを策定し(2024年度末)、将来的には国際標準化を目指す(2025年度以降の新プロジェクトとして IEC NP 提案活動)。「壁面設置 PV 能評価技術の開発とガイドライン」については、中間目標として開発した省エネ指標/発電量評価技術を活用してガイドラインを策定し(2024年度末)、将来的には国際標準化を目指す(2025年度以降の新プロジェクトとして IEC NP 提案活動)。「壁面設置 PV のための安全性調査」については、将来のガイドライン策定に繋がる調査報告書(一次案)を作成し(2024年度末)、IEA PVPS Task15の活動を通じて国際的なコンセンサス形成をリードすることを目指す。

これらの活動を通じて、本プロジェクトの成果である日本発の壁面設置 PV 評価技術および壁面設置 PV ガイドライン思想を活用して、新たな国際標準および国際合意形成において主導的な役割を果たすことで、潜在的に巨大なグローバル PV 市場として期待される BIPV 分野における国内事業者の競争優位性構築に寄与する。

## 5. 特許・論文・対外発表

該当なし。

2022年度中に、再委託先の産業技術総合研究所から特許出願（国内）3件、論文1件の発表を計画している。

## J ペロブスカイト BIPV モジュールの研究開発 (パナソニックホールディングス株式会社)

### 1. 成果詳細

昨今の地球温暖化問題の解決のため、ビルの年間の一次消費エネルギーの収支ゼロを実現するネット・ゼロ・エネルギー・ビル (ZEB) が注目されている。我々は、ZEB の普及に向けた、半透明開口 (窓) の壁面設置モジュールの実現にむけ、透過率 20%以上、変換効率 13%以上、かつ、壁面を想定した設置形態、東南西面への設置において発電コスト 16 円/kWh 以下を実現可能な要素技術を開発する。本研究開発では、ペロブスカイト太陽電池モジュールをベースとして、高効率、高耐久、低コストの壁面設置モジュールの実現に資する技術を実証する。(1) 高効率化技術

壁面設置により低下する入射エネルギーを効率よくエネルギー変換するためには、従来の単接合太陽電池の効率を超えた特性が必要になり、タンデム太陽電池の開発が求められる。ペロブスカイト・タンデム太陽電池の高効率化には、トップセル・ボトムセルそれぞれの高効率化が求められており、それぞれのセルに適切なペロブスカイト材料組成および製膜プロセスの検討、界面処理の最適化により高効率化を試みた。

まず、トップセルに用いるワイドギャップ材料の組成を決定するため、ペロブスカイト組成  $\text{APbX}_3$  において、A サイトはシングルセルで最も一般的に使用される FA (formamidinium,  $\text{CH}(\text{NH}_2)_2$ ) および、イオン半径が小さくワイドギャップ化に寄与する Cs について、X サイトはシングルセルで最も一般的に使用される I (ヨウ素) および、ワイドギャップ化に寄与する Br (臭素) についてそれぞれ比率を変化させてバンドギャップの測定を実施した。図 III-2-(イ)-(ii)-J-1 にワイドギャップ材料の組成を変化させた時のバンドギャップの変化を示す。(なお、図 III-2-(イ)-(ii)-J-1 および以下に示す図 III-2-(イ)-(ii)-J-2 のバンドギャップ値については、両端や狙いのバンドギャップ付近は実測値であるが、それ以外の部分は線形を仮定して記載している。) 赤で示す領域において、トップセルの狙いのバンドギャップである 1.85eV 付近の値が得られた。また、ヨウ素と臭素が混合したペロブスカイト材料は、臭素比が多くなると光照射下で相分離が進むことが報告されているため<sup>III-1</sup>、各材料の光照射下での安定性についても評価した。その結果、臭素比が 20%以下の領域であれば相分離が起こらないことを確認した。これらの結果から、狙いのバンドギャップである 1.85eV を満たし、かつ光照射下で安定である組成 “ $\text{CsPb}(\text{I}_{0.8}\text{Br}_{0.2})_3$ ” を選定した。

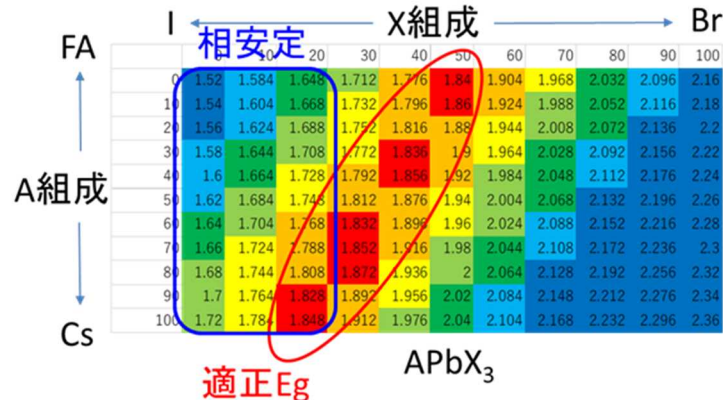
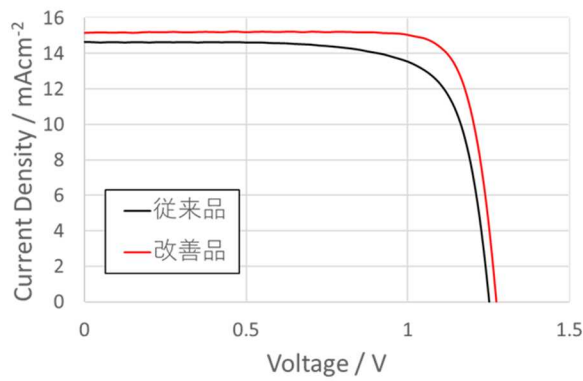


図 III-2-(イ)-(ii)-J-1 ワイドギャップ材料の組成とバンドギャップの関係

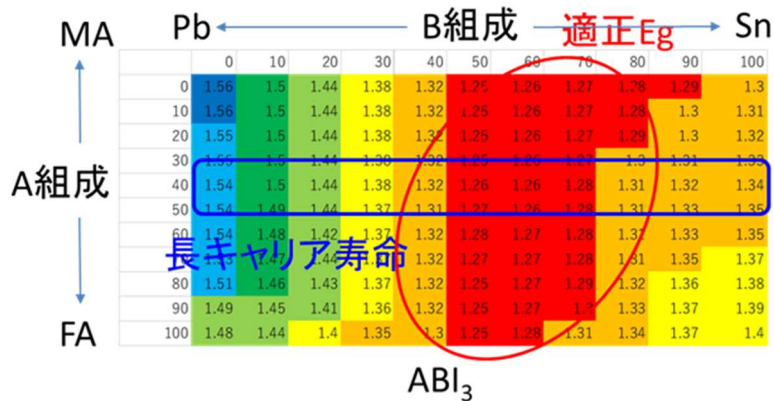
次に、本材料組成を用いて、トップセルの高効率化に取り組んだ。トップセルに用いているオール無機系のペロブスカイトは、有機—無機ペロブスカイト材料の結晶化において重要な中間体を形成することなく結晶化が高速で進行する。そのため、安定して高品質な結晶を生成することが困難であるという問題がある。この問題に対して、Wang らは  $\text{CsPbI}_3$  オール無機ペロブスカイト (バンドギャップ: 1.72eV) に Dimethylammonium Iodide (DMAI) を添加し、中間体を形成させることで高効率化することを報告している<sup>III-2</sup>。我々は、本手法を参考に、トップセル向けにバンドギャップを調整した、混合ハロゲン系オール無機ペロブスカイトである  $\text{CsPb}(\text{I}_{0.8}\text{Br}_{0.2})_3$  (バンドギャップ: 1.85eV) に対して条件を最適化し、変換効率の向上を実現した。さらに、ペロブスカイト表面に生じる欠陥をパッシベートするための界面処理材料を検討した。その結果、小さなハロゲン含有アルキルアンモニウム塩を界面処理材料として用いた場合に開放電圧が向上することを見出し、図 III-2-(イ)-(ii)-J-2 に示す通り、変換効率を 13.9% から 15.8% まで向上させることができた。



	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	PCE(%)
従来品	1.229	14.65	0.766	13.88
改善品	1.276	15.12	0.818	15.77

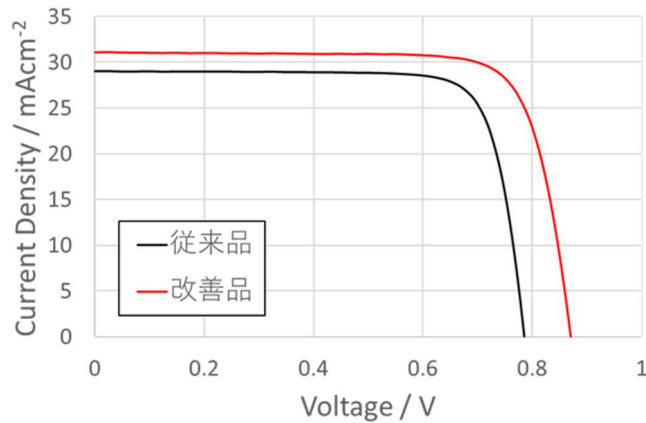
図III-2-(イ)-(ii)-J-2 トップセルの電流-電圧特性と太陽電池パラメータ

一方のボトムセルに用いるナローギャップ材料の組成の決定に際しては、ペロブスカイト組成  $\text{ABl}_3$  において、バンドギャップおよび材料品質に影響のある A サイトには、シングルセルで実績の多い FA および MA (Methylammonium,  $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ) を、B サイトにはナローギャップ化に効果的な Pb と Sn の混合について検討を行った。なお、ハロゲンサイトはヨウ素が最もバンドギャップが狭くなるため、ヨウ素で固定している。図III-2-(イ)-(ii)-J-3 にナローギャップ材料の組成を変化させた時のバンドギャップの変化を示す。赤で示す領域において、狙いのバンドギャップである 1.25eV が得られた。また、デバイス特性に重要なパラメータであるキャリア寿命について、蛍光寿命測定を行ったところ、A サイト材料が FA:MA=4:6 付近で極大値を示した。これらの検討より、狙いのバンドギャップかつキャリア寿命が最も長くなる組成として “ $\text{FA}_{0.4}\text{MA}_{0.6}\text{Sn}_{0.4}\text{Pb}_{0.6}\text{I}_3$ ” と決定した。



図III-2-(イ)-(ii)-J-3 ナローギャップ材料の組成とバンドギャップの関係

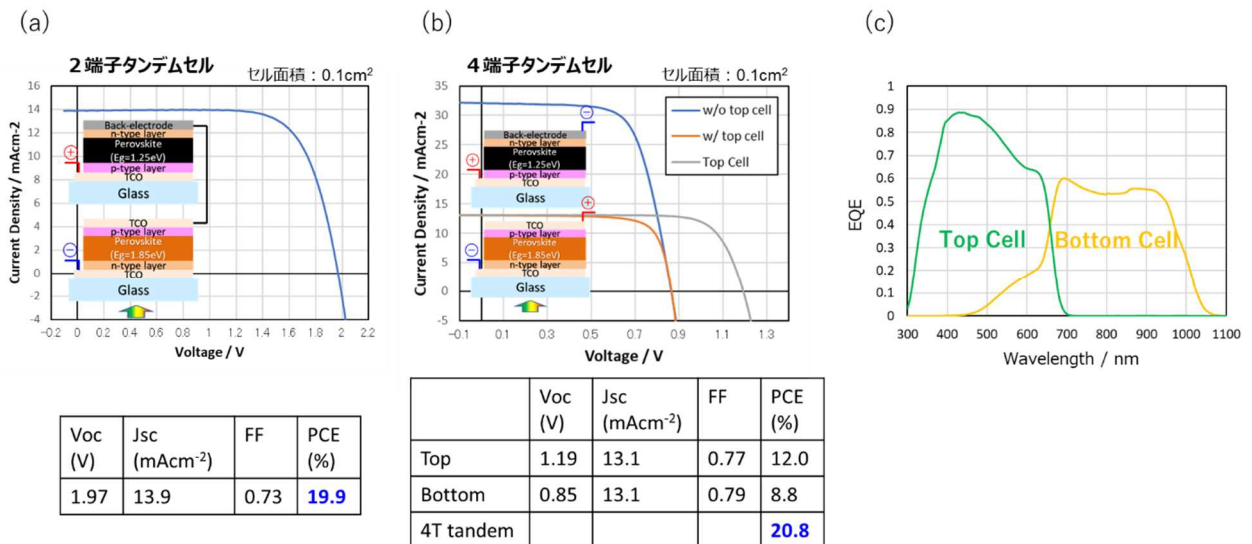
次に、本材料組成を用いて、ボトムセルの高効率化に取り組んだ。ボトムセルに用いている Pb-Sn 系のペロブスカイトは、製膜時に  $\text{Sn}^{2+}$  が  $\text{Sn}^{4+}$  へ酸化するという問題がある。この問題を解決するため、ペロブスカイトを製膜したのちに還元性のアミン処理を施すことで、酸化した  $\text{Sn}^{4+}$  の生成を大きく抑制され、変換効率が大きく向上することを見出した。さらに、界面処理を用いて電極-P層（ホール輸送層）間のバンドアライメントを整合させることで、電圧向上を実現し、図III-2-(イ)-(ii)-J-4 に示す通り変換効率が 18.3% から 21.3% まで向上した。



	Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF	PCE (%)
従来品	0.784	29.02	0.803	18.27
改善品	0.870	31.12	0.788	21.32

図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-4 ボトムセルの電流-電圧特性と太陽電池パラメータ

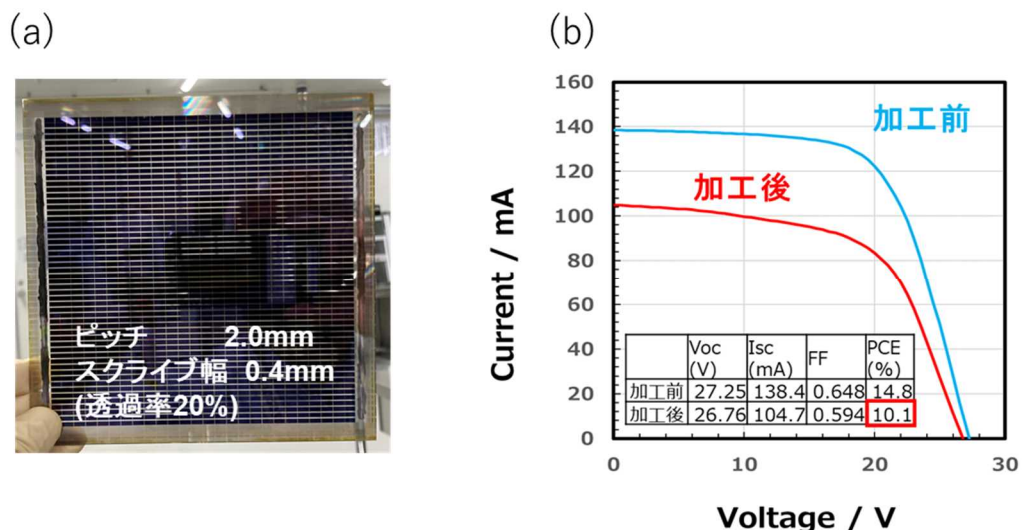
これらトップセル、ボトムセルを用いてタンデムセルの性能を評価し、2端子型・4端子型でそれぞれ19.9%、20.8%の変換効率を確認した(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-5(a)、図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-5(b))。また、4端子型タンデムセルの量子効率の測定結果(図Ⅲ-5(c))より、ボトムセルの赤外領域の量子効率が50%程度となっていることが分かり、トップセルを通過してボトムセルへ透過する近赤外光領域(700~1000nm)の低い透過率が起因していることを明らかにした。今後、トップセル、ボトムセルのそれぞれの高効率化に加えて、タンデムセルの光学設計により効率向上に取り組み、目標を達成予定である。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-5 (a) 2端子タンデムセルの電流-電圧特性と太陽電池パラメータ

(b) 4端子タンデムセルの電流-電圧特性と太陽電池パラメータ (c) 4端子タンデムセルの量子効率

また、開口部への太陽電池設置のキー技術である半透明化に関しては、透明モジュールの設計およびレーザー加工条件を最適化し、15cm角の基板において透過率20%、変換効率10.1%の半透明モジュールを実現した(図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-6(a)、図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-6(b))。今後、30cm角の基板にプロセスを拡張することにより、目標を達成する予定である。

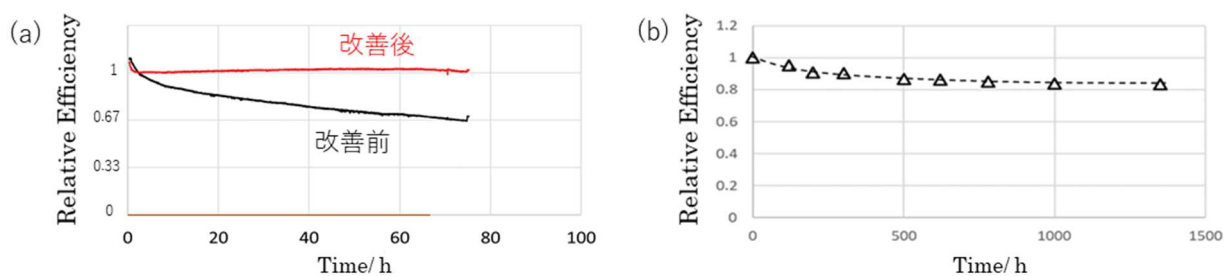


図III-2-(イ)-(ii)-J-6 (a)半透明モジュールの外観  
(b)半透明モジュールの電流-電圧特性と太陽電池パラメータ

## (2) 高耐久化技術

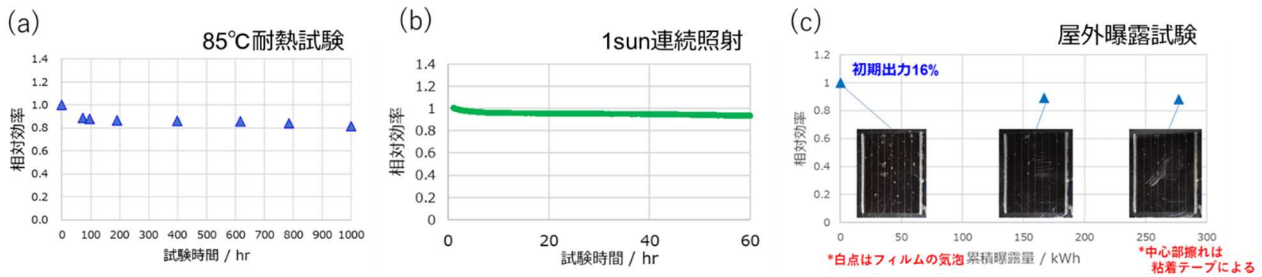
太陽電池に必要とされる信頼性には、「耐熱性」「耐湿性」「耐光性」など様々なものがあり、それらすべての課題を解決しうる材料・構造が要求される。これらのうち、我々は2019年度終了のNEDOプロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」において、耐熱性と耐光性をそれぞれ個別で向上させる要素技術を開発したが、それらを両立することが課題であった。そこで、本プロジェクトでは、まず耐熱性の高い構造をベースにして、耐光性の向上を試みた。

前NEDOプロジェクトの取り組みの中で、耐光性に関してはホール取り出し側の構造に大きく依存することが示唆されていたため、ホール取り出し構造の最適化を試みた。ガラス基板/透明導電膜(TCO)/酸化チタン薄膜(c-TiO<sub>2</sub>)/多孔質酸化チタン膜(mp-TiO<sub>2</sub>)/ペロブスカイト光電変換層/poly(triarylamine)(PTAA)/Au電極のデバイス構造(セル発電面積0.1cm<sup>2</sup>)において、ペロブスカイト光電変換層とPTAA層の界面に2-phenylethylammonium iodide(PEAI)を用いたパッシベーション層を適用し、界面の再結合を低減させた。また、PEAIパッシベーション層を用いた際のPTAA膜厚、ドーピング濃度等を最適化することで、ホールの取り出し効率を向上させ、耐光性向上を試みた。図III-2-(イ)-(ii)-J-7(a)に示す通り、上記対策を実施しホール取り出し効率を向上させることで、耐光性が大きく向上し、50℃で連続70時間の光照射において効率低下が見られなくなった。また、同一セルで耐熱試験を実施したところ、図III-2-(イ)-(ii)-J-7(b)に示すように、85℃1000時間の熱負荷において85%の維持率を達成した。



図III-2-(イ)-(ii)-J-7 小面積(0.1cm<sup>2</sup>)セルの(a)1sun 光照射試験の効率推移  
(b)85℃耐熱試験の効率推移

さらに、本技術をより大面積の集積モジュール(50cm<sup>2</sup>、8直列)に適用するため、製膜プロセスや封止、電極取り出しを最適化することで、小面積セルと同様に高い耐熱性と耐光性の両立を実証した(図III-2-(イ)-(ii)-J-8(a)、図III-2-(イ)-(ii)-J-8(b))。さらに、屋外曝露試験の環境を構築し、本モジュールを用いて試験を実施した。約2ヶ月間(累積曝露量280kWh)の試験において、デバイス自身の顕著な劣化や外観変化なきことを確認した(図III-2-(イ)-(ii)-J-8(c))。今後、封止構造を確立することで、高温高湿試験(85℃、85%、1000h)のクリアを目指す。



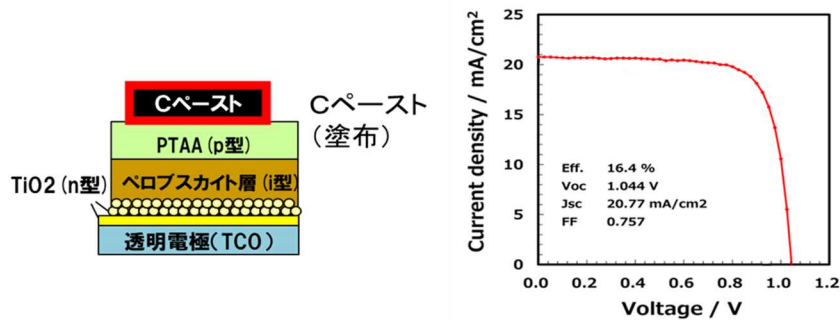
図Ⅲ-8 大面積(50cm<sup>2</sup>)集積モジュールの(a)85°C耐熱試験の効率推移 (b)1sun 光照射試験の効率推移 (c)屋外曝露試験の効率推移と外観

### (3) 低コスト化技術

ペロブスカイト太陽電池モジュールの低コスト化には、材料およびプロセスの低コスト化が必要である。これらの中で、材料に関しては電極材料として使用している金のコストが高く、最も低コスト化が必要な材料といえる。我々は、金の代替材料として低コストカーボンインクの適用に取り組んだ。

塗布型の電極を適用するには、下地を溶解させたり、ダメージを与えたりしない溶剤の選定が必須であるため、カーボンインクの溶剤について検討した。ペロブスカイト発電層は極性溶媒に溶解する傾向があり、逆にホール輸送材料は非極性溶媒に溶解しやすい傾向があるため、使用する溶剤を注意深く選定する必要がある。我々は、溶剤組成を最適化することで、カーボンインクの分散性を維持したまま、下地のペロブスカイト層やホール輸送層にダメージを与えない溶剤組成を見出した。

さらに、溶剤を最適化したインクを用いて、ガラス基板／透明導電膜(TCO)／酸化チタン薄膜(c-TiO<sub>2</sub>)／多孔質酸化チタン膜(mp-TiO<sub>2</sub>)／ペロブスカイト光電変換層/poly(triarylamine)(PTAA)/カーボン電極(金属の補助電極あり)の順に積層した太陽電池デバイスを作製し、特性を評価したところ、図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-9に示すように変換効率16.4%を達成した。この結果から、下地の溶解がなく、かつ電氣的に正常に接合していると考えられ、ペロブスカイト太陽電池への適用可能性を実証した。インクの配合比およびカーボンの膜厚を最適化することで、カーボン電極の低抵抗化に取り組み、補助電極無しで適用可能性を実証する予定である。

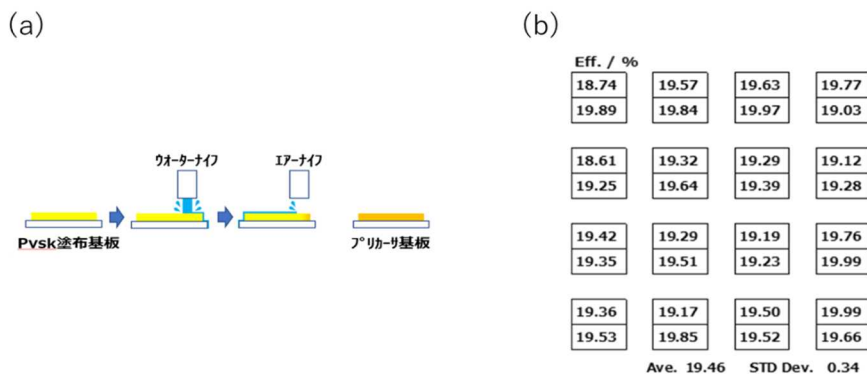


図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-9 カーボン電極を用いた太陽電池セルの電流-電圧特性と太陽電池パラメータ

また、プロセスに関しては、ペロブスカイト膜の高速形成が重要である。我々は、前NEDOプロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」において、ペロブスカイト膜をインクジェットで高速塗布(10m/分)する技術を確認した。しかしながら、高品質なペロブスカイト膜を形成するには、インクジェット塗工後に貧溶媒を滴下して結晶化を促す工程が必要であり、この工程もインクジェット塗工と同速度で高速に処理する必要がある。本プロジェクトでは、高速処理のための装置設計および面内均一に処理可能な条件の導出を試みた。

我々は図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-10(a)に示す装置を設計し、10m/分の速度で30cm角の基板を搬送しながらウォーターナイフで貧溶媒を吐出、その後エアナイフで余剰の溶媒の除去を試みた。面内均一な結晶化を促すためには、ペロブスカイト膜を塗工後に静置する時間管理や貧溶媒の流量の

調整が重要である。これらを最適化することで、図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-10(b)に示す通り、30cm 角内に 16 箇所配置した 25mm 角基板のセル（1 基板内に 2 セル配置し、それぞれを測定）の平均変換効率 19.46%，標準偏差 0.34%を得た。また、再現性を確認するため、同様の試験を 30cm 角基板 2 枚で実施したところ、それぞれ 18.5±0.8%，19.0±1.4%の変換効率を確認し、再現性の高いプロセスであることが確認できた。本結果をもって、中間目標である「ペロブスカイト工程の製造速度 3m/分以上」を達成した。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-10 (a)インライン貧溶媒処理装置の概略図  
(b)30cm 角内に配置したセルの変換効率の分布

## 2. 実用化・事業化見通し

ペロブスカイト太陽電池は、従来にない、塗布工法で高効率を得られる利点を有しており、その工法上の自由度の高さから、多様なサイズや形状を要求される建材一体型太陽電池への適用が期待される。前NEDOプロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」において、小面積で効率 20%以上を達成するとともに、30cm 角のモジュールでペロブスカイト太陽電池モジュールの世界最高効率となる 16.1%（現 17.9%）を達成し、既存の結晶シリコン太陽電池に迫る変換効率を実証している。さらに、本プロジェクトにおいて、ペロブスカイト・タンデムを用いた高効率化に取り組み、変換効率 25%への道筋が見えてきた。加えて、半透明モジュールの設計および要素技術を確認し、大きなダメージ無くモジュールを半透明化させる技術を構築した。本技術を用いることで、既存の太陽電池では不可能な、建築物の開口部へ意匠性を損なうことなく太陽電池を設置できる見通しが得られた。また、実用化に必要な不可欠な耐久性や低コスト化技術についても、最大の課題であった耐熱性と耐光性の両立や、高速かつ均一なペロブスカイト層の製膜において要素技術を確認し、実用化へ大きく前進した。事業化の課題としては、実製品を想定した信頼性の確保が挙げられる。従来の太陽電池の品質の規格試験、安全性の試験等のクリアに加えて、建材としての規格の準拠、長期的に外観を維持する技術等が求められる。これらの技術を早期に確立することで、事業パートナー（建材メーカー等）と共に事業化を目指す。

## 3. 波及効果

本研究開発における塗布工法で製造する太陽電池は、従来の結晶シリコン太陽電池では不可能な高いカスタマイズ性を有する。本プロジェクトの主目的である、建材一体型太陽電池に加え、その特徴からCO2削減に向けて電動化が進む車載分野への展開や、さらに軽量性を進めることで航空・宇宙分野への応用も期待できる。また、低照度における高い発電効率も知られている。近年、IoT 電子機器の増加や、その高性能化に伴い、従来室内用途で広く使用されているアモルファスシリコン太陽電池では電力が不足する用途も多く、ペロブスカイト太陽電池の展開が期待できる。

## 4. 今後の展開

中間目標における高効率化、透明化、耐久性、低コスト化について、要素技術を概ね確立し、目標達成の見通しが得られている。これらの技術を基に、建材一体型太陽電池に必要なさらなる高効率化と、建材準拠の信頼性の確保を実証していくことで、事業化への見通しを立てる。



## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	15 (14/1)	0 (0/0)	15 (14/1)
論文	0	1	0	1
研究発表・講演 (国内・審査有)	2 (2)	0 (0)	0 (0)	2 (2)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	1
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	2	0	2
受賞実績	1	0	0	1

(2022年6月20日現在)

### 【参考文献】

Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-1 Chemical Science, 2015, 6, 613.

Ⅲ-2-(イ)-(ii)-J-2 Angew. Chem. Int. Ed., 2019, 58, 16691.

## K 高性能化に向けたBIPV材料技術開発（早稲田大学）

### 1. 成果詳細

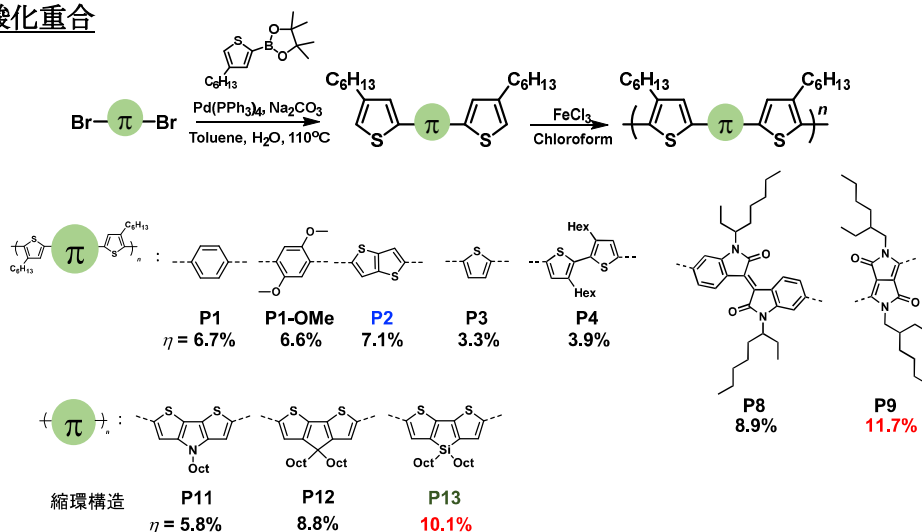
#### 1.1 ワイドバンドギャップ・ペロブスカイト適合ホール輸送材料(HTM)の開発

パナソニック株が開発を進める高効率ペロブスカイト・タンデム太陽電池のトップセルを想定し、ワイドバンドギャップ・ペロブスカイトに適合したHTM物質を耐久性も考慮して設計、15種余り合成し検討した。最高占有分子軌道(HOMO)順位  $-5.60 \sim -5.90$  eVを第一要件として、(2)高いホール移動度  $10^{2 \sim 4}$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$ 、(3)適度なホールキャリア濃度、(4)劣化防ぐためドーピング処理無し(またはわずか)でのホール抽出能・移動性、(5)着色は避ける、(6)照射下での耐久性、(7)ハイスループットで欠損なく薄層塗布できる成膜性(順型セルではさらに集電層形成時のスパッタリング耐性)を満足し、かつコスト低減可能な高分子HTMが求められる。

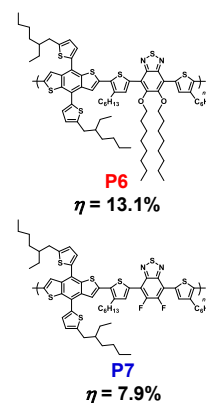
2020年度に合成したHOMO準位の異なるHTM高分子材料では、ポリ(*N*-アリールカルバゾール)及びポリ(*N,N*-カルバズリルベンゼン)を対応するモノマーから塩化鉄または鉄トシレートを経由して酸化剤として温和な条件で化学酸化重合した。またチオフェン系HTMとして、可溶性のヘキシル基を置換した1,4-ジチエニルベンゼンも同様に化学酸化重合し、可溶性のP1-P3を得た(図III-2-(イ)-(ii)-K-1)。HOMO準位は狙い通り $-5.6$  eVを示したが、セル効率は7%程度に留まった。

2021年度は、一連の芳香環pコア部位にチエニル部位を連結した対称構造を有するモノマーを設計することで、煩雑な頭-尾制御が不要なポリ(アリールチオフェン)P4, P8-P10および縮環構造を持つP11-13を合成した。いずれも温和な条件で化学酸化重合し、不溶化を回避しながらポリマーに誘導した。1ステップ合成で収率も高く、クロロベンゼンに可溶で成膜性に優れ、15 nmと薄層形成したHTMは650 nm以上の可視吸収も低く、ドーピングなしで素子に適用できた。各HTMの分子量、HOMO準位および*J-V*特性を(表III-2-(イ)-(ii)-K-1)に総括した。HOMO準位はpコア部位の電子密度で調整でき、P2と同じチエノチオフェンをコアとして側鎖置換位置を内側に配置したP10ではセル効率12.2%に向上した(entry 2)。可溶性側鎖の立体反発が解消され、ピチオフェン部位の共平面性が向上し、X線回折でも市販HTMのP3HTと同様の(100)結晶高次ピークが $5^\circ$ に現れたことよりホール輸送性が改善したためと考察した(図III-2-(イ)-(ii)-K-2)。さらに重合溶媒、重合時間を最適化したP10'を単独HTM層としてセル効率13.7%を達成した(entry 3)。また単独HTM層では低特性に留まるP2も、P3HTを積層することで準位マッチング層として適用できる(セル効率13.3%, entry 5)。

#### 酸化重合



#### 還元重合

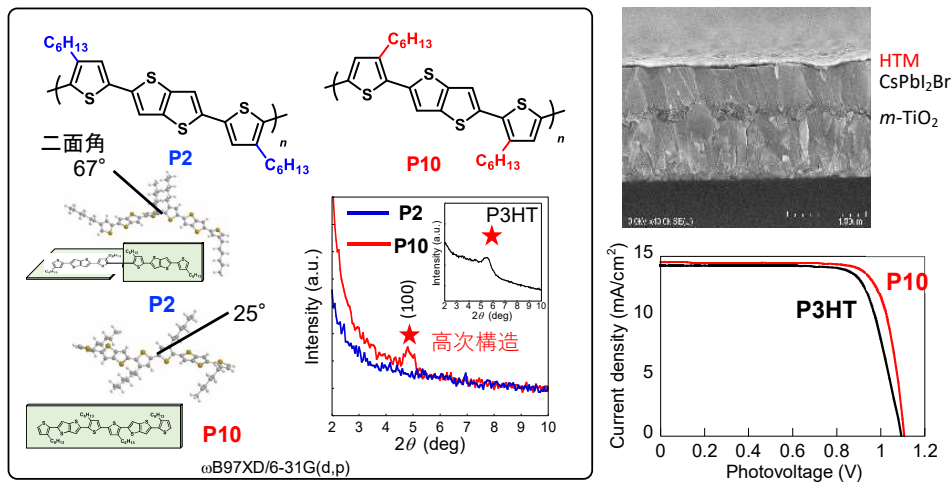


図III-2-(イ)-(ii)-K-1. 化学酸化重合及び還元重合による高分子 HTM の合成

表III-2-(イ)-(ii)-K-1. 高分子 HTM の分子量および光電変換特性

Entry	HTL	HOMO (-eV)	$M_n$	$M_w/M_n$	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF (-)	$\eta$ (%)
Cf.	P3HT	4.8	27,000	-	14.7	1.06	0.79	12.3
1	P2	5.4	18,500	1.6	14.1	0.94	0.53	7.1
2	P10	5.0	800	1.1	14.7	1.09	0.77	12.2
3	P10'	5.0	1,600	1.1	15.2	1.11	0.81	13.7
5	P3HT on P2	5.4	18,500	1.6	15.1	1.10	0.80	13.3
6	P9	5.2	5,400	1.6	14.4	1.13	0.72	11.7
7	P13	5.2	4,700	1.4	13.9	1.01	0.72	10.1
8	P6	4.8	22,000	1.2	14.8	1.13	0.79	13.1
9	P6 <sup>a)</sup>	4.8	22,000	1.2	14.2	1.16	0.77	12.7

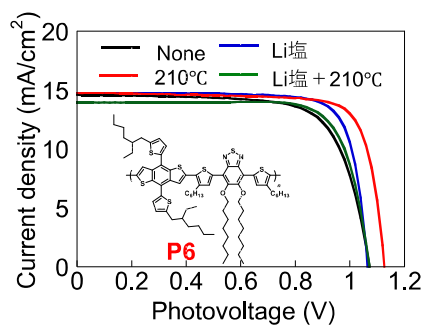
a) Doped with LiTFSI(3 wt%), tBP(9 wt%), measured by Panasonic.



図III-2-(イ)-(ii)-K-2. 側鎖置換位置による HTM の高次構造制御と  $J$ - $V$  特性

上記記載の化学酸化重合による高分子HTMに加え、2020年度Stilleカップリングにより還元重合したDA型ポリマーを改良し、P6, 7を新たに合成した(図III-2-(イ)-(ii)-K-1 右)。特にP6では高温アニーリングまたはLi塩のみのドーピングにより変換効率が向上し、13.1%を得た(図III-2-(イ)-(ii)-K-3, entry 8)。P6についてはパナソニック㈱にてI/Br組成の異なるペロブスカイト層CsPb(I<sub>0.8</sub>Br<sub>0.2</sub>)<sub>3</sub>でも検証し高特性を裏付けた(entry 9)。

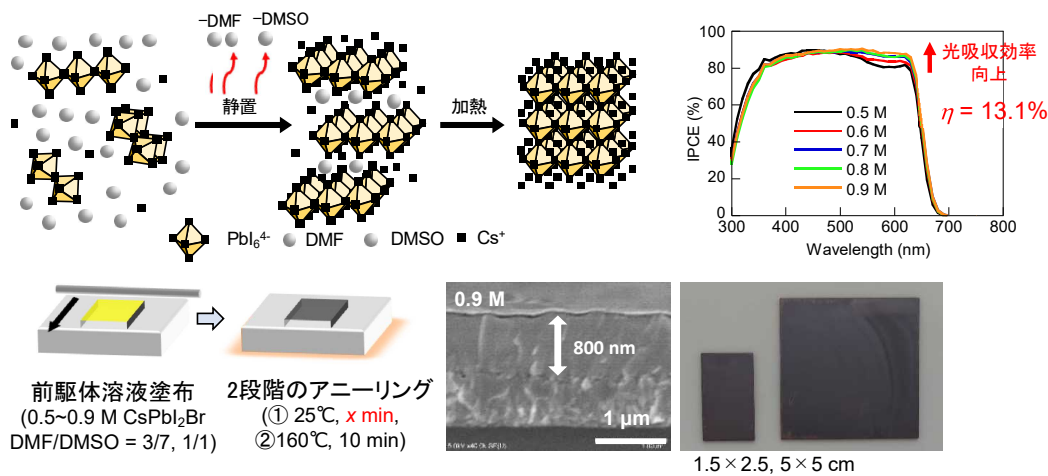
以上より、P6, P10, P13をワイドバンドギャップ・ペロブスカイトHTMの要件に沿った候補として絞り込んだ。今後はペロブスカイト-HTM界面の配向制御、アニーリング条件の最適化、界面パッシベーション技術との組み合わせ等により、ホール移動度の改善による $V_{oc}$ の向上を目指す。



図III-2-(イ)-(ii)-K-3. P6の処理条件と  $J$ - $V$  特性。

## 1.2 高速製造プロセス適合塗布材料の開発

ワイドバンドギャップ・ペロブスカイトとなる全無機組成(CsPbI<sub>2</sub>Br)インキの調製、製膜法の要件を確立した。昨年度は、特に添加ポリマーを工夫し効率10.3%を得た。本年度は、ペロブスカイト前駆体溶液(ジメチルホルムアミドDMF, ジメチルスルホキシドDMSO)のDMF比率と濃度を上げ、バーコーター(Wet膜厚#1: 6 μm)で成膜し、室温乾燥時間を最適化、その後アニールすることで無機ペロブスカイト層を形成した(図III-2-(イ)-(ii)-K-4)。断面SEM像より膜厚640 nmと従来の300 nmから増大し、光吸収効率は著しく改善し、短絡電流密度15.6 mA/cm<sup>2</sup>、素子効率12.9%と向上した(表III-2-(イ)-(ii)-K-2)。さらにインキ濃度を上げることで(0.9 M)、膜厚800 nmのペロブスカイト層まで形成でき変換効率13.1%、IPCEスペクトルでも550-650 nm域での光電変換能を向上できた(表III-2-(イ)-(ii)-K-3)。また、160°Cでのアニーリング処理の前の静置時間に関し、室温から40°Cに変更することで5分に短縮し、合計15分でペロブスカイト層を形成できた。



図III-2-(イ)-(ii)-K-4. バーコート塗布による全無機組成ペロブスカイトの膜厚向上と*J-V*特性

表III-2-(イ)-(ii)-K-2. 全無機ペロブスカイトを形成するインキ組成・室温乾燥時間と特性

Entry	Bar coater	Precursor solution		Standing time (r.t.) (min)	Thickness (nm)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF (-)	$\eta_{Max}$ (%)	$\eta_{Ave}$ (%)
		DMF/DMSO (v/v)	Conc. (M)							
1	0	3/7	0.5	15	300	13.4	1.02	0.73	10.0	7.5
2	1	1/1	0.7	12	670	15.2	1.04	0.79	12.5	5.5
3	1	1/1	0.7	16	640	15.6	1.05	0.80	12.9	12.5
4	1	1/1	0.7	20	630	15.3	1.05	0.78	12.5	12.1

表III-2-(イ)-(ii)-K-3. インキ濃度と膜厚の相関

Conc. (M)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF (-)	$\eta_{Max}$ (%)	$\eta_{Ave}$ (%)	Thickness (nm)
0.5 <sup>a</sup>	14.0	1.03	0.74	10.6	8.2	350
0.6 <sup>a</sup>	14.6	1.07	0.77	12.1	9.9	400
0.7 <sup>a</sup>	15.0	1.08	0.78	12.7	10.5	500
0.8 <sup>a</sup>	14.7	1.07	0.81	12.7	11.3	650
0.9 <sup>a</sup>	15.2	1.08	0.80	13.1	12.3	800
0.9 <sup>b</sup>	15.2	1.10	0.78	13.0	11.6	800

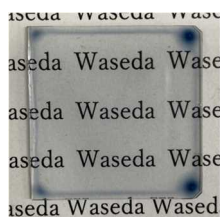
a) 25°C, 15 min静置後、160°Cで10 minアニーリング

b) 40°C, 5 min静置後、160°Cで10 minアニーリング

### 1.3 透明導電膜作製用塗布材料の開発

塗布工法によるペロブスカイト太陽電池の特徴を活かし、金属酸化物塗布型の透明導電膜材料を開発するパナソニック(株)と相補して、本項目では高分子TCO材料を検討した。

具体的には(a)市販PEDOT-PSSの酸処理、(b)有機分散PEDOTの適用、(c)気相重合によるPEDOTの形成である。市販PEDOTの硫酸処理では3,200S/cmと大きく導電率が向上するものの、強酸処理のため素子への適用は困難と考えられる。有機分散PEDOT(Orgacon Dry®)ではDMSO、EGに分散可能で容易に成膜可能だが導電率は低く留まった。一方、酸化剤Fe(OTs)<sub>3</sub>を成膜し、EDOT蒸気に暴露することでPEDOTを形成する気相重合では簡便に導電性高い薄膜を形成できた(図III-2-(イ)-(ii)-K-5)。材料コストはいずれも1000円/m<sup>2</sup>以下を満たした。さらに2021年度はカーボンナノチューブ(CNT)分散液をろ過・転写することで導電薄膜を形成した(図III-2-(イ)-(ii)-K-6)。膜厚90 nmで30Ω/Sqと高導電率を示したので透過率の向上を図っている(表III-2-(イ)-(ii)-K-4)。



図III-2-(イ)-(ii)-K-5. 気相重合 PEDOT 薄膜



名城ナノカーボン(eDIPS EC1.5)を選定  
分散剤, 濃度を最適化  
超音波(パス) 5-30 min

図III-2-(イ)-(ii)-K-6. CNT ナノシートの作成と転写

表III-2-(イ)-(ii)-K-4. PEDOT, CNT ナノシートと導電・光透過性

sample	Condition	Dopant	Sheet resistance Ω/Sq	Thickness nm	Conductivity S/cm	%T at 750 nm
市販PEDOT (Hereaus)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 処理	PSS /HSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	90	30	3,200	72
気相重合 PEDOT	-	OTs	45	145	1,600	82
有機分散 PEDOT (Orgacon®)	エチレングリ コール処理	PSS	1.9×10 <sup>3</sup>	30	130	93
SWCNT	転写	-	30	90	3,700	53
	転写	-	280	40	900	74

### 2. 実用化・事業化見通し

開口部向けBIPVの技術開発では、壁面設置と半透過性により低下する入射エネルギーを効率よくエネルギー変換するために、タンデム化による太陽電池の高効率化が鍵となる。また、建材としての外観や耐久性も同時に要求される。パナソニック(株)で開発するペロブスカイト・タンデム太陽電池の高効率化技術、BIPVモジュールの高耐久化技術ならびに低コスト化技術と相補して、早稲田大学ではワイドバンドギャップ・ペロブスカイトに適合した高分子HTM材料、塗布技術、透

明導電膜の研究開発を担っている。これまでに合成した高分子HTM材料の中から、無機ペロブスカイトに適合したHOMO準位の調節と長期耐久性を見込める無ドーブでのホール抽出能・移動性の観点から、標準物質となるポリ(3-ヘキシルチオフェン)を超えるHTM候補を3種選定できた。化学酸化重合で簡単に作成でき、コスト要件も満たしている(80円/m<sup>2</sup>)。パナソニック㈱との緊密な連携を通じて、セル特性や長期耐久性評価のフィードバックを受けながらHTM材料の改良を継続し、市販Spiro-OMeTADやPTAAを代替するHTM材料として見通しを立てることができている。

また、全無機組成(CsPbI<sub>2</sub>Br)インキの調製、バーコート一段塗布による製膜法の要件を確立し、800 nm厚み、短絡電流密度15 mA/cm<sup>2</sup>超を示す高品質の無機ペロブスカイト層の形成に成功した。タンデム素子構成ではセル間の透明電極のため効率低下が懸念されるが、スピコート法では到達できない800 nm厚みにより効率低下を低減できるとパナソニック㈱の期待度も高い。以上、高性能化に向けたBIPV材料の要素技術開発は順調に進捗している。

### 3. 波及効果

太陽光発電の主力電源化と ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル) の実現に向け、屋上だけでなく壁面等を活用した太陽電池設置面積の拡大は必須である。本事業で開発を進める高分子 HTM 材料、塗布技術、TCO 代替材料の改良は、高性能化に向けた BIPV 材料の要素技術として不可欠な基盤技術である。壁面・窓用のペロブスカイト太陽電池に対する強い期待は、展示会を通じた建設メーカーのニーズも含めて高い関心を得ており、再エネ社会のパワーリソースの革新技術として波及効果は極めて高い。

また、本事業で開発する高効率なホール輸送材料は、太陽電池だけでなく、ディスプレイや有機トランジスタなど各種電子デバイスの新素材としての注目度も高い。

### 4. 今後の展開

候補として絞り込まれた高分子 HTM 材料の大量合成法を速やかに確立し、パナソニック㈱で開発するタンデム型モジュールへの適用を見込んでいる。また一段塗布用インキの組成と塗布工程を共通基盤術として、パナソニック㈱で進めるインクジェット法への適用を試みる。基盤要素技術の開発はそれぞれ順調に進んでおり、今後注力すべき大面積化・モジュール化に向けて、変換効率を担保しながら各材料・部材の耐久性や調製法の簡便さ、歩留まりの視点から最適な基盤材料・セル構成を選択し改良を進める。コンソーシアム内の緊密な連携のもと、無駄の少ない共同開発により、最終目標を達成できると考えている。

### 5. 特許・論文・対外発表

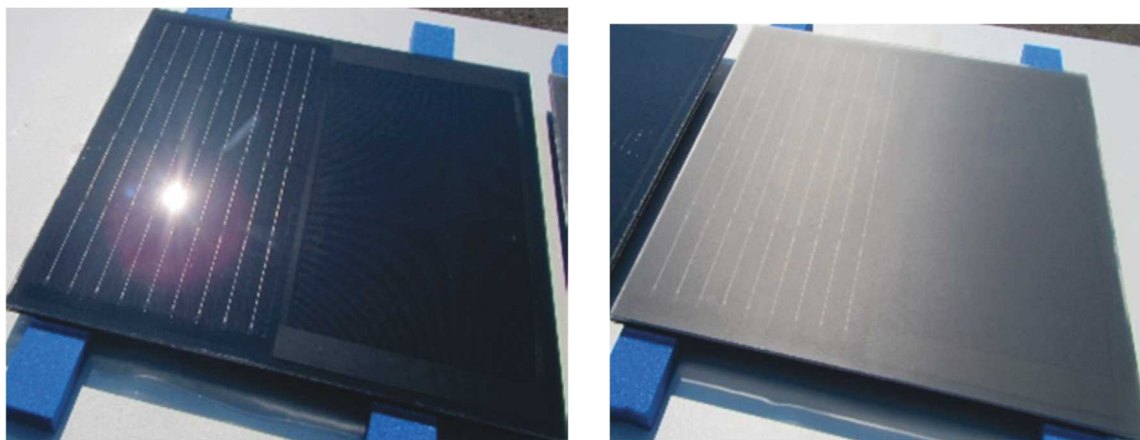
	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	1	0	0	1
研究発表・講演 (国内・審査有)	2 (0)	8 (0)	0 (0)	10 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(2)	(6)	(0)	(8)
(国際・審査無)	(0)	(2)	(0)	(2)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	1	1	0	2
受賞実績	0	1	0	1

(2022 年 6 月 20 日現在)

L ZEB 達成に向けた同時同量を実現する太陽光発電システムの実証  
(株式会社カネカ、(再委託先)大成建設株式会社、(再委託先)東京大学)

1. 成果詳細

建物壁面へ設置する太陽電池意匠改善として、広角化技術による意匠改善と、構成部材の色調均一化による意匠改善、および、それら両方を組み合わせた意匠改善手法を適用したサンプル製作を実施した。また、作成されたサンプルに対して、景観基準への適合性を評価した。評価に使用した比較サンプル写真を【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-1】に示す。さらに、景観基準への適合性を評価した目黒区の景観基準の抜粋を【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-2】に示す。景観基準への適合性については、目黒区都市整備部都市整備課開発係へ確認し、広角化技術を用いていないタイプでは、強調色と判別されるのに対して、広角化技術を用いた意匠改善タイプでは、基本色と判別することが可能であることを確認した。目黒区の景観基準では、強調色は対象壁面の1/5以下の面積にすることが求められ、基本色については4/5以上とすることが求められる。つまり、基本色に該当する意匠であれば、対象壁面により多く設置することが可能となる。以上の理由より、光の入射角広角化技術を用いることで、周囲環境への適合性を向上し、搭載可能設置面積の拡大に繋がることが確認できた。



【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-1】 景観条例適合性確認時サンプル写真  
(補足) 左：一般的なガラスを使用したサンプル  
右：光入射角特性広角化技術適用サンプル

### (1) 基本的な考え方

建築物等の色彩については、住宅地、住工混在地・商業地、特定区域ごとにマンセル表色系による色彩基準を定め、色相ごとに使用可能な色の明度と彩度の範囲を示します。

住宅地が主体となっている区の市街地特性を踏まえて、落ち着いた色彩の誘導を図ります。原色に近い高彩度の色彩は避け、空や樹木の緑、土や石などの自然の色となじむ暖色系で低彩度の色を基本とします。

特定区域（目黒川沿川、山手通り沿道、目黒通り沿道）については、それぞれの地域特性にふさわしい色彩を誘導します。

### (2) 配色割合

ア. 外壁基本色……・外壁の4/5は、基本色の基準に適合した色彩を用いることとします。

イ. 外壁強調色……・外壁に表情をつける場合などは、外壁各面の1/5まで、強調色の基準に適合した色彩を用いることを可能とします。

ウ. アクセント色……・外壁各面の1/20まで、色彩基準で示した明度、彩度の範囲外の色彩を用いることを可能とします。  
 ・ただし、強調色とアクセント色の総量は外壁各面の1/5以内とします。

エ. 屋根色……・勾配屋根を設ける場合は、屋根色の基準に適合した色彩を用いることとします。ただし、陸屋根には屋根色の基準は適用しません。

### (3) 色彩基準

ア. 住宅地の使用可能色

基準の適用部位	色相	明度	彩度
外壁基本色	0R~4.9YR	4以上8.5未満の場合	3以下
		8.5以上の場合	1.5以下
	5.0YR~5.0Y	4以上8.5未満の場合	5以下
		8.5以上の場合	2以下
その他	4以上8.5未満の場合	1.5以下	
	8.5以上の場合	1以下	
強調色	0R~4.9YR		4以下
	5.0YR~5.0Y		6以下
	その他		2以下
屋根色	5.0YR~5.0Y		4以下
	その他		2以下

なお、極端な、ストライプの塗装パターン、スポット状（水玉状）の塗装パターン、不規則な塗装パターン（迷彩色等）の使用は禁止します。

### 【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-2】目黒区の色彩に関する景観基準

（出典：目黒区景観計画に基づく届出および事前協議 届出の手引き2）

[https://www.city.meguro.tokyo.jp/gyosei/keikaku/keikaku/yasashi\\_machi/keikan/keikan\\_keikaku/todokedenituite.files/tebiki02.pdf](https://www.city.meguro.tokyo.jp/gyosei/keikaku/keikaku/yasashi_machi/keikan/keikan_keikaku/todokedenituite.files/tebiki02.pdf)

また、本事業目的である建物壁面への大量設置実証を実施するための太陽光発電システムについて検討を進めている。検討の中で、大量設置時の課題として、上記の色調の課題と、建物壁面の設置可能面積が案件毎に異なる課題と、建物寿命と太陽光発電システム寿命のミスマッチからくる将来の交換・更新への対応方針の課題を検討の中で抽出した。現在検討中案のイメージパース図および設置太陽電池意匠検討サンプルについて、【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-3】および【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-4】に示す。



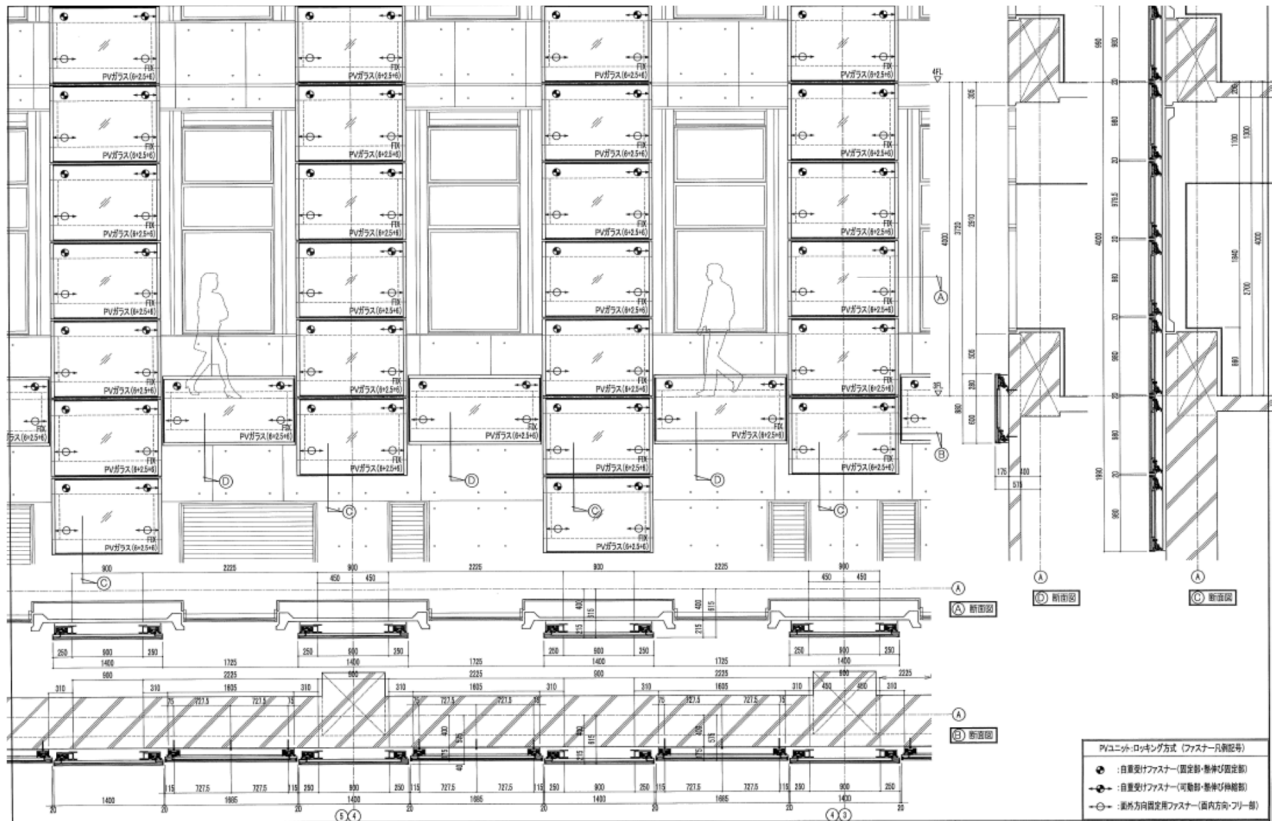
【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-3】  
太陽電池設置の検討パース図例



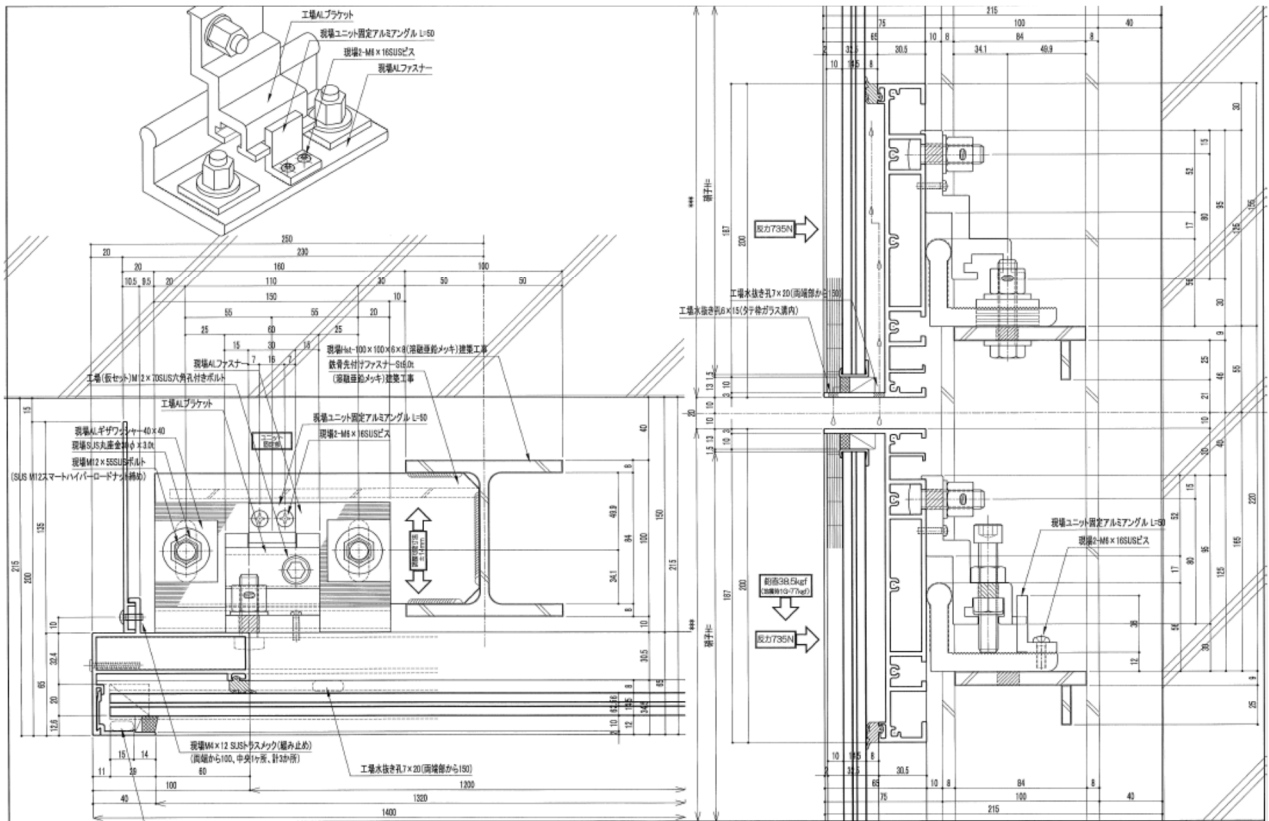
【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-4】  
意匠検討サンプル



実証検討向け太陽電池システムの検討を通じて抽出された課題に対しては、意匠改善することで、色調による面積制限を解決するとともに、太陽電池の取り付け工法をガラスファサード等で使用されるサッシ工法し、かつ、一定範囲サイズの太陽電池設置が可能な可換性を有した取付方法を検討することで解決を図る。現在検討中の設置方法案について、【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-5】および【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-6】に示す。図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-5および図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-6に示すようにメンテナンス性や交換容易性を確保するため、個々の太陽電池単体で取り外しが可能な工法を選択している。また、太陽電池裏面支持位置を可変可能な支持構造とすることで、一定太陽電池サイズ内の汎用性を向上させている。



【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-5】実証システムの太陽電池設置現状案



【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-6】 実証システムの太陽電池取付現状案

最後に、建物壁面の太陽電池の設置候補の一つであるPC（プレキャストコンクリート）への太陽電池設置について、工法検討中である。工法検討にあたっては、実際の建物の一部を再現したPC構造のモックアップを作製し、工法・意匠の両面から評価を実施している。【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-7】に検証に使用したモックアップサンプル外観写真を示す。外観写真からも分かるように、実際の建物の一部を再現することで、その他外壁材との見え方の比較、連結部の連動性など、実意匠に近い形で評価することができた。また、太陽電池の意匠については、適用する意匠改善手法で特徴が大きく異なる。左のタイプについては、コンクリートなどの表面のようにマット調に見えるのに対し、右のタイプでは、光沢感があることでガラスファサードを主体として建物の意匠に近いと言える。以上のように、適用する技術によって、太陽電池の意匠が異なるため、建物のコンセプトに近い意匠を選択肢することができることを確認した。



【図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-L-7】 実証システムの太陽電池取付現状案

## 2. 実用化・事業化見通し

本事業にて検討中の太陽光発電システムは、住宅隣接地などの光害問題が発生しやすい地域にも設置可能と考えている。また、建物構造としても、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造に適用可能と考えており、本事業での実証検討をモデルケースとして壁面への太陽電池設置について広く公開することで、建設会社との協業により、非住宅案件の実案件による検証を経て、事業化につながると考えている。

## 3. 波及効果

脱炭素社会の実現に繋がるオフィスビル当の建物のZEB化の加速に貢献する。太陽電池発電システムが、単なる太陽電池パネルではなく、発電する外装材と広く認識され、建物設計時に標準搭載されることで国内のサプライチェーンが拡充されることを期待する。

## 4. 今後の展開

中間評価後、検討中の太陽光発電システム実証の実現に向けた詳細設計、関連省庁への届け出、周辺住民との合意形成を図り、2023年度完成に繋げる。また、完成後においては、発電実証を通じて、壁面発電の有用性を示し、実案件での検討等に繋げる。

## 5. 特許・論文・対外発表

該当なし。

(2022年6月20日現在)

## M デザイン性を考慮した後付け可能な新築・既築向け BIPV システムの実証 (株式会社 LIXIL)

### 1. 成果詳細

BIPV の潜在的課題解決と脱炭素化への貢献のため、BIPV ロールスクリーンを提案し、研究開発を実施した結果、以下の成果を得た。

#### 成果 1 フレキシブル BIPV モジュールの実現

フレキシブル PV セルとファブリック素材である日射遮蔽物とを統合し、フラットネスで巻取り性のある安全なフレキシブル BIPV モジュールを開発した (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-1)。また、可動する巻取り部 (駆動部) からのスムーズな電力取出し機構も構築できたことで、巻取り可能で電力も取出せるフレキシブルな BIPV モジュールとしての BIPV ロールスクリーンを実現した。

#### 成果 2 デザイン性や視界の自由度確保を提供

デザイン性を考慮した BIPV ロールスクリーンとして紫、緑、青、黄、茶、銀、薄銀および白の豊富なカラーバリエーションを実現した (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-2)。また、可動可変性付与で外観デザインへの配慮や屋内からの視界確保など自由度を提供できた。

#### 成果 3 施工性やメンテナンス性に対する課題を解決

新築既築を問わず屋内側から容易に設置可能で電気工事が不要なシステムを実現した。取付施工は従来の電動ロールスクリーンとほぼ変わらない施工容易性を提供できた (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-3、4)。

#### 成果 4 ユーザビリティを向上

フレームに内蔵された充放電回路とフレームに設けたユーザーインターフェース (USB ポート) を開発したことにより、独立電源として自家消費での利便性が向上した (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-5)。また、蓄電機能搭載により災害時などへの備えとしても有効活用が可能となる。

#### 成果 5 窓まわりの熱的性能向上を実現

BIPV ロールスクリーンと端部レール構造により、断熱性を 44.1%向上し<sup>※2</sup>、日射熱取得率は発電時に 19.1%向上した<sup>※3</sup>。発電と熱移動の制御により、脱炭素化への効果が明らかとなった。

※2: 既築の窓 (透明単板ガラス 3mm) を対象とし、BIPV ロールスクリーンシステムの有無で評価

※3: 上記※2に加え、素材+厚さ+色などが同じロールスクリーンと BIPV ロールスクリーンシステムの発電時で評価

#### 成果 6 屋内設置型 BIPV の出力評価方法の開発 (斜入射含む)

屋内設置型 BIPV としてガラス越しかつ斜入射特性も踏まえた評価方法を開発し<sup>※4</sup>、<sup>※5</sup>、本 BIPV ロールスクリーンの評価に適用できた (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-6)。

※4: 石井久史: 多機能 PV ロールスクリーンの研究開発 日本建築学会 2021 年度学術講演会大会 (東海) 2021 年 9 月

※5: 石井久史: 屋内設置型 BIPV の入射角別出力特性 -PV ロールスクリーンを使用した場合-, 日本建築学会 2022 年度学術講演会大会 (北海道) 2022 年 9 月

#### 成果 7 ワイヤレスによる制御、操作及びデータ取得の実現

Wi-Fi、PC サーバーおよびクラウドなどを活用することで、PC 端末などから、ワイヤレスで BIPV ロールスクリーンの開閉状況、開閉操作、発電状況、各種アラート情報などの操作、取得、確認が行える一連の制御システムを本実証用に開発した (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-7)。

#### 成果 8 開発した BIPV ロールスクリーンを既存窓部に設置し実証実験開始

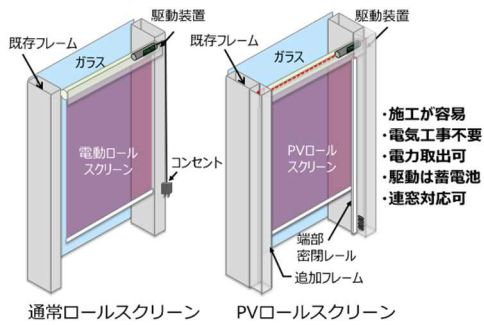
実証実験用に開発した BIPV ロールスクリーンシステム 99 台 (発電用、非発電用含む) を当社ビルの既存窓部分に後付け施工を行い、実証実験を開始した (図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-8)。実証実験は 2023 年 1 月末ごろまで実施する予定である。



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-1  
BIPV ロールスクリーン(標準タイプ)外観



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-2  
BIPV ロールスクリーンシステム概略



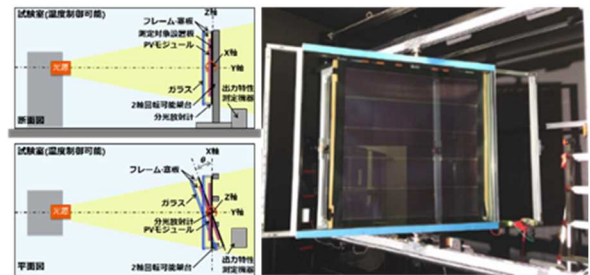
図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-3  
従来品と BIPV ロールスクリーンの比較



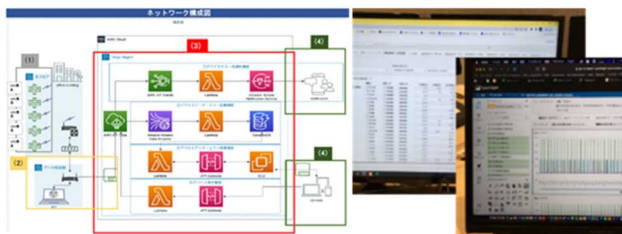
図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-4  
BIPV ロールスクリーンの取付施工時



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-5  
カバーフレーム内蔵充放電回路+USB ポート



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-6  
屋内設置型 BIPV の IV 評価方法 (斜入射考慮)



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-7  
ワイヤレスでの制御、操作、データ取得方法の開発



図Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-8  
実証実験開始の様子

表Ⅲ-2-(イ)-(ii)-M-1 成果一覧

No.	開発期間	個別テーマ名	委託先	テーマ概要	目標
	2020～2022	① フレキシブルBIPV モジュールの実現 ② デザイン性および視界の自由度確保 ③ 施工性メンテナンス性に対する課題解決 ④ ユーザビリティ向上 ⑤ 窓の熱的性能向上 ⑥ 屋内設置型BIPV の出力評価方法の開発 ⑦ ワイヤレス制御操作 ⑧ 実証実験開始	無し	①フレキシブル PV セルとファブリック素材である日射遮蔽物とを統合し、フラットネスで巻取性のある安全なフレキシブル BIPV モジュールを開発する。 ②デザイン性を考慮した BIPV ロールスクリーンとして色付き PV モジュールを実現する。また、可動可変性付与で外観デザインへの配慮や屋内からの視界確保など自由度を提供する。 ③ 新築既築を問わず屋内側から容易に設置可能で電気工事が不要なシステムを実現する。 ④フレームに内蔵された充放電回路とフレームに設けたユーザーインターフェース (USB ポート) から電力を取出せるようにすることで、独立電源として機能することを目指す。 ⑤BIPV ロールスクリーンと端部レール構造により、熱的性能を向上させる。 ⑥屋内設置型 BIPV としてガラス越しかつ斜入射特性も踏まえた評価方法を開発し、BIPV ロールスクリーンの評価を実施する。 ⑦Wi-Fi、PC サーバーおよびクラウドなどを活用することで、PC 端末などから、ワイヤレスで BIPV ロールスクリーンの開閉状況、開閉操作、発電状況、各種アラート情報などの操作、取得、確認が行える一連の制御システムを本実証用に開発する。 ⑧実証実験用に開発した BIPV ロールスクリーンシステム 99 台 (発電用、非発電用含む) を当社ビルの既存窓部分に後付け施工を行い、実証実験を開始する。	①フレキシブルな BIPV モジュールとしての BIPV ロールスクリーンを実現した。 ②紫、緑、青、黄、茶、銀、薄銀及び白のカラーバリエーションと可動可変性を有する PV モジュールを実現した。 ③屋内側から容易に設置可能で電気工事が不要なシステムを実現した。 ④フレームに内蔵された充放電回路と USB ポートにより、独立電源として機能するシステムを構築できた。 ⑤断熱性を 44%、日射熱取得率を 19%向上できた。 ⑥屋内設置型 BIPV としての評価方法を開発し、BIPV ロールスクリーンの評価を実施した。 ⑦ワイヤレスで BIPV ロールスクリーンの開閉状況、開閉操作、発電状況、各種アラート情報などの操作、取得、確認が行える一連の制御システムを本実証用に開発した。 ⑧実証実験用に開発した BIPV ロールスクリーンシステムを当社ビルの既存窓部分に後付け施工し、実証実験を開始した。

## 2. 実用化・事業化見通し

本実証事業では、当初計画していた実証用 BIPV ロールスクリーンの構築は計画通り実現できたが、事業化に向けては、スクリーン部の薄膜化による構成見直しやスクリーンの更なるフラットネス化及び電力取出部の安定性を向上する必要がある。しかしながら、本事業によって得られた知見から、追加開発に要する時間は大幅に短縮されていると考えている。また、充放電回路およびユーザーインターフェースも含むシステムとしての仕上がりは、情勢変化による影響を直に受け、設計内容の変更を余儀なくされたため、十分とは言えない状況にある。したがって、事業化に向けては、さらに一段の開発が必要になると現時点では考えている。

これらの結果を踏まえ、本事業終了後に 1 年から 2 年程度の追加開発を実施し、事業化への一つの判断となるテストマーケティングにより感触をつかんだ上で、市場投入を目指したい。

## 3. 波及効果

BIPV は、通常の屋根置き型太陽光発電設備とは異なり、建材としての要求性能が強く求められ、メンテナンスやデザイン性による課題から、現時点ではほとんど採用されていない。BIPV モジュールは、カーテンウォールなどのフレームに嵌め込むため、破損や故障などの時に交換や取外しが難しく、開口部では PV セルが固定配置されることで視界・眺望に影響する。また、開口部は季節や天候に応じて室内側にエネルギーを取り込める反面、設備機器の負荷増大や快適性を損なう場合もあり、開口部周

りでエネルギーを制御できることが望まれる。本研究開発では、これらの課題を BIPV ロールスクリーンによって解決することを提案した。特に屋内側から簡便に取り付けられる BIPV ロールスクリーンは、施工の簡便さやメンテナンスへの対応容易性などから BIPV 導入の障壁となっていた課題を取り除き、簡便に窓周りの環境性能を向上させ、発電した電力を自家消費できることから、脱炭素化に向けた簡便、かつ、アイテムとなり得る。この BIPV ロールスクリーンは、新築既築を問わず設置することが可能なので、特に窓部のエネルギー損失の大きい既築ビルでの脱炭素化に貢献できるものと考えている。さらに、発電により近赤外線領域の波長を吸収し電力へ変換するので日射熱取得率の改善により屋内の空調負荷も低減でき、近赤外線の電力変換により顕熱負荷低減でヒートアイランド現象の緩和にも役立つ。こうした可能性から、脱炭素化に向けた一つのアイテムとして社会実装に向けて、その意義は大きいと考える。

#### 4. 今後の展開

事業化に向けて本実証事業で得られた知見を最大限活用し、本実証事業終了後に1年から2年程度の追加開発期間を得て、BIPV ロールスクリーンの薄膜化による部材構成の見直しやスクリーンのフラットネス化実現と電力取出部の安定性向上及びコストダウンを図るための設計変更を行い、製品精度を向上させる。さらに、充放電回路およびユーザーインターフェースも含むシステムの在り方を再構築する。これらの結果を踏まえ、事業化への一つの判断となるテストマーケティングにより感触を掴んだ上で市場投入を目指したい。本開発品は、従来 BIPV が持つ参入障壁を大幅に改善でき、窓部での機能集積化による多機能性により、脱炭素化に貢献できるため、以下①-⑦のプレーヤーにとってメリットがあると考えている。

- ① 施主・オーナー：多機能で ZEB や災害時 BCP への対応が可能のため建物価値および利便性が向上。メンテナンス性も含めたコストメリットもある。
- ② 建築家：ファサードのデザイン性を維持ながら環境負荷低減ができる。
- ③ 施工者：屋内側からの設置のため取付け作業が容易。システム化商品のため工事品質管理が容易。
- ④ 建物管理者：屋内側からの作業のため足場架設も要らず、メンテナンスが容易。
- ⑤ テナント：従来のブラインドやロールスクリーンと同様に自由に可動可変でき取扱いが簡単。
- ⑥ 製造者：開発品を製造提供すれば良く、現場ごとの設計製作が不要のためコスト抑制効果大。
- ⑦ 国：カーボンニュートラルに向けた基本政策の実現に貢献できる。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	2 (1/1)	6 (5/1)	0 (0/0)	8 (6/2)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	2 (1)	0 (0)	2 (1)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(1)	(0)	(1)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)





(iii) 移動体用太陽電池の研究開発

【A 超高効率低コストセル・モジュール技術開発】(シャープ株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
超高効率セル・モジュール技術開発 ①. III-V多接合セル・モジュール開発 (i) 曲面モジュール開発	変換効率33%と同等のセル(化合物2接合セル+SiセルもしくはCIGSセル)を用いた3D曲面モジュール(曲率半径1mを含む)の作製	<ul style="list-style-type: none"> <li>曲面モジュール構造検討及びプロセス条件出しを実施</li> <li>Siセルを用いて、実車輻サイズの曲面モジュールの作製。曲面モジュールサイズ: 100cm×150cm、最小曲率<math>r=2.7</math>。屋外発電評価用モジュールとして提供準備完了(開発項目III-①に使用)</li> <li>(化合物2接合+Si、化合物2接合+CIGS)モジュール構造検討着手。モジュール形状、およびモジュール内セルレイアウト決定</li> </ul>	△	メカニカルスタック構造での、最小曲率0.65mの小サイズモジュールの検討で基本的な構造を決定済み。また、Siセルのみでの大サイズ(100cm×150cm)で大サイズ化に対するプロセス確立済。両者をあわせてモジュール化することで目標達成見込む。
超高効率セル・モジュール技術開発 ①. III-V多接合セル・モジュール開発 (ii) 高効率モジュール開発	変換効率33%のモジュール作製	<ul style="list-style-type: none"> <li>化合物3接合型: セル充填率向上および表面保護材下での分光感度最適化の効果を検証し、それぞれ従来比で2%の効率向上。300mm□サイズのモジュールを作製し、モジュールとしての最高効率となる変換効率32.65%(産総研測定)を得た。</li> <li>化合物2接合+Si or CIGS: 豊田工業大学Grおよび出光興産で開発中のボトムセルの評価用のフィルターを作製し両機関に提供。セルレイアウトを決定。</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>化合物3接合型: テーマI-①-(iii)の成果を3接合型の上段2接合に適用しセル効率を上げることで目標達成を見込む。</li> <li>化合物2接合+Si or CIGS: 化合物2接合についてはテーマI-①-(iii)の成果でセル効率30%、モジュールで28%を見込む。これに、2接合下で5.5%を見込む両者のセルを合わせて目標達成を見込む。</li> </ul>

<p>超 高 効 率 セル・モジュール技術開発 ①. III-V多接合セル・モジュール開発 (iii)セル高効率化 (化合物セル)</p>	<p>4インチウエハからELOで作製した25cm<sup>2</sup>以上の透過型2接合セル (InGaP/GaAs)構造で変換効率30%</p>	<p>・ 中間目標を満たすためのV<sub>oc</sub>を確認 (InGaPセル=1.47V、GaAsセル=1.08V、2接合型セル=2.501V (従来比+0.013V)) ・ 実用サイズ (約22.8cm<sup>2</sup>) の透過型セルでも同等の結果を得た。</p>	<p>△</p>	<p>・ 現在小サイズで得られている29.8%のセル構造の反射防止膜を適正化による効率向上。現在までの開発で小サイズと同等の電気特性が得られることが確認できている大サイズへの適用、テーマII-①で基本的条件を抽出済みのELO法の適用で目標達成を見込む。</p>
<p>低コストプロセス技術開発 ① 低コスト成膜装置開発</p>	<p>当社としての目標設定はなし (他機関で作製されたサンプルの評価支援を行う)</p>	<p>当社としての取組事項なし</p>	<p>—</p>	
<p>低コストプロセス技術開発 ② 基板再生装置開発</p>	<p>多数枚処理可能な装置設計のための要素技術開発完了</p>	<p>・ 剥離装置開発：単枚処理で安定剥離ができる条件を抽出。複数枚同時剥離検討治具を作製し、複数の同時剥離検討を開始。剥離後の薄膜と基板の分離工程の基本評価完了。 ・ 基板再生プロセス：検討用CMP装置を導入し立ち上げ完了、基本性能を確認。スラリー種、研磨パッド、研磨条件などを変更した基礎検討を実施。</p>	<p>△</p>	<p>・ 基本的条件抽出が終了しているので、評価枚数増による各種不安定要因の抽出、およびそれらの安定化条件の対策を実施し目標達成を見込む。</p>
<p>移動体用モジュール発電量評価・構造最適化設計 移動体用モジュールの屋外実験環境下における評価・解析技術の確立</p>	<p>移動体用モジュールの屋外実験環境下における評価・解析技術の確立</p>	<p>・ 作製した曲面形状モジュールを屋外評価用に宮崎大学に提供 ・ 車両取り付け評価用モジュールの形状を決定</p>	<p>△</p>	<p>・ 曲面モジュールの車両への取付方法は決定済み。取付後評価、解析を実施し今年度の目標達成を見込む</p>

\* 1 達成度

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【B 高効率多接合薄膜セル】(国立大学法人東京大学(再委託先:タカノ株式会社))

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
① III-V 多接合セル・モジュール開発 ・ InGaP/GaAs トップセル	逆方向成長 InGaAs/GaAs 2 接合型セルにおける開放電圧 2.5 V, 変換効率 30%を達成する。	デバイスシミュレーションによってリアヘテロ構造サブセルの最適化構造設計を実施し、SHARP と共同でセルの開発を行った結果、既に中間目標の値を達成。最終目標の達成に向けて広帯域反射防止膜の設計を含めて進行中。	○	
① III-V 多接合セル・モジュール開発 ・ GaInAsN ボトムセル  (東京大学)	GaInAsN ボトムセルで GaAs 配置下において $J_{sc} = 14 \text{ mA/cm}^2$ , および $V_{oc} = 0.45 \text{ V}$	格子整合系 GaInAsN/GaNAs MQW 構造の設計、試作、並びに 3 接合太陽電池のボトムセルへの実装を行い、2 端子型 3 接合セル動作を実証した(現状ボトムセル $V_{oc} = 0.32 \text{ V}$ )。また、ELO によるクラックレス剥離を実証した(10mm $\square$ セル)。	△	MQW 構造の最適化(タイプ II 構造)により、MQW 層内での再結合を抑制し $J_{sc}$ , $V_{oc}$ 向上を図り中間目標達成を目指す。
低コストプロセス技術開発 ②. 基板再生装置開発	量産プロセスのコンセプトを確立。 IMM セルの剥離に向けた課題抽出と装置コンセプト検討。	複数枚処理に向けた装置コンセプト検討と装置化を行った。 ELO 薄膜品質評価技術の開発において、発光検出部の 1ヘッド化、高 S/N 化、4 インチ撮像への拡張化、3J セルの 3 層画像統合技術を確立した。 IMM セルの ELO に向け、応力制御層の検討を行い、ELO 時のクラック発生頻度の低減化を確認した。	○	

\*1 達成度

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【C 超高効率ボトムセル開発 (CIS)】(出光興産株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
C I S ボトムセル技術開発	G a A s フィルター下変換効率 5.5%	G a A s フィルター下変換効率 4.2%を確認。	△	バンドプロファイルの改良による長波長領域の外部量子効率の改善。アルカリ金属の添加による特性改善
C I S ボトムセル技術開発	30cm x 30cm モジュール用ボトムセル作製	C I S セルの大面積化に向けた、瓦積み接続によるモジュール構造を開発。	○	

\*1 達成度

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【D 超高効率多段接合モジュール開発】(学校法人トヨタ学園豊田工業大学、(再委託先: 学校法人明治大学、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学))

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
②. 超高効率ボトムセル開発	軽量で曲面追従可能な変換効率 33%以上の超高効率太陽電池モジュール実現のために必要なボトムセルの共通基盤技術を確立する。GaAs フィルター下で効率 5.5%となるシリコンセルを開発し、プロジェクト連携企業の技術開発を支援して、モジュール効率 33%の実現に貢献する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>高精度 Si ヘテロ接合太陽電池 (SHJ) セル試作プロセスを確立。SHJ ボトムセル高効率化・セル構造最適化検討に注力し、1-sun 下セル効率 23.6%, GaAs フィルター下セル効率 5.49%達成。中間目標 (GaAs フィルター下効率 5.5%)をほぼ達成した。</li> <li>上記 SHJセルのモジュール化方法を検討し、ラミネート後もベアセル特性をほぼ維持 (CTM≒100%) できるセル間接続法を確立した。</li> <li>PV-EV の走行距離、CO<sub>2</sub> 排出量削減、充電コスト低減効果を分析し、モジュールの高効率化が走行距離、CO<sub>2</sub> 削減等に大きく影響することを明確にした。さらに、実証車走行試験データの解析から、モジュール効率 35%で晴天時の PV-EV 走行が 50km/day 以上可能であることを示し、中間目標 33%、最終目標 35%の妥当性を示した。</li> </ul>	○	

<p>②. 超高効率ボトムセル開発 (明治大学：再委託)</p>	<p>物理化学評価の側面からセル・モジュール開発を支援することによって、軽量で曲面追従可能（想定サイズ 30cm x 30cm、曲率半径 1m）な変換効率 33%以上の超高効率太陽電池モジュールの実現に貢献する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・曲面追従性に優れたタンデムセル用の湾曲に強いウエハ製造プロセスの開発を実施。ダメージエッチングはウエハの柔軟性を向上させるが、テクスチャ形成に伴って大きく低下すること、さらにそのあと混酸エッチングを施すことによって改善すること、などを明らかにし、SHJ 構造セルにおいて曲率半径 1m 以下を達成した。</li> <li>・SHJ プロセスの高効率化のため、プラズマ CVD により誘起される結晶 Si へのダメージとその深さ分布を評価し、200°C30 分のアニール処理ではダメージが残存することを確認した。</li> <li>・積層数や混晶の組成比によりバンド構造を制御できる TMD に着目し、MoS<sub>2</sub> のキャリア選択層としての可能性を検討した結果、MoS<sub>x</sub> がキャリア選択層の中でも電子コンタクトとして機能する可能性が高いことを見出した。</li> </ul>	○	
<p>②. 超高効率ボトムセル開発 (名古屋大学：再委託)</p>	<p>表面再結合電流密度 <math>J_{0front}</math> および裏面再結合電流密度 <math>J_{0rear}</math> を 20 fA/cm<sup>2</sup> に低減する。また、長波長領域(1000nm 以上)における内部量子効率 (IQE)を 50%以上に高める (IQE@1100nm &gt; 50%) 光及びキャリア閉じ込め技術を開発する。それによって、軽量で曲面追従可能な変換効率 33%以上の超高効率太陽電池モジュールの実現に寄与する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・長波長感度を極限まで高める光閉じ込め構造の作製法開発を実施。新設備導入によりナノインプリント (NIP) 光閉じ込め技術開発を加速。NIP 光閉じ込め構造を導入した SHJ 太陽電池の反射率は、導入しない場合に比べて 1000~1200 nm の近赤外領域で 9%低く、NIP 光閉じ込め構造が近赤外光の光路長を延伸していることが示唆された。また、近赤外領域での短絡電流密度および外部量子効率の増加も確認した。</li> <li>・結晶シリコン表面再結合抑制のための高品質キャリア選択材料の開発を実施。TCO と p 型アモル</li> </ul>	○	

		<p>ファスシリコン間のキャリア輸送を改善するボロンデルタドーピング (BDD) プロセスを開発して、再結合電流を <math>33.5\text{fAcm}^{-2}</math> から <math>16.8\text{fAcm}^{-2}</math> に減少させるとともに接触抵抗も約 3 分の 1 に低減。ip 面再結合電流密度中間目標達成。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>シリコンナノ結晶とシリコン酸化膜を複合化させた NATURE contact を開発。さらに水素プラズマ処理 (HPT) プロセスを採用してパッシベーション性能を向上させ、再結合電流を <math>8.8\text{cm}^{-2}</math> まで減少させることができた。</li> </ul>		
--	--	--	--	--

\* 1 達成度：

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

**【E 低コスト成膜装置開発】(大陽日酸株式会社)**

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
低コスト成膜装置開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>6 インチ基板に成膜できる HVPE 装置の設計、製作。</li> <li>4 インチ基板以上の GaAs 成膜の実現。</li> <li>4 インチ基板以上の GaAs 成長において、Ga および In 金属原料の内部供給による原料切り替え機構の実証。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属原料外部供給システムでは高速成膜上での課題を明確にした。これより、内部供給で高温での原料高速切替え機構を考案し、装置改良設計を完了。製作に着手した。</li> <li>6 インチ対応量産型 HVPE 装置コンセプトを策定し、シミュレーションを用いた炉内構造の検証を実施した。</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>6 インチ対応量産型 HVPE 装置を製作し、内部供給による原料切り替え性能と初期成膜を確認する。</li> <li>反応炉の構成は反応シミュレーション及びガス流れシミュレーションを併用し、確実性を高めた設計としており、中間目標は達成の見込みである。</li> </ul>

\* 1 達成度

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【F 移動体用モジュール評価・構造設計技術開発】(国立大学法人宮崎大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
①移動体用モジュール発電量評価・構造最適化設計	・移動体用モジュールの屋外実環境下における評価・解析技術の確立	・典型的な車体屋根形状において、被覆可能な太陽電池面積を定量的に明らかにした ・ストリング構成最適化のための評価手法や微分幾何学を用いた曲面太陽電池発電出力評価手法を開発した	△	評価法の大枠は完成したが、セル間の隙間による損失など、細部の検討の必要がある。そのため、実際のセル配置方法等を考慮したうえで発電への影響を定量化する。
②移動体用モジュール発電量予測	・実証データに基づく移動体用モジュール発電量予測のための要素技術開発	・建物分布が移動体用モジュール発電量に与える影響について定量的に明らかにした ・建物分布をもとにした移動体周辺の3次元曲面日射量予測手法を開発した	△	日射量のモデル化は完成したが、発電量予測のための多接合セルにおけるミスマッチング損失が考慮されていない。高速スペクトル計測器を用いて、ミスマッチング損失を定量化する。

\*1 達成度

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

**【G 低コストエピ・接合技術開発】(国立研究開発法人産業技術総合研究所)**

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
①低コスト成膜装置開発	・ InGaAs/GaAs 2 接合セルで変換効率 27%以上。	・ 世界で初めて高品質 Al 系材料の成長に成功。InGaAs/GaAs 2 接合セルで変換効率 28.3% (HVPE として世界最高)	◎	
	・ 量産実証型 HVPE において、4 インチ以上の GaAs 成膜の実現。	・ 量産実証型 HVPE 製作中。中間目標達成予定。	△	大陽日酸からの装置の納入、立ち上げ後、早急の実施予定。
③低コスト接合技術開発	・ CIGS/GaAs 間の接合抵抗 $<2\Omega\text{cm}^2$	・ 接合抵抗 $1\Omega\text{cm}^2$ 以下達成。GaAs 系/CIGS 3 接合セルで変換効率 28.1% (世界記録) 達成	◎	
	・ 表面ラフネス 200nm の CIS ボトムセルに GaAs 系トップセルを接合する要素技術構築。	・ 粘着剤利用新規スマートスタックで、ラフネス 200nm の CIS/GaAs 接合要素技術構築	○	
	・ 2 インチ GaAs セルと CIGS ボトムセルの接合実証。	・ 2 インチの 1/4 のサイズで接合実証済。中間目標達成予定	△	東大の ELO 装置で剥離したトップセルを使用することで、2 インチの接合実証可能。

\* 1 達成度

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

**【H 実用サイズペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池実現のためのプロセス技術開発】(国立研究開発法人産業技術総合研究所、(再委託先：国立大学法人山形大学))**

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
実用サイズペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池実現のためのプロセス技術開発	実用サイズのペロブスカイト・シリコンタンデムセルに対応したペロブスカイト層塗布技術を構築する。 上記技術を用いて作製したペロブスカイトセルにおいて変換効率 17% (Si 基板上、面積約 $100\text{cm}^2$ ) を得る。	100 mm 角ガラス基板上に貧溶媒法を用いてトリプルカチオン組成のペロブスカイト層を面内で均一に塗布する技術を構築した。 ガラス基板上のワイドバンドギャップ (1.7 eV) のセル(面積 $1.04\text{cm}^2$ )において変換効率 18.9%を達成した。 開発した塗布プロセスにより 100 mm 角基板上に、ほぼ均一な特性を有するペロブスカイトセルを作製し、小セル部分(基板上 3 mm 角)にて変換効率 17.0%を達成した。	○	

\* 1 達成度

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達



【I 高効率タンデム型太陽電池モジュールの開発】(株式会社カネカ)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
① 高効率タンデム型太陽電池セルの技術開発	モジュール変換効率25%を達成するために必要な高効率セル技術を確立する。	21年度までの取り組みにより、ボトムセルの最適化に加え、トップセルの高品質化や中間層、電荷輸送層の改良により、小サイズセルで変換効率28.3% (第三者機関測定) および29.0% (社内測定) を得ている。 ボトムセルの表面形状制御による低反射構造設計とタンデムセル作製による検証を行い、電流向上等により更なる高効率化が実現できる見通しを得た。	○	
② 高意匠性曲面モジュールの技術開発	モジュール効率25%以上、3D曲面 (球面曲率半径1mを含む)	タンデムセル開発の予備検討として、ボトムセル (シリコン太陽電池) を用いて曲面モジュールの試作を実施。作製時の課題抽出とその対応手法を開発した。 曲面モジュールの評価技術開発の一環として、屋外環境での実発電量の測定系の構築に加え、屋内での評価方法も確立した。 これまで得たデータをもとにペロブスカイト太陽電池とシリコン太陽電池の組み合わせにより、25%以上の変換効率が実現できる設計を得た。	△	

\*1 達成度

◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

## A 超高効率低コストセル・モジュール技術開発（シャープ株式会社）

### 1. 成果詳細

#### I. 超高効率セル・モジュール技術開発

##### I-①. III-V多接合セル・モジュール開発 I. 低コストセル技術開発

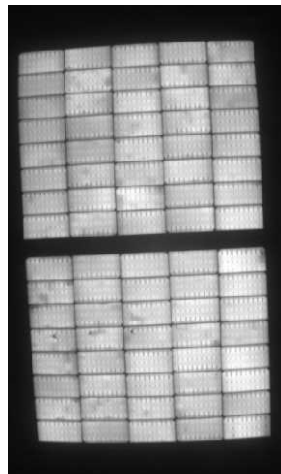
###### (i) 曲面モジュール開発

曲面にセルを密着させる際に、封止材への気泡混入やセル割れを防止するために、サブアッセンブリ+真空バック方式を検討した。

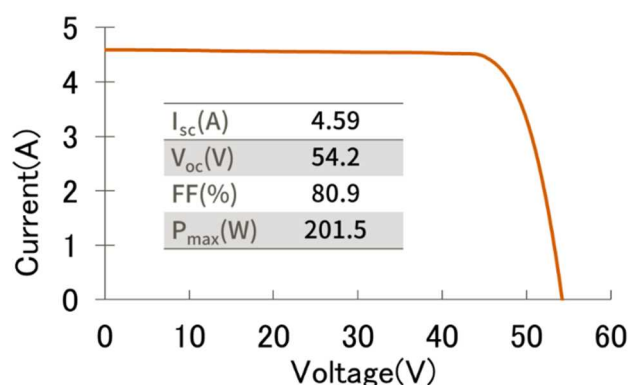
(Siセルでの検討) 大サイズ化の課題抽出を目的に、実車両に実際に使用されている形状を模した、曲率、ルーフサイズ(150cm×100cm、最小曲率 $r=2.7$ )を持つガラスを用いて検討を実施した。結晶Siセル(出力平均2.6W)を40直列に接続し封止したサブアッセンブリモジュール(650mm×900mm)を2枚作製し、真空バック方式で曲面ガラスにラミネートし曲面モジュールを作製した。図III-2-(イ)-(iii)-A-1に外観、図III-2-(イ)-(iii)-A-2にEL像、図III-2-(イ)-(iii)-A-3に電気特性を示す。セルの割れは確認できず、外観も良好で、また電気特性もほぼ期待値どおりのものが得られた。



図III-2-(イ)-(iii)-A-1. 曲面モジュールの外観図



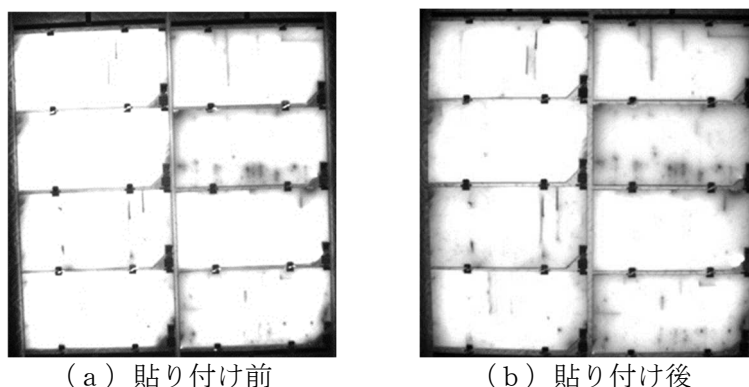
図III-2-(イ)-(iii)-A-2. 曲面モジュールのEL像



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-3. 曲面モジュールの電気特性

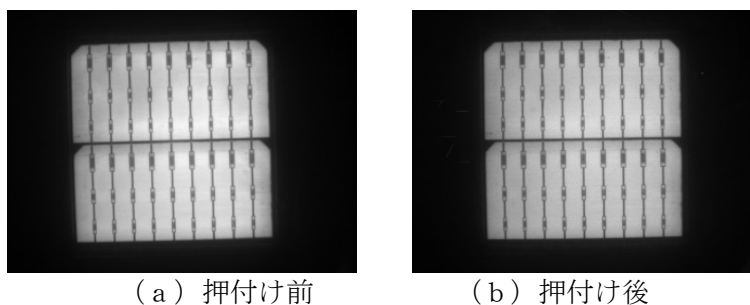
(メカニカルスタック構造の検討)

S iセルのみでの検討で取り組んだサブアッセンブリ+真空バック方式による曲面タンデムモジュールの開発に着手した。検討は曲率半径が最小値0.65m(目標の曲率半径1mより厳しい値)を含んでいる曲面ガラスで行った。トップセルとなる化合物2接合型セルを4直列×2並列の配列でラミネートしたサブアッセンブリモジュール(約15cm×15cm)を、ガラスに接着したものの接着前後のEL像を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-4に示す。接着前後で変化はなく、良好な貼り付けを実現できた。

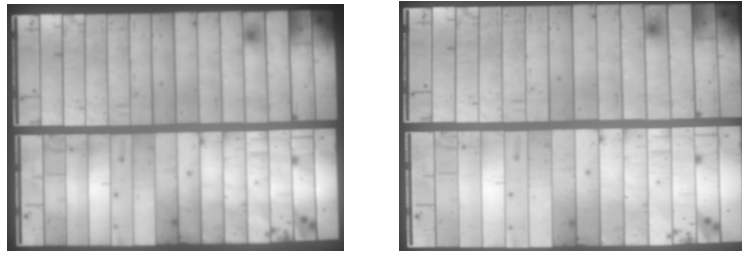


図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-4. 曲面ガラス基材への貼り付け前後のEL像

次にボトムセルとなるS iおよびC I Sセルについて検討を行った。前述したテスト用曲面ガラス基材に豊田工業大学で作製したセルを当社で封止したS iのサブアッセンブリ(約15cm×15cm)と、出光興産株式会社で作製したC I Sのサブアッセンブリ(約10cm×15cm)をそれぞれ押し付け、前後のEL像を観察した。図Ⅲ-5にS i、図Ⅲ-6にC I SのEL像を示す。両者とも、割れなどは確認されていない。



図Ⅲ-5. S iサブアッセンブリモジュール押し付け前後のEL像

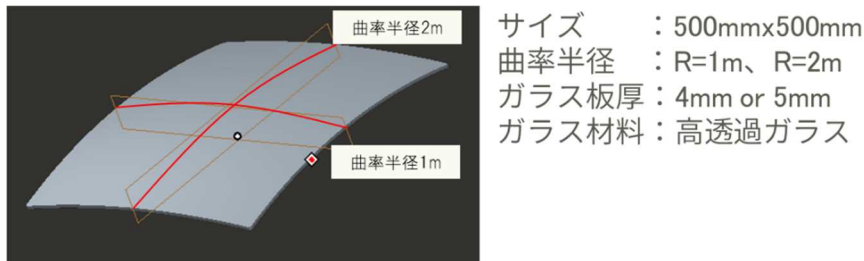


(a) 押付け前

(b) 押付け後

図III-6. C I Sサブアセンブリモジュール押付け前後のE L像

一方、中間目標の、曲率半径1 m以下を含む30 cm□のモジュール作製のための設計を開始した。モジュールの形状は車両へ搭載しての屋外試験を考慮した形状とする必要があるため、宮崎大学と協力して行い、図III-2-(イ)-(iii)-A-7 エラー! 参照元が見つかりません。に示す形状に決定した。また、セル配置については、トップセル（化合物2接合型）のレイアウトを決定し、S iおよびC I Sをこのサイズに合わせたものとするを出光興産株式会社と合意した。現段階では、サイズ拡大に対する懸念点はないので、上記の構造でモジュール作製を進め中間目標の達成を目指す。



図III-2-(イ)-(iii)-A-7. 曲面タンデムモジュール用基材ガラス模式図

## (ii) 高効率モジュール開発

### (化合物3接合型)

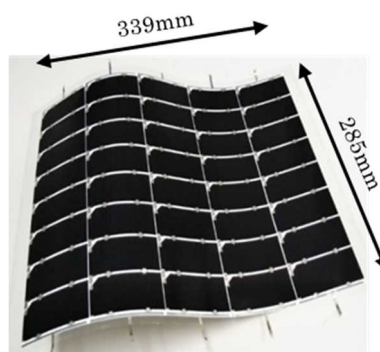
セル充填率改善の検討結果に基づき、化合物3接合型セルを使用した300 mm□サイズのモジュールの作製を行った（図III-2-(イ)-(iii)-A-8）。モジュール構造は、将来の移動体への搭載を念頭に、曲面追従可能なフィルムタイプを採用し、軽量かつフレキシブル性を実現した。

また、本モジュール内のセル充填率は94.2%であり、前プロジェクト（※1）で当事業者が作製し、当時の世界最高効率（※2）となるモジュール変換効率31.2%を記録した化合物3接合モジュール（以下、前回試作モジュール）の92.1%から約2%向上させた。またセル分光感度の最適化の有効性についても検討を行った。モジュールの表面保護材で透過損失の大きいトップセル領域の分光感度を予め向上させることにより、約2%の効率向上がえられた。使用したセルの電気特性は表III-2-(イ)-(iii)-A-1に示す通り、平均で36%を超える（自社測定）ものである。

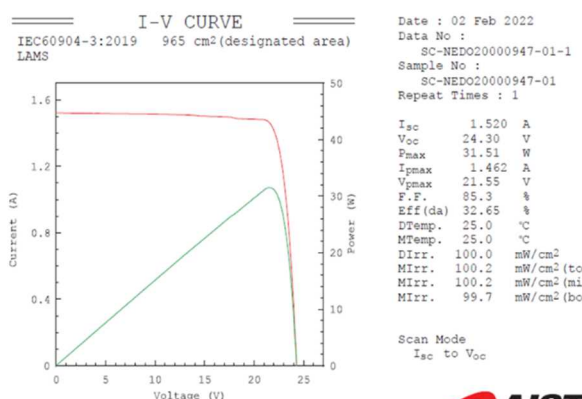
上記試作モジュールの標準条件下での電気特性を、国立研究開発法人産業技術総合研究所で測定した結果を図III-2-(イ)-(iii)-A-9に示す。開放電圧（ $V_{oc}$ ）=24.30V、短絡電流（ $I_{sc}$ ）=1.520A、 $F.F.$  =0.853、最大電力（ $P_{max}$ ）=31.51W、変換効率=32.65%であり、前回試作モジュールの変換効率31.2%を上回り、モジュールとしての世界最高効率（※3）を達成した。下段（iii）項で取組んでいる裏面ヘテロ構造の採用、反射防止膜の改良、およびモジュール充填率向上により目標達成を目指す。

表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-1 モジュール作製に使用したセルの電気特性

	Voc [V]	Isc [mA]	FF	Pm [W]	Eff
Min	3.015	319.5	0.833	0.820	35.84%
Max	3.066	326.4	0.846	0.835	36.48%
Ave	3.042	322.9	0.841	0.826	36.08%



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-8. モジュール外観  
(図中の数値はセルエリアのサイズ)



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-8. 電気特性評価結果  
(産業技術総合研究所測定)

※1 2015年度～2019年度委託業務『高効率・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発／革新的新構造太陽電池の研究開発／超高効率・低コストⅢ-V化合物太陽電池モジュールの研究開発 (多接合セル・モジュールの低コスト化技術開発)』

※2 2016年5月19日時点、研究レベルにおける太陽電池モジュールにおいて (シャープ調べ)。

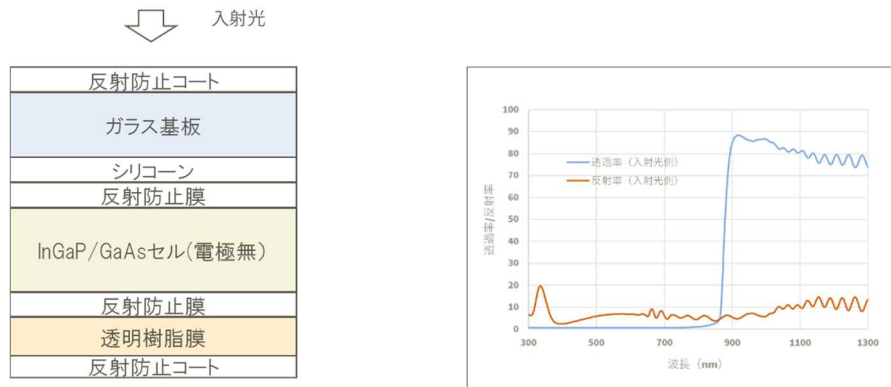
※3 2022年5月20日現在、研究レベルにおける太陽電池モジュールにおいて (シャープ調べ)。

(メカニカルスタック構造)

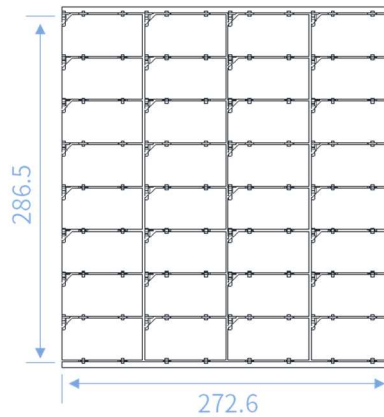
本構造はトップセルとなる化合物2接合型を当社が、ボトムセルとなるSiセルは豊田工業大学、CISセルは出光興産株式会社が担当するため両機関と協力して開発を実施した。2点を中心に検討を実施した。

一点目として、各ボトムセルの化合物セル下での変換効率の評価方法の統一を行った。ボトムセルは化合物2接合セルを透過した光の下(850nm以上の光のみ透過)での電気特性が必要で、通常のソーラーシミュレーターでは評価が難しいため、当社にて化合物2接合セルを模擬した構造の光学フィルターを作製し、このフィルター下でのボトムセルの電気特性を評価することとした。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-10に断面模式図、透過率および反射率を示す。2点目としてセルレイアウトの決定を行った。化合物2接合セルのレイアウトを図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-11に示すように決定し、ボトムセルは

これにあわせることとした。なお、各セルの変換効率の向上については、化合物セルは下段（iii）項に記述し、ボトムセルについては、両機関の報告に委ねる。今後、当社で取組む下段（iii）項の成果を用いた化合物2接合セルと、豊田工業大学、出光興産株式会社から提供予定のS iセルおよびC I Sセルを用いて、上段（i）項より得られた構造でモジュール作製を行い目標達成を目指す。



図III-2-(イ)-(iii)-A-10. ボトムセル特性測定用フィルター構造模式図（左）、透過率および反射率（右）

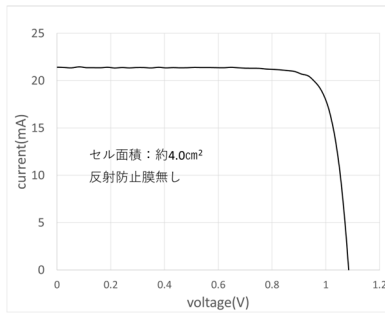


図III-2-(イ)-(iii)-A-11. モジュールレイアウト（化合物2接合セル部）

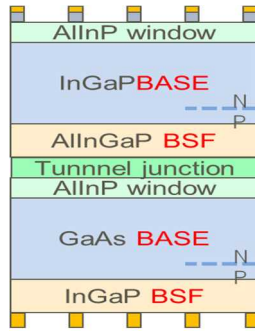
### (iii) セル高効率化（化合物セル）

化合物セルの高効率化を取り組むにあたり、初めに、各サブセルの効率向上に取り組んだ。具体的には逆積み裏面ヘテロ接合のInGaPセル、逆積み裏面ヘテロ接合GaAsセルの特性向上に取り組んだ。エピタキシャル層の構造は、東京大学でのシミュレーション結果を参考に作製し、InGaPセルで $V_{oc} = 1.47V$ 、GaAsセルで $V_{oc} = 1.08V$ の良好な結果を得た（図III-2-(イ)-(iii)-A-12）。

続いて、上記の結果と逆積み裏面ヘテロ接合InGaPセルの検討結果を用いて、逆積み裏面ヘテロ接合InGaP/GaAsセルの効率向上の検討を行った。本構造の検討を行うにあたっては、メカニカルスタック構造でのモジュール化を意識した透過型セル構造（裏面楕型電極、図III-2-(イ)-(iii)-A-13）、また、セルサイズは評価用の約 $4cm^2$ から実用化サイズの約 $22.8cm^2$ を用いた。まず、従来構造の非透過化型セル（裏面全面電極）と、裏面楕型電極セルを比較した。裏面楕型電極は、従来考慮が必要なかった裏面の半導体層のシート抵抗が電気特性に影響することとなるので電気特性（FF）の低下が懸念されたが、図III-2-(イ)-(iii)-A-14に示すように、両構造ともほぼ同等の電気特性が得られる結果を得、透過型構造でも問題無いことを確認できた。また、 $4cm^2$ と $22.8cm^2$ の両サイズのセルの比較でも各々同等の結果が得られた。これらの構造でエピタキシャル層の構造の検討を実施し、 $V_{oc} = 2.501V$ （従来比： $0.013V$ 上昇）を得た。（図III-2-(イ)-(iii)-A-15）変換効率については、 $4cm^2$ 、非透過型で $29.8\%$ を得ている。今後、さらなる構造の適正化、反射防止膜の適正化により目標達成を目指す。

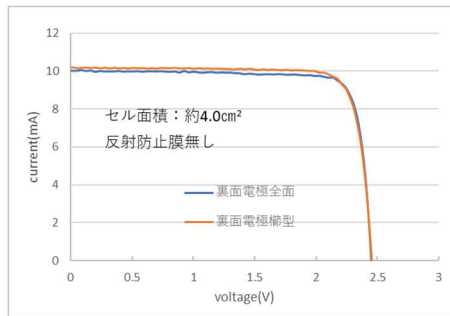


図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-12. 裏面ヘテロ構造のGaAsセルの電気特性

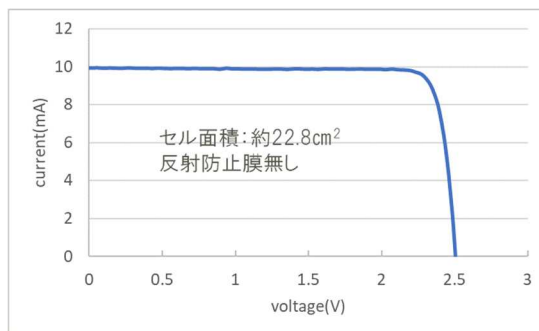


裏面電極櫛型

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-13. 透過型セルの構造模式図



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-14. 透過型セルと非透過型セルの電気特性の比較



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-15. 裏面ヘテロ構造型2接合セル (InGaP/GaAs) の電気特性

## Ⅱ. 低コストプロセス技術開発

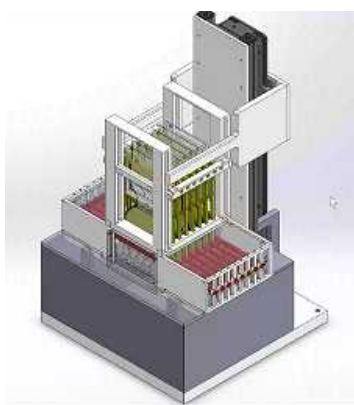
### Ⅱ-①. 低コスト成膜装置開発

取組事項なし

### Ⅱ-②. 基板再生装置開発

剥離装置開発については、剥離方向の検討を行い剥離速度・剥離品質・量産装置化の適正を評価した。剥離方向については、鉛直上方向、鉛直下方向、水平方向（ウエハ表面上およびウエハ表面下）の4つの条件で評価をおこない、その結果、鉛直上方向に剥離進行する方式が、最も適切であることが分かった。上記の治具は単枚のウエハのみ処理可能であるため、量産機を想定した複数枚処理での課題を確認するために、東京大学およびその再委託先であるタカノ株式会社と連携して当該方式で複数枚同時処理可能な治具を作製し、導入した（図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-16）。検証の結果、ウエハをセットするスロットによって剥離品質が異なる結果となった。ウエハ面内の温度均一性が低下していることを確認し、単枚処理時と同等の温度均一性とすることで良好な結果を得た。

また、剥離後の薄膜と基板の分離する工程の検討も東京大学、およびタカノ株式会社と協力して実施した。動作を確認する治具は東京大学、タカノ株式会社と連携して製作し、検証の結果、大きな課題がないことを確認した。今後は装置設計に必要となる繰返し安定性が得られるプロセス条件の抽出を行い目標達成を目指す。



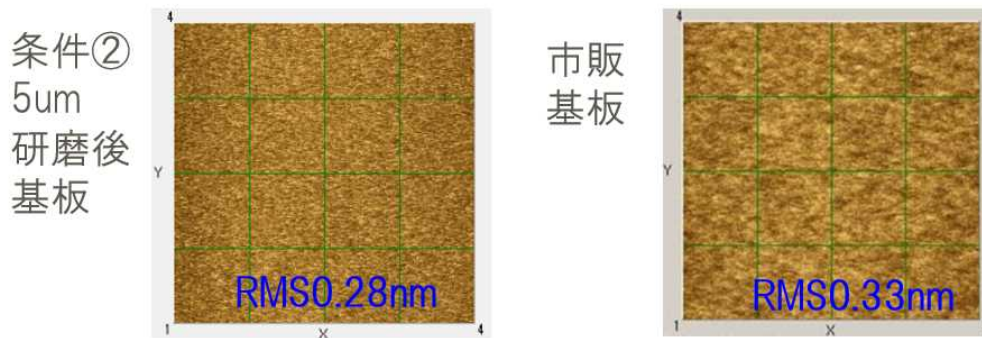
図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-16. 複数枚同時剥離治具（模式図）

基板再生プロセスについては、CMP装置の導入、およびスラリー種、研磨パッド、研磨条件などを変更した基礎検討を行った。CMP装置の導入では、稼働させた装置において、G a A s 基板表面を  $Rms 0.5nm$  以下の品質で研磨できることを確認した。また、プロセスコストの低減を検討できる構造など、装置仕様に問題が無いことを確認した。続いて、一般的なCMPの条件からの低コスト化（具体的には、材料費低減、装置使用時間低減、研磨量低減）のための、スラリー種、研磨パッド、研磨条件などを変更した基礎検討を実施した。表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-2 に示す通り、スラリー種と研磨パッドの組み合わせを変更することで、E L O 後基板の凹凸欠陥の除去し易さや、研磨能率、キズ／くもり、表面粗さなどが変わることが分かった。表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-2 および図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-17 より、条件②において、 $5\mu m$  研磨した後の表面粗さが  $Rms 0.28nm$  と市販基板と同等で良好であり、凹凸欠陥も除去し易いため、E L O 後基板の研磨に適していることがわかった。表Ⅲ-2-

(イ)-(iii)-A-2. 各種条件での検討結果

条件	①	②	③	④
研磨パッド	I	I	I	II
スラリー	A	B	C	C
価格	高い	高い	安い	安い
研磨能率	0.6~1.0um/min	0.15~0.25um/min	0.20~0.32um/min	0.19~0.26um/min
表面粗 (Rms)	0.33nm	0.28nm	0.29nm	評価せず
キズ／くもり	無／無	無／無	薄く有／無	有／有
凹欠陥除去し易さ	5um研磨で除去できない	3um研磨で概ね除去 5um研磨で完全除去	5um研磨で概ね除去 (3umは未確認)	評価せず
凸欠陥除去し易さ	難しい (InGaP除去不可)	3um研磨で可能 (厚いものは鏡面化)	5um研磨で可能 (3umは未確認)	評価せず
洗浄後異物数	多い ~100個	少ない ~10個	多い ~100個	多い ~100個



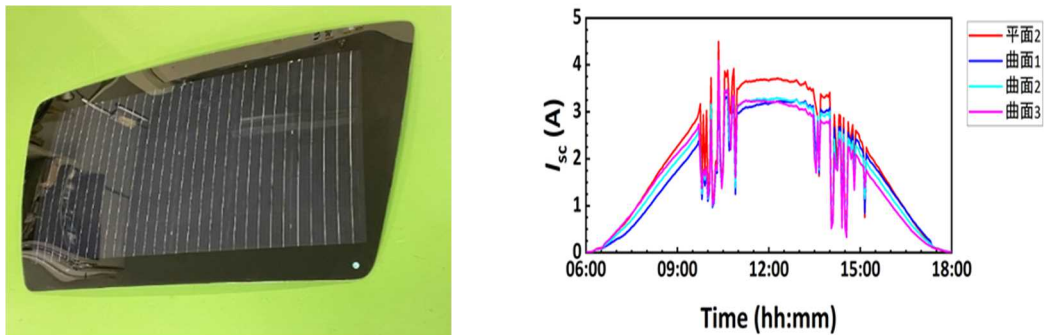


図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-17. CMP後基板表面のAFM像

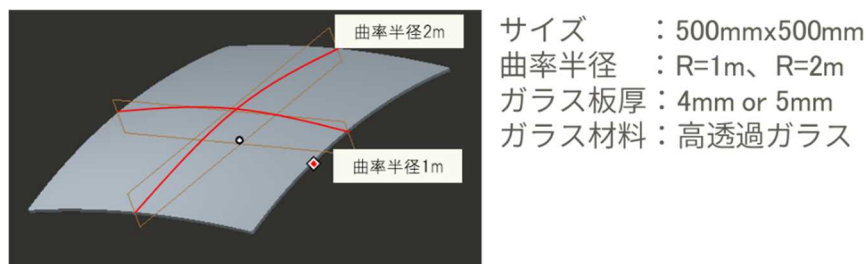
### Ⅲ. 移動体用モジュール評価・構造設計技術開発

#### Ⅲ-①. 移動体用モジュール発電量評価・構造最適化設計

本項目では、宮崎大学で実施する屋外での発電量測定（曲面モジュール、メカニカルスタック構造モジュール特有の評価、及びそれらの車両搭載時の評価）のために上記Ⅰ-①.(i)で開発したモジュールを提供することが主な取組事項である。作製したSiセルの曲面モジュールを提供し、宮崎大学での屋外測定を開始した。測定データの一例を示す。(図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-18 (左) 外観、(右) データの一例) なお、測定データの詳細は宮崎大学の報告書に委ねる。また、メカニカルスタック構造モジュールの形状について、宮崎大学と協議し、車両への取り付け性を考慮し、図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-19 に示す形状とすることを決定した。作製したモジュールを宮崎大学に提供し、屋外でのデータ取得を進めることで目標達成を目指す。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-18. 宮崎大学に提供した曲面モジュール  
(左) 外観、(右) 宮崎大学での測定データの一例

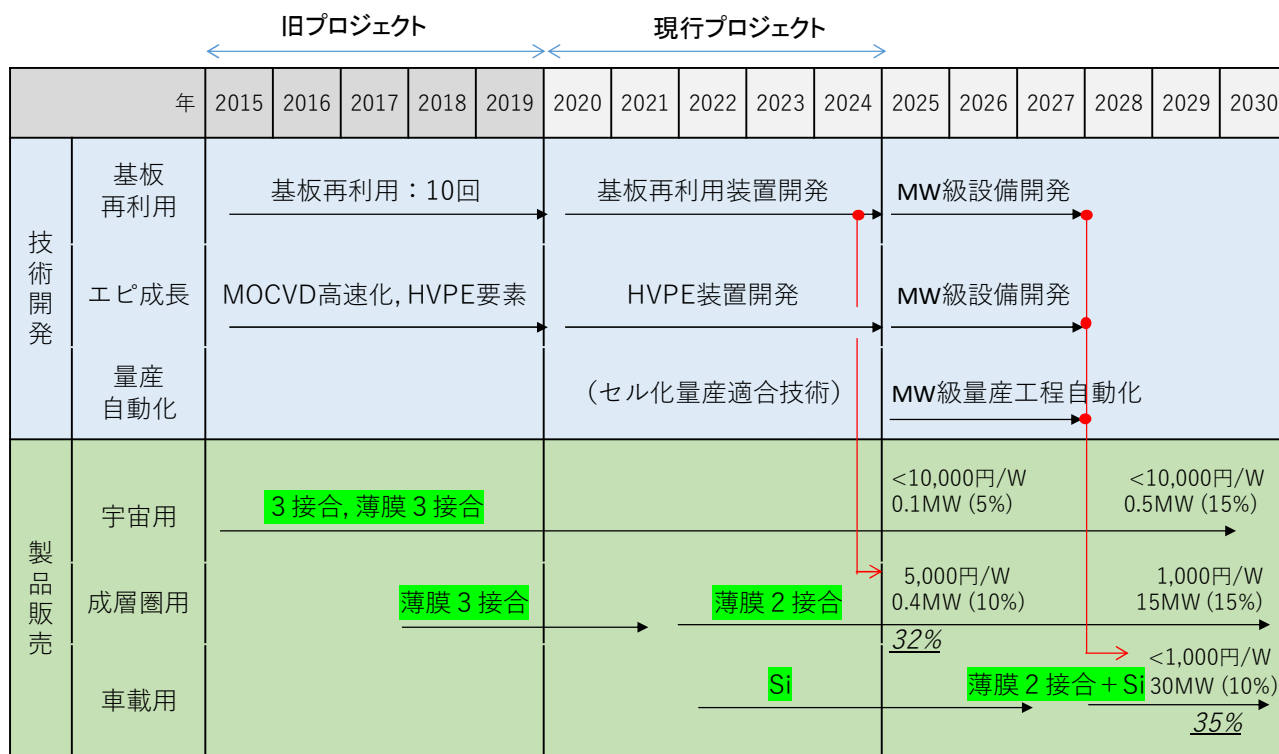


図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-19. 作製予定のモジュール用ガラスの形状

## 2. 実用化・事業化見通し

本研究開発の成果物である化合物多接合型太陽電池およびモジュールは、シリコン太陽電池を凌ぐ高い変換効率から、太陽電池設置面積が限られ、かつ、所望の電力を必要とする人工衛星、飛行体、電動車等の移動体への電源として用いられることが期待される。当社は古くから宇宙用太陽電池の事

業に携わり、化合物太陽電池も国内人工衛星向けに販売している。今後は、更なる性能向上（特に軽量化）と低コスト化を実現し、用途を宇宙から成層圏、地上へと拡大することを計画している（図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-20）。



(%)は世界シェア、\_%はモジュール変換効率

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-20 事業化のための開発計画

上述の用途拡大のためには低コスト化が必須であり、そのためには、高価な単結晶基板の「基板再利用」、化合物層の「エピタキシャル成長」、セルおよびモジュールの「量産自動化」の技術開発が鍵となる。旧 NEDO プロジェクトでは、基板再利用および安価エピタキシャル成長のための要素技術を開発し、現在、本研究開発プロジェクトでは、基板再利用および安価エピタキシャル成長を実現する装置開発、量産化技術開発をコンソーシアム体制で進めている。本プロジェクト終了後、量産装置を MW 級のパイロットラインに仕上げ、生産実証を行い、数 10 MW/年の製造規模にて W 当たり数 100 円レベルまでの低コスト化の実現を計画している。その後、数 GW/年までの製造規模拡大により更なる低コスト化を期待する。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-21 に、高効率 PV モジュール搭載により PV 発電のみで電動車が走行可能になった場合の PV モジュール導入効果について、車載用 PV モジュールの市場投入（2030 年）から市場浸透（2050 年）までの経済効果および二酸化炭素削減効果についてまとめた。

		~2030	2030-2035	2040	2050
製造規模	年間製造量	30MW	100MW	1GW	10GW
販売台数	年間台数	30,000台	100,000台	1,000,000台	10,000,000台
PV価格	1kW	¥1,200,000	¥900,000	¥450,000	¥220,000
	(PV)	1000円/W	800円/W	400円/W	200円/W
	(制御器)	200円/W	100円/W	50円/W	20円/W
使用年数		12年	12年	12年	12年
12年間総発電量	日射量1000h/年	12000kWh	12000kWh	12000kWh	12000kWh
	発電単価	¥100/kWh	¥75/kWh	¥38/kWh	¥18/kWh
12年PV走行距離	電費10km/kWh	120,000km	120,000km	120,000km	120,000km
12年間燃料費比較 (①ガソリン車、②HV車、③EV車、④PV搭載車)					
①ガソリン車	15km/l, 120円/l	¥960,000	¥960,000	¥960,000	¥960,000
②HV車	25km/l, 120円/l	¥576,000	¥576,000	¥576,000	¥576,000
③EV車	系統25円/kWh	¥300,000	¥300,000	¥300,000	¥300,000
④PV搭載車	PV初期投資	¥1,200,000	¥900,000	¥450,000	¥220,000
1台当たりの1年間CO2排出量					
①ガソリン車	2.33kg-CO2/l	1.55t	1.55t	1.55t	1.55t
②HV車	2.33kg-CO2/l	0.93t	0.93t	0.93t	0.93t
③EV車	0.35kg-CO2/kWh	0.35t	0.35t	0.35t	0.35t
④PV搭載車	製造0.6t-CO2/kW	0.05t	0.05t	0.05t	0.05t
PV搭載車の販売による年間CO2総削減量					
対ガソリン車①	(①-④)×販売台数	4.5万t	15.5万t	155万t	1550万t
対HV車②	(②-④)×販売台数	2.6万t	8.8万t	88万t	880万t
対EV車③	(③-④)×販売台数	0.9万t	3万t	30万t	300万t

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-A-21 高効率PVモジュール搭載によりPV発電のみで電動車が走行可能になった場合のPVモジュール導入効果(経済効果および二酸化炭素削減効果)

低コスト化のためには、量産が可能な工程、装置の開発、製造規模拡大が鍵となる。現在、本研究開発において、当社は、基板再利用に関する量産化工程の開発、装置コンセプトの決定に見通しが得られるようになっており、また、目標としているモジュール効率33%に近い、32.65%を達成し、モジュール高効率化開発についても順調に進めることができています。

また、曲面モジュール開発の中で試作されたシリコン太陽電池モジュールは、車載用として早期製品化が期待される。

### 3. 波及効果

#### (1) 未来社会の実現

上述の事業化シナリオに則って、高効率の太陽電池が妥当なコストで提供できるようになれば、新しい高速通信インフラの構築による高度情報化社会の実現、輸送部門でのカーボンニュートラル・脱炭素化社会の実現に貢献できると期待する。更には、現在、国をあげて取り組んでいる宇宙太陽光発電の実現に貢献できる。

#### (2) サブセルの多用途展開

化合物多接合型太陽電池を構成するサブセルについて、トップセルは白色光に対して、ボトムセルは赤外光に対して高い変換効率を有する。例えば、InGaP トップセルは屋外照明(蛍光灯やLED光)に対して32%程度の高い変換効率を示すため、スマートウォッチ等の電源として期待されている。また、InGaAs ボトムセルはYAGレーザーを受光して高い効率で発電するためレーザーエネルギー伝送用の受光器として期待されている。

#### (3) 化合物材料の低コスト化技術の普及

基板再利用技術や安価エピタキシャル成長技術は、同様の化合物半導体材料から成るレーザーやLEDの低コスト化に大きく貢献する。

### 4. 今後の展開

上述の事業化計画の中で示した通り、本プロジェクト終了後、MW級のパイロットラインを実証し、更に、製造規模を拡大していくことが重要であり、そのために、自動車メーカー等のエンドユーザー

との製品化に向けた協力・協業を進めると共に、サプライチェーンの中の材料メーカー等の重要な組  
手と協力・協業を進める予定としている。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	0 (0/0)	1 (1/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演	1	1	0	2
(国内・審査有)	(0)	(1)	(0)	(1)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(1)	(0)	(0)	(1)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	1	1
展示会への出展	0	1	0	1
受賞実績	1	0	0	1

(2022年6月20日現在)

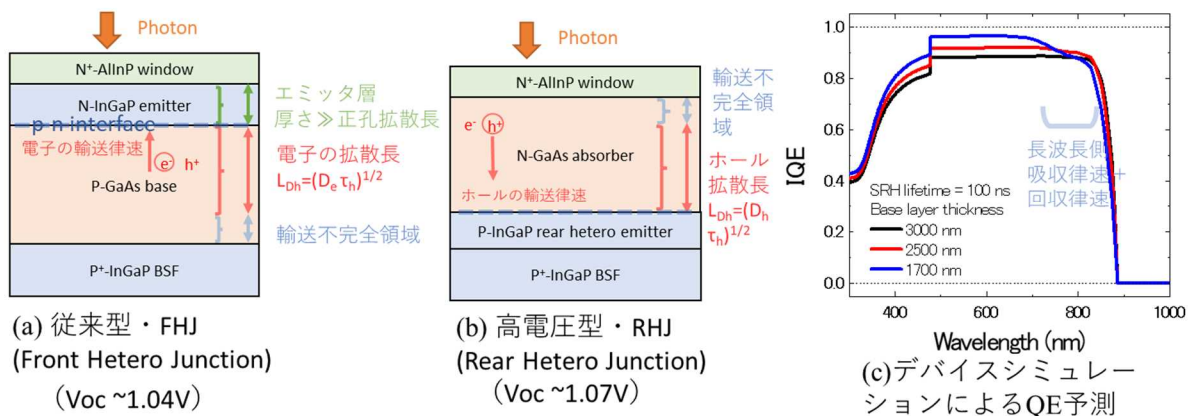
## B 高効率多接合薄膜セル (国立大学法人東京大学)

### 1. 成果詳細

#### I-1. ①. InGaP/GaAs トップセル

変換効率 35%を超える太陽電池モジュールの実現へ向けた中核となる構成要素 InGaP/GaAs2 接合セルの高効率化のため、リアヘテロ接合 (RHJ) 構造 GaAs 単接合セルの開発を進めた。数値計算に基づくデバイスシミュレーション及び試作セルの評価結果により、RHJ GaAs セルにおいては、従来のフロント接合 (FJ) と比べ、リアヘテロ界面における非発光再結合の抑制 (1)に加えて、吸収層として機能する n-GaAs の少数キャリア寿命が長いこと (2)による非発光再結合確率の低減によって開放電圧  $V_{oc}$  が向上する効果が見られた。シャープと共同でセルの試作を行った結果、FJ では最大  $V_{oc}=1.049$  V であったのに対して、RHJ 構造では  $V_{oc}=1.087$  V まで向上し、GaAs サブセルにおいては最終目標に対して必要な要件 (1.08 V) を満たしている状況を達成した。シミュレーションに基づく構造最適化の結果から、n 型の GaAs 吸収層においては少数キャリア (正孔) が長寿命ではあるものの、移動度が電子より 2 桁程度小さいため、少数キャリア拡散長の律速によって短絡電流密度が減少する傾向が明らかとなった (図III-2-(イ)-(iii)-B-1)。FJ 構造ではベース層厚さ  $3.5 \mu\text{m}$  の場合に短絡電流密度が最大となったのに対して、RHJ 構造では  $2.5 \mu\text{m}$  の場合に短絡電流密度  $J_{sc}$  が最大となる結果が得られた。

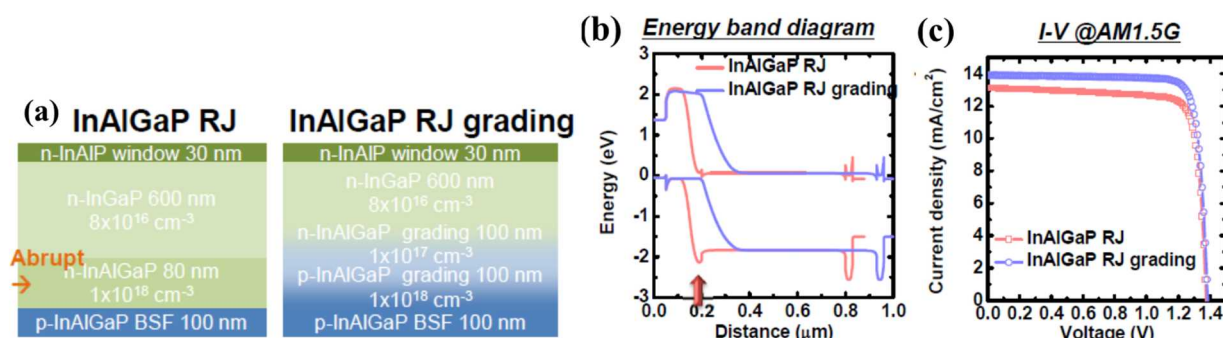
また、変換効率 35%超となる 3 接合モジュールの製造を想定し、大規模製造装置による GaAs 単接合セル、および 2 接合セルの試作についても同様に行った結果、RHJ 構造 GaAs 単接合セルでは  $J_{sc}=21.70$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc}=1.084$  V,  $\text{FF}=84.3\%$ まで到達しており、ウエハー口径の増大、及び複数枚製造といった量産工程において顕著な性能低下をもたらす要因は見られないという結果が得られた。同時に、InGaP/GaAs RHJ 2 接合セルの試作を進め、両サブセルを RHJ 構造とした場合における良好な 2 接合動作を確認、性能面においては  $J_{sc}=10.39$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $V_{oc}=2.501$  V まで到達し、短絡電流密度は FJ 2 接合セルと同程度を維持しながら開放電圧を増大させることに成功している。また、このセルに対して 2 層の誘電体膜からなる既存の方法による反射防止加工を適用した場合、電流ゲインが 1.35 となり、 $J_{sc}=14.$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ ,  $\text{FF}$  値は典型的に 0.86 以上が得られているため、変換効率  $\eta > 30.1\%$ となり、中間目標の変換効率 30%は達成の見込みである。さらに今後の開発において、①これまでの実験データをフィードバックしたデバイスシミュレーションの精緻化による構造最適化を進めて、RHJ 構造における電圧と電流出力の両方を最大化し、最終目標の InGaP/GaAs 2 接合セルにおいて変換効率 32%を達成すること。②反射防止膜の構造を従来の 2 層構造から有効媒質近似を利用した疑似 3 層構造とすることで広帯域化し、3 接合モジュールのボトムサブセルの光入射量を増大することでモジュール変換効率 35%超を達成する方針を進める。



図III-2-(イ)-(iii)-B-1. GaAs 単接合セルにおける(a)FJ 構造、(b)RHJ 構造の場合におけるキャリア輸送律速条件の模式図、およびデバイスシミュレーションによる RHJ 構造 GaAs セルの量子効率に対する厚さ依存性(c)。

同時に、東京大学における取り組みとして RHJ 構造 InGaP トップセルにおける界面制御についての開発を進めている。シャープとの共同開発では RHJ 構造の厚さやドーピング密度の制御による太陽電池性

能の変化に着目しているのに対して、東京大学では独自にエピタキシャル結晶成長時のヘテロ(異種物質材料)界面が太陽電池性能に与える影響について評価及び開発を進めている。半導体中の異種材料の界面においては結晶欠陥とそれに伴う再結合中心の密度が増大し、デバイス性能を低下させる要因となることがしばしば指摘されている。理論上の理想に近い太陽電池デバイスが実現されている GaAs ボトムセルよりも3元混晶である InGaP トップセルで顕著にこの影響が強くみられることが想定されている。この課題に対して、①基板温度などの結晶成長中の環境条件が InGaP トップセルに与える影響、②ヘテロ界面における組成制御、③成長用 GaAs 基板の結晶方位が InGaP トップセルに与える影響、の3点についてセル性能の改善指針を与えるための実験と評価を進めている。例として、n-InGaP/p-AlInGaP ヘテロ界面が pn 接合界面として機能するトップセルに対して、光吸収層としてふるまう n-InGaP 層とワイドギャップヘテロ材料としての p-AlInGaP 層が急峻な界面を持つ状態と、Al 組成が傾斜的に変化する p-AlInGaP (graded) な状態の試料を実験的に作成し(図III-2-(イ)-(iii)-B-2(a))、そのセルの内部に存在するエネルギーバンドダイアグラムをシミュレーションによって予測した場合、界面が急峻な場合には価電子帯においてヘテロ界面に正孔に対するポテンシャル障壁が発生するのに対し、組成傾斜界面の場合にはその発生が抑制されることが想定される(図III-2-(イ)-(iii)-B-2(b))。また、それらの試料に対して太陽電池セルを試作し、評価を行った結果、組成傾斜界面の試料では短絡電流密度が  $J_{sc}=13.1 \text{ mA/cm}^2$  から  $J_{sc}=14.0 \text{ mA/cm}^2$  まで増大し、それに伴って FF が向上する結果が得られた(図III-2-(イ)-(iii)-B-2(c))。これは、急峻な界面を持つ場合よりも組成傾斜界面での光キャリア(正孔)の輸送効率が向上することによって起るものと考えられる。この結果から、界面における条件制御によって InGaP トップセルの高効率化が示された。これらの知見をシャープと共同開発を進めている RHJ InGaP/GaAs 2 接合セルに適用し、さらなる高効率化を進める予定である。

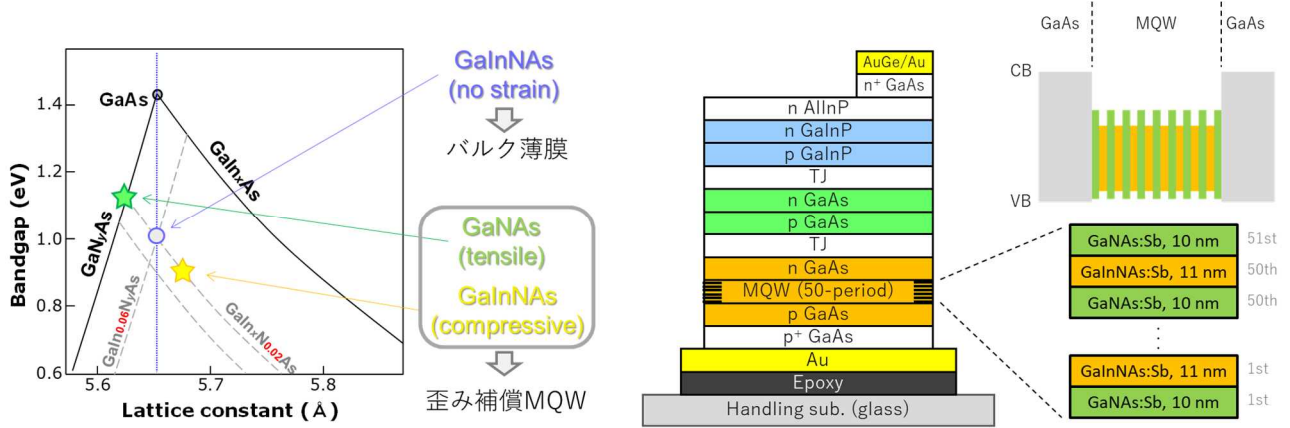


図III-2-(イ)-(iii)-B-2. RHJ 構造 InGaP トップセルにおける n-InGaP/p-InAlGaP リアヘテロ界面が急峻(abrupt)な場合と組成傾斜(grading)状態における試料の構造図(a)。およびそれらの試料に対して数値計算により想定されるエネルギーバンドダイアグラム(b)と試作した太陽電池セルにおける照射下の I-V 特性(c)。ヘテロ界面が Abrupt な状態から Grading 界面を導入することにより、価電子帯のポテンシャル障壁の発生を抑制した結果、キャリアの取り出し効率が向上し、短絡電流密度と FF が向上する傾向がみられる。

### I-3. ①. GaInAsN ボトムセル (担当: 岡田グループ)

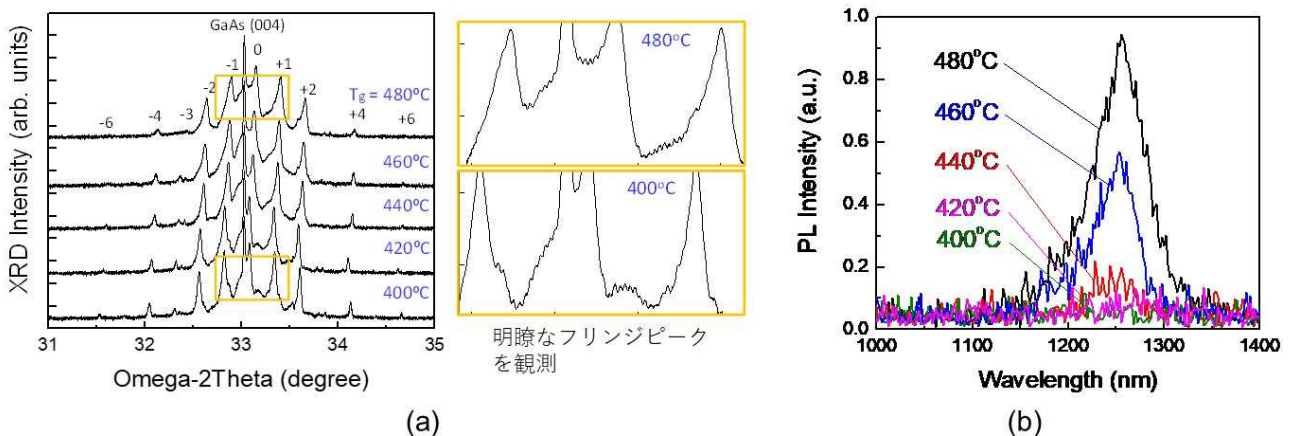
高効率 3 接合セルへの ELO 技術の適用を実現することにより、(i)セルコストの大幅低減、(ii)基板薄化プロセスを用いず薄膜フレキシブル太陽電池を作製可能などのメリットが生まれ、社会実装への加速効果が期待される。本テーマでは、これまでに確立している従来型 ELO 技術を基盤とした大面積エピ薄膜層の剥離技術の適用が可能で高効率 3 接合セルの構築に向け、格子整合型 GaInAsN 1.0 eV ボトムセルの開発を進めている。3 接合セルを格子整合材料のみで構成するメリットとして、デバイス構造内に結晶歪みによる応力の残留しない点が挙げられる。こうした残留応力は、薄膜層が基板から分離された際にクラックを生じさせる要因となることから、結晶歪みの制御は項目 II-②で開発を進める ELO の信頼性を確保する上で最も考慮すべき点の一つである。

ボトムセル開発には、これまでに岡田グループ(東大)が確立した MBE 法による高品質 GaInAsN 結晶成長技術を基盤として用いた。光吸収層材料として GaInAsN 系多重量子井戸(MQW)構造を採用した。歪み制御技術によって GaAs 基板との格子整合を維持することができ、かつ従来型の GaInAsN バルク結晶と比較して少ない窒素添加で所望のバンドギャップを実現することが可能である(図III-2-(イ)-(iii)-B-3)。この MQW を 1.0 eV ボトムセルに適用することにより、高品質化、開放電圧向上(中間目標: 0.45 V)を図り、最終目標である 3 接合セル効率 37%を目指す。

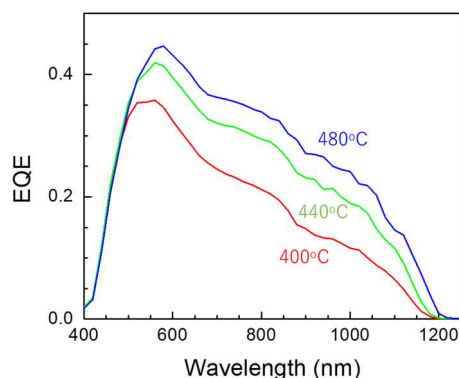


図III-2-(イ)-(iii)-B-3 GaInAsN/GaNAs系歪み補償MQWおよび3接合セルへの実装コンセプト(1)  
1.0 eV帯歪み補償MQWの作製と最適化

構造シミュレーションを行い、GaAsとの格子整合が可能なGaInAsN/GaNAs系多重量子井戸(MQW)を設計し、それを基にMBEにより20周期のGaInAsN/GaNAs MQW試料を作製した。また、400~480°Cの範囲において結晶成長時の最適温度探索を行った。図III-2-(イ)-(iii)-B-4(a)に示す高分解X線回折(XRD)測定結果から、いずれの試料においても高次のサテライトピークが観測されコヒーレント成長ができており、また積層数に対応する明瞭なフリンジピークが観測されたことから急峻なヘテロ界面が形成できており、高品質な結晶の成膜ができてることが示唆された。また同図(b)に示すフォトルミネッセンス(PL)評価により、成長温度440~480°Cの試料においてポストアニール無しでも室温発光が得られる良好な結晶品質のMQW構造の成膜が可能であることを確認した。次いでMQW構造を導入した単接合太陽電池を作製し、セル特性の評価を行った。成長温度を400, 440, 480°Cと昇温させるにつれて外部量子効率の増加が見られ、PL強度の傾向との一致が確認された。(図III-2-(イ)-(iii)-B-5)なお、より高温での成膜はMQW層のヘテロ界面の擾乱が懸念される。以上のことから、MQWセルの成膜において480°C付近が最適条件であることが示唆された。一方、開放電圧(Voc)は0.32Vに留まっていることから、MQW構造の最適化(現状のタイプI構造→タイプII構造化設計の検討)により、Voc向上を図る。



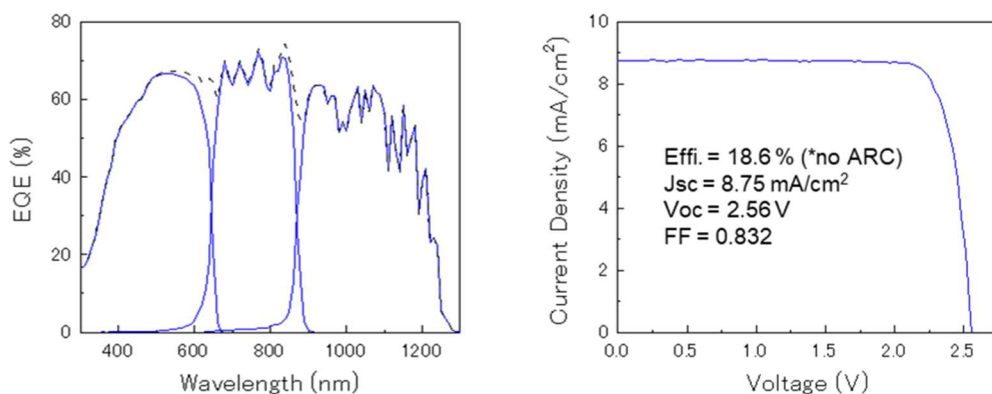
図III-2-(イ)-(iii)-B-4 20周期GaInAsN/GaNAs系歪み補償MQWの(a)高分解X線回折および(b)室温PL評価:成長温度400~480°Cの試料間で比較。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-5 20 周期 GaInAsN/GaNAs 系歪み補償 MQW の分光感度特性：成長温度 400～480°C の試料間で比較。

### (2) MQW セルの 3 接合セルへの実装

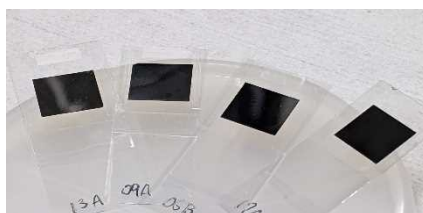
GaAs へ格子整合させた GaInAsN/GaNAs 系多重量子井戸 (MQW) セルの 3 接合セルへの実装を行った。MBE 法による再成長を行い、2 端子型 GaInP/GaAs/MQW 3 接合セルを作製した。ボトム MQW セルの外部量子効率を 60% (反射防止膜不適用) に維持しつつ吸収端を 1300 nm まで長波長化させ、トップセルに電流律速していることを確認した。(図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-6) 今後、広域に反射率を低減させた反射防止膜を適用できれば、トップ律速条件を維持し、14 mA/cm<sup>2</sup> の短絡電流値を実現できると考えられる。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-6 2 端子型 3J (InGaP/GaAs/GaInAsN/GaNAs MQW・ARC なし) セルの太陽電池特性。

### (3) MQW を実装した 3 接合セルの ELO

本テーマで開発を行っている格子整合型 3 接合セルの重要な位置づけとして、ELO による無損傷なデバイス剥離の実証を図った。先に述べた 2 端子型 GaInP/GaAs/MQW 3 接合セルへ従来条件で ELO を適用し、再現性良く GaAs 基板から無損傷にデバイス層を剥離できることを確認した (図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-7, 10mm 正方形セル)。今後チーム II と連携し ELO の大面積化、高速化を図る。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-7 InGaP/GaAs/ GaInAsN/GaNAs MQW セルのクラックレス ELO (写真は 10mm 正方形)。



## II. 低コストプロセス技術開発

### II-2. 基板再生装置開発 (担当： 岡田グループ、タカノ株式会社：再委託)

高効率セルの普及技術として、低コスト化に有効な ELO セルの量産化要素検討が必須である。本テーマでは、高速剥離並びに複数枚処理技術開発を行っている。さらに、より高い変換効率が可能な格子不整合型 3 接合太陽電池 (IMM3J) に対する ELO 技術、および従来技術の適用が可能な格子整合型 3 接合太陽電池 (GaInP/GaAs/GaInAsN) の開発を進めている。

#### (1) 高速剥離技術検討

ELO プロセスの高速化によって、生産性の向上のみならずウエハとエッチャント溶液との接触時間が短縮されデバイス性能の歩留まり向上、ウエハ汚染の低減に伴う再利用工程の簡易化が可能となる。4 インチφサイズのウエハの処理に対応した ELO 自動機を製作し、プロセス条件の最適化を図った。ELO 時の加温、およびエッチャント濃度を変化させ、剥離可能な速度上限の探索により、最大 85 mm/h の速度での ELO が可能であることを見出した (小面積チップ状の 2 接合セルサンプル)。また、4 インチフルサイズでの ELO に関しては 50 mm/h での全面剥離を可能とした (図 III-2-(イ)-(iii)-B-8)。また、シャープ製の透過型 2 接合セルウエハにおいては、独自の電極構造や薄膜保持層等の影響のため、ELO 速度は現状 25-30 mm/h 程度に留まることも確認された。薄膜保持層等の構造の最適化により、高速化は可能であると考えられる。

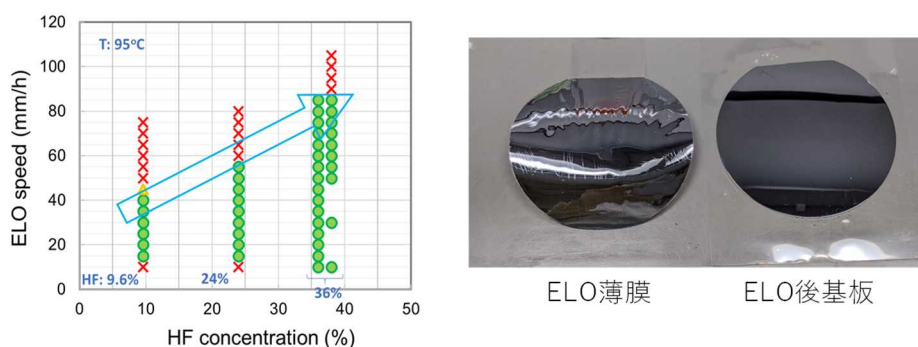


図 III-2-(イ)-(iii)-B-8 ELO 自動機による高速化条件探索 (○印は剥離可、×印は剥離不可)、および 50mm/h で全面剥離した 4 インチウエハサンプル (2 接合セル)。

#### (2) 複数枚処理技術検討

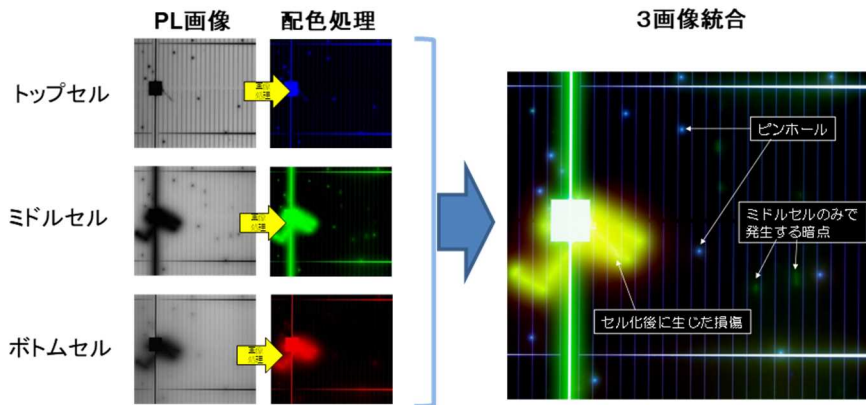
量産技術開発として、ELO ウエハの複数枚同時処理に向けた技術検討、装置開発を進めた。開発当初、装置仕様としてエッチャント供給方法やウエハ設置方法の異なる 4 種類の方式について、シャープを含む 3 機関での検討を行い、縦型 (HF 吹上、ウエハ下降方式) 方式を採用することとした。この仕様をもとに、7 枚同時処理仕様の装置の試作を行った。ウエハおよびノズル周辺の設計改善、エッチフロント付近の温度分布の擾乱の抑制を図り、1 枚での ELO において、安定的に行えることを確認した。現在シャープにて、複数枚を安定的に処理できる条件最適化を進めている。また、ELO 後に一對のウエハと太陽電池薄膜が収納されるキャリア内での水リンス工程において、それぞれを分離するための分離装置の試作を行い、実サンプル 3 枚の同時分離が可能であることを確認した。

#### (3) プロセスモニタ技術開発

ELO 後の太陽電池薄膜は繊細なため、プロセス時やその後の洗浄、搬送の工程においても損傷のリスクが高くなる。そのため、非接触かつ短時間でウエハ品質の観測を行うためのプロセスモニタ技術の開発を進めている。生産ラインにおいては、ウエハ品質管理により歩留り、生産性向上が期待でき、また ELO プロセスの異常発生時のその場検知への有用性も想定される。一方、研究開発段階においても、ELO 後のウエハに発生する異常を把握することで条件の最適化に資するものである。

プロセスモニタの開発にあたり、非接触にエピ膜の状態を画像化し評価することを目的とし、試料ウエハ/エピ膜の発光分布 (PL, EL) 観測を基盤とした 3 接合エピ膜評価装置 (□5 μm 分解能) の製作並びに歩留り向上のための検査工程の最適化に取り組んだ。PL 及び EL 画像化における発光検出部の 1 ヘッド化を図り 400~1600 nm に感度を有する PL/EL 画像化環境を構築した。また、TDI 方式による高 S/N 化を実現した。また、スキャン領域の拡張を図り、4 インチサイズの撮像を可能とした。シャープ

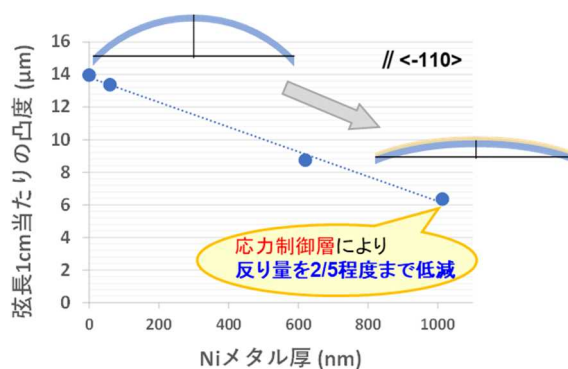
製の IMM3J エピ膜サンプルによる評価を実施し、3 条件（トップセル：InGaP、ミドルセル：GaAs、ボトムセル：InGaAs）の PL 画像統合技術の確立・不良要因の検証を行った（図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-9）。また、インライン化・検査の高速化を目的とした3条件の同時スキャン技術の確立に向け、励起光源の全 LED 化および照明設計を完了した。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-9 既存 IMM3J サンプルを用いた PL 画像統合と不良要因の検証。

#### (4) IMM セルの ELO 技術開発

IMM3J セルは異なる格子定数を持つ半導体単結晶材料（InGaP/GaAs および InGaAs）を積層し 3 接合セル化することにより高い変換効率が実現されている。これらの材料の品質を維持して積層するために組成傾斜バッファ技術が用いられており、太陽電池構造は内部に結晶歪みが内在された状態で半導体基板によって支持されていることになる。内部応力は ELO 前のエピ表面にも大きな影響を及ぼしており、ウエハ表面に反り（湾曲）を生じさせることが知られており、ELO の際にはその影響により薄膜の割れが生じることが従前からの課題となっている。本テーマでは、ELO 時の割れを抑制するための応力制御技術の開発に取り組んだ。応力を及ぼす材料として Ni を用い、IMM セル表面に薄膜を形成し、表面の反りの変化の評価を行った。Ni 厚を増すにつれ反りの大きさが単調に減少する傾向を確認した（図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-10）。また、Ni 応力制御層を導入して ELO を行うことにより、IMM 薄膜層に発生するクラックの発生頻度が低下する傾向を確認しており、無損傷剥離に向けた最適な応力制御層の設計を検討している。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-B-10 IMM3J セル表面に形成した Ni 層厚と、ウエハ反り量（<-110>に沿って弦長 1 cm 当たりの凸度で定義）との関係。

## 2. 実用化・事業化見通し

2050年カーボンニュートラルを目指す国際的な動向、および2030-2040年を目安にCO<sub>2</sub>排出の抑制を目指した自動車などの電動化が進む流れが予測されるうえで、高効率な太陽光発電モジュールが自動車市場に性能面で付加価値を与える製品として実用化され得ると考えられる。III-V族化合物半導体太陽電池における課題であったコスト面においては、結晶成長に用いたGaAs基板から太陽電池機能層を剥離するELO技術の進歩によって、製造速度およびスループットに大幅な改善がみられることから、2035年前後あたりで発電量当たりの単価は既存の太陽光発電並みになり、面積当たりの効率の高さが価値を持つであろうことが予測される。

本プロジェクトで開発の中心となっている、高効率性に利点を持つInGaP/GaAs 2接合セルは、従来の裏面電極をグリッド型にし、透過型モジュールとすることで結晶SiやCIGSといった既存の太陽電池パネルに被覆する、あるいはELO適性の高いボトムセル（メタモルフィック成長InGaAsやGaInAsNボトムセル）と積層する形で高効率3接合モジュール（最終モジュール効率目標35%）として機能することを目指している。変換効率は上記2接合のみの場合において中間目標の30%を達成見込みであり、最終目標の32%も凡そ目途が立っている。従来のIII-V族半導体から構成される、高効率多接合太陽電池は宇宙用としては既に実用化がなされている。これは、多接合太陽電池の電力出力当たりのコストが住宅用太陽光発電パネルの10-100倍程度大きくなることから、人工衛星のようなその他の費用が電力コストを大きく超過するような限定空間にのみ太陽電池の高効率性によるコストメリットが生じるためである。同様のロジックを用いて地上応用を検討すると、その高効率性を利用した限定空間へのニーズ、つまり航空機や自動車といった移動体、あるいはモバイル通信デバイスへの充電用電源としての適性が高い。そのためには適切な低コスト化が必要で、例として既存の自動車市場における車体価格（スタンダード価格帯で300-600万円程度、ハイクラス価格帯で1000万円程度）に対して付加装置である発電設備（車体搭載面積 $\sim 3\text{m}^2$ とすると、変換効率35%のモジュールで最大出力 $\sim 1000\text{W}$ ）の価格割合は1/10以下程度に抑えられることが望ましい。本プロジェクトの低コスト化技術の目標では200円/Wであるため、これが達成されれば1000Wのシステム構成時に20万円程度となり、市場適用性としては十分な水準となる。一方で、発電効率は充電時間と直接の相関があるため、従来の結晶Siを用いたシステムで変換効率20%弱と比較すると、高効率太陽電池を用いた場合は必要充電時間に2倍近い短縮がなされることが最大の利点となる。従って、実用化へ向けた動きとしては、本プロジェクトで開発されている高効率太陽電池セルの製造技術と低コスト化技術の両方を統合し、一定の製造規模における製品の価格を決定する段階に進めること、この点について国際的な競合相手より先に進めることが必要である。これについては既存の太陽電池の研究グループのみでは対応することが難しいため、自動車や航空機の製造業者を含めた形で実用化を加速するための統合されたプロジェクトを進めることで商業的に先行する優位性が獲得可能であると考えられる。

## 3. 波及効果

本プロジェクトの目的に沿って実用化が進み、電動自動車に高効率太陽電池を搭載することが現実的となることで、他の分野でも利用価値のあるものとして認識されることになる。この影響で、製造が大規模になるに従って価格の抑制が進むという想定は結晶Si太陽電池でも見られたシナリオが再現されると思われる。SDGsの考えが浸透するとともに、カーボンニュートラルの必要性が共通認識として設定されたことで将来的に化石燃料の使用の抑制が進行する。これに伴って不足する電力需要を補うために再生可能エネルギーあるいは原子力発電の利用が想定されており、このうち、エネルギー供給装置としての太陽光発電は主力として機能することが可能であり、かつエネルギーのクリーンさという観点からは最も望ましいと期待される。この流れに沿って、従来の太陽光発電パネルよりも大出力が可能な多接合太陽電池＝高効率太陽電池の市場拡大と価格の低減が進行することが望ましい。学術面においてはより高効率な太陽電池をより低価格で供給するという最大の要求に従って従来の開発方針が進行すると想定される。それと共に、従来の化石燃料の代替として再生可能エネルギーを利用する方向性、つまり、エネルギー変換デバイスとしての太陽光電池と同時に、太陽光発電で獲得したエネルギーの蓄積と安定化供給についての研究開発が実用へ向けて加速するはずである。そのためには本プロジェクトにおける開発対象の多接合太陽電池の経済性を伴いつつ適切なタイムスケールに応じた産業化が進む過程が必要となる。

産業規模、および製品の適用価格から電動自動車へ向けた応用が先行して進むと想定されるが、カスタマー側においては「高効率性を持つ太陽電池」として認識され、その要求に応じた価格推移がな

されるはずである。生産規模が増大するとともにコスト低下が進むことでモバイル用途、または住宅用の太陽光発電設備としての市場が拡大されるはずである。現在の太陽光発電の世界市場は約 10 兆円であり、導入規模としては拡大が続いている。将来的には製造コストの抑制により 2035 年予測では同程度の市場規模を維持していることが想定されている。エネルギー産業としてはこの規模が大幅に低減することはないはずで、さらに太陽電池の重要な性能指標＝変換効率という観点で品質の向上を考えた場合、現実的に導入可能性が高いのが本プロジェクトにおいて進められている多接合太陽電池である。従って今後、本プロジェクトで開発した技術基盤に基づく高効率太陽電池がこの市場の主力製品となるであろうことは国内外の動向を見ても堅いと予測される。このことは、海外の主要研究機関においても III-V 多接合太陽電池の低コスト化が主軸になっていることから明らかで、そのうえで、国際市場に先んじて実用化、産業化を形成する枠組みが必要である。

#### 4. 今後の展開

本プロジェクトにおいては、中間目標については概ね達成の見込みであり、最終目標についても技術的には達成あるいは非常に近い水準まで到達することが想定される。それに伴って実用化へと進める際に課題となるのが 1) 事業化に際しての製造規模と販売価格のバランス 2) 結晶 Si 系を中心とした太陽光発電産業において問題点として浮き上がっている点の先行対処。であると考えている。1) については、車載太陽電池が電動自動車の補助機関として搭載される場合の車体販売価格とそれに伴って自動車メーカーが太陽電池に対して許容する価格、製造規模と見通しについて自動車メーカーを含めた協議が前もってなされないと国際市場における開発競争の速度に耐えられないことが予想される。2) については、住宅用発電設備、あるいは事業用のメガソーラー設備において問題視されている部分、災害によって破損した設備の取り扱い、環境破壊、供給の不安定性についての対処について、法的枠組みを含む取り決めが先行してなされていないと円滑な市場形成を阻害する恐れがある。EV 化が進む 2035 年頃までに実装が本格化するため、廃棄まで含めた法整備とそのための機関の充足が必要であることを鑑みても、自動車メーカーを含む形で車載を実用化させる、あるいは市場拡大のために実用先市場のプレイヤー（住宅用 PV、通信など）を含めた国家 PJ に参画していく構想を抱いている。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	3	0	3
研究発表・講演 (国内・審査有)	8 (0)	9 (0)	1 (0)	18 (0)
(国際・審査有)	(3)	(5)	(1)	(9)
(国内・審査無)	(5)	(4)	(0)	(9)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	1	2	0	3

(2022 年 6 月 20 日現在)

## C 超高効率ボトムセル開発 (CIS) (出光興産株式会社)

### 1. 成果詳細

#### 1.1 可撓性基板の選定

3D曲面(曲率半径1mを含む)に設置可能なCIS太陽電池の作製に向けて、可撓性基板材料を用いたCIS太陽電池の効率向上に取り組んだ。文献調査をもとに、候補となる基板材料として、金属薄板、薄板ガラス、樹脂フィルムなどを検討した。それらの候補材料のうち、金属薄板に関しては、厚さ0.1mmの可撓性金属薄板上に作製したCIS太陽電池において、小面積ではあるものの、変換効率18%超のCIS太陽電池を作製することに成功した。作製した小面積CIS太陽電池の外観を図. III-2-(イ)-(iii)-C-1 に示す。また、当社が従来開発してきたガラス基板上CIS太陽電池を用いた検討としては、CIS太陽電池を作製したガラス基板に対して裏面側からエッチング、研磨を実施する事で、ガラス基板を厚さ0.2mmまで薄板化し、可撓性とすることに成功した。



図. III-2-(イ)-(iii)-C-1 厚さ0.1mmの可撓性金属薄板上に作製したCIS太陽電池の外観

#### 1.2 可撓性基板の選定 3D曲面CIS太陽電池モジュールの開発

前項で述べた通り、可撓性基板として厚さ0.1mmの金属薄板および厚さ0.2mmのガラス薄板において、それぞれCIS太陽電池を作製する事ができた。2021年度においては、これらの基板の中でも割れなどの懸念がなく、また高効率化の可能性がある金属薄板上CIS太陽電池の開発に注力した。この中で、3D曲面モジュール開発の中間目標である30cm x 30cmのサイズを踏まえて、大面積化への検討を行った。具体的には、短冊状の金属薄板上CIS太陽電池の単位セルを瓦積み接続で物理的および電氣的に接触させる事で大面積モジュールに展開可能なモジュール構造を開発した。セル同士の接続には、導電性の両面テープを用いた接続法に加え、溶接法による接続法も検討した。導電性の両面テープを用いた場合の瓦積み接続によるCIS太陽電池モジュール構造の概略を図. III-2-(イ)-(iii)-C-2 に示す。同図に示したように、CIS太陽電池セルの透明導電酸化物膜(Transparent Conductive Oxide, TCO)上に集電電極であるバスバー電極を成膜し、このバスバー電極上に両面性導電テープを貼り、さらにその上に隣接するCIS太陽電池セルを重ねる事で瓦積み接続によるCIS太陽電池モジュールを実現した。

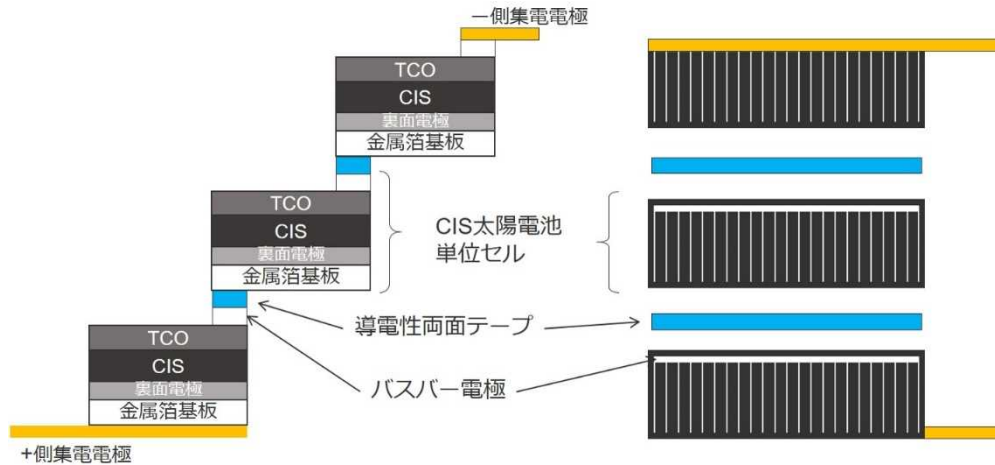


図. III-2-(イ)-(iii)-C-2

導電性両面テープを用いた瓦積み接続によるC I S 太陽電池モジュール構造の概略

また、実際に作製した5直列接続のC I S 太陽電池モジュールを図. III-2-(イ)-(iii)-C-3 に示す。この構造においては、単位セルの表面に設けられたバスバー電極膜が、隣接セルの金属基板裏面側と接続される事で、太陽電池のアクティブエリアの充填率を高めた直列接続が実現できている。本構造のC I Sセルに集電電極の取り付けおよび封止材を用いたラミネートを実施する事で太陽電池モジュールを作製し、本モジュールで発電を確認する事ができた。

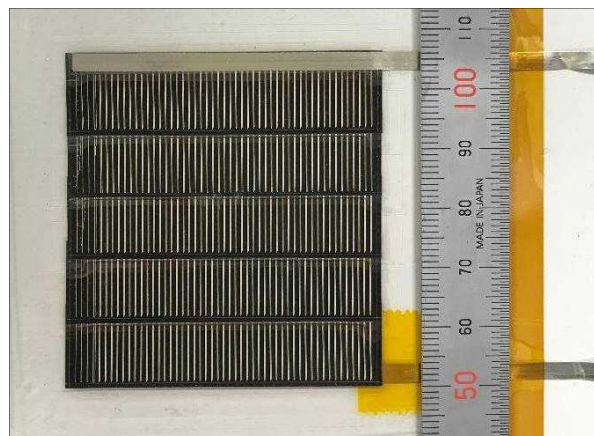


図. III-2-(イ)-(iii)-C-3 瓦積み接続で作製した5直列接続のC I S 太陽電池モジュール

中間目標である30cm x 30cmサイズのモジュール作製のためには、現在使用している単位セルを用いた場合、単位セルを直列で28個前後瓦積み接続したサブモジュールを作製し、またそのようなサブモジュールを5並列分作製する必要がある。2022年度においては、このような大面積のモジュールを瓦積みで作製する際の、各セルの重ね合わせの精度を検証し、その上でボトムセルモジュールのレイアウトを設計する。

### G a A s フィルター下におけるC I S 太陽電池の評価環境の構築および特性評価

C I S 太陽電池のG a A s フィルター下における特性評価手法に関しても検討を行った。単純にC I S 太陽電池の上にG a A s フィルターを乗せるだけの構成では、C I S 太陽電池とG a A s フィルターの間には低屈折率である空気層が入る事になり、フレネル反射が多くなる。そこで、C I S 太陽電池とG a A s フィルターの間には屈折率が約1.4であるエタノールを導入する事でフレネル反射の低

減を行った。具体的には、まずシャーレを用意し、その底にC I S太陽電池を固定した。次にC I S太陽電池の表面が覆われる程度にエタノールを注入し、その上からG a A s フィルターを置く事でC I S太陽電池-G a A s フィルター間へのエタノールの挿入を行った。実際の評価の写真を図. III-2-(イ)-(iii)-C-4に示す。

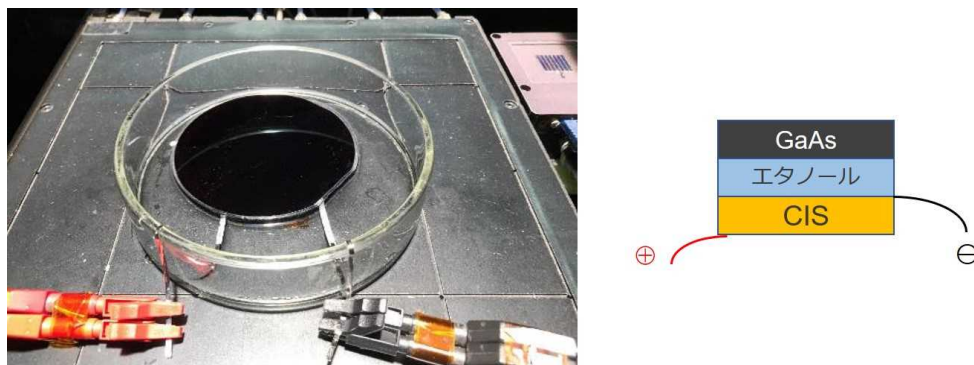


図. III-2-(イ)-(iii)-C-4 GaAs フィルター下における CIS 太陽電池の特性評価

また、前述の評価環境を用いて、厚さ0.1mmの可撓性金属薄板上に作製したC I S太陽電池の特性評価を実施した。はじめに、G a A s フィルターおよびエタノールがない状態で、即ち通常の評価手法で特性評価を実施し、17.4%の変換効率を確認した。次に同じセルをG a A s フィルターおよびエタノールを導入した状態で再度評価し、4.2%の変換効率を確認した。図. III-2-(イ)-(iii)-C-5に今回評価を行ったC I S太陽電池の電流電圧特性を示す。今回評価を行ったC I S太陽電池はボトムセルとしてのチューニングはできていないものであるが、中間目標値であるG a A s フィルター下での変換効率5.5%とはまだギャップがある事を確認した。中間目標値達成には、後項で述べるように、金属薄板上に作製するC I Sのバンドプロファイルをボトムセルとしてより適切なプロファイルにする必要がある。今回G a A s フィルター下で評価したC I S太陽電池の短絡電流密度は10 mA/cm<sup>2</sup>であったが、このバンドプロファイルの改良によって長波長領域の外部量子効率を改善し、G a A s フィルター下の短絡電流密度を11 mA/cm<sup>2</sup>以上とすることを旨とする。

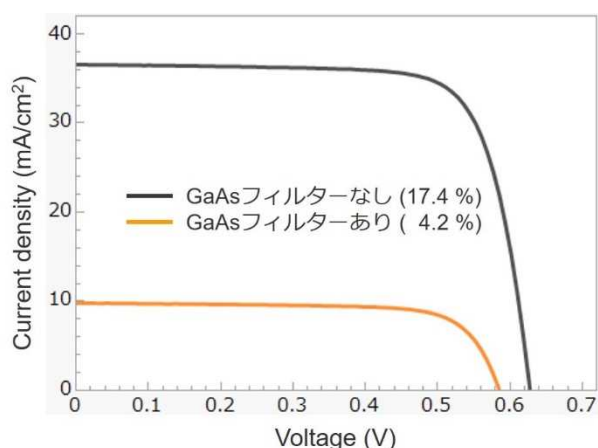


図. III-2-(イ)-(iii)-C-5 通常の評価方法およびG a A s フィルター下での特性評価を行ったC I S太陽電池の電流電圧特性

### 1.3 C I Sボトムセルの開発

C I Sの超高効率ボトムセルの実現には、C I S太陽電池の長波長領域の量子効率改善が重要な課題であり、この課題は(1) C I Sのバンドギャップの縮小、および(2) C I Sのバンドプロファ

イル中における低バンドギャップ領域の拡大、の2点で実現される。今年度は2020年度に確立したCISのバンドギャップ制御法の、金属薄板上CISへの応用を検討した。当社のCIS光吸収層はCu、In、Gaの金属からなる前駆体の成膜およびこの前駆体膜をセレン化水素ガス、硫化水素ガスと反応させることで得られる（セレン化/硫化法）が、これらのプロセス条件を調整する事で上記（1）のCISバンドギャップの縮小を実現し、図. III-2-(イ)-(iii)-C-6 に示すように長波長領域における外部量子効率（External Quantum Efficiency, EQE）の改善を確認した。次年度は更なるプロセス調整を重ねる事で上記（2）の低バンドギャップ領域の拡大に取り組むと同時に、従来はガラス基板からの熱拡散によって導入されてきたアルカリ金属の添加にも着手し、変換効率の向上を目指す。

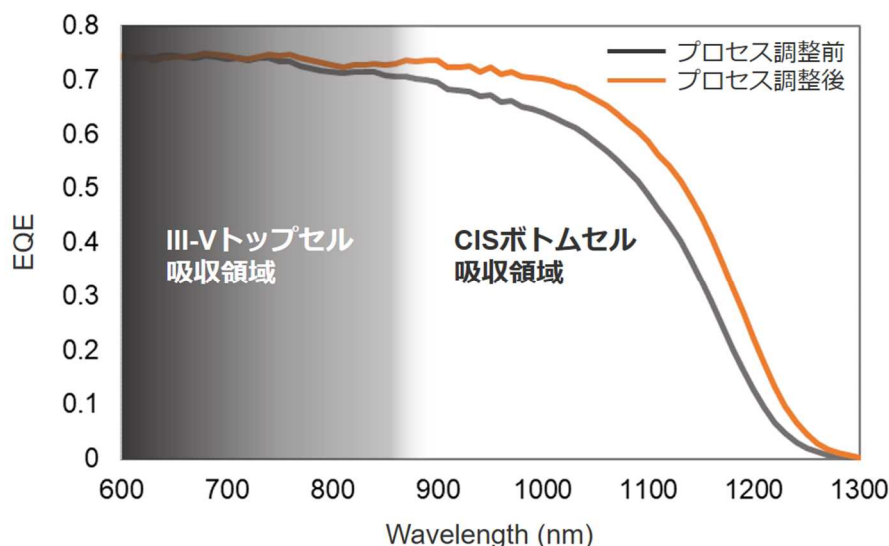


図. III-2-(イ)-(iii)-C-6 CISのプロセス調整による長波長側の量子効率の改善

## 2. 実用化・事業化見通し

当社グループではこれまでCIS太陽電池の製造および販売事業を行ってきたが、本プロジェクトで開発している金属薄板上CIS太陽電池の事業化は、当社で行ってきたガラス基板上CIS太陽電池とは基板の性質が大きく異なるため、量産における基板のハンドリングが生産技術としては課題となる。また、金属薄板基板上に作製したCIS太陽電池セルの分断プロセスや瓦積みプロセス（セル同士の重ね合わせおよび接続プロセス）も現状は手作業で行っており、これらのプロセスの自動化も量産に向けた課題となる。このような生産技術上の課題に対しては装置メーカーとも協議を重ねながら自動化プロセスの開発を推進する。

また、現在は小面積かつ少量のサンプル開発を行っているが、今後はより大面積かつ大量のサンプル作製に取り組む中で各プロセスの繰り返し再現性の検証および生産歩留の試算を行うと同時に、生産コストの試算も行う事で、事業化に向けた各課題の洗い出しおよびその対応策を検討する。

## 3. 波及効果

本プロジェクトにおける技術開発によって、可撓性のある金属薄板基板上へのCIS太陽電池作製が可能である事、また、ガラス上のCIS太陽電池と同様に、プロセス調整によってCISのバンドプロファイルが制御可能である事が示唆された。このことから、本プロジェクトの技術開発が進むことで、高効率、軽量、フレキシブルなIII-V化合物とCISのタンデム型太陽電池の実現が期待される。このような特性を持つ太陽電池は、本プロジェクトがターゲットとする電気自動車のみならず、近年普及拡大の進むドローン、UAV等への展開も予想される。

## 4. 今後の展開

2022年度においては、現在手作業で対応しているCIS太陽電池セルの分断プロセスや瓦積みプロセスに関して、装置メーカーとの協議、協業を重ねながらこれらのプロセスの自動化技術開発に着手する。並行して金属薄板上CIS太陽電池の大面積化にも着手する。このような各プロセスの自



動化および大面積化を実現した後の2023年度以降に各プロセスの面内均一性および繰り返し再現性を検証しながら生産歩留の試算を行う。また、移動体用途としての太陽電池では、搭載する移動体に合わせて太陽電池の電気的特性、形状等をカスタマイズする必要があると思われる。よって、2024年度以降には、ビジネス戦略として、顧客候補との議論を通して目指すべき商材をデザインし、その商材を製造するための生産技術の開発を遂行する。

移動体用途としての太陽電池には、効率のみならず信頼性上も高い性能が求められる。この点に関しても2023年度より振動や温度サイクル等の基本的な項目を評価し、また2024年度以降には顧客候補との議論を通してさらに必要な信頼性試験の詳細を把握し、商材開発の一環として評価を実施する。

現在は研究拠点においてCIS太陽電池の作製を行っているが、実際の事業化に向けては別途量産拠点の立上げが必要となる。この量産拠点の立上げのターゲットを2025年度以降、また実際の量産開始のターゲットを2027年度以降とする。

## 5. 特許・論文・对外発表

該当なし。

(2022年6月20日現在)

## D 超高効率多段接合モジュール開発（学校法人トヨタ学園豊田工業大学、（再委託先：学校法人明治大学、国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学））

### 1. 成果詳細

豊田工業大学(Toyota Technological Institute, TTI)及び明治大学・名古屋大学は、(1)曲面对応 Si ボトムセル高効率化技術開発、(2)新規材料探索および異種界面評価技術開発、(3)移動体用モジュール発電量評価・構造最適化設計に取り組み、現在までに主に下記のような成果を得た。

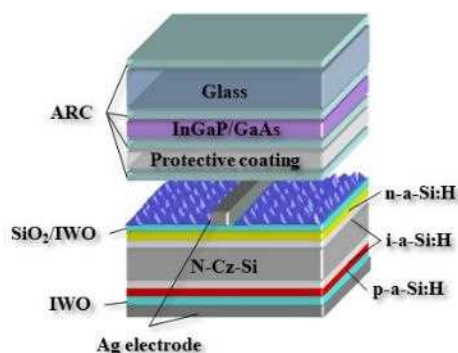
#### (1)曲面对応 Si ボトムセル高効率化技術開発

TTI では、Si ボトムセルとして SHJ (Silicon Hetero-junction) セルが最も有望と判断し、前 NEDO プロジェクトにおいて構築した結晶 Si 太陽電池セル・パイロットライン、および名古屋大学に導入したクラスター型 PECVD 装置を活用して高効率 SHJ セルの開発を行ってきた。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-1 に TTI で構築した高精度 SHJ セル試作プロセスの概略を示す。2020 年度には、このプロセスを用いて試作した 48mm 角高精度 SHJ セルで 1-sun (100mW/cm<sup>2</sup>, AM1.5) 照射下セル効率 22.4%を達成。2021 年度は、この高精度 SHJ 試作プロセスのさらなる高度化・高効率化を検討するとともに、タンデム用ボトムセルとしてのセル構造・プロセスの改善と最適化に取り組んだ。

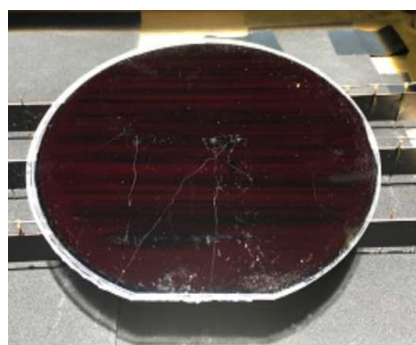
豊田工大	N-type Cz Si
	ゲッタリング処理
	片面 Texture
	ラウンドエッチング
名古屋大	製膜前洗浄
	表面 i/n a-Si 製膜
豊田工大	裏面 i/p a-Si 製膜
	表裏両面 IWO 製膜
	レジスト塗布・露光・現像
	表裏両面 Ag スパッタ/蒸着
	リフトオフ
	アニール

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-1. 高精度 SHJ セル試作プロセス

トップセルが上面に配置されることによって低照度環境下におかれるボトムセルにおいては、特に長波長光を効率的に吸収して光電変換することが求められる。そこで我々はボトムセルに適した Texture 形状の改善、透明導電膜 (Transparent Conductive Oxide, TCO) の長波長光透過率向上および仕事関数調整、反射防止膜 (Anti-reflection coating, ARC) 改善による光閉じ込め技術の深化やアモルファス層改善によるキャリア閉じ込め技術の深化、などを検討した。また、これらのセル構造・プロセス改善と並行して、試作した SHJ セルの特性を GaAs フィルター下で測定・評価した。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-2. SHJ セルおよび GaAs フィルター構造模式図

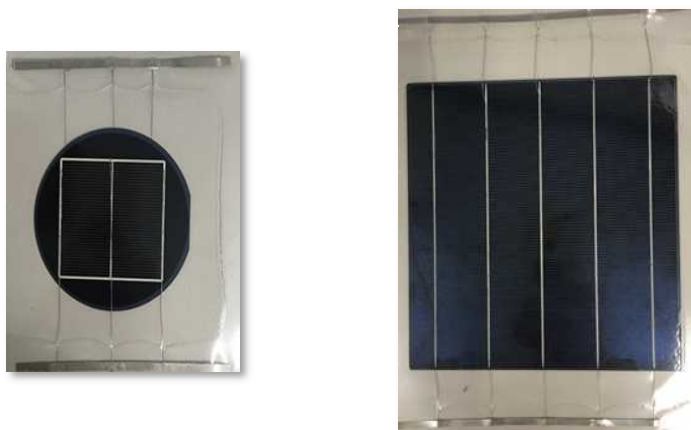


図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-3. GaAs フィルター下セル特性測定

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-2 に TTI で試作した SHJ セルと測定に用いた GaAs フィルターの構造模式図を示し、図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-3 には、実際の GaAs フィルター下でのセル特性測定の様子を示している。なお、測定に用いた GaAs フィルターはシャープ（株）よりご支給いただいた試作品である。当初（2021 年 6 月時点）TTI で試作した 1-sun 下効率 22.95% の SHJ セルを GaAs フィルター下で測定したところ、効率は 5.04% であった。しかしその後、上記のようなセル構造・プロセスの改善・最適化に取り組んだ結果、1-sun 下効率を向上させるとともに、それ以上に GaAs フィルター下効率を向上させることができた。表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-1 に、本年度試作した 48mm 角高精度 SHJ セルの 1-sun および GaAs フィルター下太陽電池特性を示す。上記の検討の結果として、1-sun 下効率が 23.60% まで向上するとともに GaAs フィルター下効率 5.49% が得られ、中間目標（ポトムセル効率 5.5%）に極めて近い値を達成することができた。

表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-1. TTI 試作 48mm 角高精度 SHJ セル 1-sun および GaAs フィルター下特性

測定環境	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	Eff. (%)
1-sun 下	40.30	0.724	0.809	23.60
GaAs フィルター下	9.85	0.687	0.811	5.49



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-4. ワイヤー接続・ラミネート完 (a) 3 インチセル及び(b) 156mm 角セル

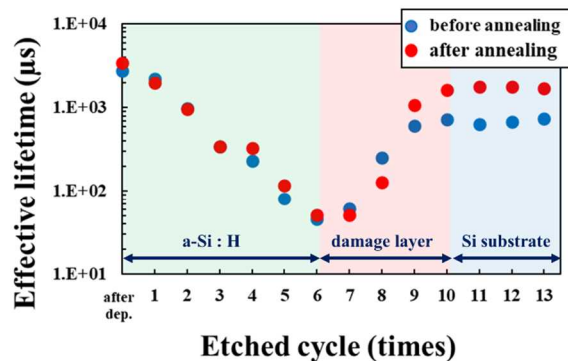
上記のようなセルの高効率化・最適化検討と並行して、試作したセルをモジュール化する検討も行った。特に GaAs フィルター（ボトム環境）下で高い CTM (Cell-to-Module ratio) を実現するセル間接続法の確立を目指し、低融点はんだや導電性接着剤を使ったワイヤー接続を検討した。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-4 には、ワイヤー接続した後、封止材でラミネートした状態（サブアッセンブル状態）の 3 インチフォトリソ電極セル及び 156mm 角印刷電極セルを示している。検討の結果、ラミネート後もベアセル特性をほぼ維持 (CTM≒100%) することができるセル間接続法を確立することができた。今後は、ボトムセルとしてのセル構造・プロセスの改善・最適化を継続して GaAs フィルター下セル効率をさらに向上させるとともに、モジュール化検討およびモジュール試作・評価を推進し、モジュール効率 33% の実現に貢献していく。

## (2) 新規材料探索および異種界面評価技術開発

明治大学では、以下の研究開発を行った。

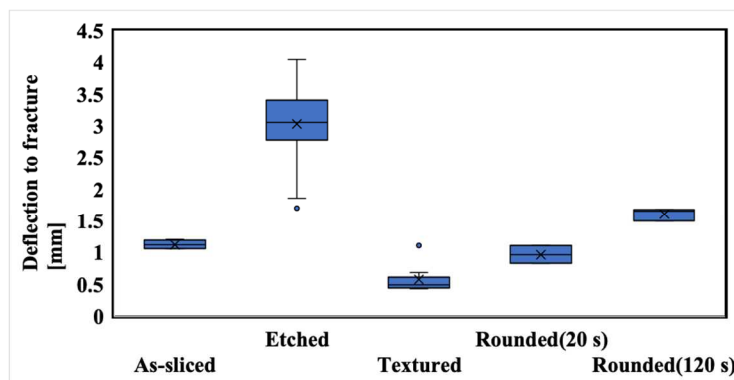
### (A) アモルファスシリコン(a-Si:H)成膜プロセスにおける変換効率劣化要因の解明

SHJ プロセスのさらなる高効率化を目指し、a-Si:H 成膜プロセスとして一般的であるプラズマ励起化学気相成長 (PECVD) 法によって誘起される結晶シリコン(c-Si)へのダメージとその深さの評価を行った。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-5 にステップエッチングで得たライフタイムの深さ方向分布を示す。6 ステップ目までのエッチングでは、a-Si:H 層がエッチングされ、パッシベーション効果の低下によりライフタイムが減少した。6 回目から 10 回目のプロセスではダメージ層を除去したことによるとみられるライフタイムの増加が確認された。また、このダメージは 200℃、30 分の熱処理では消失せず、完成後の太陽電池に残留することが分かった。エッチングレートより推定されるダメージ層は c-Si 表面約 2.60 nm に存在すると考えられる。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-5. エッチングによるキャリアライフタイムの推移

### (B) 単結晶 Si ウエハの表面構造が柔軟性に与える影響



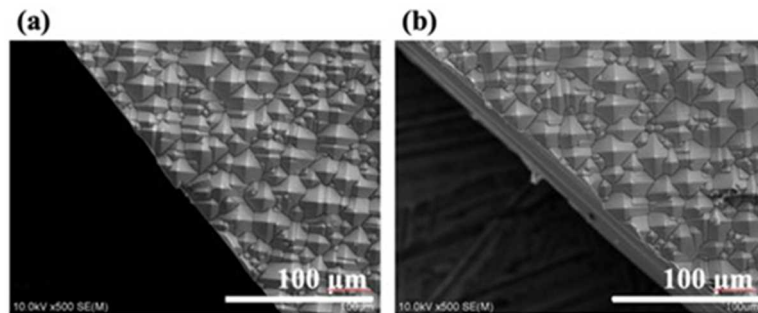
図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-6. Ball-on-Ring 試験結果

本研究ではウエハの表面構造が柔軟性に与える影響を評価することを目的に、様々な表面構造を持つ Si ウエハに対し、三次元的な曲げの評価が可能な二軸曲げ試験の一種である、Ball-on-Ring 試験を行い、柔軟性を評価した。厚さ 180 μm にスライスした Si (100) ウエハに対し (As-sliced)、20 wt% KOH による 70℃、10 分のダメージエッチングを行った (Etched)。エッチングした試料に対し、常圧化学気相成長 (APCVD) 法によって製膜されたシリコン酸化膜で片面を保護し、3 wt% KOH 水溶液+添加剤による 80℃、10 分のテクスチャーエッチングを片面のみに行った (Textured)。さらに、テクスチャーリン

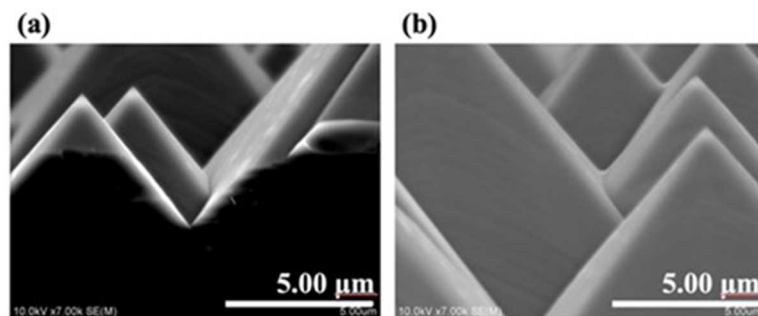
グを行なった試料に対し、ウエハ柔軟性を向上させるために、 $\text{HNO}_3:\text{HF}(50:1)$ による、室温、120 secで混酸エッチングを行い、ピラミッド構造を丸めた(Rounded)。各試料に対して Ball-on-Ring 試験を行い、ウエハ破壊時の曲げたわみを最大曲げたわみとして柔軟性を評価し、テクスチャされたウエハの破壊起点近傍を SEM で観察した。

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-6 に各表面構造のウエハにおける曲げ試験結果を示す。As-sliced のウエハに対してダメージエッチングを行うことで破壊の起点となるような亀裂などが除去され、柔軟性が大きく向上している。一方で Textured は柔軟性が As-sliced と同程度まで低下した。ウエハ表面のテクスチャ構造によって太陽電池の変換効率は向上するが、その構造がウエハの柔軟性を大きく低下させる恐れがあるため、フレキシブル単結晶 Si モジュール実現のためには高い柔軟性が確保できる表面構造を検討することが必要である。混酸エッチングによってピラミッド構造を丸めた試料では、柔軟性が向上された(図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-6)。しかし、Etched より高い柔軟性の向上は見られなかった。この柔軟性向上の機構を明らかにするために Textured と Rounded の破壊起点の近傍を SEM によって観察したところ、どちらもピラミッド構造の谷部に沿って破壊されていることが確認できた(図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-7)。これは、ピラミッド構造の谷に応力が集中することで、そこから破壊が始まっているため、柔軟性が低下していると考ええる。また、破壊断面を SEM にて観察したところ、Rounded が Textured に比べ、多少ピラミッド構造が丸みを帯びている(図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-8(b))。Textured より Rounded の方が柔軟性が向上しているのは、ピラミッド構造のような谷では応力が集中してしまうのに対し、混酸エッチングによってピラミッド構造を丸めることにより応力が分散され、柔軟性が向上していると考ええる。

三次元曲面に対応できる単結晶 Si 太陽電池の実現のために、Si ウエハの表面構造を変えて、三次元に曲げ試験を行い、柔軟性を評価し、SEM にて観察した。ダメージエッチングを行うことでウエハの柔軟性は向上したが、テクスチャーエッチングを行うことで柔軟性が低下することがわかった。さらに、混酸エッチングを行うと、柔軟性の改善が確認できた。三次元曲面に対する柔軟性が確認できたため、三次元曲面に対応できるフレキシブルな単結晶 Si 太陽電池の実現の可能性を示した。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-7. 破壊後ウエハのテクスチャの SEM 観察図 (a)Textured, (b)Rounded



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-8. SEM によるテクスチャの拡大図 (a)Textured, (b)Rounded

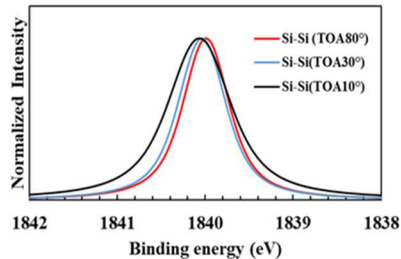
### (C) キャリア選択層としての TMD(二次元層状材料)の検討

積層数や混晶の組成比によりバンド構造の制御可能な TMD に着目し、キャリア選択層としての利用の可能性について検討した。我々は、手始めに TMD として多くの報告例がある  $\text{MoS}_2$  に着目した。

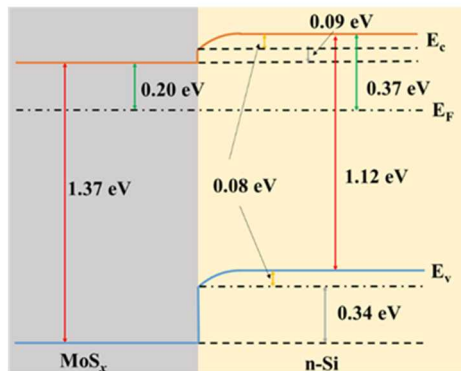
n 型結晶 Si 基板に RF マグネトロンスパッタ法を用いて  $200^\circ\text{C}$  で  $\text{MoS}_x$  を 5 nm 成膜した。キャリア選択層として重要なバンド曲がりについて、角度分解 HAXPES(硬 X 線光電子分光法) (SPring-8 BL46XU) を利用して TOA(Take-Off Angle)を  $10^\circ\sim 80^\circ$  の範囲で変化し、各角度において測定された  $\text{Si}1s$  スペクトル

の結合エネルギー $E_b$  (binding energy)を比較することで $\text{MoS}_x/\text{c-Si}$  界面のバンド曲がり进行评估した。

図III-2-(イ)-(iii)-D-9 に HAXPES によって得られた Si1s スペクトル中の Si-Si 結合の TOA 依存を示す。図9より TOAの減少により Si-Si のピーク位置が 0.08 eV シフトすることが確認された。この結果は、 $\text{MoS}_x/\text{c-Si}$  界面近傍で Si のバンドが下方方向に曲がっていることを示す。さらに、同種の試料で求めたバンドギャップと価電子端スペクトルの結果を総合すると、図III-2-(イ)-(iii)-D-10 に示すバンドアラインメントであることが想定される。したがって  $\text{MoS}_x$  はキャリア選択層の中でも電子コンタクトとして働く可能性が高いことが明らかになった。

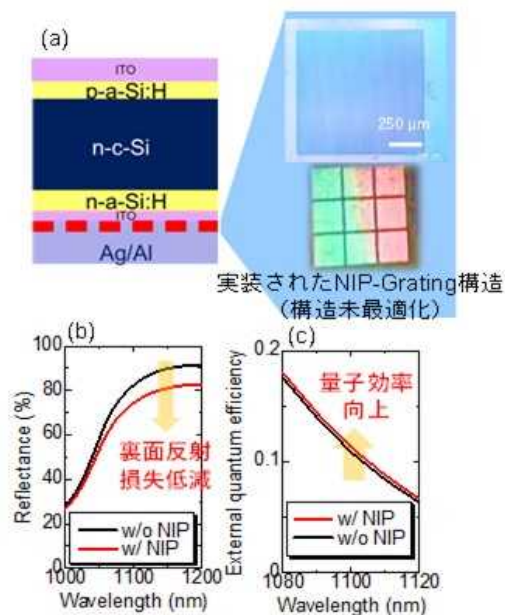


図III-2-(イ)-(iii)-D-9. 各 TOA における Si1s スペクトル



図III-2-(イ)-(iii)-D-10.  $\text{MoS}_x/\text{c-Si}$  界面近傍のバンド構造

名古屋大学では、Finite-difference time-domain method (FDTD 法)を用いた光学シミュレーションによる長波長感度を極限まで高める光閉じ込め構造の作製と結晶シリコン表面再結合抑制のための高



図III-2-(イ)-(iii)-D-11. (a) SHJセルに実装した NIP-Grating 構造の写真と SHJセルの (b)表面反射率及び(c)外部量子効率

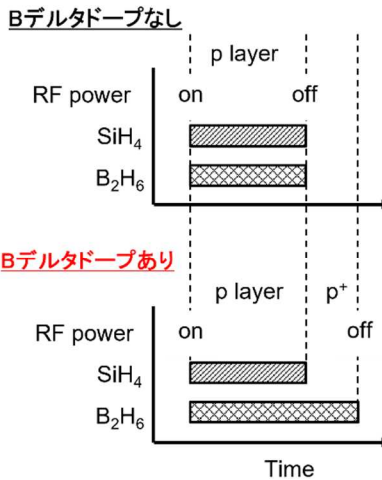
品質キャリア選択材料の開発を行った。

(A) 光閉じ込め構造

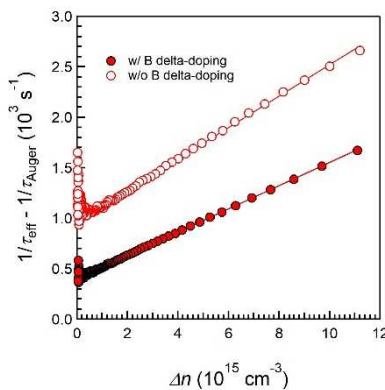
図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-11(a)に作製したシリコンヘテロ接合型 (SHJ) 太陽電池の構造と実装したナノインプリント (NIP) -Grating 構造の写真を示す。NIP-Grating 構造を裏面のスズ添加酸化インジウム (ITO) の裏側に形成し、導通のために一部をエッチングした後、金属電極を蒸着した。実装した NIP-Grating 構造は幅 5  $\mu\text{m}$ 、周期 15  $\mu\text{m}$ 、高さ 100 nm 程度の Grating 構造である。今回は NIP-Grating 構造を太陽電池構造に実装するプロセスを開発することが目的であったため、構造は長波長光用途に最適化されていない。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-11(b)はセル構造の表面反射率を NIP-Grating 構造ありなしで比較したものである。波長 1000~1200 nm の範囲で反射率の低減を確認した。表面構造は NIP-Grating 構造ありなしで同じであることから、裏面側で反射し、表面側に放出された光の強度が低減したことを示している。すなわち、裏面の NIP-Grating 構造により、長波長光が散乱し、セル内部における光路長が延伸したことを示唆する結果である。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-11(c)に示すように長波長領域の外部量子効率も増加することを確認した。増加率は十分ではないが、NIP-Grating 構造を長波長光用途に最適化することでさらなる効率向上を見込むことができる。

(B) 高品質キャリア選択材料開発

ヘテロ接合型太陽電池の高効率化に貢献するために、p 型水素化アモルファスシリコン p-a-Si:H のプロセス改善を行った。透明導電膜/p-a-Si:H 界面の電気的特性の改善のために、図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-12に示すようにボロンデルタドーププロセスを開発してきた。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-13は、実効キャリア寿命の逆数 ( $1/\tau_{\text{eff}}$ ) から Auger 再結合によるキャリア寿命の逆数 ( $1/\tau_{\text{Auger}}$ ) を減じた値を縦軸にとり、横軸を少数キャリア密度 ( $\Delta n$ ) に取ったグラフである。 $(1/\tau_{\text{eff}} - 1/\tau_{\text{Auger}}) \propto J_0 \cdot \Delta n$  の関係から線形回帰により求めた  $J_{0, \text{ip}}$  は、B デルタドープにより 33.5 から 16.8  $\text{fA cm}^{-2}$  に低減した。これは、化学パッシベーションを損なうことなく電界効果パッシベーションが強化されたためと考えられる。また、接触抵抗も B デルタドープにより、3.46 から 1.12  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  に低減しており、キャリアの収集

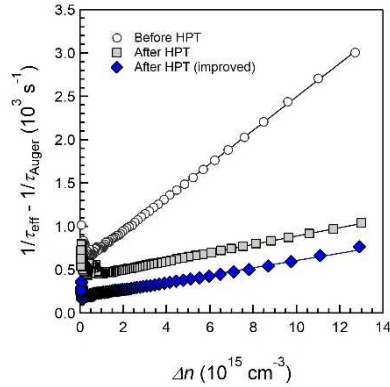


図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-12. B デルタドーププロセスの概略図



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-13. B デルタドープ有無のヘテロ構造の  $1/\tau_{\text{eff}} - 1/\tau_{\text{Auger}}$  の少数キャリア密度依存性

を改善することができた。

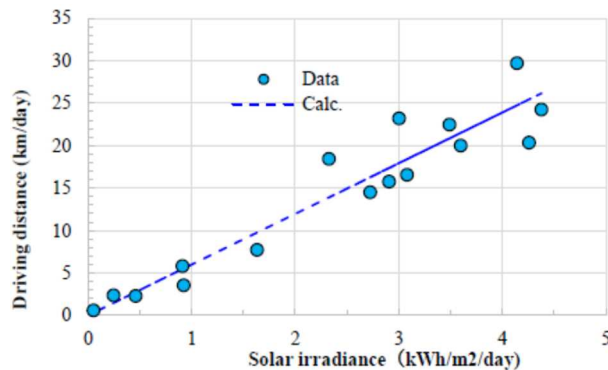


図III-2-(イ)-(iii)-D-14. 水素プラズマ処理前後のNATURE構造の $1/\tau_{\text{eff}} - 1/\tau_{\text{Auger}}$ の少数キャリア密度依存性

さらに、シリコンナノ結晶とシリコン酸化膜を複合化させたNATURE contact (NAnocrystal Transport path in Ultra-thin dielectrics for REinforced passivating contact)を新規高品質キャリア選択材料として開発してきた。パッシベーション性能の向上を目指し、水素プラズマ処理(HPT)を用いてきた。今回、HPTプロセスの最適化を進め、パッシベーション性能のさらなる向上を行った。図14は、水素プラズマ処理前後のNATURE contactの $1/\tau_{\text{eff}} - 1/\tau_{\text{Auger}}$ と $\Delta n$ の関係である。傾きから求めた $J_0$ は、HPT前では $40.4 \text{ fA cm}^{-2}$ であったのに対し、改善したHPT後では $8.8 \text{ fA cm}^{-2}$ と大きく低減した。

### (3) 移動体用モジュール発電量評価・構造最適化設計

太陽電池搭載自動車の走行試験に関して、トヨタ自動車および日産自動車の実証車の走行試験データをもとに、解析を進めている。各種太陽電池モジュールの現状調査と解析を行った結果、走行距離の延長のためには、車載用太陽電池モジュールの高効率化、温度係数や照度特性の改善が重要であることがわかっている。各種太陽電池モジュールを搭載した自動車の走行距離の評価を進めている。トヨタ自動車の実証車の太陽電池出力 $860\text{W}$ 、電費 $9.35\text{km/kWh}$ 、充電のシステム効率 $73.9\%$ 、を仮定し、日射量を変化させて、計算した。2020年9月の走行試験データと比較して、図III-2-(イ)-(iii)-D-15に示す。実測値と良い一致を示している。この月の平均日射量が $2.4 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ のため、一日の平均走行距離は $14.2 \text{ km/day}$ にとどまっている。名古屋の平均日射量 $4 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ 下では $25 \text{ km/day}$ に近い走行距離が期待できる。



図III-2-(イ)-(iii)-D-15. トヨタ自動車Prius実証車の走行距離の日射量依存性に関する計算値と実測値

表III-2-(イ)-(iii)-D-2に、現状の太陽電池モジュールを搭載した場合の走行距離の計算値と実測値、表3に、候補となる車載用太陽電池の効率の現状値と走行距離の計算値を示す。本研究開発で試作したSiボトムセル(効率 $5.5\%$ )とシャープのInGaP/GaAs 2接合上部セルのメカニカルスタック3接合セルにより、効率約 $34\%$ と走行距離 $28.2\text{km/day}$ の実現が期待できる。表III-2-(イ)-(iii)-D-3から予想されるようにモジュール効率 $35\%$ 以上の高性能太陽電池モジュールを開発することにより、平均日射条件下で $30\text{km/day}$ 以上、晴天時 $50\text{km/day}$ 以上の長距離走行が可能であることがわかる。



今後、年間を通しての走行試験データを入手し、解析の精度をあげると共に、種々の損失要因、課題を明らかにして行く予定である。また、宮崎大の走行試験データと比較検討し、太陽電池搭載自動車に適した高効率太陽電池の開発に資する予定である。

表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-2. 現状の太陽電池モジュールを搭載した場合の走行距離 DD の計算値と実測値

Modules	Efficiency (%)	Estimated DD (km/day)	Actual DD (km/day)
III-V 3-J	32.65	27.0	
III-V 3-J (Prius)	30.9	25.6	25.6
GaAs	25.1	20.8	
Si	24.4	20.2	
Si (Sion)	20	16.6	16
CIGS	19.2	15.9	
Perovskite	17.9	14.8	

表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-D-3. 候補となる車載用太陽電池の効率の現状値と走行距離 DD の計算値

Solar cells	Efficiency (%)	Estimated DD (km/day)
III-V 3-J	39.5	32.8
III-V/Si 3-J	35.9	29.8
III-VSi 3-J (This study)	34.0	28.2
III-V/Si 2-J	32.8	27.9
III-V/CIGS 3-J	29.3	24.3
Perovskite/Si 2-J	29.8	24.7
Perovskite/perovskite 2-J	28.0	23.2
Perovskite/CIGS 2-J	24.2	20.1

## 2. 実用化・事業化見通し

本事業は移動体用超高効率太陽電池モジュールを開発するプロジェクトであるが、その主要なターゲット市場は車載 PV (VIPV) である。この VIPV には近年、世界的に急速に注目が集まってきており、海外では VIPV や、それを搭載した電動車 (PV-EV) の市場投入が一部で既に始まっている。かかる状況においては我々も、本プロジェクトの研究開発成果を一刻も早く実用化・事業化していかなくてはならない。そのためには最終目標の達成前であっても、市場投入できる開発成果については順次、実用化・事業化していくべきである。より具体的に言うならば、化合物/Si タンデム太陽電池モジュールの市場投入に先立って、Si 太陽電池モジュールを VIPV 用としていち早く市場に投入していくことが非常に重要である。豊田工業大学は本プロジェクトにおいて、軽量かつ曲面对応可能な高効率 Si 太陽電池セルおよびモジュールの技術開発を担当しており、その研究開発成果は VIPV 用 Si 太陽電池モジュールにほとんどそのまま適用可能である。豊田工業大学の試作プロセスを用いて作製した SHJ セルは 1-sun において効率 23.6% を記録しているが、この効率向上のためのセル構造・プロセス改善・最適化検討において得られた技術的知見はそのまま、VIPV 用 Si 太陽電池モジュールの実用化に活かすことができる。一方、明治大学では曲面追従性に優れた、湾曲に強いウエハプロセスの開発を行い、SHJ 構造セルにおいて曲率半径 1m 以下を達成している。この検討により得られた技術的知見も VIPV 用モジュールの実用化において非常に有益である。さらに名古屋大学で行っている、長波長感度を極限まで高める光閉じ込め構造や、結晶シリコン表面再結合抑制のための高品質キャリア選択材料開発は、タンデム用ボトムセルのための研究開発であると同時に、日射条件が刻一刻と変化する VIPV において変換効率と発電量の最大化に寄与する技術である。また、豊田工業大学では連携先太陽電池メーカーと数多くの研究打ち合わせを行って緊密に意見・情報を交換するとともに、電気回路シミュレーション等を活用した検討も共同で行ってきたが、その過程において部分日影の影響を緩和して出力低下を最小限に抑えることができ、さらに曲面モジュールの面内不均一性による発電量低下に対しても改善効果があると考えられる、新しいモジュール方式のアイデアを生み出すことができた。上記のような豊田工業大学・明治大学・名古屋大学の研究開発成果は、連携先太陽電池メーカーが近い将来、市場に投入する VIPV モジュールに適用され、実用化されていく見込みである。

### 3. 波及効果

上記のように、豊田工業大学・明治大学・名古屋大学の研究開発成果は、連携先 PV メーカーにおいて VIPV モジュールとして早期に実用化・事業化されていくことにより、その PV 事業の発展に貢献するとともに、研究開発により得られた技術的知見を連携先 PV メーカーが特許化・知財化していくことにより、競合する海外 PV メーカーに対する競争優位性確保にも寄与していくものと考えている。さらには、こういった一連の活動が PV モジュールを国内生産へ回帰させる動きへとつながっていき、我が国の PV 産業が再興するきっかけとなることを期待している。昨今の国内外の政治的・経済的状況を鑑みれば、日本国内において VIPV モジュールを製造・販売して事業展開することは、十分に可能であると考えられる。特に、自動車産業は今なお我が国がモノづくりにおいて世界をリードしている産業分野である。これに VIPV という新たな価値を付加することによって、我が国自動車産業の国際競争力をなお一層強化することは、国家戦略としても非常に重要であると考えられる。加えて、VIPV とそれを搭載した PV-EV の普及を進めることは、移動・輸送などのトランスポート分野における CO2 排出削減に大きく寄与し、我が国の国際公約である『2050 年カーボンニュートラル宣言』達成に貢献するものである。また、軽量・曲面对応・超高効率・低コストな PV モジュールは VIPV や PV-EV に限らず、高高度長時間滞空型無人機 (UAV) や、成層圏通信プラットフォーム (HAPS) などの移動体用電力源として今後、広く普及していくものと考えられる。それに伴い、新たな産業分野を創出するとともに新たな雇用も生み出していくものと期待される。

### 4. 今後の展開

上記のような VIPV モジュールの早期実用化・事業化に向けて、連携先 PV メーカーの研究開発をサポートするとともに、新規プロセス技術・新規光閉じ込め構造の研究開発を継続することによって、GaAs フィルター下で効率 6%となるシリコンセルを早期に開発し、軽量で曲面追従可能な変換効率 35%以上の超高効率太陽電池モジュール実現のために必要なボトムセルの共通基盤技術を確立する。それを活用して試作したシリコンボトムセルを連携先 PV メーカーに提供してモジュール効率 35%の実現に貢献するとともに、軽量・曲面对応・超高効率・低コストなタンデム PV モジュールのいち早い実用化・事業化に貢献していく。

### 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	5	11	1	17
研究発表・講演 (国内・審査有)	38 (0)	38 (0)	4 (0)	80 (0)
(国際・審査有)	(19)	(28)	(4)	(51)
(国内・審査無)	(19)	(10)	(0)	(29)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	10	0	10
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	1	0	1
展示会への出展	0	1	0	1
受賞実績	1	1	0	2

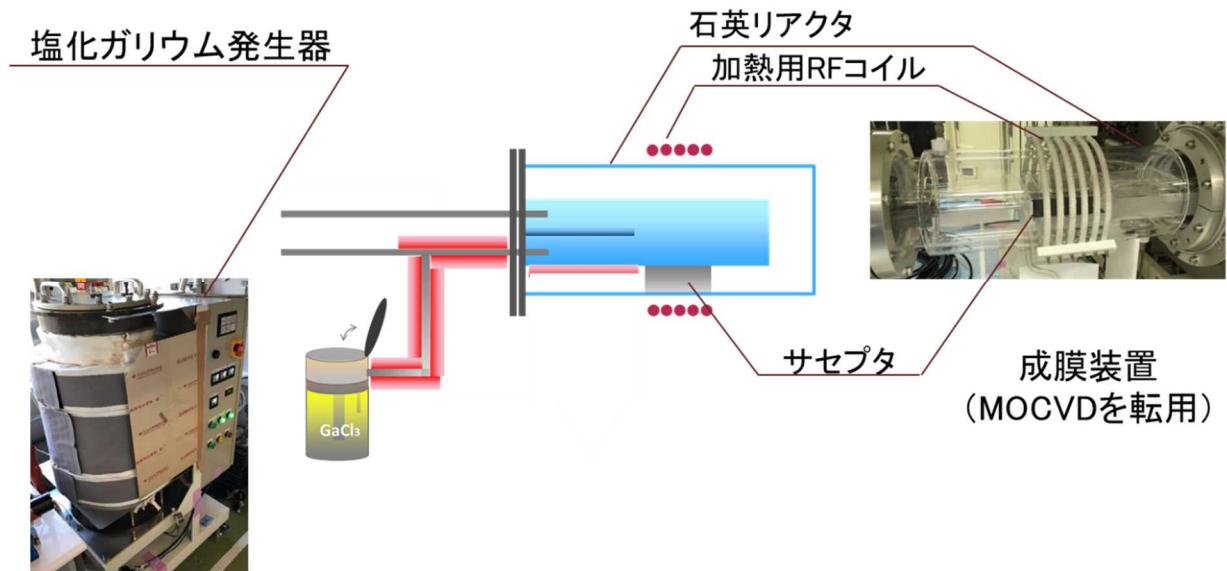
(2022 年 6 月 20 日現在)

## E 低コスト成膜装置開発（大陽日酸株式会社）

### 1. 成果詳細

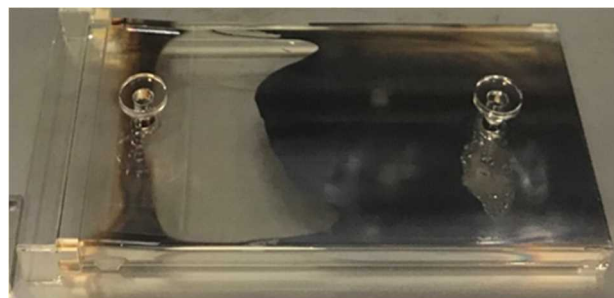
#### 【金属原料外部供給評価①上流加熱無しによる成膜試験】

MOCVD(HR3335)の改造を実施した。その概念図を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-1に示す。従来は、MOCVD装置においてトリメチルガリウムとアルシンガスの反応によりガリウム砒素の結晶成長を行っていたが、本改造においては、ガリウム原料として塩化ガリウム発生器から供給される塩化ガリウムを用いていることが特徴である。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-1 MOCVD 装置改造概要

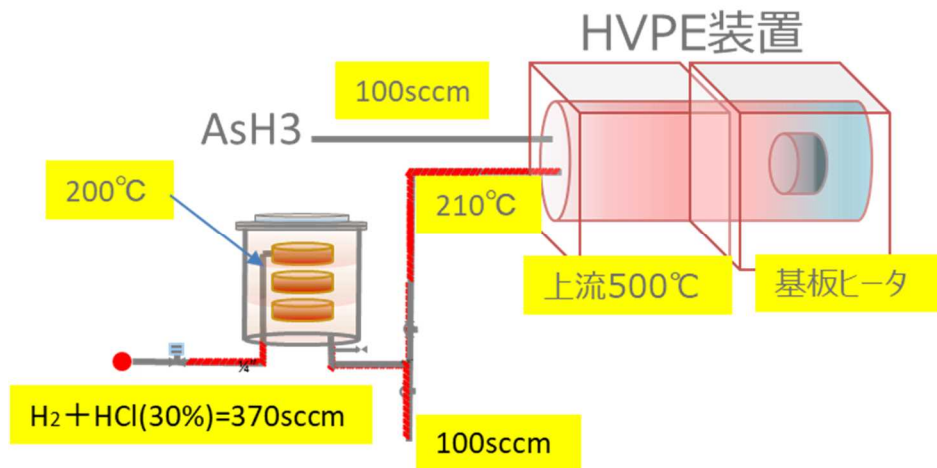
MOCVD(HR3335)の改造後の結晶成長試験の結果、リアクタが汚れて原料ガスが供給されていることは確認できた。その結果を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-2に示す。一方で、完全な単結晶膜はまだ確認できなかった。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-2 汚れが確認できたリアクタ内部品

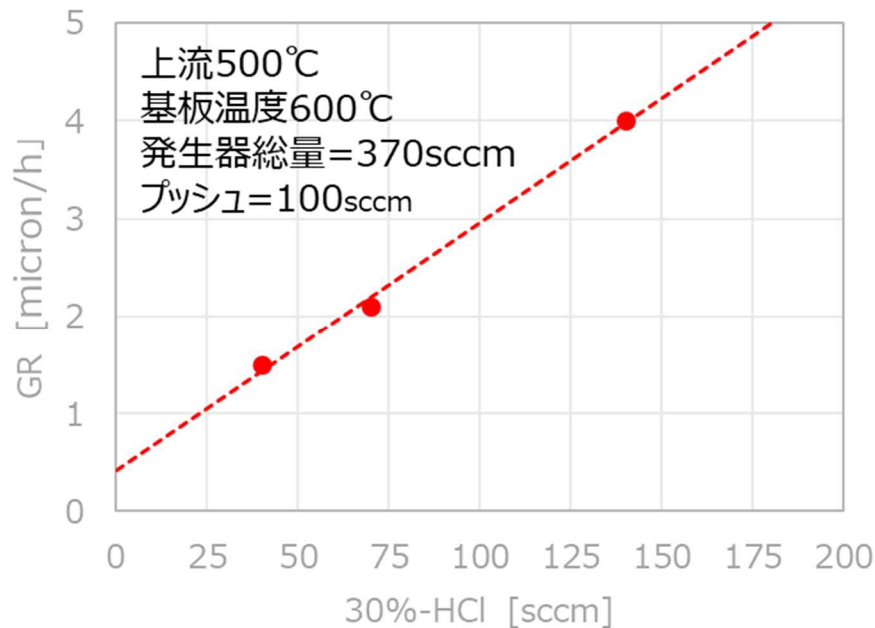
#### 【金属原料外部供給評価②上流加熱有りによる成膜試験】

HVPE装置H260の改造を実施し、外部供給によるガリウムひ素成膜を試みた。その概念図を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-3に示す。改造前は、ガリウム塩化物を内部供給でガリウムひ素成膜を行っていたが、詳細の量産HVPE装置の設計指針を得るためにガリウム塩化物の外部供給が可能となるように改造した。ガリウム塩化物の発生装置とHVPE装置H260を結合し連動運用により結晶成長を行っている。



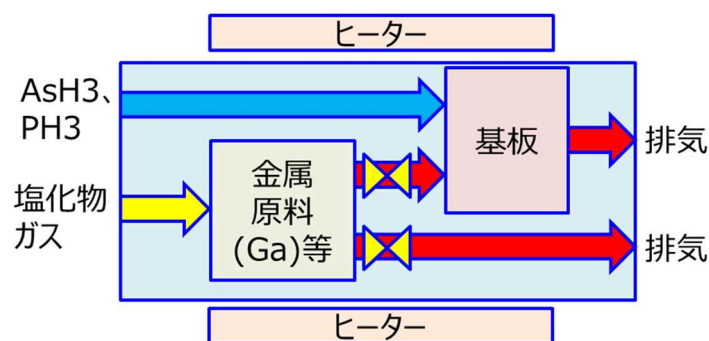
図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-3 外部からの塩化 Ga 供給を行う HVPE 装置の概念図

ガリウムひ素成膜の結果を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-4に示す。横軸に示した塩化水素の供給量に応じて、縦軸に示したガリウムひ素sの成長速度 (Growth Rate : GR) がほぼ正比例になっていることが判る。これは塩化水素の供給量に応じて塩化ガリウムが発生しており、それを原料としたガリウムひ素成膜ができていることを示している。一方で内部供給での成長速度に比べて、外部供給の成長速度は1/100程度と非常に遅く、量産装置としては不適であると判断をした。この成長速度が遅い理由を明らかにすることはできなかったが、原料種が外部供給では三塩化ガリウムが主体、内部供給では一塩化ガリウムが主体となっていることも一因と考えている。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-4 塩化ガリウム外部供給による HVPE 装置でのガリウムひ素成膜の結果

上記の結果に基づき、内部供給を採用しながら、量産に適した装置検討を行った。量産における課題は、複数種の原料の高速切り替えを高温下で行うことである。この概念図を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-3に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-5 反応炉内部における高温下での原料切り替えの概念図

当社では高温での原料の高速切り替えを実現できる独自の切り替え方式を考案し、それを用いた装置設計を進めた。この方法は2022年度に実証評価を行う予定である。実際には、運用結果を確認しながら、装置の改良改善を行えるように原料供給部を切り離して改造できる設計としている。この考え方は結晶成長部についても同様であり、2022年度から実施する結晶成長試験の結果に基づき結晶成長部を後から交換による改良改善ができるように設計している。

概略の計画仕様を表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-1に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-E-1 量産HVPE装置設計仕様

反応炉温度	最高800℃
ガリウム原料	3系統
インジウム原料	2系統
アルミニウム原料	1系統
処理可能基板	最大6インチ径 1枚
基板回転速度	最大3000rpm
基板搬送	窒素雰囲気グローブボックスによる搬送 将来の自動搬送への改造を可能とする構造

## 2. 実用化・事業化見通し

当事業における最終目標は電気自動車における太陽電池である。10GWの需要を得るにはHVPE装置が10,000台以上の稼働が必要と見込んであり、うち20%が新規需要とし、1台3億円とすれば、6,000億円の非常に大きな市場が創出される。

電気自動車普及以前には、HAPSのような成層圏における無人航空機の電源としても超高効率太陽電池の利用が期待できる。

HAPS用途等でHVPE装置の普及を図り、装置技術の成熟を図ることで、さらに性能を高めたHVPE装置を電気自動車向けとして販売し事業拡大を進める計画である。

## 3. 波及効果

### ①太陽電池産業への貢献

NEDO「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会中間報告書 2018年度版」による太陽電池搭載自動車の市場予測では、2050年に53GWの車載太陽電池モジュールの導入が期待できる。先行して高性能車載太陽電池開発をリードすることにより我が国の太陽電池産業が20%のシェアを獲得できるとすると、本提案の実施により生産工程は自動化され、2050年において10GW以上の移動体用太陽電池モジュールの国内生産と、それに伴う雇用が期待できる。また、セル構造、セル製造工程・装置、モジュール構造等において特許を取得することで、大きな内外ライセンス収入が期待される。

### ②自動車産業への貢献

電気自動車や水素燃料電池車において、充電ステーションや水素ステーション整備の遅れがクリーンな自動車導入のブレーキとなっていることが指摘されている。電気自動車の場合、ベースとなる充電は利用者の夜間充電でカバーできるとしても、継ぎ足し充電を担う高速充電ステーションの充足が

大幅に遅れている状況である。車載太陽電池によるエネルギー自給と高度な発電量予測により可能となるエネルギー管理技術の向上により、充電のためのインフラ整備の不充足がカバーでき、電気自動車の飛躍的な普及に大きく貢献する。自動車メーカーのニーズに応じた研究開発を実施することにより、国内自動車産業の継続的な発展に貢献する。

### ③HVPE 装置製作による国内産業への貢献

HVPE は日本発の成膜技術であり、本提案において量産機の開発に成功すれば世界初となり、大きな波及効果が期待される。車載モジュール 10GW 生産時には HVPE が 10,000 台以上必須となり、それに伴う各種材料メーカーに対する貢献や、大きな雇用が期待される。また、HVPE 技術の国外流出を防ぐことで、これまでの太陽電池産業とは異なり、移動体用太陽電池モジュール作製技術全体が我が国の経済再生に大きく貢献する。

さらに、HVPE が MOCVD にとって代わることにより、現在生産されている光デバイスや電子デバイス市場への波及効果が期待される。特に、高周波デバイスや携帯電話のパワーアンプとして用いられる InGaP/GaAs ヘテロバイポーラトランジスタ向けの用途が有望である。コストの低減効果に加えて、GaAs バッファ層を HVPE にて成長することにより、より高品質のデバイス作製の可能性がある。HVPE によって 70%の生産が可能となったとすると、2025 年時点で 45 億円規模の波及効果が見込まれる。

## 4. 今後の展開

太陽電池の普及に際して、当社はまず 6 インチ基板対応処理の化合物太陽電池向け HVPE 装置を 2024 年度までに上市する。その後、さらなる普及化のために 8 インチ基板対応装置の開発にも取り組む。化合物太陽電池の普及にはハードの装置開発だけではなく、高効率な太陽電池を低コストに製造するためのプロセス開発や事業化にむけた製造メーカーとの連携が必須である。これまで NEDO プロジェクトにより III-V 族化合物太陽電池用途の HVPE 装置の開発を行っている国内で唯一の機関であり、豊富な実績を有している産業技術総合研究所および、太陽電池モジュール製造メーカーであるシャープ株式会社と連携して開発を行っており、今後も同様に共同で開発を続けていく計画である。

## 5. 特許・論文・対外発表

該当なし。

(2022 年 6 月 20 日現在)

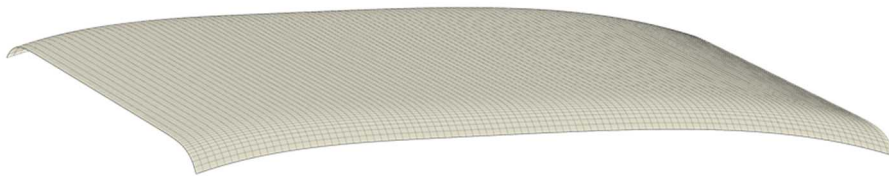
## F 移動体用モジュール評価・構造設計技術開発（国立大学法人宮崎大学）

### 1. 成果詳細

#### (1) 移動体用モジュール発電量評価・構造最適化設計

移動体用モジュールの発電評価および構造最適化設計には、3次元曲面を有するモジュールの形状を定量的に理解する必要がある。本研究開発では、乗用車に太陽電池モジュールを搭載した場合に課題となる3次元曲面への被覆の影響を定量的・統計的に評価するため、国産車100車種、200ケース（リアウインドウまで太陽電池を被覆するか否か）の車体屋根の座標を採取し、その分布傾向から、光学的損失の面分布や太陽電池への応力の原因となる曲率の面分布を算出した。また、これらの知見を統計的に処理し全車種での傾向を分析した。

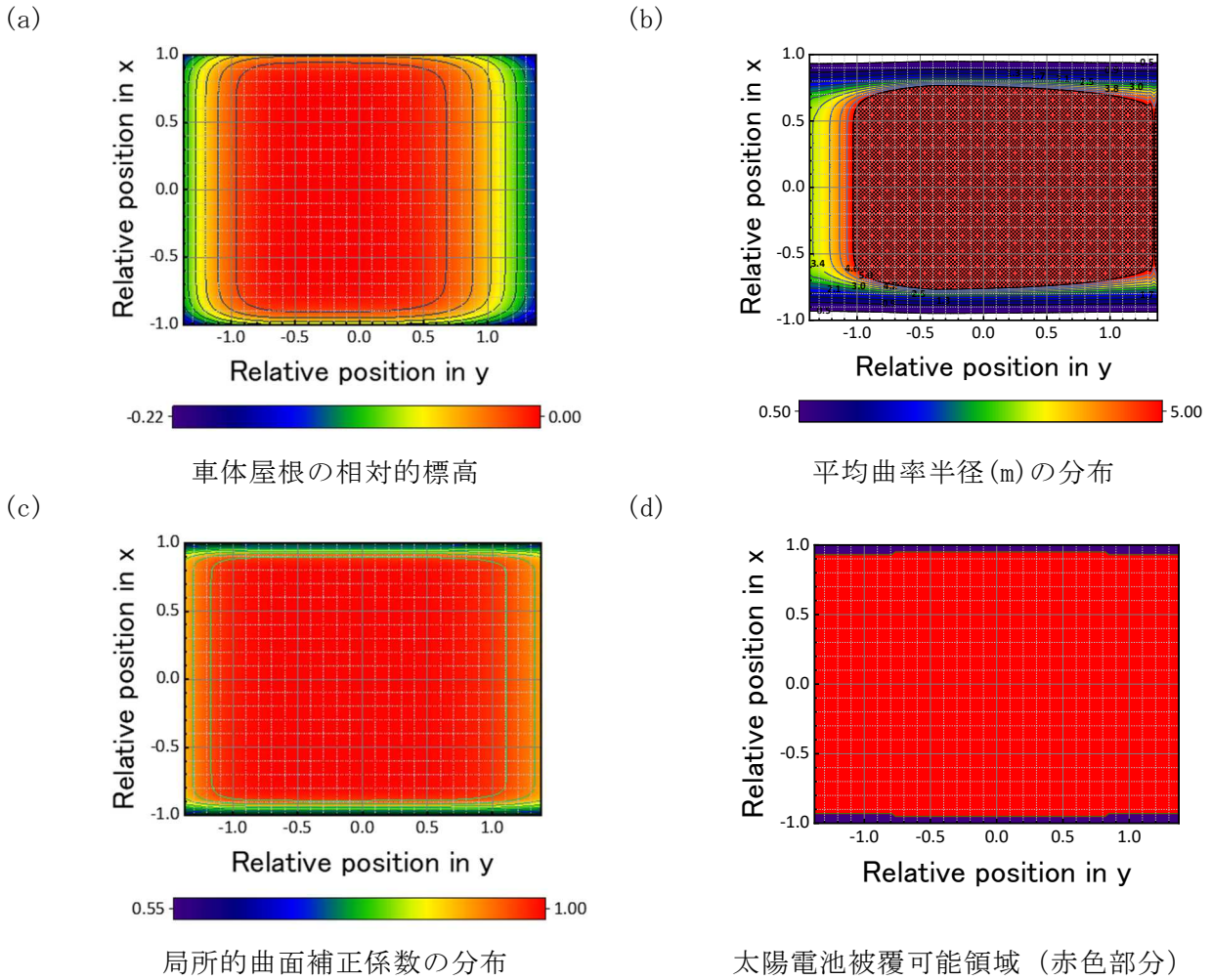
多くの車種のモデルの中で、その平均的な形である自動車屋根形状を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-1に示す。



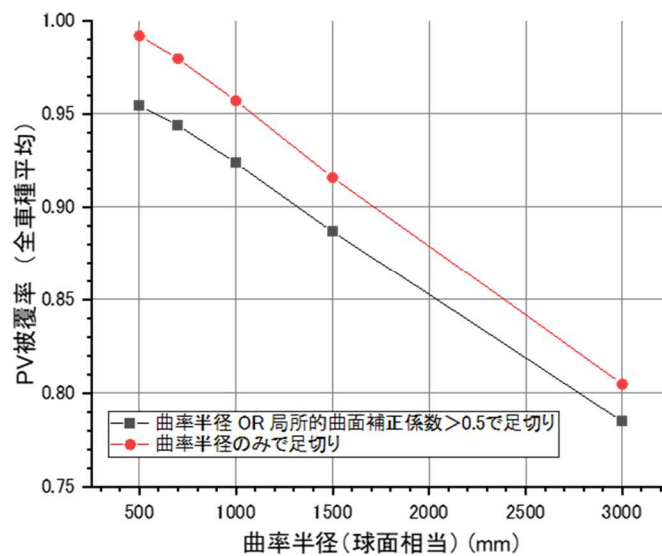
図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-1 多くの車種のモデルから求めた典型的（メジアン）な車体屋根形状

また、その典型的な車体屋根における曲率半径、太陽光損失の分布を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-2に示す。なお、車体は3次元曲面であるので、曲率半径は方向により異なる。曲率が最大となる方向と最小となる方向での曲率の和の逆数を平均曲率半径として算出した。局所的曲面補正係数は、当該箇所の太陽電池を水平面に置いたときと、曲面を被覆したときでの、太陽エネルギー（年間累積値）の比率である。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-2は、曲面の自己影、余弦損失、ビルや電柱などによる日影の影響を考慮してMETPV-11から得られた日射分布（全国平均）から算出した。曲率半径1mの球面相当の平均曲率半径以上（移動体太陽電池モジュール開発目標値）の面素、かつ、局所的曲面補正係数が0.5以上の面素を太陽電池被覆可能領域とした。リアウインドウまで太陽電池被覆領域を広げた場合、急傾斜面に太陽電池が置かれるために日射が不足し局所的曲面補正係数が0.5未満となる場合があり、この場合も被覆不相当と判断した。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-2(d)に典型的な車体屋根形状において被覆可能な太陽電池面積（赤色部分）を示す。

太陽電池モジュールを車載する際には、車体屋根のどの部分まで覆うかが重要な設計ポイントとなる。発電量を増やすには屋根全面を覆えばよいが、過大な曲率の部分の覆えば、セルの応力も増大し、セル割れの原因となり、歩留まりや信頼性を低下させる。適正な設計基準の算出のため、曲率半径基準を変えた場合における太陽電池モジュール掲載可能な車体屋根率（全車種平均）を図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-3に示す。許容できる曲率半径を小さくするほどPV被覆率が低下するが、モジュール開発目標である曲率半径1mの球面まで被覆できれば、車体屋根の96%まで太陽電池で覆うことが出来ることが定量的に確認された。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-2 車体屋根曲面の曲率半径、太陽光損失の分布 (典型的屋根曲面での計算例)



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-3 曲率半径と太陽電池被覆率との関係

車載太陽電池の発電量は、①周囲の建築物などによる日影に伴う日射量低下、②街路樹や電線等の小さな日影によって発生するミスマッチング損失 (部分日影損失)、③曲面での自己影や局所的な余弦損失にともなう損失、④高速で移動する影にともなう動的日影損失などがある。この

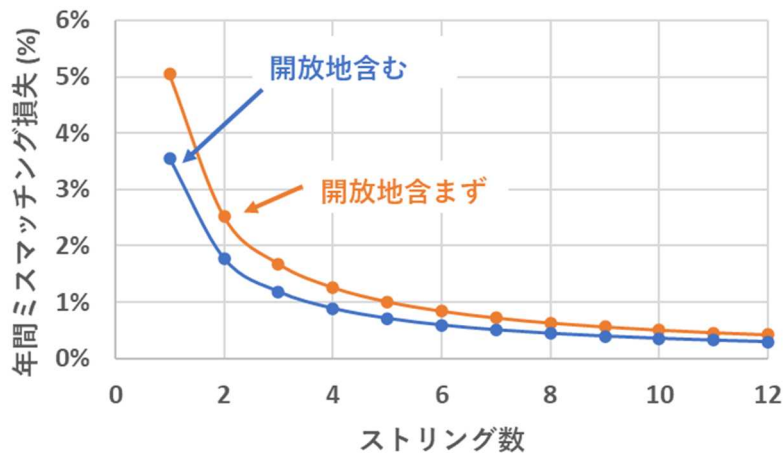


うち、①についてはどこを走行するか等、外的要因で決まるため、モジュール設計の最適化により改善することはできないが、②、③、④については最適設計による発電量向上が可能とみられたため、計測、解析および損失緩和のための設計方法の開発を行った。

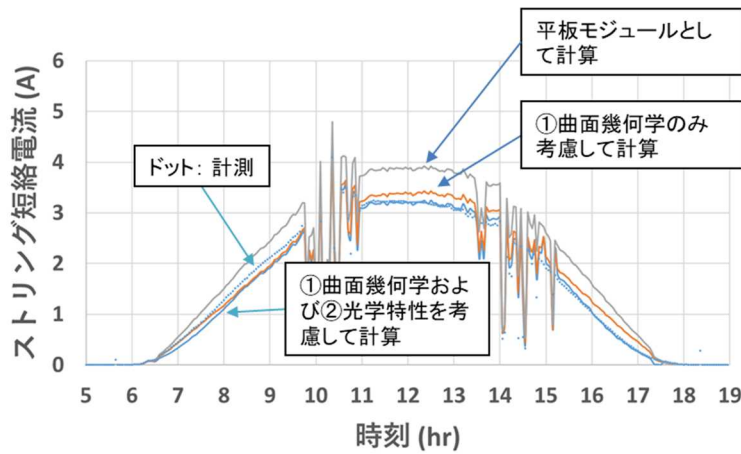
部分日影によるミスマッチング損失②については、まず、部分日影を作る障害物が移動体周辺（乗用車）にどのように分布しているかを把握した。乗用車屋根に天空カメラを据え付け、走行中の天空画像を録画した。さらに、画像処理により、建物のエッジ、街路樹や電線等の細かい構造物を抽出し、乗用車の局所座標系上でどのような方位角、仰角に分布しているかにつき、データ収集した。さらに、その分布の傾向を読み取り、太陽高度が与えられたときに部分日影が発生する確率を算出した。次に、部分日影が発生したときに、ミスマッチング損失によりどの程度発電電力が低下するかを調査した。モジュールの周囲に小型日射計を並べ、部分日影により低下する局所日射量の最小値を平均値で割った値を部分日影因子と定義したところ、発電電力とほぼ1:1の対応をとることができた。さらに、部分日影が発生したときの部分日影因子のメジアン値はほぼ0.5であることも確認できた。これにより、部分日影発生源の分布からミスマッチング損失を定量的に算出することができるようになったため、モジュール内のストリング構成によりミスマッチング損失を低減する可能性を検討した。まず、ストリング数を増やすことによりミスマッチング損失を低減できることを示した。特に、開放地を含まない都市部において効果が顕著であり、年間発電量4.5%増大できる（図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-4）。また、縦と横のストリング分割を組み合わせることも効果的であることを見いだした。

曲面の影響③については、曲面モジュールの3次元座標計測結果を、微分幾何学を用いて丁寧に解析した。曲面化に伴う発電量低下が幾何学的要因によることを検証した。さらに、カバーガラスの光学的性質を考慮することにより、計測結果により近づくことも確認した（図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-5）。

今後、高速で移動する影にともなう動的日影損失④を定量的に明らかにすることで、移動体用モジュールの屋外実環境下における評価・解析技術を確立する。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-4 ストリング数と部分日影に伴う年間ミスマッチング損失との関係



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-5 モジュール曲面化に伴う発電量低下の解析結果

## (2) 移動体用モジュール発電量予測

実際の走行時における、車両に搭載した太陽電池モジュールの発電量を評価した。これまで、移動式マルチ日射計アレイ(MMPA)システムを用いて車両が受け取る日射量の評価を実施してきた。日射量評価と車載太陽電池モジュール発電量評価を組み合わせることで、車両の任意面に搭載を想定した太陽電池モジュールの発電量予測をより高精度に実施することができる。

車両上部に市販されている太陽電池モジュール(NQ-143、シャープ)と全天日射計(SR20、Hukseflux Thermal Sensors B.V.)を取り付け、走行時および停車時の発電量および車両上の全天日射量( $I_{\text{roof}}$ )を測定した。太陽電池モジュール裏面には、直接風が当たらないように断熱材を張り付けた。モジュール温度( $T_{\text{mod}}$ )測定のため、太陽電池モジュール-断熱材間に温度センサーを設置した。太陽電池モジュール出力( $P_m$ )は、最大出力追従(MPPT)システムを備えた電子負荷(ECL02401、日本カーネルシステム株式会社)により測定された。天空カメラを車両上部に設置し、走行中の空の様子を撮影した。比較のため、宮崎大学構内において、水平面全天日射量(GHI)を測定した。測定は、快晴日および曇天日に行い、両日とも11:30~12:30は宮崎大学から宮崎駅までの往復を走行し、11:00~11:30および12:30~13:00は宮崎大学構内に停車した。

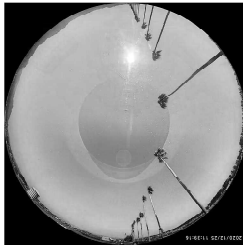


表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-1に、快晴時および曇天時における走行中および駐車中の積算水平面全天日射量(GHI)、車両上積算全天日射量( $I_{\text{roof}}$ )、総発電量( $E_{\text{pv}}$ )を示す。表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-1には、車両上積算全天日射量と総発電量から求めたシステム出力係数( $PR$ )および走行中および駐車中の太陽電池モジュールの平均温度( $T_{\text{mod,ave}}$ )を示す。快晴時(実験中の平均外気温:  $7.7^{\circ}\text{C}$ )、車両が走行することで $T_{\text{mod,ave}}$ が $23.4^{\circ}\text{C}$ から $19.3^{\circ}\text{C}$ まで減少した。一般的に太陽電池モジュール温度が低下すると $PR$ は上昇するが、車両上太陽電池モジュールの場合、走行時の $PR$ は低下した。これは、走行中、太陽電池モジュールに対する部分日影が原因である。また、走行中、 $I_{\text{roof}}$ は基準となるGHIより減少した。一方、曇天時(実験中の平均外気温:  $12.8^{\circ}\text{C}$ )では、走行中での $PR$ の差異は見られなかった。

表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-1 快晴時および曇天時における走行中および駐車中の積算水平面全天日射量(GHI)、車両上積算全天日射量( $I_{\text{roof}}$ )、総発電量( $E_{\text{pv}}$ )。  $I_{\text{roof}}$ と $E_{\text{pv}}$ から求めたシステム出力係数( $PR$ )および走行中および駐車中の太陽電池モジュールの平均温度( $T_{\text{mod\_ave}}$ )をあわせて示す。

Sunny day conditions					
	GHI (kWh/m <sup>2</sup> )	$I_{\text{roof}}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{\text{pv}}$ (kWh)	$PR$	$T_{\text{mod\_ave}}$ (° C)
Parking condition	0.606	0.606	0.090	1.03	23.4
Driving condition	0.620	0.555	0.078	0.99	19.3
Overcast day conditions					
	GHI (kWh/m <sup>2</sup> )	$I_{\text{roof}}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{\text{pv}}$ (kWh)	$PR$	$T_{\text{mod\_ave}}$ (° C)
Parking condition	0.066	0.065	0.011	1.14	14.0
Driving condition	0.089	0.071	0.012	1.14	12.4

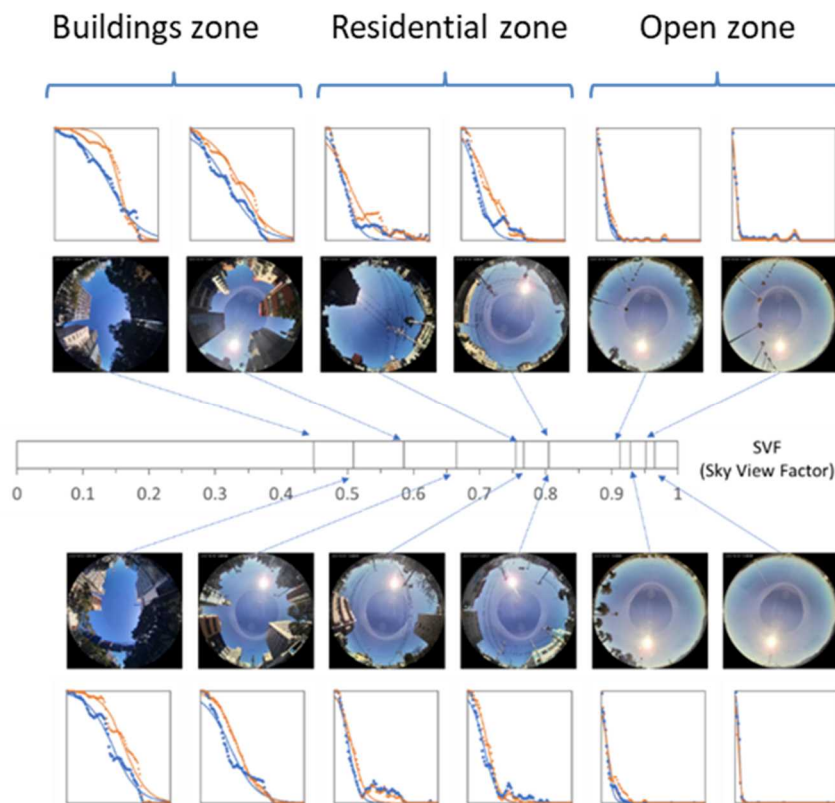
建物と車両上太陽電池モジュールの $PR$ の関係を明らかにするため、ビル街区間、住宅区間および開放区間の発電性能を比較した。表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-2に、各区間における代表的な天空画像、建物などの障害物高さ分布、障害物高さ分布と走行時の太陽位置から求めた動的部分日影確率および区間ごとの $PR$ を示す。 $PR$ は、住宅街区間において大きく低下した。また、障害物高さは車両左右方向に比べ前後方向(進行方向)において低くなった。天空画像から明らかのように、住宅区間では一般住宅の他に電柱や電線等が車両上部を通過し、太陽電池モジュール上の部分日影を発生させた。走行時の太陽位置と障害物高さ分布から求めた動的部分日影確率が57.7%と他区間と比べ大きくなり、動的部分日影確率が $PR$ に大きく影響していることを明らかにした。また、ビル街区間ではビルなどの影が太陽電池モジュール全体を覆い、総発電量は減少するものの $PR$ に大きな影響は見られなかった。

表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-2 ビル街区間、住宅街区間および開放区間における代表的な天空画像、建物などの障害物高さ分布、障害物高さ分布と走行時の太陽位置から求めた動的部分日影確率および区間ごとの $PR$ 。

	開放区間	ビル街区間	住宅街区間
天空画像			
障害物平均高さ (前後方向・左右方向)	4.3° ・ 4.7°	40.5° ・ 60.1°	17.1° ・ 19.6°
動的部分日影確率	11.1%	5.7%	57.7%
$PR$	1.02	1.03	0.88

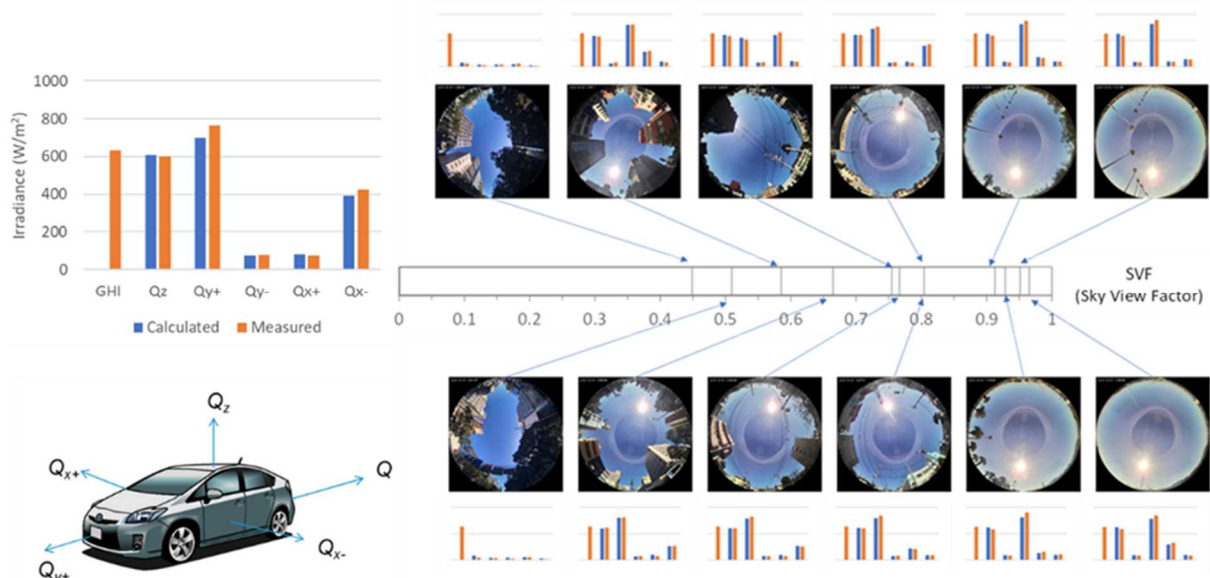
発電量の予測においては、移動体周辺の日影構造物の分布を把握する必要がある。乗用車屋根に天空カメラを据え付け、走行中の天空像を収集し、仰角方向の分布を算出した(図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-6)。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-6のグラフにおいて横軸は仰角、縦軸は障害物が遮蔽する確率である。その結果、天空開口率(sky view factor: SVF)が小さくなるにつれ、仰角方向の日影確率が高くなること(図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-6中の縦軸)、また、移動体の前後方向(図Ⅲ-2-(イ)-

(iii)-F-6中の青線)に比べ左右方向(図III-2-(イ)-(iii)-F-6中の橙線)の方が遮蔽する確率が高くなる傾向にあることが判明した。



図III-2-(イ)-(iii)-F-6 街区毎の日影遮蔽確率分布計測結果

さらに、これら遮蔽構造物により、移動体各面(屋根、側面4方向:前後左右、つまり互いに直交する5軸)での日射量がどう変化するかを走行中の日射計測および走行中の遮蔽物分布計測から調査した。その結果、移動体の走行方位(太陽との相対位置)、周辺環境(ビル群、居住地、開放地)如何に関わらず、計測値と計算値とはほぼ一致した(図III-2-(イ)-(iii)-F-7)。つまり、移動体各面の日射量は算出可能であり、よって、周辺遮蔽構造物の差異があっても発電量の予測は可能である。



図III-2-(イ)-(iii)-F-7 周辺遮蔽物分布を考慮した移動体各面の日射量(計算値と計測値と比較)

亜熱帯に属する宮崎、豪雪地域として知られる長岡での年間発電量の移動体屋根面に設置したモジュールの年間発電量予測値を図III-2-(イ)-(iii)-F-8に示す。周辺の遮蔽物が低いOpen zone

(開放地)といえども、最適傾斜角、方位に設置した固定角設置モジュールと比べると移動体モジュールの発電量は低下する。Residential zone (居住地)、Building zone (ビル群)になると、さらに顕著となる。また、これら周辺環境の違いによる発電量の差は、気候差によるものよりも大きくなる。つまり、移動体モジュールにおいては、気候区など地域差のみで発電量は決まらず、どのような街区を走行するかが重要となる。

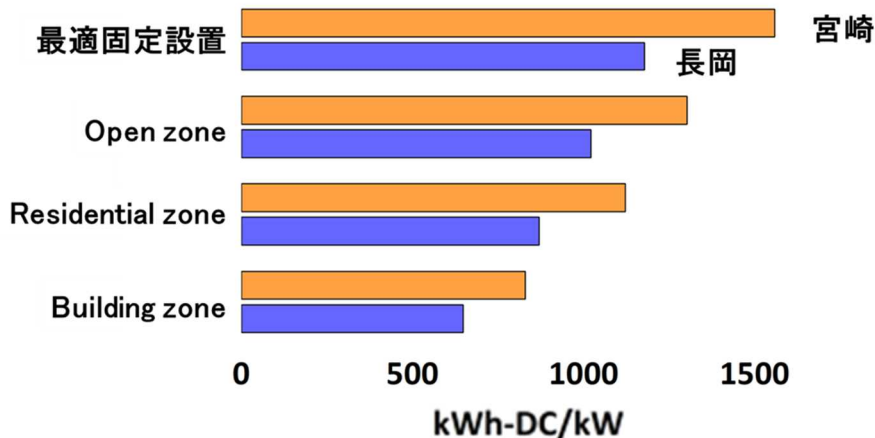


図 III-2-(イ)-(iii)-F-8 宮崎、長岡の各街区における年間発電量の差

なお、上記の発電量は日射量、街区 (障害物高さ分布)、気温、降雪量を基準としており、部分日影、曲面形状などは考慮していない。また、タンデムセルで懸念されるスペクトル変動による発電量への影響について、明らかにする必要がある。今後、移動体用モジュール発電量予測のための部分日影や曲面形状、スペクトル変動の要素技術開発を実施する。

## 2. 実用化・事業化見通し

太陽電池搭載車に対するメリット (消費者メリット、環境負荷メリット) が認知されはじめ、複数の自動車メーカーより太陽電池を動力源として利用する乗用車の販売が告知されている。

太陽電池搭載車の市場投入およびその予告を行っている大手自動車メーカー:

トヨタ自動車、ヒョンデ、メルセデス、BMW、ボルボ、アウディー

表 III-2-(イ)-(iii)-F-3 日本各地 (METPV-11 830 カ所平均) での車載太陽電池導入効果<sup>(1)</sup>

	開放地	住宅地	ビル群市街地
PV 定格あたりの年間発電量 (kWh/kW)	1124	945	673
PV 定格あたりの走行距離 (km/kW)	8265	6954	4948
車体屋根あたり年間走行距離 (km)	2975	2503	1781
CO2 償却年 (年) <sup>(2)</sup>	2.0	2.3	3.3

<sup>(1)</sup>国内市販車 100 車種トレース図面から調査した車体屋根面積 (曲率、傾斜率) から車体屋根形状のメジアン値を求め、曲率や車体屋根傾斜が過大な領域 (太陽電池被覆不利) を除き、完全に被覆し、日影変動に対しても完全に順応した場合を想定 (現時点ではこれらの技術は開発途上にあるので、理想的な数値)

<sup>(2)</sup>PV による CO2 排出量 1008 kg-CO<sub>2</sub>/kW、系統から充電する場合の排出原単位 0.462 kg-CO<sub>2</sub>/kWh として、PV 定格あたりの年間発電量を用い、代替技術 (グリッドから給電) と比較した排出削減効果から算出した。

曲面被覆など、モジュール化技術や試験・評価技術で、これまでにない技術課題を解決する必要があるが、本分野では日本の技術がトップレベルにあるため、国際競争力上でもメリットが大きい。太陽電池を動力源とした場合、発電性能が自動車の製品価値を決める重要な指標となるため、公正かつ科学的な検査方法や性能表示が必要となる。本分野の国際標準化は日本が中心となって進められているため、国際市場においても主導権を確保することができる。

### 3. 波及効果

乗用車だけでなく、トラック、バスなどの大型車に搭載した場合のメリットも認知され始め、広く交通機関の動力源として認知され始めている。

EV の欠点とされてきた電欠およびバッテリー巨大化の課題を解決できるので、大量普及時の充電インフラ、系統補強などの諸問題を解消できる。また、充電インフラや PV インフラに頼らずにエネルギー補充できるので、レジリエンス上のメリットも大きい。

通常の EV と異なり、太陽電池搭載車は「停車時および走行時どこでも発電する」自動車である。そのため、V2X による電力流通を喚起することになり、系統、電力託送に頼らない電力流通、つまり、自動車が電力を運ぶ世界観も実現できる可能性がある。特に、太陽光発電の出力抑制が頻繁に発生する九州においては、太陽電池搭載車を用いて、余剰電力を各家庭や事業場に持ち運んで有効活用できるようになる。これにより、温室効果ガス排出抑制を強力に推進させ、自家消費をベースとした太陽光発電電力供給事業を推進できる。つまり、太陽光発電を活用した地方経済の活性化を進めることができる。

### 4. 今後の展開

欧州で太陽電池搭載車の本格的な販売が間近に迫っていることを考慮し、曲面被覆などのモジュール化技術の開発、信頼性・安全性向上技術の開発、および車載太陽電池の性能試験方法や性能表示技術の開発を重点化し、国内での普及をスムーズに進める方向に進める必要がある。安全性や耐久性を確保しながら車体曲面への太陽電池被覆率向上や高頻度で日影がかかる環境でいかに発電量を維持するかなどの実用サイドに基づいた技術開発および設計方法の開発が、短期的にはセルの効率向上よりも、駆動に用いるエネルギーの増大の点から見て効果的であるため、製品化を早めることができるし、市場確保の確実性も高めることができる。

表Ⅲ-2-(イ)-(iii)-F-4 効果が大きいとみられるモジュール化技術一覧（セル効率向上との比較）

項目	作用	効果
カットセル最適被覆	曲面不均一照射に伴うミスマッチング低減 被覆率向上（端部まで被覆）	+7%
ストリング構成最適化	動的日影、街路樹や電線等による部分日影によるミスマッチング損失の低減	+5%
高曲率対応モジュール化技術	曲率半径 1m（球面）を被覆できるモジュール実装技術 （プリウス 50 系用ソーラーパネル比）	+19%
トップセル効率向上	（中間目標）→（最終目標）	+4%
ボトムセル効率向上	（中間目標）→（最終目標）	+1%

### 5. 特許・論文・对外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 （国内／国際）	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	2	0	2
研究発表・講演 （国内・審査有）	1 (0)	9 (1)	0 (0)	10 (1)
（国際・審査有）	(1)	(8)	(0)	(9)
（国内・審査無）	(0)	(0)	(0)	(0)
（国際・審査無）	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

（2022 年 6 月 20 日現在）

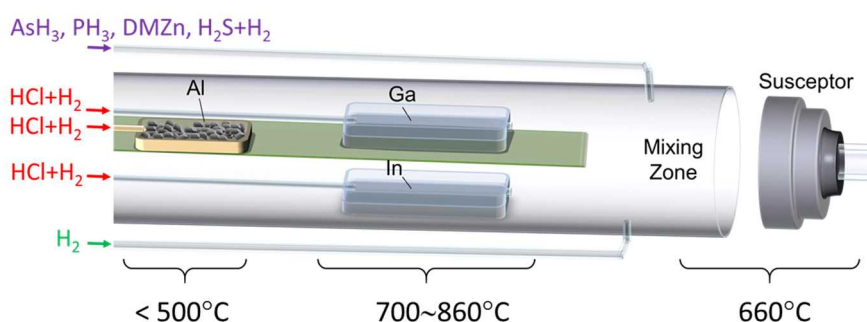
## G 低コストエピ・接合技術開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所)

### 1. 成果詳細

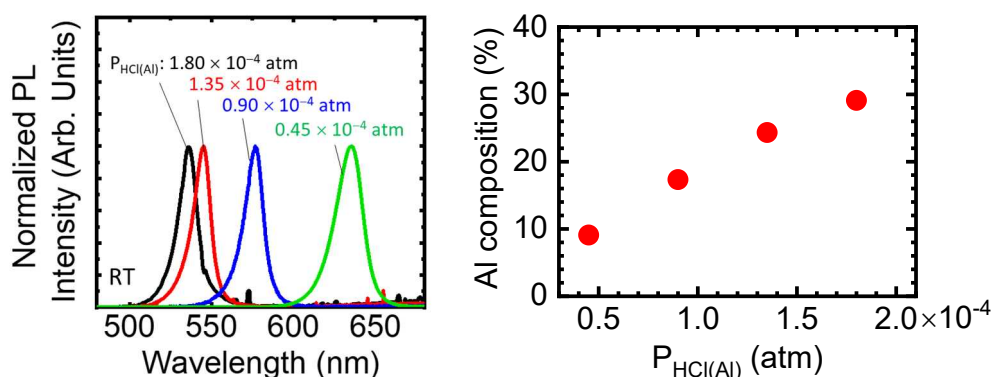
#### (1) 低コストプロセス技術開発

##### ①. 低コスト成膜装置開発

ハイドライド気相成長法 (HVPE) による InGaP/GaAs 2 接合セルの高効率化に向けて AlInGaP パッシベーション層の作製を可能とする反応炉の設計および開発を行った (図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-1)。HVPE 法では III 族原料の前駆体として金属塩化物を用いるが、アルミニウム塩化物のうち一塩化アルミニウム (AlCl) は石英反応炉を還元するため、その発生を抑える必要がある。そこで反応炉内の Al を 500°C 以下で加熱した状態で HCl ガスを導入することで AlCl の発生を極力抑え、三塩化アルミニウム (AlCl<sub>3</sub>) が反応炉内で支配的に生成される装置を太陽日酸 (株) と共同で開発し、AlInGaP の結晶成長を行った。このとき Al 原料に導入する HCl ガスの分圧 ( $P_{\text{HCl(Al)}}$ ) を変えることで AlInGaP 結晶内の Al 組成を制御することができ、バンドギャップの変化が可能であることを実証した (図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-2)。これにより、HVPE 装置においても InGaP セルに対して表面パッシベーション層を導入することが可能となった。

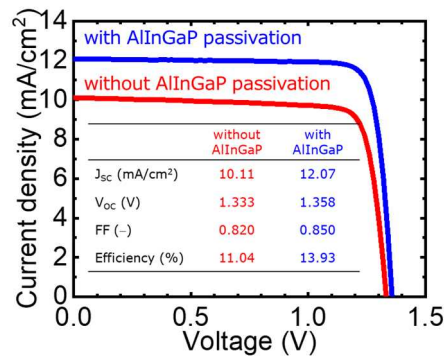


図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-1 AlInGaP 成膜用 HVPE 反応炉

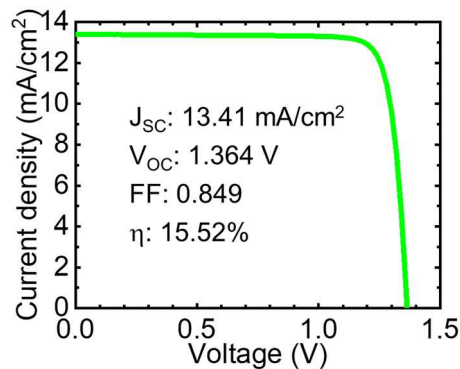


図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-2 Al 原料に導入する HCl ガスの分圧  $P_{\text{HCl(Al)}}$  に対する AlInGaP の PL 発光位置の変化 (左) および Al 組成の変化 (右)

AlInGaP 表面パッシベーション層を導入することで、InGaP セルの短絡電流密度 ( $J_{\text{sc}}$ ) は 10.11 から 12.07 mA/cm<sup>2</sup> に改善された (図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-3)。これはパッシベーション層により、表面再結合損失が減少した効果と言える。また、開放電圧 ( $V_{\text{oc}}$ ) や曲線因子 (FF) に関しても AlInGaP 層の導入により劣化しておらず、変換効率の向上が確認された。同時期に米国再生可能エネルギー研究所においても HVPE 法で Al 含有材料の結晶成長に成功しているが、太陽電池に導入した際に性能の劣化が報告されている。本結果は HVPE 法で作製した AlInGaP がデバイス内で機能することを世界で初めて実証した例となった。また、AlInGaP 表面パッシベーション層を導入した InGaP セルに関しては、さらに吸収層の膜厚等の最適化を行い変換効率が 15.52% まで向上した (図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-4)。



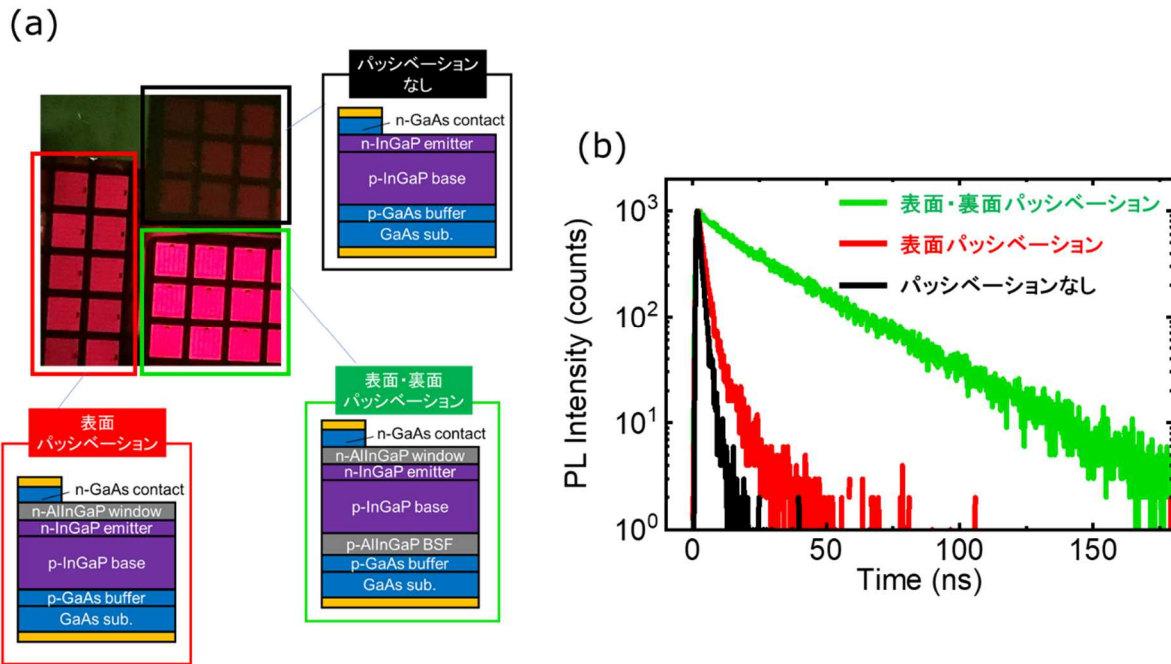
図III-2-(イ)-(iii)-G-3 InGaPセルに対するAlInGaPパッシベーション層の導入効果



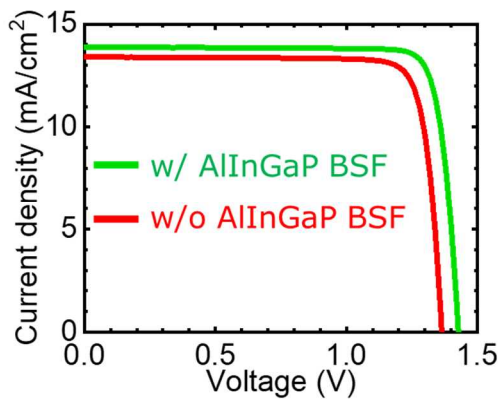
図III-2-(イ)-(iii)-G-4 構造最適化を行ったAlInGaPパッシベーション層付きInGaPセルの電流電圧特性

n-AlInGaP 窓層の導入に引き続き、p-AlInGaP 裏面電界減衰(BSF)層の導入を検討した。図III-2-(イ)-(iii)-G-5 は InGaP 単接合セルに対して各 AlInGaP 層を導入した際の発光特性であり、(a)はフォトルミネッセンス(PL)の様子、(b)は時間分解 PL 減衰プロファイルを示している。n-AlInGaP 窓層と p-AlInGaP BSF 層を導入した試料では、InGaP のバンドギャップエネルギーに由来した赤色(波長 660nm)の発光が強く発現しており、表面と裏面の両側を AlInGaP によってパッシベートされたことにより、非輻射再結合成分が減少し、輻射再結合成分が増大していることを示している。また、発光の減衰プロファイルからもキャリア寿命が増大している様子が確認できる。以上の結果は太陽電池特性の大幅な改善に繋がった。図III-2-(イ)-(iii)-G-6 は InGaP 単接合セルにおける p-AlInGaP BSF 層の有無による太陽電池特性 (AM1.5G 太陽光スペクトル照射時) の変化を示している。p-AlInGaP BSF 層により、特に開放電圧(VOC)が改善され、変換効率が向上した。 $V_{oc}$  は米国再生可能エネルギー研究所から報告されている MOVPE 法で作製した upright 型 InGaP 単接合セルと同等の値を示しており、HVPE 法でも高品質な InGaP 結晶が成長されていることが示唆された。





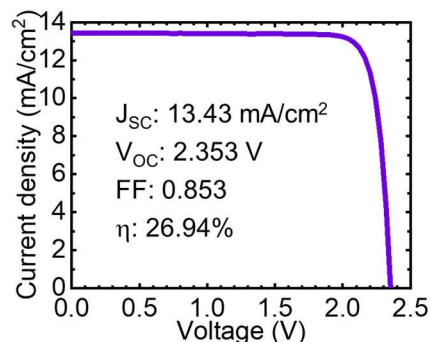
図III-2-(イ)-(iii)-G-5 HVPE 法において InGaP 単接合セルに対して各 AlInGaP 層を導入した際の発光特性 (a)PL の様子、(b)時間分解 PL 減衰プロファイル



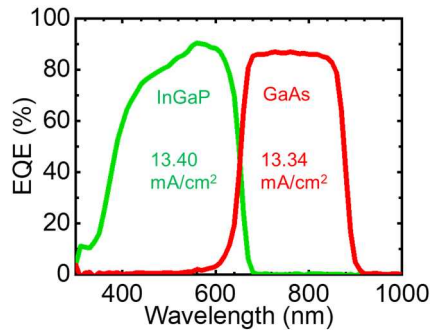
Sample	$J_{sc}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ (V)	FF (-)	Efficiency (%)
w/ AlInGaP BSF	13.9	1.43	0.859	17.1
w/o AlInGaP BSF	13.4	1.36	0.849	15.5

図III-2-(イ)-(iii)-G-6 HVPE 法で作製した InGaP 単接合セルにおける p-AlInGaP BSF 層の有無の影響

上記の InGaP セルの高性能化に伴い、InGaP/GaAs 2 接合セルに対しても AlInGaP 表面パッシベーション層を導入して高効率化を行った。これまで産総研の HVPE 装置で作製された 2 接合太陽電池の効率は 21.8%に留まっていたが、AlInGaP 表面パッシベーション層の導入が可能になったことで 26.9%まで効率が改善した (図III-2-(イ)-(iii)-G-7)。また、当該太陽電池のサブセルの外部量子効率スペクトルを評価した結果、InGaP セルと GaAs セルの光生成電流量はほぼ整合できていることが確認された。(図III-2-(イ)-(iii)-G-8)

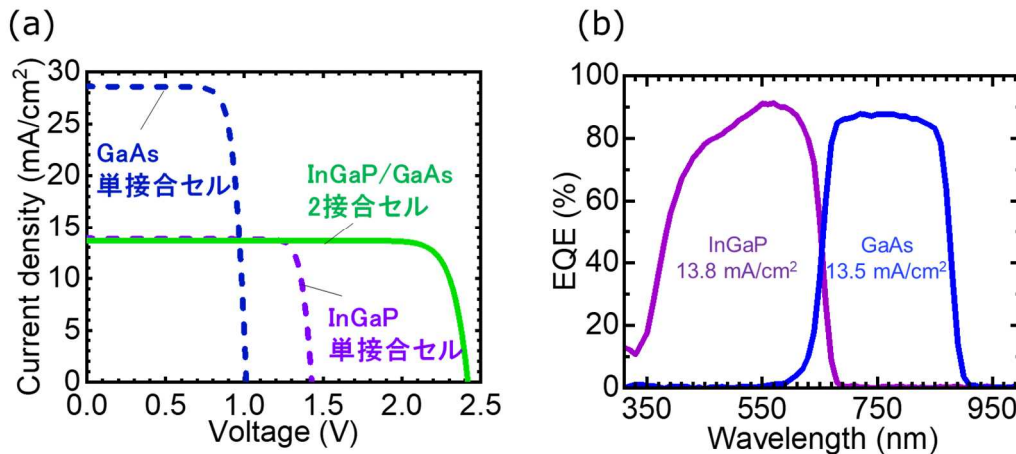


図III-2-(イ)-(iii)-G-7 AlInGaP パッシベーション層を導入した InGaP/GaAs 2 接合セルの電流電圧特性



図III-2-(イ)-(iii)-G-8 AlInGaP パッシベーション層を導入した InGaP/GaAs 2 接合セルの EQE スペクトル

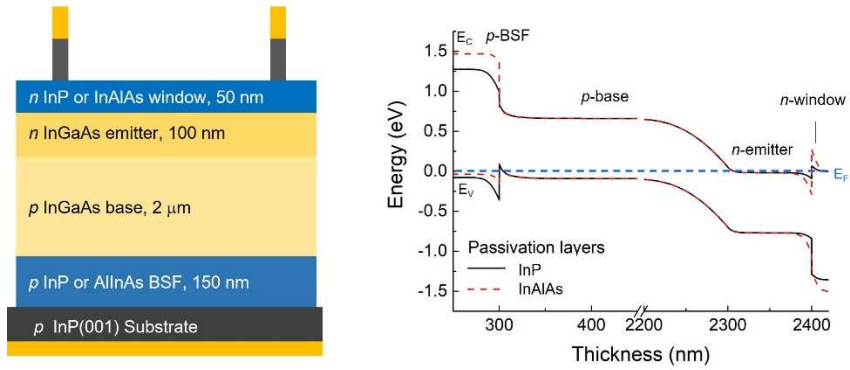
次に、p-AlInGaP BSF 層を導入した InGaP/GaAs 2 接合セルの電流電圧特性を図III-2-(イ)-(iii)-G-9(a)示す。また同図に比較のため、各サブセルの単接合時の特性を破線で示す。p-AlInGaP BSF 層の導入による InGaP セルの電圧改善により、変換効率は 28.3%に向上した。当該成果により、本プロジェクトにおける中間目標値(変換効率 28%)の達成に至っている。図III-2-(イ)-(iii)-G-9(b)は p-AlInGaP BSF 層を導入した 2 接合セルの外部量子効率(EQE)スペクトルを示している。得られた EQE 値から AM1.5G 太陽光スペクトルに対する各サブセルの短絡電流値を算出すると、InGaP セルは 13.8 mA/cm<sup>2</sup> であり、GaAs セルは 13.5 mA/cm<sup>2</sup> であった。このことから現状では GaAs セルによって 2 接合セルの出力電流値が制限されていることが示された。そのため、p+-InGaP/ n+-GaAs で構成されるトンネル接合の寄生吸収の抑制および GaAs セルの性能向上が課題として挙げられる。加えて、電極シャドーロスの改善と AlInP 窓層の導入、各サブセルの電圧値の底上げにより、本プロジェクトの最終目標値(変換効率 30%)の達成が見込まれる。



図III-2-(イ)-(iii)-G-9 (a) InGaP/GaAs 2 接合セルおよび各単接合セルの AM1.5G 太陽光スペクトル照射時における電流電圧特性と(b) InGaP/GaAs 2 接合セルの外部量子効率スペクトル

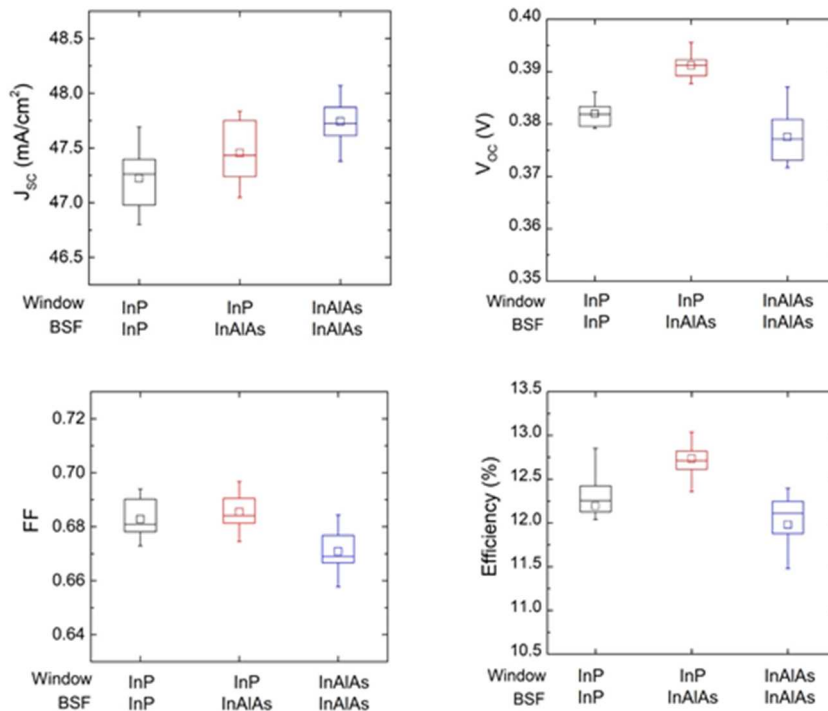
また、HVPE 装置を用いた InGaP/GaAs/InGaAs 逆積み格子不整合系 3 接合セル (IMM-3J) の開発に向け、InGaAs セルの開発を進めた。ボトムセルである InGaAs 単セルの構造最適化、高効率化に関する研究報告例は世界的に少なく十分な知見がないため、HVPE 装置に導入するための前段階としてシミュレーション解析と分子線エピタキシー (MBE) 法を用いた構造最適化を進めた。具体的には、本年度は窓層、BSF 層の材料の最適化を試みた。

セル構造のバンドプロファイルをシミュレーションしたところ (図III-2-(イ)-(iii)-G-10)、BSF 層として InGaAs に対して伝導帯のバンドオフセットが大きい InAlAs が、窓層として価電子帯のバンドオフセットが大きい InP が適している結果が得られた。

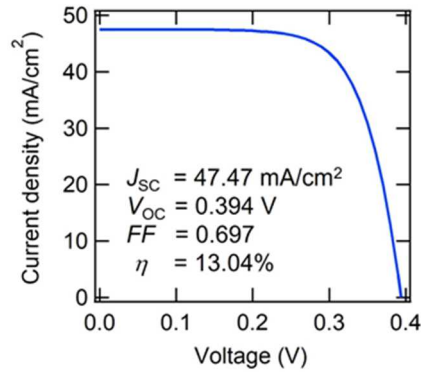


図III-2-(イ)-(iii)-G-10 InGaAs 単接合セル構造図 (左) とバンドプロフィール (右)

本考察に対する評価試験として、異なる組み合わせの窓層、BSF層を用いた InGaAs セルを作製し、セル特性を評価した (図III-2-(イ)-(iii)-G-11)。短絡電流密度 ( $J_{sc}$ ) に関して、InP (1.35eV) と比較してバンドギャップが大きい InAlAs (1.50eV) を窓層に用いることで吸収損失を抑制でき  $J_{sc}$  が向上した。一方で窓層に InAlAs を用いた場合、価電子帯のバンドオフセットが小さくなることによる正孔の逆流、n-emitter/n-window 界面で伝導帯にスパイクが形成することによる高抵抗化が生じ、結果として開放電圧 ( $V_{oc}$ ) 曲線因子 (FF) が低下した。以上により、窓層として InP、BSF層として InAlAs を用いた構造が最適である結果が得られ、変換効率は従来の InP 窓層、BSF層のものに比べて 12.42%から 13.04%に向上した (図III-2-(イ)-(iii)-G-12)。得られた変換効率は n-on-p 型の InGaAs セルとして世界最高レベルであり、リアヘテロ構造の導入により更なる変換効率の向上が期待できる。今後は更なるセル構造の高度化を進めるとともに、本結果を基にした HVPE 法での InGaAs セルの開発を進めていく。



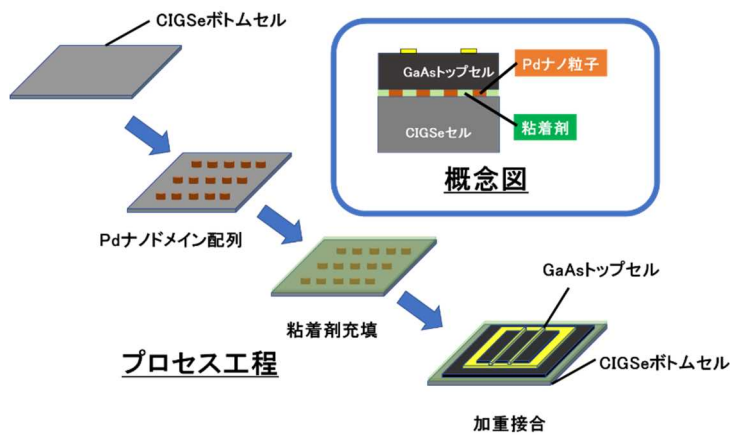
図III-2-(イ)-(iii)-G-11 異なる窓層、BSF層を用いた InGaAs セルのセルパラメータの箱ひげ図



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-12 窓層に InP、BSF 層に InAlAs を用いた InGaAs セルの電流電圧特性

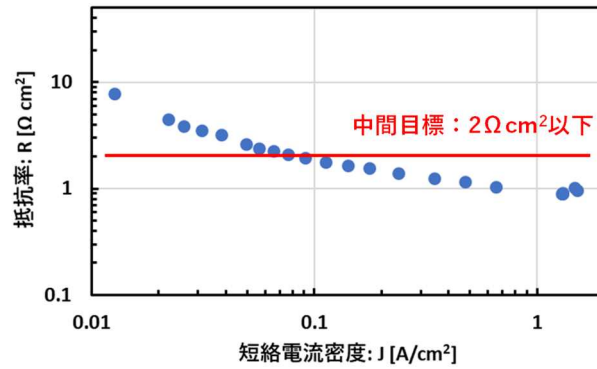
②. 低コスト接合技術開発 <スマートスタック>

GaAs//CIGS 系タンデム型太陽電池の実現に向け、新たな接合技術の開発を行った。従来、産総研においてはパラジウムナノ金属を介在したスマートスタック技術を提唱してきたが、平滑性が粗い CIGS セルへの接合においては、接合強度が弱く剥離等の課題があった。このため、新たにスマートスタックの接合界面にシリコン粘着剤を介在させた技術を開発した。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-13 には、接合界面の概念図およびプロセス工程を示す。ボトムセルには、スマートスタック技術の特徴であるパラジウムナノ金属を配列形成し、その後シリコン粘着剤をスピナー装置により薄膜塗布する。トップセルである GaAs 系セルはエピタキシャルリフトオフ (ELO) 法を用いて薄膜剥離し、その後前述のボトムセル上加重接合する。接合界面は、スマートスタックの原理により低接合抵抗および低光損失が担保され、また接合強度はシリコン粘着剤により強化されることになる。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-13 新スマートスタック技術の概念図およびプロセス工程図

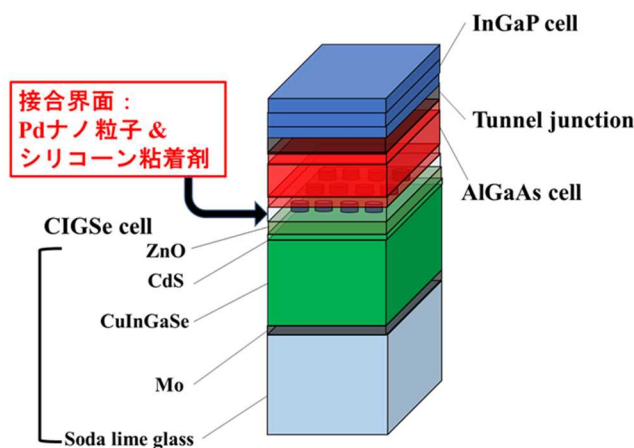
上記の新規スマートスタック技術による GaAs//CIGS の接合抵抗の評価を行った。CIGS セルは、Br 系エッチングによる表面平滑化処理を行い、また表面の TC0 膜として  $\text{In}_2\text{O}_3$  膜<sub>10nm</sub> を適用している。タンデム太陽電池構造で、集光特性より電流密度に対するデバイス抵抗を導出し、その飽和抵抗より接合抵抗を間接的に推測している。本方法は Si/GaAs 接合抵抗でも実績がある算出法である。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-14 に、接合抵抗率の電流依存性を示す。電流密度と共に抵抗率は低下し、 $1 \Omega \text{ cm}^2$  程度が得られていることがわかる。これは、中間目標の  $2 \Omega \text{ cm}^2$  以下を上回る値である。



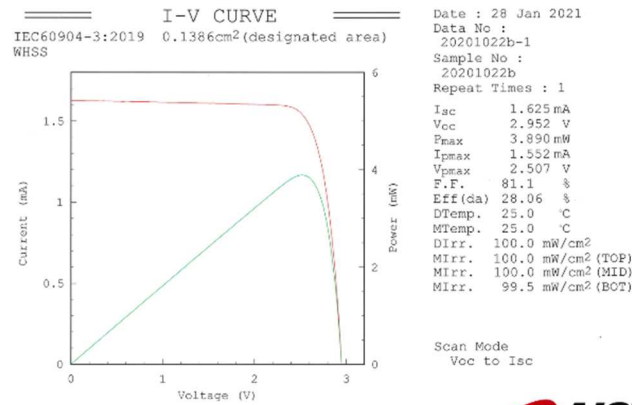
図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-14 GaAs/CIGS 接合抵抗率の電流依存性

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-15 には、新スマートスタック技術を用いて試作した InGaP/AlGaAs//CIGS 3 接合太陽電池の構造を示す。トップセルは Fraunhofer 研究所 (独) により供与された InGaP/AlGaAs 2 接合セル、ボトムセルは産総研 CIGS グループにおいて蒸着法 (MBE 法) により試作された CIGS セルで、接合部には粘着剤を介在したスマートスタック技術を適用した。特に、CIGS セルは多接合太陽電池のボトムセルとして新たに開発を行ったもので、上記のように Br 系エッチャントを用いて CIGS セル表面を平滑化し、また CIGS 吸収層の Ga 組成調整によるナローギャップ化している。

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-15 には、新スマートスタック技術を用いて試作した InGaP/AlGaAs//CIGS 3 接合太陽電池の構造を示す。トップセルは Fraunhofer 研究所 (独) により供与された InGaP/AlGaAs 2 接合セル、ボトムセルは産総研 CIGS グループにおいて蒸着法 (MBE 法) により試作された CIGS セルで、接合部には粘着剤を介在したスマートスタック技術を適用した。特に、CIGS セルは多接合太陽電池のボトムセルとして新たに開発を行ったもので、上記のように Br 系エッチャントを用いて CIGS セル表面を平滑化し、また CIGS 吸収層の Ga 組成調整によるナローギャップ化している。この素子では、CMP (Chemical mechanical polishing) 処理を行わず接合化を行っている。このため CIGS の表面ラフネスは 100nm 程度を有するが、接合条件等の改良により CMP フリーでの接合に成功した。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-16 には、発電特性を示しており、短絡電流 11.72mA/cm<sup>2</sup>、開放電圧 2.95V、曲線因子 81.1%、発電効率 28.1% である。本効率値は、2 端子型 GaAs//CIGS 系タンデム素子としては最高性能で、世界的に権威ある雑誌「Progress in Photovoltaics」の「Efficiency Table」に掲載された。予測性能としては、効率 35% が期待されており、現況としては接合界面の反射損失に課題があると考えている。このため、CIGS セルのウェットエッチングによる平滑化処理および透明電導膜の薄膜化等に注力を行っている。



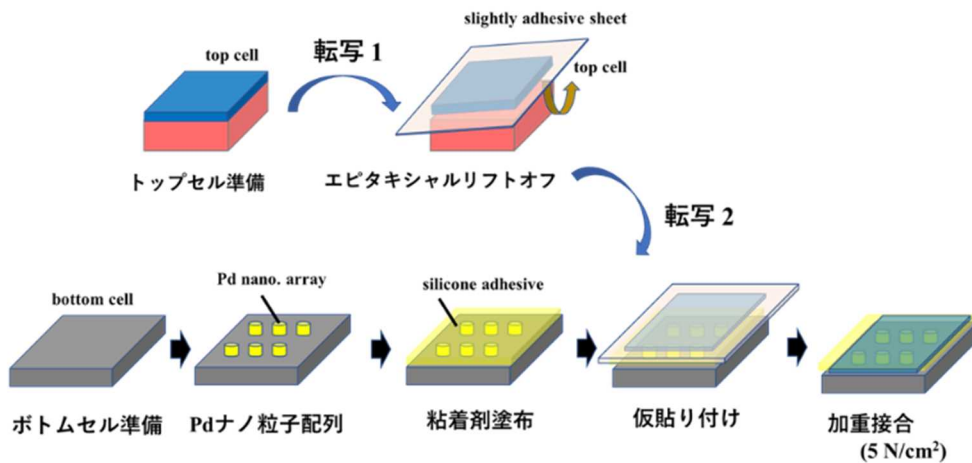
図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-15 InGaP/AlGaAs// CIGS 3 接合素子の構造図



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-16 InGaP/AlGaAs// CIGS 3 接合素子の発電特性

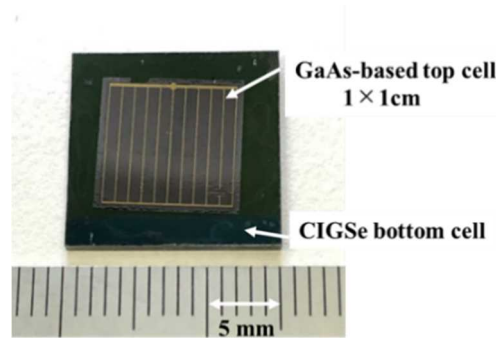
\*産総研評価チームによる認証測定。発電効率～28.1%。

大面積化に関しては、改良型スマートスタック技術において、転写工程の検討を行い目途が得られた。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-17 には基本プロセスを示すが、要点としてはトップセルである GaAs エピを基板から剥離する工程（エピタキシャルリフトオフ）で、微粘着シートを強化材として剥離支援し（転写 1）、その後 CIGS ボトムセル処理に接合（転写 2）する技術である。この 2 回転写技術は、改良型スマートスタックが粘着剤を介在しているため、ボトムセル側の接合強度が増強し可能になった手法である。図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-18 には、本技術により試作された InGaP/AlGaAs//CIGS 3 接合セル（素子サイズ 1cm 角）の外観を示す。従来に比べ 6 倍程度の面積のセル化が容易に得られるようになり、また発電効率も 27.5%と同構造を有する小面積セルとほぼ遜色ない特性が得られた。現在、さらなる大面積化として 2 インチ相当（プロジェクト中間目標）の実証実験を開始した。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-17 改良型スマートスタック技術の基本工程。

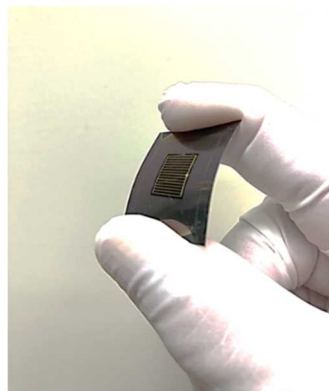
微粘着シートによる 2 回転写により大面積化が可能



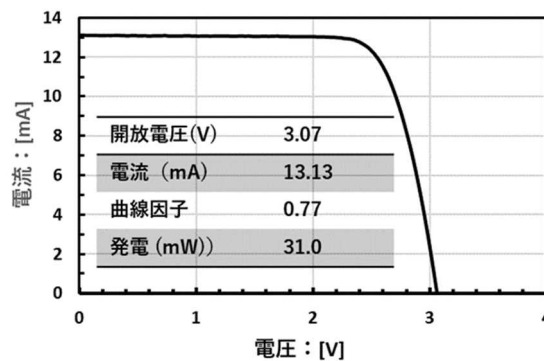
1cm角セルの発電効率～27.5%

図III-2-(イ)-(iii)-G-18 1cm角セルの外観写真。InGaP/AlGaAs//CIGS 3 接合セル

また、実用的な観点よりセレン化法による CIS セルの検討も継続している。今年度は、共同研究先である出光興産（株）殿より、ボトムセル性能に特化したセルを提供いただき検討を行った。CIS セルは、フレキシブル基板にセレン化法で製膜された構造を呈しており、また CIS 吸収層も独自技術を用い吸収端の長波長化を行っている。図III-2-(イ)-(iii)-G-19 には、試作した InGaP/AlGaAs//CIS 3 接合セルの外観写真を示す。接合法は、前述した粘着剤シートを用いた 2 回転写技術を用いており、素子サイズ 1cm 角である。試作素子は、写真に示すようにフレキシブル性を有している。図III-2-(イ)-(iii)-G-20 には、試作したセルの発電特性を示しており、発電電力 31mW が確認されている。本結果は、セレン化法フレキシブル CIS セルをボトムセルとした GaAs//CIS 系タンデムセルとしては、世界初めての成果である。フレキシブルセルは、本プロジェクトの開発目標である移動体搭載において重要な開発指標である。現在、接合プロセスの最適化、セル構造の最適化等を行っており、高効率化に向け開発を加速している。



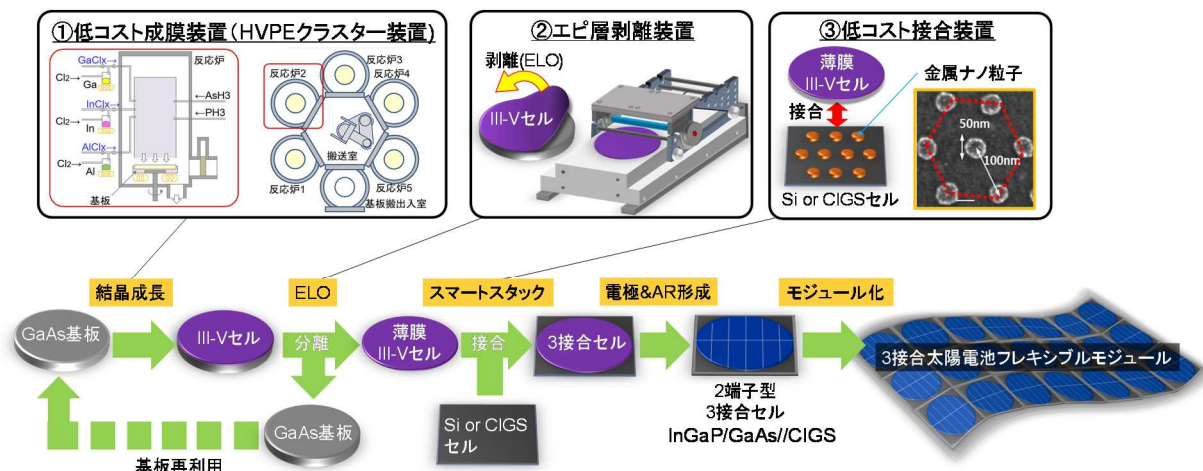
図III-2-(イ)-(iii)-G-19 フレキシブルGaAs//CISタンデムセル  
\*CISはセレン化法による（出光興産株）



図III-2-(イ)-(iii)-G-20 フレキシブルInGaP/AlGaAs//CIS素子の発電特性

## 2. 実用化・事業化見通し

産総研が想定する2端子型 InGaP/GaAs//CIGS モジュールの実用化イメージを、図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-21 に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-G-21 2端子型 InGaP/GaAs//CIGS モジュールの実用化イメージ

上図において、HVPE に関しては大陽日酸が実用化・事業化を検討し、シャープ・東大・タカノが取り組むエピ層剥離装置の実用化と合わせたモジュール作製を想定する。低コスト接合装置に関しては、スマートスタックの技術移転等によりスマートスタック自動装置の開発を行い、出光興産が開発する CIGS ボトムセルに大面積 InGaP/GaAs トップセルを自動で接合する装置を実現する。HVPE で作製したトップセルをスマートスタックし、2端子型 InGaP/GaAs//CIGS モジュールを作製する。

## 3. 波及効果

本事業の主目的達成のために開発する要素技術の中には、下記の通り種々の応用に波及効果を有するものが多く存在する。

### 【光デバイス、パワーデバイス等の化合物半導体の製造技術】

本事業で得られる HVPE 高速製膜技術は化合物半導体太陽電池だけでなく、そのほかの光デバイス、パワーデバイス等の化合物半導体の製造技術にも採用可能であり、当該装置の生産能力向上による化合物半導体のコストダウンや市場普及に貢献する。加えて HVPE 装置による複雑な構造の製膜の実現は、従来 MOCVD で担ってきたデバイス構造への HVPE 技術の応用の可能性を持っており、これによりさらなる製造コストの削減など新たなデバイス製造方法の普及に繋がるものと考えられる。例えば、光ファイバー通信に用いるレーザーおよび変調器を集積した光集積デバイスの製造技術としての応用が考えられる。実際、InP などの化合物半導体基板上に光導波路構造を形成した後にクラッド層を形成する「埋め込み再成長」においては、厚さ 10 μm に達する結晶層を数時間かけて成長しており、生産性の低さが製造過程のボトルネックとなっている。このため、現在開発中の高速 HVPE 技術に対する光デバイス業界からの注目度は高いと考えられる。

### 【InGaP トップセルのモバイル機器等への応用】

屋内光（照明等）に対して高効率で発電可能な InGaP トップセルについても、単体でエピ層剥離が可能であるため、基板再利用による大幅なコスト削減が期待でき、高効率セルの低価格化の実現により、モバイル機器などへの応用、普及が期待される。

## 4. 今後の展開

HVPE に関しては、量産型結晶成長装置の開発終了後、大陽日酸においてその実用化・事業化・普及を図る。Ⅲ-V族化合物半導体太陽電池用の HVPE 量産機開発は世界でまだ行われておらず、開発に成功した場合のメリットは非常に大きい。それにより、他の追随を許すことなく、HVPE 装置市場の大部分を占有できる可能性がある。



スマートスタックに関しては、技術移転等によりスマートスタック自動装置の開発を行い、低コスト接合装置としてその実用化、普及を目指す。太陽電池用途の他に、種々の電子デバイス・光デバイスの開発においても、簡便で低コストな接合技術としての普及が期待される。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	0 (0/0)	1 (1/0)
論文	1	5	0	6
研究発表・講演	4	9	2	15
(国内・審査有)	(1)	(0)	(0)	(1)
(国際・審査有)	(0)	(5)	(2)	(7)
(国内・審査無)	(3)	(4)	(0)	(7)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	1	2	0	3
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	1	0	1
受賞実績	2	2	0	4

(2022年6月20日現在)

## H 実用サイズペロブスカイト・シリコンタンデム太陽電池実現のためのプロセス技術開発 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人山形大学(再))

### 1. 成果詳細

#### 1.1 開発の概要

本研究では、株式会社カネカと連携して実施する研究開発において、その最終目標の達成に貢献するため、これまで主に小面積で作られてきたペロブスカイト太陽電池を実用サイズにスケールアップし、かつ結晶シリコン太陽電池上に直接作製するという新しい技術を開発する。このため、産業技術総合研究所においては、実用サイズ（シリコンウェハサイズ）のペロブスカイト・シリコンタンデムセル実現のためのペロブスカイトセルの作製技術を、また再委託先である山形大学においては、ペロブスカイトトップセル作製基盤技術の開発を進め、協力してセルの開発を行っている。以下、委託先、再委託先ごとに開発成果を記述する。

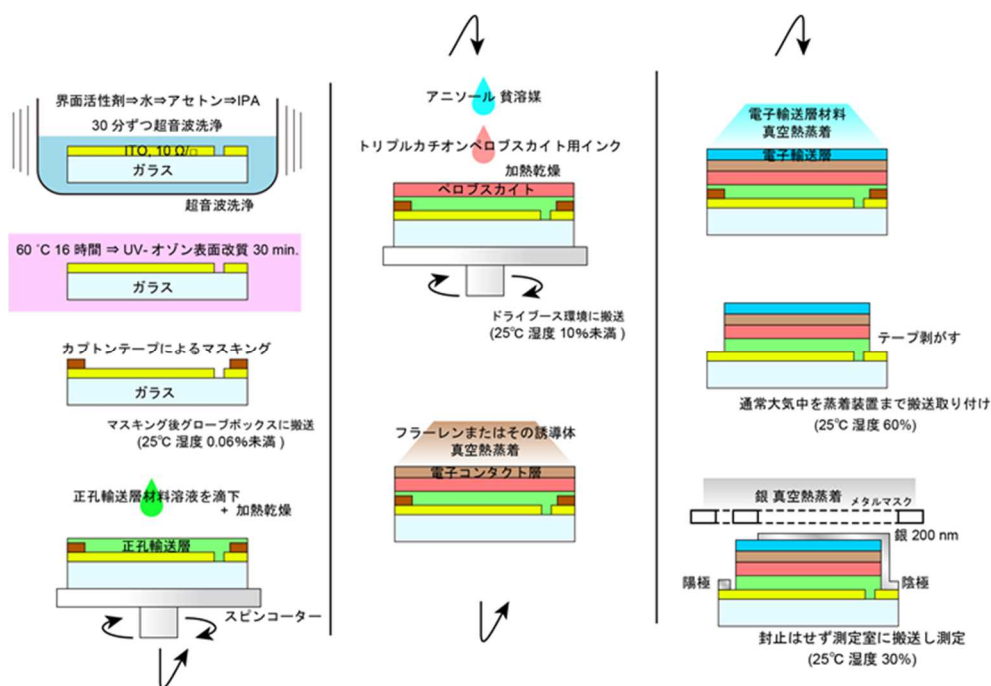
#### 1.2 実用サイズのペロブスカイト・シリコンタンデムセルの開発（産業技術総合研究所）

##### 1.2.1 逆型ペロブスカイト単セル(面積 1.04 cm<sup>2</sup>)試作・評価

タンデムセルに適したペロブスカイトセル作製プロセスの構築のために、山形大学の研究成果を取り入れながら逆型ペロブスカイト単セル（面積 1.04 cm<sup>2</sup>）の試作・評価を進めた。

図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-H-1 にペロブスカイト太陽電池の作製プロセス、図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-H-2 に 1cm<sup>2</sup> 逆型ペロブスカイト単セルの写真、構造及び発電特性の例を示す。20×25 mm のITOパターンガラス基板上に図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-H-1 の作成プロセスで、正孔輸送層 (MeO-2PACz) /ペロブスカイト層/電子輸送層 (BCP/C60) 及び電極 (Ag) を順に成膜し、封止をせずに 4 端子測定を行った。ペロブスカイト層の組成 (Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.76</sub>MA<sub>0.24</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.74</sub>Br<sub>0.24</sub>)<sub>3</sub>) は、タンデムセルに適したバンドギャップ（約 1.7eV）に調整している。本プロセスを用いることで、図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-H-2 の右に示す通り、順方向掃引にあっては短絡電流密度 19.5 mA/cm<sup>2</sup>、開放電圧 1.14 V、エネルギー変換効率 18.4% が得られた。

こうして得られる発電特性と、より大きな基板サイズでペロブスカイト太陽電池を作製した場合の発電特性との差が最小限となるようにプロセスを最適化していくことが今後の開発に重要である。



Ⅲ-2-(イ)-(iii)-H-1 ペロブスカイト太陽電池の作製プロセス

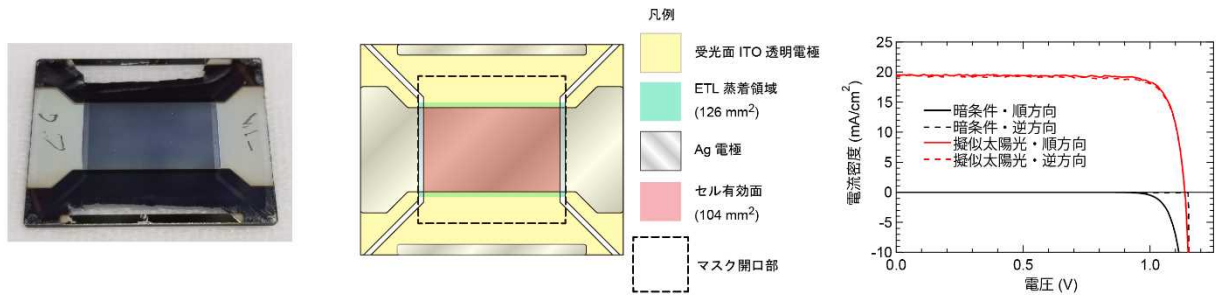


図 III-2-(イ)-(iii)-H-2 逆型単セル (面積 1.04cm<sup>2</sup>) の(左) 写真、(中) 構造、(右) 電流・電圧特性

### 1.2.2 表面パッシベーションによる高効率化

電子輸送層、ペロブスカイト層及びホール輸送層の全てを溶液ベースのプロセスで成膜する方法は、タンデムセルに適したペロブスカイト太陽電池の作製プロセスとして期待できるが、現時点の産総研が作成した場合、電子輸送層を真空蒸着によって成膜する方法よりもわずかに発電特性やその均一性が劣っていた。そこでペロブスカイト層と電子輸送層の界面を溶液ベースの追加プロセスでパッシベーションすることにより特性の向上を試みた。

具体的には、パッシベーション層として、濃度の異なる Phenethylammonium chloride (PEACl) 溶液をペロブスカイト層形成後にスピコートにより塗布することでセル (面積: 1.04cm<sup>2</sup>) を作製し、最適な濃度を検討した。セルの構造は、ITO/MeO-2PACz /Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.76</sub>MA<sub>0.24</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.74</sub>Br<sub>0.24</sub>)<sub>3</sub> /PEACl/PCBM /BCP/Ag (図 III-2-(イ)-(iii)-H-3 左上) で、Ag の蒸着を除いてすべての工程をスピコートによる塗布によって行った。図 III-2-(イ)-(iii)-H-3 (右上、下) に、I-V 特性の例、および溶液濃度による特性変化を示す。セルの特性は、PEACl 溶液の濃度に依存し、0.5 mg/mL (IPA 溶液) の時に、18.9% (forward scan) の変換効率を得ることができた。

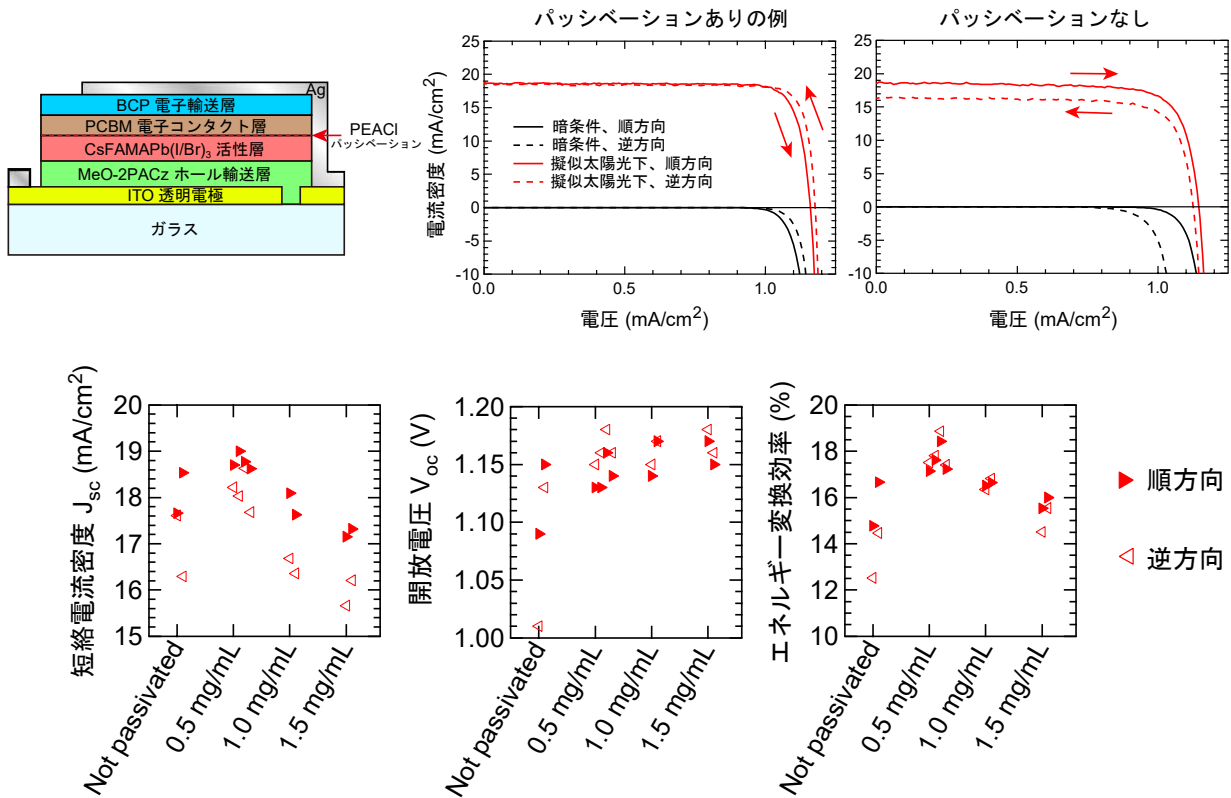


図 III-2-(イ)-(iii)-H-3 (左上) 試料構造、(右上) I-V 特性の例、(下) 溶液濃度による特性変化

### 1.2.3 実用サイズでのタンデムセルの実現のための基板サイズ拡大の検討

タンデムセルに適したペロブスカイト太陽電池の作製プロセスについて、実用サイズでのタンデムセルの実現に向け実際により大きな基板サイズでのペロブスカイト太陽電池の作製及び、その特性および均一性の検証を進めた。

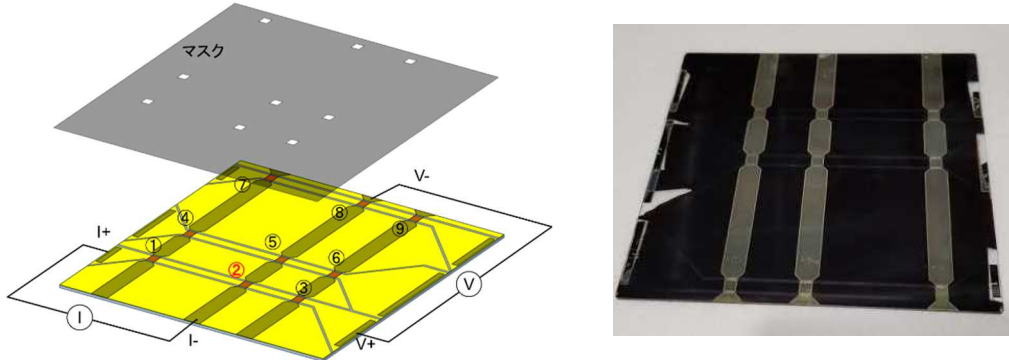


図 III-2-(イ)-(iii)-H-4 測定プロセス(左)、および 100 mm 角基板上に作製したセルの写真 (左)

ペロブスカイト太陽電池の基本的な作製プロセスは、図 III-2-(イ)-(iii)-H-1 と同様に、100 mm 角の ITO パターンガラス基板にスピンコーティングにより正孔輸送層及びペロブスカイト層を成膜したのち、電子コンタクト層および電子輸送層、銀電極は真空蒸着により成膜をおこなっている。100 mm 角に成膜するためにプロセスの内容を調整し、塗布性が改善されたプロセスにより大面積での成膜が可能となった。図 III-2-(イ)-(iii)-H-4 に、測定プロセスおよび実際のセルの写真を示す。本プロセスでは図の左に示すように中央付近から基板端より 3.5 mm の位置までの 9 か所にマスクされた 3 mm 角のセルが作られ、測定電極の切り替えによって各セルの発電特性を評価することで、成膜の品質及びその均一性を評価した。試料の位置により ITO 引き出し電極の長さが著しく異なるため、測定を 4 端子測定で行う事でその影響を排除している。

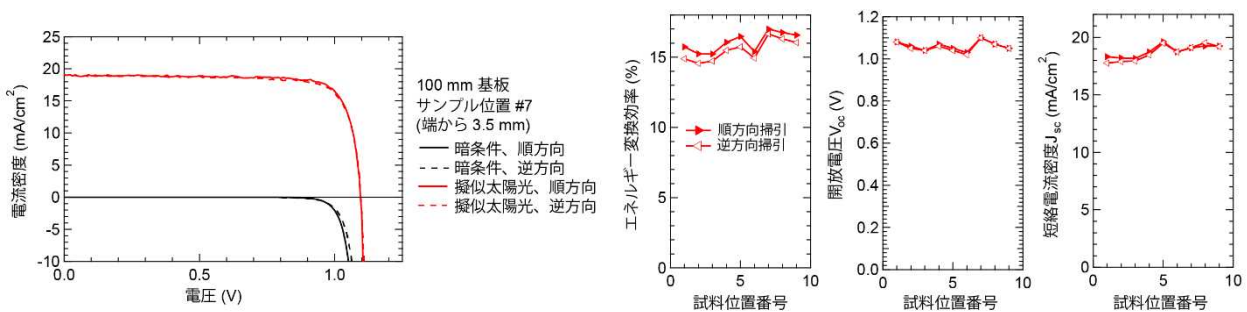


図 III-2-(イ)-(iii)-H-5 (左) 100 mm 角基板上の小セルの電流・電圧特性の例 (右) 9 個の小セルの特性比較

図 III-2-(イ)-(iii)-H-5 は図 III-2-(イ)-(iii)-H-1 で示したペロブスカイト太陽電池試料の電流・電圧特性の例及び 100mm 角基板上に成膜した 9 個のセルの発電特性の比較である。

図の左側に示したのは 100mm 角基板の端付近に作製した 3 mm 角の小セルの電流・電圧特性の例であり、基板端からセル端の距離は 3.5 mm である。暗条件ではリークが非常に少なく閾値電圧が 1V 程度のダイオードとしてふるまい、擬似太陽光下にあってもリークの増加は顕著ではなく、ヒステリシスも少ない。順方向掃引にあつては短絡電流密度 19.1 mA/cm<sup>2</sup>、開放電圧 1.10 V、エネルギー変換効率が 17.0% が得られた。順方向掃引の擬似太陽光下では 9 セルすべてでエネルギー変換効率が 15% を、短絡電流密度が 18 mA/cm<sup>2</sup> を、開放電圧が 1V を超えるなど一定の均一性を示しており、100 mm 角基板全体に均一な特性のペロブスカイト太陽電池が作製出来ていることが示唆された。

### 1.3 ペロブスカイトトップセル作製基盤技術の開発（山形大学）

#### 1.3.1 ホール選択層への自己組織化単分子膜の適用

ペロブスカイトトップセルの作製技術においては、特に、シリコンセルとペロブスカイトセルの連結部分、中間層の形成技術が重要である。逆型構造では、ホール選択層（ホール輸送層）が中間層の構成要素にあたる。ホール選択層としては、従来、高分子型ホール輸送層を用いることが一般的であったが、高分子型ホール輸送層は撥水性が高いものが多く、ペロブスカイト前駆体溶液の濡れ性に問題があり、下地が前駆体溶液をはじくことで塗りむらを生じるなど、大面積で均一に良質なペロブスカイト活性層を形成することが難しかった。

そこで今回、ホール選択層に用いる材料を、撥水性のある高分子型ホール輸送層（PTAA や TFB 等）から、親水性を一部付与した、自己組織化単分子膜（SAM）に置き換えることで、濡れ性及び塗布性の改善を行った。

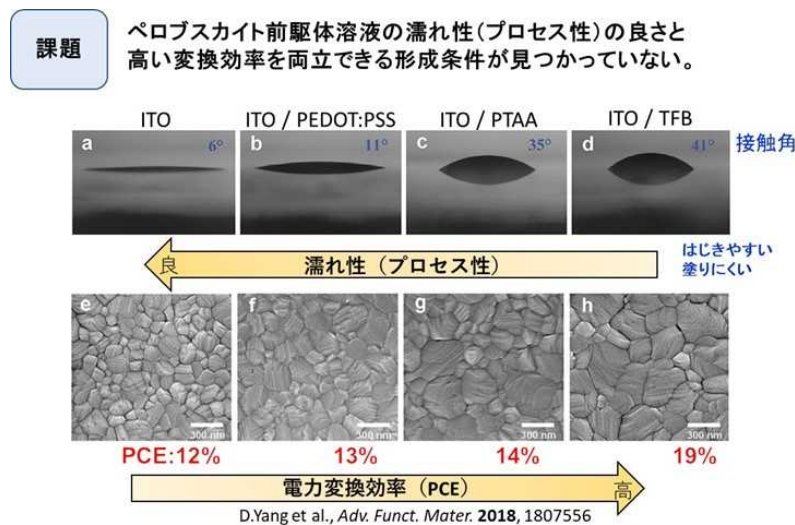


図 III-2-(イ)-(iii)-H-6 従来技術における課題

**要点** ①ITOへの被覆性/化学結合性と、②ペロブスカイト前駆体溶液の濡れ性（プロセス性）の良さを併せ持つ、ホスホン酸系自己組織化単分子膜（SAM）材料を適用

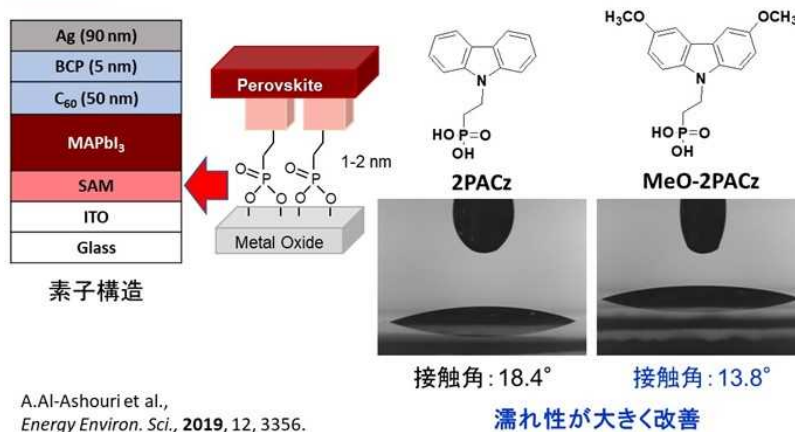


図 III-2-(イ)-(iii)-H-7 ホール選択層への自己組織化単分子膜の適用によるペロブスカイト溶液の濡れ性改善

具体的には、自己組織化単分子膜として、カルバゾール基を有するホスホン酸化合物（2PACz 及び MeO-2PACz）を適用した。その結果、以下の改善が得られた。

- ①接触角の改善：高分子型ホール輸送層（PTAA：35°、TFB：41°）  
⇒自己組織化単分子膜（2PACz：18.4°、MeO-2PACz：13.8°）

- ②塗布性の改善：30mm 角 SiO<sub>2</sub> 基板に対しペロブスカイト膜の均一全面塗布を確認  
(従来材料では塗りむらや塗り残しあり)
- ③逆型ペロブスカイト太陽電池単セルの試作・評価：変換効率 18%を実現  
自己組織化単分子膜 MeO-2PACz をホール輸送層に替えて用いた 3mm 角セルで、  
J<sub>sc</sub>: 22.3 mA/cm<sup>2</sup>, Voc: 1.09 V, FF: 0.74, PCE: 18.0%を得た。

実際の素子作製プロセス、ペロブスカイト膜外観、UV-Vis 及び XRD スペクトル、電流密度-電圧 (J-V) 特性などを以下に示す。開放電圧は MeO-2PACz を用いた場合、1.09 V であった。

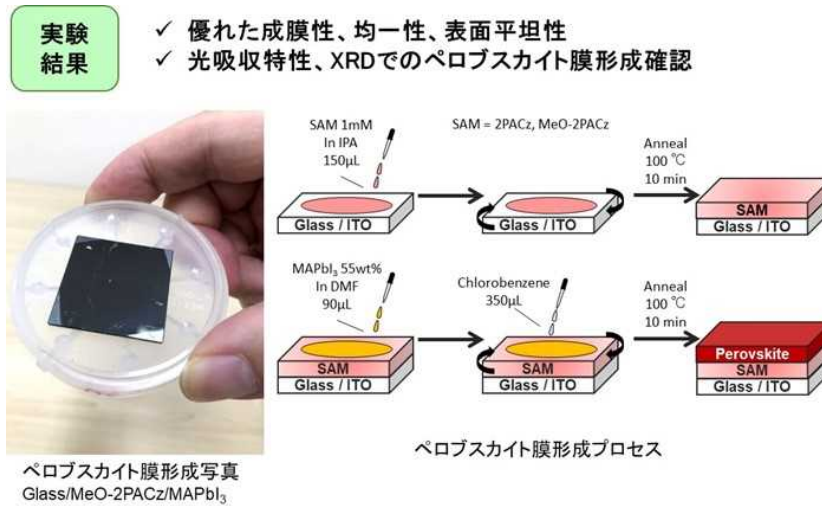


図 III-2-(イ)-(iii)-H-8 自己組織化単分子膜上に成膜したペロブスカイト膜の写真及び成膜方法

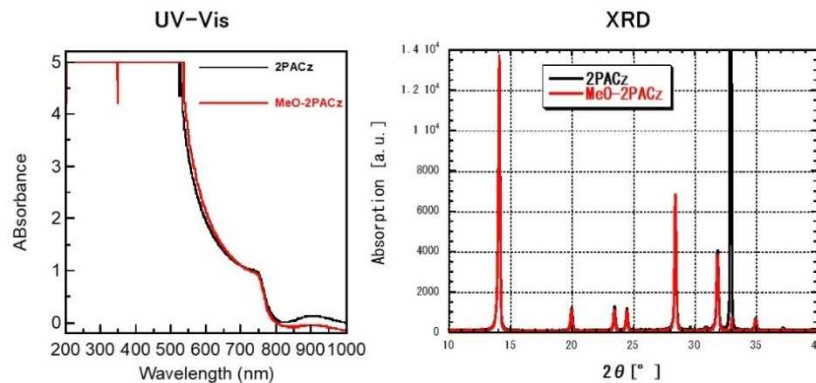
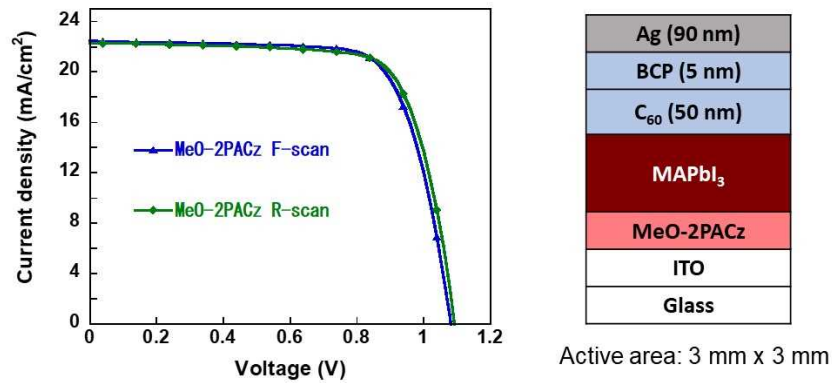


図 III-2-(イ)-(iii)-H-9 自己組織化単分子膜上に形成したペロブスカイト膜の UV-Vis 及び XRD スペクトル



	MeO-2PACz forward-scan	MeO-2PACz reverse-scan
Jsc [mA/cm <sup>2</sup> ]	22.43	22.27
Voc [V]	1.08	1.09
FF	0.73	0.74
PCE [%]	<b>17.82</b>	<b>18.06</b>

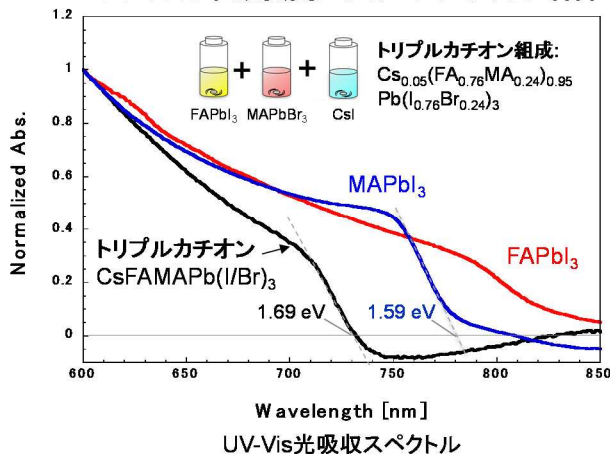
図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-H-10 自己組織化単分子膜を用いたペロブスカイトセルの太陽電池特性

### 1.3.2 ペロブスカイト層の組成検討（トリプルカチオン）・単セル試作・評価

ペロブスカイトセルの安定性（耐久性）を高めるため低分子材料のメチルアンモニウム（MA）の一部を分子量の大きいホルムアミジニウム（FA）及び無機材料のセシウム（Cs）に替えた組成について検討を行い、ペロブスカイト太陽電池単セルでの試作評価を行った。またバンドギャップ（Eg）制御のためハロゲン組成も調整した。結果は以下の通りである。電流密度－電圧（J-V）特性評価においてはヒステリシスがよく抑えられている。開放電圧は、トリプルカチオン組成のペロブスカイト層を用いることで、1.14 Vが得られた。

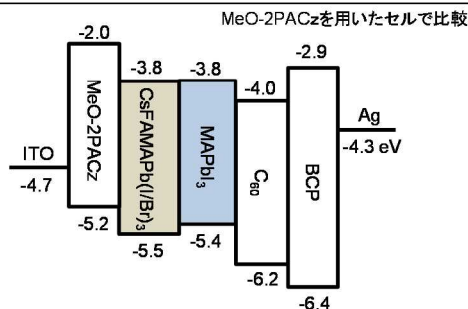
- ・素子構造（逆型、トリプルカチオン組成）  
ITO/MeO-2PACz or PTAA/Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.76</sub>MA<sub>0.24</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.74</sub>Br<sub>0.24</sub>)<sub>3</sub>/C<sub>60</sub>/BCP/Al
- ・PTAA を用いたセルの太陽電池特性  
Jsc: 20 mA/cm<sup>2</sup>, Voc: 1.15 V, FF: 0.69, PCE: 15.9%
- ・MeO-2PACz を用いた単セルの太陽電池特性  
Jsc: 20.5 mA/cm<sup>2</sup>, Voc: 1.14 V, FF: 0.77, PCE: 17.9%

ペロブスカイト組成変更によるバンドギャップ制御



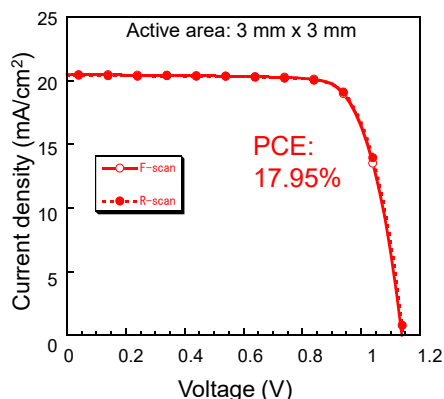
太陽電池セル開放電圧

ペロブスカイト膜組成	開放電圧 Voc
MAPbI <sub>3</sub>	1.09 V
$\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.76}\text{MA}_{0.24})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.76}\text{Br}_{0.24})_3$	1.14 V



ITO (150 nm) / MeO-2PACz (1-2 nm) /  $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.76}\text{MA}_{0.24})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.76}\text{Br}_{0.24})_3$  (400 nm) / C<sub>60</sub> (30 nm) / BCP (8 nm) / Ag (90 nm)

Ag (90 nm)
BCP (8 nm)
C <sub>60</sub> (30 nm)
$\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.76}\text{MA}_{0.24})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.76}\text{Br}_{0.24})_3$ (400 nm)
SAM (MeO-2PACz)
ITO
Glass



	Forward scan	Reverse scan
J <sub>sc</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]	20.50	20.42
V <sub>oc</sub> [V]	1.14	1.14
FF	0.77	0.77
PCE [%]	17.89	17.95

図III-2-(イ)-(iii)-H-11 トリプルカチオン組成のペロブスカイト層を用いたセルの太陽電池特性

1.3.3 電子輸送層の形成技術の開発：蒸着法と塗布法の比較

ペロブスカイト/シリコンタンデムセルのトップセルとして用いるペロブスカイト太陽電池の形成技術、特に電子輸送層の形成技術の開発に着目し、最適な作製技術の開発を目的として、電子輸送層の成膜法（蒸着法と塗布法）が異なるペロブスカイトセルの作製及び特性比較を行った。

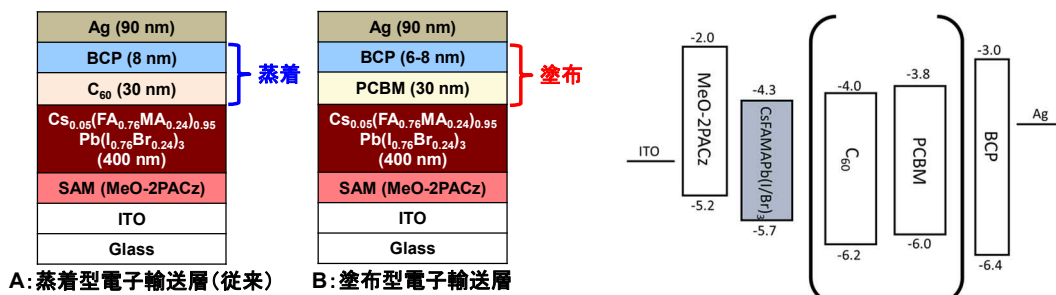
作製を行った素子の具体的な製法及び素子構造は以下である。

A：蒸着型電子輸送層（ペロブスカイト層の上に、C<sub>60</sub>とBCPの2層を蒸着）

ITO / MeO-2PACz (1 nm) /  $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.76}\text{MA}_{0.24})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.76}\text{Br}_{0.24})_3$  (370 nm) / C<sub>60</sub> (30 nm) / BCP (8 nm) / Ag (70 nm)

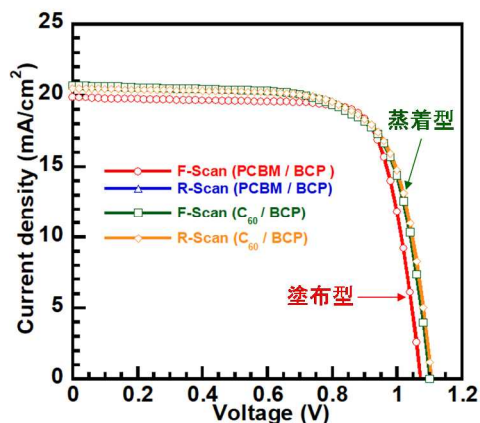
B：塗布型電子輸送層（ペロブスカイト層の上に、PCBMとBCPの2層を塗布成膜）

ITO / MeO-2PACz (1 nm) /  $\text{Cs}_{0.05}(\text{FA}_{0.76}\text{MA}_{0.24})_{0.95}\text{Pb}(\text{I}_{0.76}\text{Br}_{0.24})_3$  (370 nm) / PCBM (30 nm) / BCP (6 nm) / Ag (70 nm)



図III-2-(イ)-(iii)-H-12 電子輸送層の作製プロセス検討における素子構造図





	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	FF	PCE (%)
蒸着型 Forward scan	20.7	1.10	0.71	16.3
蒸着型 Reverse scan	20.4	1.10	0.72	16.5
塗布型 Forward scan	19.9	1.07	0.77	16.5
塗布型 Reverse scan	19.7	1.07	0.79	16.7

図 III-2-(イ)-(iii)-H-13 電子輸送層を蒸着した素子と塗布した素子の特性比較

作製した素子の特性を評価したところ、電子輸送層2層を蒸着した素子では、代表的な特性として変換効率 16.3%~16.5%、電子輸送層2層を塗布成膜した素子では、変換効率 16.5%~16.7%とほぼ同等の変換効率が得られた。細かい特性では、蒸着型は塗布型よりもわずかに高い開放電圧である 1.10V を示し、塗布型は蒸着型よりも高いフィルファクター：0.77~0.79 を示した。なお、今回の素子作製条件においては、BCP の膜厚に関して蒸着型が 8 nm、塗布型が 6 nm であり、電子輸送層の成膜法やわずかな膜厚の差が特性に影響を及ぼした可能性もある。

ペロブスカイトセルの作製技術としては、電子輸送層の成膜法に関して、蒸着、塗布、いずれの製法においても遜色ない特性が得られたことで、選択肢が広がった。

### 1.3.4 高移動度・高耐熱電子輸送材料の適用評価

一般的にペロブスカイト太陽電池で用いられる電子輸送材料のうち、BCP は、ガラス転移点(Tg)が約 89°C と低いため、より耐熱性が高い材料が今後求められるものと考えている。また、BCP は数 nm の薄い膜厚範囲で制御する必要があり、移動度が課題である可能性が考えられる。

そこで今回、移動度が  $1 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/Vs と高く、耐熱性についても融点が 374°C と高い、高移動度・高耐熱電子輸送材料として、下図に示す B4PyMPM を電子輸送層に用いて素子を作製し、特性を評価した。素子の作製法としては、電子輸送層のうち PCBM を塗布、BCP または B4PyMPM を蒸着する方法を用いた。Ag 電極は蒸着法で成膜しているため、総合的な工程数としては変化しない。

具体的な素子構造は以下である。

C：塗布+蒸着併用（ペロブスカイト層上に PCBM を塗布、BCP または B4PyMPM を蒸着）

ITO/ MeO-2PACz (1 nm) / Cs<sub>0.05</sub>(FA<sub>0.76</sub>MA<sub>0.24</sub>)<sub>0.95</sub>Pb(I<sub>0.76</sub>Br<sub>0.24</sub>)<sub>3</sub> (370 nm) / PCBM (30 nm) / BCP or B4PyMPM (8 nm) / Ag (70 nm)

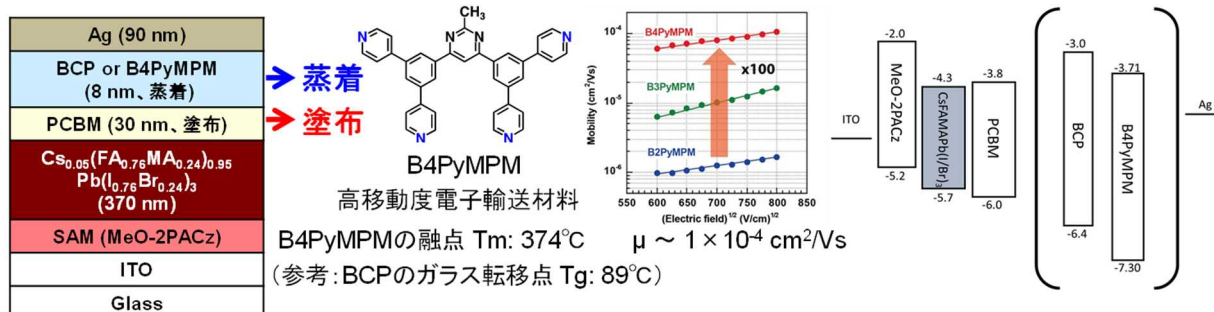


図 III-2-(イ)-(iii)-H-14 異なる電子輸送材料を用いて作製した素子の構造

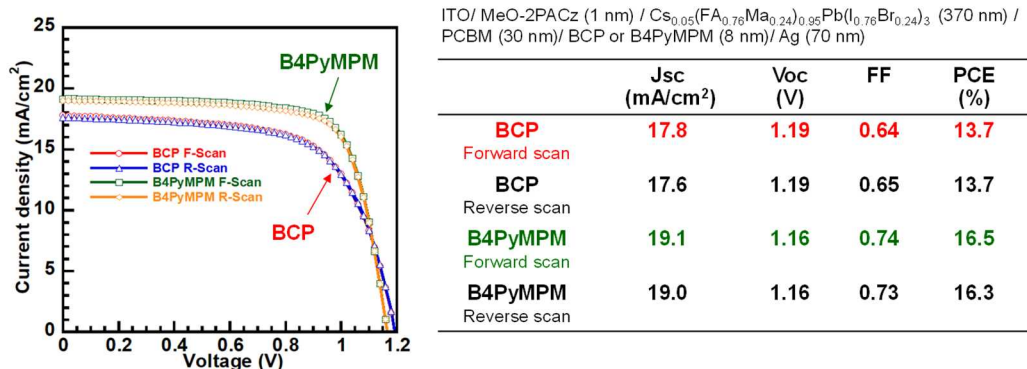


図 III-2-(イ)-(iii)-H-15 異なる電子輸送材料を用いて作製した素子の特性評価結果

BCP もしくは B4PyMPM を PCBM 上に蒸着して形成した本実験においては、B4PyMPM を用いた素子の方が優れた特性 (Jsc: 19.1 mA/cm<sup>2</sup>, Voc: 1.16 V, FF: 0.74, PCE: 16.5%) を示した。これは、B4PyMPM の高い電子移動度が寄与したものと考えている。但し、今回の実験では、BCP を用いた素子の電流値やフィルファクターが低く、この部分はBCPの膜厚調整により改善できる余地がある。今後さらに実験数を上げて、最適な電子輸送層の構成及び成膜方法を構築していく予定である。

また、今回の電子輸送層の構成において、開放電圧 (Voc) : 1.16V と従来よりも高い値が得られた。これは、電子輸送層の材料及び成膜プロセスの最適化により、Voc ロスを抑え、より高い開放電圧が得られる可能性を示している。今後、他層の成膜技術の開発と併せて最適化を図る。

### 1.3.5 ペロブスカイト層の組成開発：添加剤導入による高信頼性化

ペロブスカイト層の品質を上げ高信頼性化を図るため、ペロブスカイト層の組成開発を行った。具体的には、結晶粒表面の不安定性を抑える目的でカリウム及びアミン系添加剤を加えた。また、それにより結晶粒表面の不動態化を図り、不要な PbI<sub>2</sub> の生成を抑え、ペロブスカイト層の安定化を実現した。具体的な実験法及び実験結果を以下に示す。

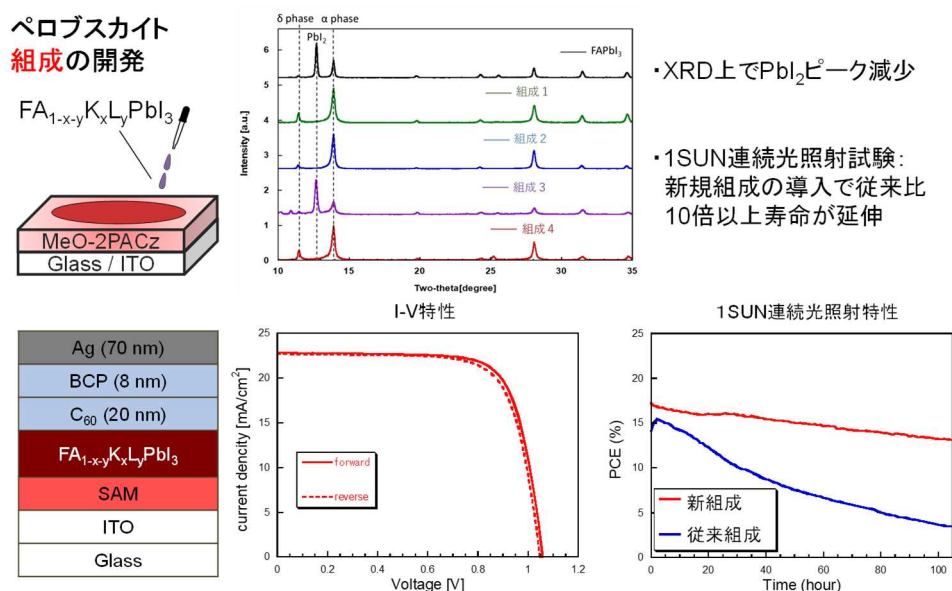


図 III-2-(イ)-(iii)-H-16 ペロブスカイト層の組成改良及び連続光照射試験における信頼性評価結果

実験の結果、添加剤を加える前に比べて、XRD 上で観測される PbI<sub>2</sub> ピークが抑制され、作製した素子の 1SUN 連続光照射試験においては、添加剤を用いない場合と比べて 10 倍以上寿命が延伸した。これは、添加剤等によるペロブスカイト層の組成改良が、信頼性の向上のために極めて有効であることを示している (特許出願中)。今後、より複雑な組成であるトリプルカチオン (CsFAMAPbIBr) 系ペロブスカイトに、今回見出した添加剤の組合せを適用し、変換効率と寿命の両立を図る。

## 2. 実用化・事業化見通し

小面積 (0.09 cm<sup>2</sup>, 1.04 cm<sup>2</sup>) での検討により、タンデムセルに適したペロブスカイトセルのベースラインとなる作製プロセスを構築することができた。このプロセスを基に中間目標である 100 mm 角基板へのペロブスカイト層の成膜に目途をつけることができ、100 mm 角基板上でのセル効率も部分的 (3 mm 角) ながら 17% を達成した。このため、最終目標である結晶シリコン基板サイズ (156 mm 角サイズ) への成膜技術の開発を進めている。また、これにあわせてカネカ提供の基板上へペロブスカイトセルを形成するための基礎検討を行っており、今年度中にはタンデムセルの作製が可能となる見込みである。

## 3. 波及効果

本事業を通して結晶シリコン基板サイズへの成膜技術が確立され、このサイズのタンデムセルの高効率化が実現されれば、ペロブスカイトセル単体およびシリコンセル単体では得られない変換効率が得られるため、プロジェクトの目的である PV 搭載電動自動車実現のための技術開発の加速が期待される。

## 4. 今後の展開

実用サイズのペロブスカイトセルの変換効率向上に向けた開発を引き続き進める。特に、小面積セルを実用サイズにスケールアップしても変換効率の低下が少ないプロセスの開発、および、ペロブスカイトが本来有しているバンドギャップと実際のセルで得られる開放電圧 Voc との差 (Voc ロス) を最小化するための開発を重点的に進めることで、共同研究先の株式会社カネカの目標達成に貢献する予定である。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	1 (1/0)	0 (0/0)	1 (1/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	1 (0)	3 (1)	1 (0)	5 (1)
(国際・審査有)	(1)	(0)	(0)	(1)
(国内・審査無)	(0)	(2)	(1)	(3)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	1	0	1
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

# I 高効率タンデム型太陽電池モジュールの開発（株式会社カネカ）

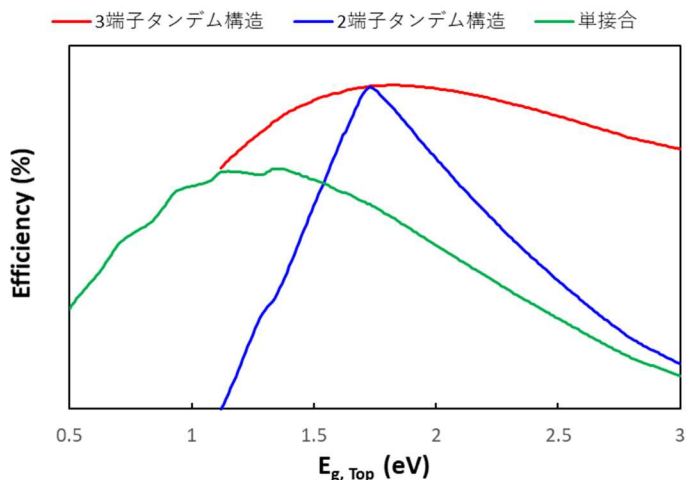
## 1. 成果詳細

本プロジェクトでは、自動車形状に追従可能で、高効率、低コストを実現できる太陽電池モジュールの開発を目指しており、低コストの結晶シリコンをベースとして30%以上の高効率化、曲率半径1mを含む3D曲面モジュール化を70円/Wで目指す技術開発に取り組んでいる。具体的には、① 高効率タンデム型太陽電池セル技術、② 高出力曲面モジュール技術の開発を実施しており、移動体等の用途において発電量最大化を実現するセル、モジュール構造の開発に取り組んだ。

### ① 高効率タンデム型太陽電池セルの技術開発

高効率タンデム型太陽電池セルとして、ペロブスカイト/シリコンタンデム型太陽電池の開発を実施し、移動体用太陽電池として良好な特性が得られるセル構造、特にボトムセルの設計を行い、その設計の検証から開発を開始した。

セル設計に必要なシミュレーション技術として、光学シミュレーション技術の開発を実施し、種々の構造、材料特性、膜厚等を有するタンデム型太陽電池セルの光学計算を、実測値データをもとに実施した。また、Shockley-Queisser Limit をベースとした単接合太陽電池、二端子および三端子タンデム型太陽電池の理論変換効率を算出し、移動体等の用途において発電量最大化を実現しやすいセル構造の検討を行った（図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-I-1）。端子構造（二端子、三端子）や各層の特性の影響等を検討した結果、特に、三端子タンデム型構造の採用により、トップセルとボトムセルとの電流マッチングの制約がなくなり、トップセルであるペロブスカイト型太陽電池における材料の選択肢が圧倒的に増えることを確認した。自動車用途等の移動体においては、太陽光の入射方向、入射角度の変動が大きいことから、入射光スペクトルへの変換効率の依存性が低い三端子タンデム構造の特性は発電量最大化に有利にはたらくものと期待できる。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-I-1 : Shockley-Queisser Limit をベースとして単接合太陽電池、二端子および三端子タンデム太陽電池の理論変換効率を検討した結果の一例。トップセルのバンドギャップに対する各種太陽電池の理論効率を算出した。二端子タンデム構造でも、三端子タンデム構造でも、単接合太陽電池より高い変換効率を得られるものの、三端子タンデム構造では、トップセルのバンドギャップの選択肢が広いことが分かる。

更に、設計の検証を実施するため、高品位のトップセル、ボトムセル、トップセル/ボトムセル界面を形成するための技術を開発し、これらの技術を高効率タンデム型セルの技術開発に適用した。また、高効率タンデム型セルの技術開発を効率的に推進するため、作製途中のタンデム型セルの特性をモニタするための手法、およびタンデム型太陽電池セルの電気的特性や光電変換特性を評価するための手法を検討した。これらの結果を踏まえた測定系を構築し、高効率タンデム型セルの技術開発で活用した。

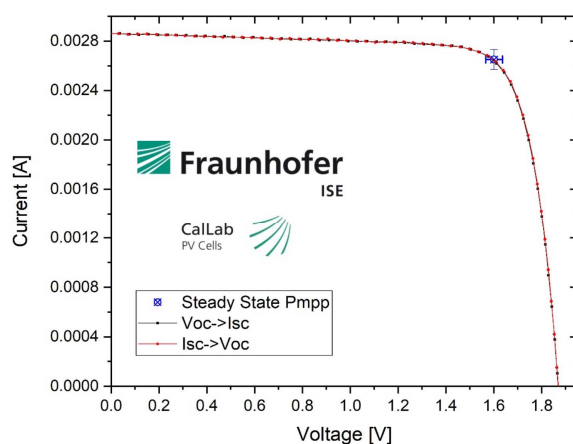
Shockley-Queisser Limit をベースとした理論変換効率では、三端子タンデム構造が潜在的に優位となる可能性を示唆する結果を得たが、ペロブスカイト/シリコンタンデム型太陽電池セルの開発を進

める上では、まずは構造がシンプルで、中間層などにおいて三端子タンデム太陽電池セルと共通の技術を有すると考えられる二端子タンデム太陽電池セルの開発に取り組んだ。

二端子タンデム太陽電池セルにおいて、移動体用太陽電池として良好な特性が得られるセル構造設計の光学シミュレーション結果をベースに、二端子タンデム太陽電池セルの高効率化技術開発を実施した。光学シミュレーション結果との整合性を確認しながらタンデム太陽電池セルの作製、評価を実施し、各層の光吸収ロスや反射ロスを低減させるセル構造の最適化を進めた。特に、トップセルとボトムセル間において、反射ロス低減と良好な電気特性の両立が求められる中間層について、薄膜シリコン形成技術を活用することで技術開発を促進させ、トップセル、ボトムセル間の損失低減技術のベースを確立した。

更に、トップセルにおけるペロブスカイト層の高品質化に加え、電子輸送層やホール輸送層の材料検討も実施した。特にホール輸送層材料においては、自己組織化単分子膜（SAM）材料のペロブスカイト太陽電池特性への適用およびその影響を調べ、複数のSAM材料を混合することにより、単独で用いた場合と比較して太陽電池特性が向上することを示唆する結果を得た。これらの検討を通じて、ペロブスカイト／シリコンタンデム型太陽電池セルの変換効率は第三者測定で変換効率28.3%（図III-2-(イ)-(iii)-I-2）、自社測定で変換効率28.8%が得られている。

$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$V_{oc}$ [mV]	FF [%]	Eff. [%]	Measurement
19.07	1870	79.02	28.17	Voc->Isc
19.08	1870	79.11	28.22	Isc->Voc
<b>28.28 steady state</b>				



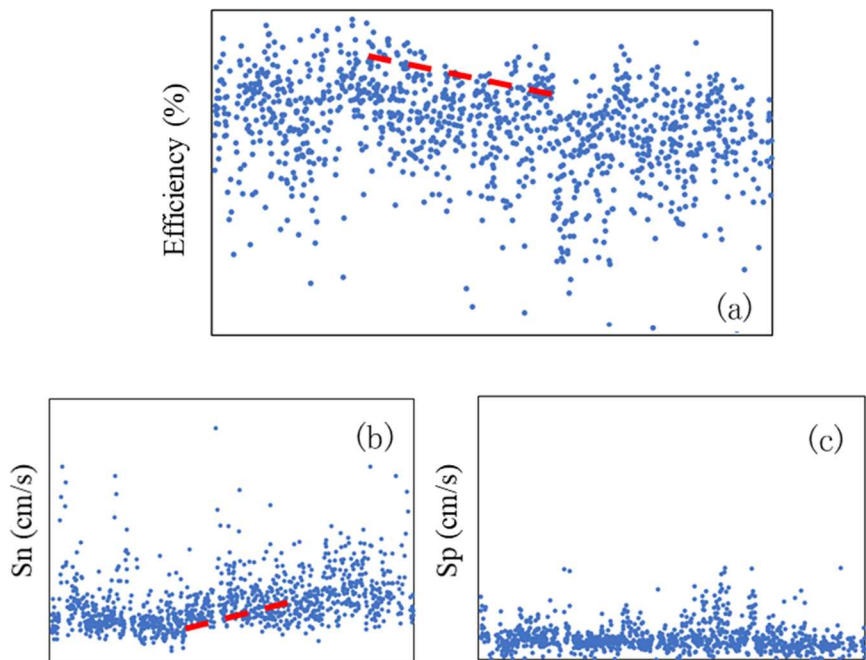
図III-2-(イ)-(iii)-I-2：二端子タンデム構造を有するペロブスカイト／シリコンタンデム型太陽電池の第三者測定によるI-V測定結果。 $V_{oc} \rightarrow I_{sc}$ および $I_{sc} \rightarrow V_{oc}$ の各掃引方向におけるI-V特性と、最大電力点追従制御（MPPT）による変換効率が示されている。

更なる変換効率の向上を目指し、タンデム太陽電池セルの光閉じ込め構造に関しても光学シミュレーションとセル作製の両面での取り組み、ボトムセルの表面形状最適化によるセルおよびモジュールにおける光閉じ込め効果向上に関しても検討した。また、タンデム太陽電池において、更なる高効率化および高信頼性化を実現するため、トップセル作製および評価に関する新規設備の導入も実施し、より高品質なトップセルの形成およびより高精度な評価を実現するための環境を整えた。

更に、今後三端子タンデム太陽電池のボトムセルへの適用を目指しているヘテロ接合バックコンタクト（HBC）太陽電池セルにおいても検討を実施しており、裏面のパターニング工程の検討を効率的に進めるため、I-V特性よりp、n領域それぞれにおける少数キャリア再結合速度を見積もる手法を検討した。

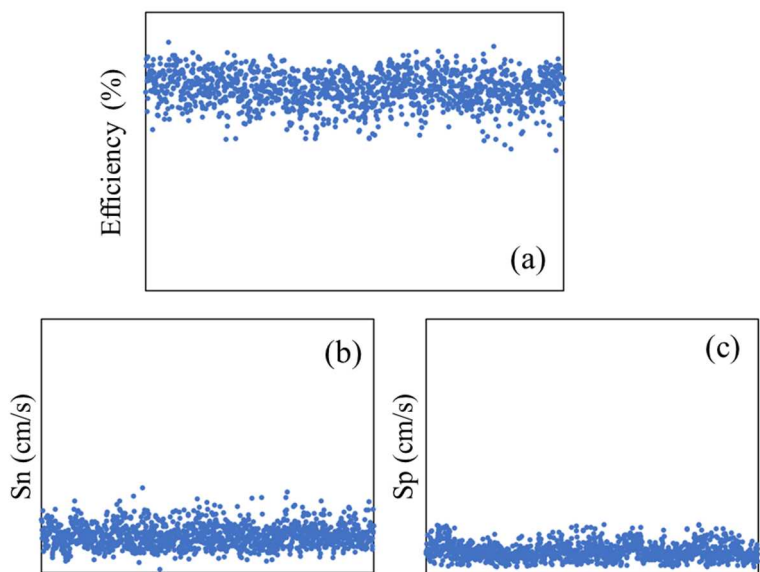
多数枚のHBC太陽電池セルを作製した時のセル作製順の変換効率の推移を図III-2-(イ)-(iii)-I-3 (a)に示す。セル変換効率は、図中に赤点線で示したように、作製枚数が増加するとともに低下する傾向があることが分かる。また、図III-2-(イ)-(iii)-I-3 (a)に示したサンプルのデータを元に求めたp領域、n領域における少数キャリア再結合速度の結果を図III-2-(イ)-(iii)-I-3 (b), (c)にそれぞれ示す。p領域と異なり、n領域の少数キャリア再結合速度は、作製

枚数の増加とともに増大する傾向があることが示唆される結果が得られた。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-I-3：変換効率(図 a)および p 領域(図 b)、n 領域(図 c)における少数キャリア再結合速度の推移の評価結果の一例を示す説明図。横軸はセルの作製順を表す。

この結果をもとに、n 領域における少数キャリア再結合速度の変動を抑制させるための検討を実施し、変換効率の変動を抑制することができた。また、この結果は、作製条件を検討した後のデータである図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-I-4 (b), (c)に示すように、n 領域の少数キャリア再結合速度の変動が抑制されたことによるものであると確認できる。これらの取り組みを踏まえ、更なる最適化を進めた結果、ペロブスカイト／シリコンタンデムセルにて、セル変換効率 29.0% (社内測定)を得た。



図Ⅲ-2-(イ)-(iii)-I-4：作製条件検討後における変換効率(図 a)および p 領域(図 b)、n 領域(図 c)における少数キャリア再結合速度の推移の評価結果の一例を示す説明図。横軸はセルの作製順を表す。

## ② 高出力曲面モジュール技術の技術開発

移動体用太陽電池における所定精度を有する大型の曲面モジュールを試作するため、レイアップ工程やモジュール封止工程における位置・寸法精度確保手法の検討を、ボトムセル（シリコン太陽電池）を用いて実施した。この検討を通じて試作工程における基板の曲率の影響を確認した。また、曲面基板を用いて高精度のシリコン太陽電池モジュールを試作した。試作した曲面モジュールを用いて、曲面モジュールの各種評価（出力、意匠性等）を実施する際の課題を抽出した。更に、曲面モジュールを安定的に作製するために必要なモジュール構造や部材の情報を蓄積して技術開発を行った。また、開発した技術を用いて作製した曲面モジュールの意匠性評価や出力評価を行い、評価手法の課題抽出とその対応手法を開発している。

出力評価に関しては、基準となる出力評価条件を設定するための初期段階として、屋内評価の測定環境を整えるとともに、移動体に搭載した曲面モジュールの出力特性測定を実施するために必要なシステムを構築した。また、このシステムを用いて移動体に設置した曲面モジュールの出力測定を気象条件や設置環境が異なる条件で実施した。

屋内出力評価に関しては、出力評価手法として海外の研究機関にて用いられる評価手法を導入し、精度高く出力評価を実施できるシステムを構築した。更に、曲面モジュールについて第三者機関でも出力評価を行い、互いの評価結果を比較することで新たな出力評価方法が、より評価の確度が高い方法となっていることを確認した。また、各評価方法で得られた結果を分析すると、曲面構造に起因するセルの設置角度の違いによりセルへの光入射角度が変わるため、大きく評価結果が変わり得ることが確認できた。

また、モジュール用部材の移動体用太陽電池への適用可能性を評価する際に用いる基礎データを得るため、曲面モジュールを用いて信頼性試験を実施した。取得した基礎的なデータから、信頼性を確保するために必要なモジュール構造、部材の検討を進めている。

これまで記載してきた通り、我々は本プロジェクトにおいて曲面太陽電池モジュールの効率目標達成のための課題抽出および技術開発を各種実施してきた。これらの研究開発により得られた成果を組み合わせることにより、我々はペロブスカイト太陽電池とシリコン太陽電池のタンデム構造を持つ太陽電池モジュールにて25%以上の変換効率の中間目標を達成可能とする設計を得ている。

## 2. 実用化・事業化見通し

株式会社カネカ（以下、カネカ）は、ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池を自社で生産し、これらを用いた住宅用太陽光発電システムならびに産業用太陽光発電システムの販売を行っており、カネカの保有する太陽電池モジュールの商品設計技術、製造技術、太陽光発電システムの販売チャンネル等を最大限に活用し、本プロジェクトでの開発成果の早期事業化を図るものとする。移動体用太陽電池としても、国内自動車メーカーとの協業を進めており、今後更に国内外の自動車メーカー等へのアプローチを積極的に展開する。また、展示会の当社ブースでの開発品の展示や、プレスリリースなどを積極的に行い、潜在的な顧客へのアプローチを継続していき、国内外の太陽電池研究者、技術者に対しても、論文発表や国際会議等での発表などを通じたプロジェクト成果のアピールを継続的に実施していく。

## 3. 波及効果

結晶シリコン太陽電池の理論効率を超えるタンデム太陽電池の開発により、本プロジェクトの主目的である移動体への導入だけでなく、発電量の増加や、一定の発電量がより小面積で得られることによる太陽光発電システムの導入費等の低減につながることから、従来の住宅用太陽光発電システムやビル用途等においても普及が進み、カーボンニュートラル実現にも貢献することものと期待する。更に、スマートフォンやPC等、従来消費電力が大きく太陽電池の導入が積極的に行われてこなかった民生用途に関しても、変換効率の高さを武器として展開が期待できる。

## 4. 今後の展開

「2. 実用化・事業化見通し」で記した事業化を早期に実現するため、引き続き、太陽電池の変換効率向上、製造コスト低減、信頼性および意匠性の向上等の技術開発に取り組む。また、カネカは、本プロジェクトの成果を活用した次世代モジュールにおいて、移動体用途を中心とした製品の実用化に向け開発を進める。

5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内／国際)	0 (0／0)	1 (1／0)	0 (0／0)	1 (1／0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	0 (0)	1 (0)	1 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(1)	(1)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)



(ロ)太陽光発電の長期安定電源化技術開発

(i) 安全性・信頼性確保技術開発

【A 高安全PVモジュール、高安全PVシステムの技術基準案の策定】

(太陽光発電技術研究組合、学校法人日本大学(再))

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
A) 高安全PVシステム診断技術の普及策検討 A I)最先端のPVシステム診断技術の技術基準案の検討	【2021年度中間目標】 故障検出技術の開発と既存技術の評価	既存の診断技術等の評価を進め、技術基準を策定すべき診断技術候補をリストアップするとともに技術基準素案の策定を開始した。これらにより、中間目標を達成した。	○	-
A II)ビッグデータ活用手法の検討	【2021年度中間目標】 ビッグデータ有効活用手法	中小PVの安全性に資するユースケース（ビッグデータの有効活用手法）を重点的に調査し、現状を把握するとともに課題抽出と対応策提言を行った。これにより中間目標を達成した。	○	-
B)太陽電池モジュールの火災安全設計技術の開発	【2021年度中間目標】 太陽電池モジュール火災安全の技術基準の課題抽出と解決に向けた方向性の提示	モジュール火災発生メカニズム解明に注力し、屋外実証試験で火災起因となるアークを強制的に発生させることが可能となった。また、予兆の可能性などの有力な知見を得ることができ、これらにより中間目標を達成した。	○	-

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

【B 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定】（特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定（国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人北海道科学大学(再)、国立研究開発法人防災科学技術研究所(再)、一般社団法人構造耐力評価機構、公立大学法人大阪(再)、一般社団法人太陽光発電協会(JPEA)、八千代エンジニアリング株式会社、デロイトトーマツコンサルティング合同会社）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定	【2021年度中間目標】 傾斜地設置型・営農型・水上設置型の各ガイドラインを策定する(2021年版)。	傾斜地設置型、営農型、水上設置型の設計・施工ガイドラインの暫定版(2021年版)を完成し、2021年11月に公開。Webによるセミナー(説明会)を2021年12月に実施し、セミナーの一部のビデオを公開	○	-

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

【C 太陽光発電の安全性・信頼性評価、回復技術の技術情報基盤整備】

(国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般社団法人構造耐力評価機構、SOMPOリスクマネジメント株式会社、一般社団法人太陽光発電協会(JPEA))

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
太陽光発電の安全性・信頼性評価、回復技術の技術情報基盤整備	【2021年度中間目標】PV発電設備の評価・回復手法の技術情報および技術評価ガイドの策定に資する情報を収集する。	2017年から約3年間の保険事故情報を追加し整理した。構造関係の評価・回復技術に応用可能な既存技術のリストアップ、専門家によるリスク評価に受け継ぐために必要な非専門家による事前調査項目を整理した。電気関係の評価・回復技術に応用可能な技術としてアーク検知、遮断技術の実験の実施、絶縁抵抗監視の予防保全に関して、高抵抗領域の測定方法を検討した。	○	-

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

【D 太陽光発電の長期安定電源化に向けた評価・回復の実用化促進技術開発】

(関西電力株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所(再)、一般社団法人構造耐力評価機構(再)、アジア航測株式会社、株式会社エクソル、株式会社CO2O、日本土工株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
基礎・地盤の評価・回復技術および現地利用方法の開発	【2021年度中間目標】不具合要因特定するためのチェックリストおよび手順書の開発	切土、盛土を施した用地に建設された特別高圧・高圧・低圧について90サイト(DC出力約1,063MW)を抽出し、それぞれの立地の基礎地盤、基礎、地盤の変状の履歴について調査・検証を実施。	○	-
架台の評価・回復技術および現地利用方法の開発	【2021年度中間目標】構造的に不適格な架台に対する補強・補修方法の開発	事例資料収集・分析事例(事例、トラブル事例等)を基に、②適合性(ニーズ)を考慮した補強・補修案を検討(他分野の技術も活用)し下記技術の活用が可能で有ることが判明した。 ・架台の梁補強、接合部補強に関するアクリル樹脂系接着試験 ・既設杭の杭長を求める弾性波試験	○	-
設計図面作成支援技術の開発	【2021年度中間目標】太陽光パネル構造診断用の設計図面を低コストで作成できるソフトウェアを開発	・太陽光発電設備の架台部分の構造設計診断解析手法に必要な診断DBの要件整理、部材長や厚さ、種類、結合部状況などの情報を整理、架台モデルの試行 ・現地情報取得についてタブレットアプリケーションでの架台モデルの効率的な生成手法検討	○	-
杭基礎補強技術の開発	【2021年度中間目標】低廉かつ狭隘箇所での施工可能な手法の開発	補強用アンカーの試作品を作成・現地施工し結果良好	○	-
杭基礎の引抜き強度判定技術の開発	【2021年度中間目標】補強が必要な杭を判定するシステムを開発	杭の地耐力試験により基礎データを収集済。改訂JISによる荷重や簡易的な地盤強度確認等により杭の引き抜き強度を判定できるシステムの開発に向けて打音による支持力判定技術の開発にも着手。教師データの収集を続ける中、精度が上がっており、今後この技術も判定情報の一つに含めた形でシステムを開発。	○	-
緊急時点検技術の開発	【2021年度中間目標】衛星リモートセンシング技術を活用した太陽光発電施設周辺のモニタリングシステム開発	・高解像度衛星(WorldView)による解析技術開発、発電施設規模と災害種別の整理・衛星コンステレーション(アクセルスペースGRUS衛星)によるモニタリング技術の開発	○	-

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

【E 傾斜地設置型並びに営農型太陽光発電施設を対象とした凍上対策ガイドラインの策定に関する研究開発】（国立大学法人北海道大学機構北見工業大学）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
傾斜地設置型並びに営農型太陽光発電施設を対象とした凍上対策ガイドラインの策定に関する研究開発	【2021年度中間目標】基礎（布基礎、べた基礎、独立基礎）、埋設深さを変化させた布基礎、各種杭（直接杭、地盤改良杭、スクリー杭、RC杭など）の凍上挙動について明らかにする。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・埋設深さが浅い布基礎の凍上挙動を解明</li> <li>・埋設深さが深い布基礎の耐凍上性を確認</li> <li>・布基礎の適切な埋設深さを解明</li> <li>・H鋼杭の凍上挙動を解明</li> <li>・埋設深さが浅いスパイラル杭の凍上挙動を解明</li> <li>・埋設深さが深いスパイラル杭の耐凍上性を確認</li> <li>・スパイラル杭の凍上対策としての有効性を確認</li> </ul>	○	-

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

【F 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のための実証実験】

(一般社団法人構造耐力評価機構、八千代エンジニアリング株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所、キョーラク株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のための実証実験	【2021年度中間目標】 傾斜設置型PV、営農型PV、水上設置型PVのガイドラインの最終版にあわせて実証実験の結果、データを提供する。	設備形態の実態調査として斜度のデータ分析、営農型約59件、水上型約100件を調査。 傾斜地設置型について、CFD解析の条件を設定、基礎の载荷試験を実施。地盤侵食保護に関する実証実験を開始。 営農型について、足高式の風洞実験を準備。 水上型について、連結浮体の動揺を踏まえた係留張力特性把握として予備実験の実施、水中アンカーの载荷試験の場所選定、フロートの強度や性能評価方法の検討としてラボレベル試験の実施、フロートへの荷重検討のための風水洞実験の準備。	○	-

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

【G 次世代の O&M を支える発電電力量評価等の技術開発】

(株式会社エナジービジョン、一般社団法人新エネルギー O&M 協議会)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
① 発電電力量解析の高度化と阻害要因推定	【2021 年度中間目標】 推定した阻害要因の実例による実証とそれを元に阻害要因推定手法を定型化	・新規に入手した発電電力量データを中心に 147 発電所の解析を行い、発電阻害要因候補の切出し・分類を作成し、年内に実施する実証調査対象 25 発電所を選定した。 ・阻害要因影響パターンの基礎情報収集のため、2 発電所をモデルとしてデータの深堀を行うとともに、1 発電所で遠隔によるパネルの電氣的測定データ収集を開始した。	○	-
② 遠隔での日常監視業務の自動化	【2021 年度中間目標】 開発した手法の確立と実業務での使用	・主要な遠隔監視システム 11 機種を対象に、自動でデータを取得し判定する RPA を設定し、人による日常監視と当該自動監視の平行実施を 6 月 6 日から開始している。(78 発電所を対象に、毎週水・木に実施)	○	-
③ 新たな検査ガイド	【2021 年度中間目標】 検査ガイド初版の確立と実業務の開始	・外部専門家とも協議しながら、リスクコストベースの事故ハザード評価テーブルを作成中。 ・並行的に、検査制度と対になる補償制度の構築へ向け、協議を継続している。	○	-
④ 発電電力量解析／新検査・評価実施支援システム	【2021 年度中間目標】 既保有技術による既開発システムの使用開始 (NEDO 助成外) と研究成果の実装仕様の作成	・本件助成事業に先行して、2021 年 5 月からエキスパートシステム※の開発を実施しており、現在、最終調整段階にある。 ※既保有技術による発電電力量解析、不具合・修繕等の履歴の作成、新たな検査の入力・評価等	○	-

\* 1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、 ○ : 達成、 △ : 達成見込み、 × : 未達

**A 高安全 PV モジュール、高安全 PV システムの技術基準案の策定  
(一般社団法人太陽光発電技術研究組合、学校法人日本大学(再))**

**1. 成果詳細**

我が国における太陽光発電の導入は、FIT 開始後に導入が急拡大したが、規模や属性も異なる様々な事業者による参入する中で、安全面、防災面、景観や環境への影響、将来の設備廃棄等に対する地域の懸念や、FIT 事業認定者が、20 年間等の買い取り期間終了後も、事業を継続するのか、更に発電事業終了後に再投資が行われて持続的な導入・拡大が図れるのかといった懸念が高まっている。

既に導入されている太陽光発電の長期安定的な事業の運営確保として、安全性信頼性の確保等の現在顕在化している課題解決や適切な事業環境整備に資する技術を開発する。

本事業では、発電設備の安全性、信頼性を確保するため、リスクを低減する手法とその普及を目的とした技術や情報の基盤整備を行う。知見の不足する項目については、必要に応じて実証実験等を実施する。具体的には、表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-1 に示す内容を行う。

表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-1 開発項目と中間及び最終目標

	開発項目	中間目標	最終目標
A) 高安全 PV システム診断技術の普及策検討	A I)最先端の PV システム診断技術の技術基準の検討 (含 日大再委託)	故障検出技術の開発と既存技術の評価	PV システム診断技術の技術基準案
	A II)ビッグデータ活用手法の検討	ビッグデータ有効活用手法	-
B) 太陽電池モジュールの火災安全設計技術の開発	B I) 太陽電池モジュールの火災安全に求められる技術と評価手法の開発 (配線技術、封止技術、バイパス回路)	太陽電池モジュール火災安全の技術基準の課題抽出と解決に向けた方向性の提示	太陽電池モジュールの火災安全の技術基準 (標準化素案)
	B II) 緊急遮断機能を持つ高安全 PV モジュールの評価手法の検討		

**A I) 最先端の PV システム診断技術の技術基準案の検討 (含 日大再委託)**

[概要] 日本大学にて、昨年度構築した評価試験設備を用いて、遠隔監視技術や BPD 故障診断技術開発を実施し、順調に推移している。また、技術基準案に向け方向性、具体的な進め方の討議を開始した。今後、診断技術の開発を進めるとともに既存技術の評価を行い、技術基準案を策定する。

[詳細]

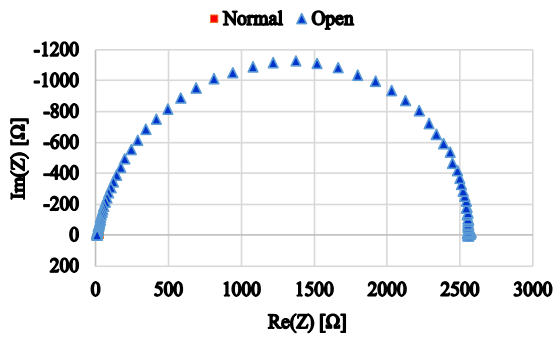
**[1] 診断技術の開発 (実証試験)**

[1.1] インピーダンス計測による故障検出 スtringのインピーダンスを計測して、故障の有無、程度を把握する技術を確立することが目的である。第1段階として、夜間を想定し暗幕シートでモジュールに太陽光が当たらない状態で、正常状態、バイパス回路の完全開放故障およびバイパス回路の完全短絡故障における、インピーダンスの周波数特性を調査した。なお、太陽電池の電圧-電流曲線 (以下、IV 曲線) は非線形であるため、計測範囲の中心点の位置により、インピーダンスの値が異なるため、「DC バイアス無し」、「順方向 DC バイアスあり」、「逆方向 (バイパスダイオード Db が ON 状態になる方向) DC バイアスあり」の3種類について計測した。以下に実験結果の代表例を示す。

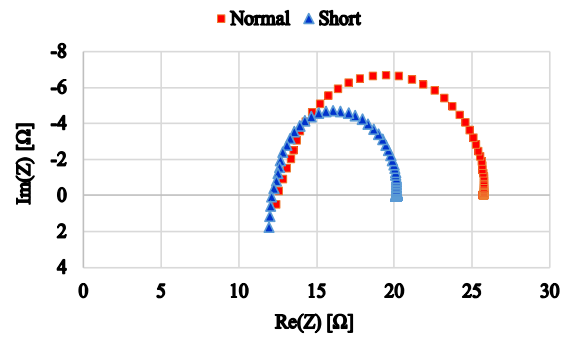
図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-1 に DC バイアス無しにおける正常状態と Db 開放故障のインピーダンスの周波数特性 (以下、CC プロット)、図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-2 に DC バイアス無しの正常状態と Db 短絡故障の CC プロットを示す。CC プロットの形状は何れもほぼ半円になっているが、この部分は等価回路が抵抗 R とキャパシタンス C の並列回路であり、半円の実部の直径は R の大きさを示す。図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-1 より、開放故障時は R の大きさが約 2,500 Ω であるのに対し、正常状態では原点に点として存在し、開放したことにより R が桁違いに大きくなるのが分かる。ま



た、短絡時故障時は、半円の直径の大きさは、短絡時は正常時のほぼ半分になるが、これはモジュールの 1/2 が短絡されたことによる。



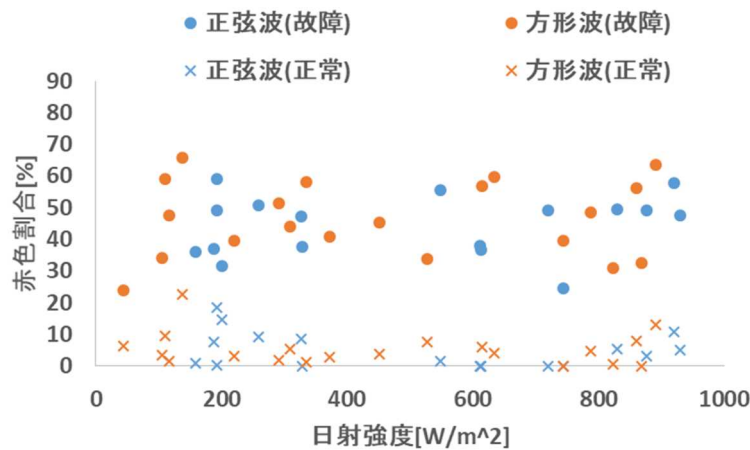
図III-2-(ロ)-(i)-A-1  
Db 開放故障 (DC バイアス無し)



図III-2-(ロ)-(i)-A-2  
Db 短絡故障 (DC バイアス無し)

また、順方向バイアス時には短絡故障は検出できるが開放故障は検出困難で、反対に逆方向バイアス時には開放故障は検出できるが短絡故障は検出困難であることを確認した。

[1.2] 赤外線カメラによるバイパス回路の開放故障の位置検出 スtringへの印加電圧波形が、バイパス回路の開放故障位置の特定に与える影響について実証試験を実施した。日射強度と赤色割合（赤色割合が大きほど開放故障の可能性大）の関係を図III-2-(ロ)-(i)-A-3に示す。

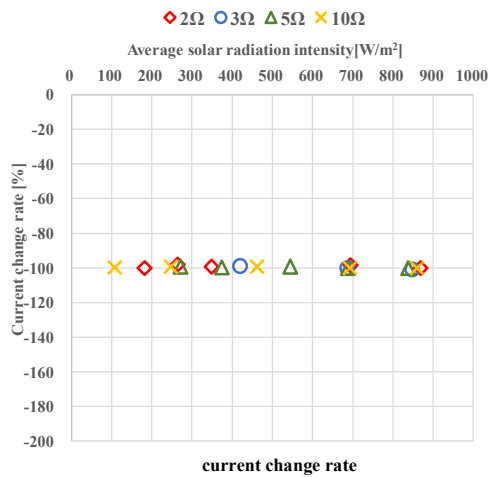


図III-2-(ロ)-(i)-A-3  
印加電圧波形の故障検出精度への影響

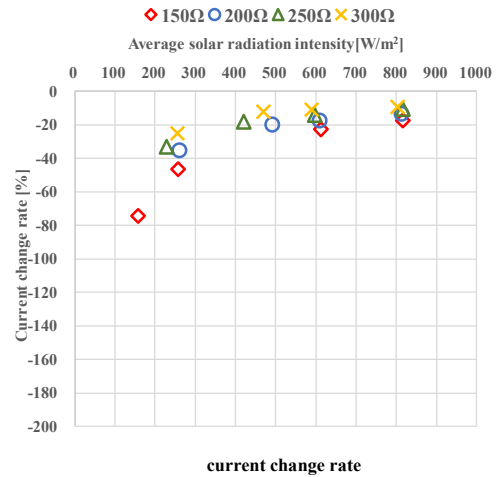
印加電圧波形は正弦波と方形波の2種類であるが、投入エネルギーを同じにするため2つの電圧波形の実効値は同じにしている。これより、両波形とも日射強度が  $200\text{W}/\text{m}^2$  以上であれば正常と故障の違いは明瞭であり、波形の違いによる故障検出の影響には違いはほとんど無いことが確認できる。

[1.3] String監視による故障検出 String監視による故障検出として、接続箱内での端子間短絡事故について、短絡抵抗の大きさと日射強度が故障による電流変化率に与える影響を調査した。実験結果の例として、図III-2-(ロ)-(i)-A-4に短絡抵抗  $R$  が2、3、5および  $10\ \Omega$  の場合、図III-2-(ロ)-(i)-A-5に150、200、250および  $300\ \Omega$  の電流変化率を示す。なお、ここでは逆流防止ダイオードBLDがある回路構成としている。図III-2-(ロ)-(i)-A-4より短絡抵抗が  $10\ \Omega$  以下の場合には変化率が全て-100%となっている。ここで-100%とは、故障前に流れていた電流が0になったことを示している。一方、図III-2-(ロ)-(i)-A-5では日射強度が高くなるにつれ電流変化率が減少しており  $800\text{W}/\text{m}^2$  では-10%程度まで低下していることが分かる。BLDが無い回路構成（BLDが短絡故障またはヒューズを想定）の場合は、抵抗が  $10\ \Omega$  以下の場合には並列接続されている正常Stringからの全電流が流

れ込むため、電流変化率が-200%になることを確認した。ただし、150Ω以上の場合は図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-5 とほぼ同じである。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-4  
端子間短絡故障時の電流変化率  
(短絡抵抗=2, 3, 5, 10Ω : BLD あり)

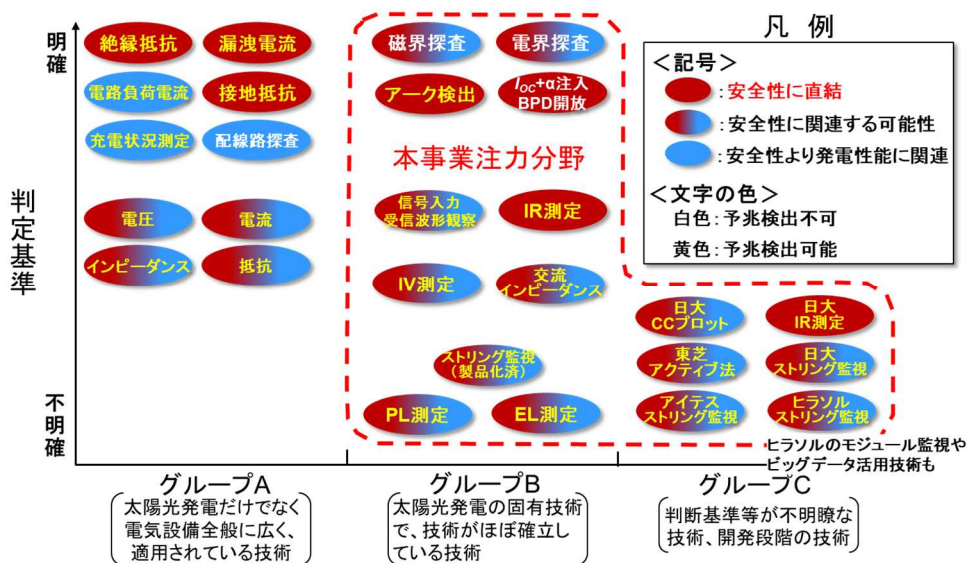


図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-5  
端子間短絡故障時の電流変化率  
(短絡抵抗=150, 200, 250, 300Ω : BLD あり)

[2]故障診断技術基準案の策定

既存の診断技術等の評価を進め、技術基準案を策定すべき診断技術候補 (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-6 参照) をリストアップするとともに技術基準案の策定を開始した。これらにより、中間目標を達成することができた。今後、診断技術の開発を進めるとともに既存技術の評価を行い、技術基準案を策定する (表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-2 参照)。

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-6  
抽出した診断技術候補



表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-2

成果イメージ図と成果の一例（ストリング端子間短絡の電流変化 $\Delta I$ ）

発生箇所	モジュール			電線路(コネクタ含む)		接続箱・集電盤内	
故障の種類 常時計測時は不明	インターコネクタ 断線・剥離	バイパス 回路開放	バイパス 回路短絡	ケーブル 断線	コネクタ 接続不良	ストリング 端子間短絡	逆流防止 ダイオード短絡
発生事象例 (故障判定要素)  黒:常時計測 赤:詳細調査 (一部,常時計測あり)	①インピーダンス増加 $\Delta Z$	①インピーダンス増加 $\Delta Z$ ②温度上昇 $\Delta T$ (部分影,セル劣化等発生時)	①インピーダンス増加 $\Delta Z$ ②ストリング電圧低下 $\Delta V$	①インピーダンス増加 $\Delta Z$ ②ストリング電流低下 $\Delta I$	③コネクタ温度上昇 $\Delta T$	①線間電圧低下 $\Delta V$ ②ストリング電流変化 $\Delta I$ ③短絡部温度上昇 $\Delta T$	①ストリング電流変化 $\Delta I$ (部分影,端子間短絡等発生時) ②短絡部温度上昇 $\Delta T$
故障判定条件例	① $\Delta Z \geq 0\%$	① $\Delta Z \geq 0\%$ ② $\Delta T \geq 0\%$ 日射強度 $\geq 0W/m^2$	① $\Delta Z \geq 0\%$ ② $\Delta V \geq 0\%$	① $\Delta Z \geq 0\%$ ② $\Delta I \geq 0\%$	③ $\Delta T \geq 0\%$	① $\Delta V \geq 0\%$ ② $\Delta I \geq 5\%$ ③ $\Delta T \geq 0\%$	① $\Delta I \geq 0\%$ ② $\Delta T \geq 0\%$
技術的根拠例  本事業の成果	①出力低下 $\Delta P \leq 0\%$ に抑制	① $\Delta P \leq 0\%$ に抑制 ②-1 火災防止 ②-2 材質劣化防止	①② $\Delta P \leq 0\%$ に抑制	①② $\Delta P \leq 0\%$ に抑制 ③-1 火災防止 ③-2 材質劣化防止		①② $\Delta P \leq 0\%$ に抑制 ③-1 火災防止 ③-2 材質劣化防止 ④正常時の電流変化率との差	

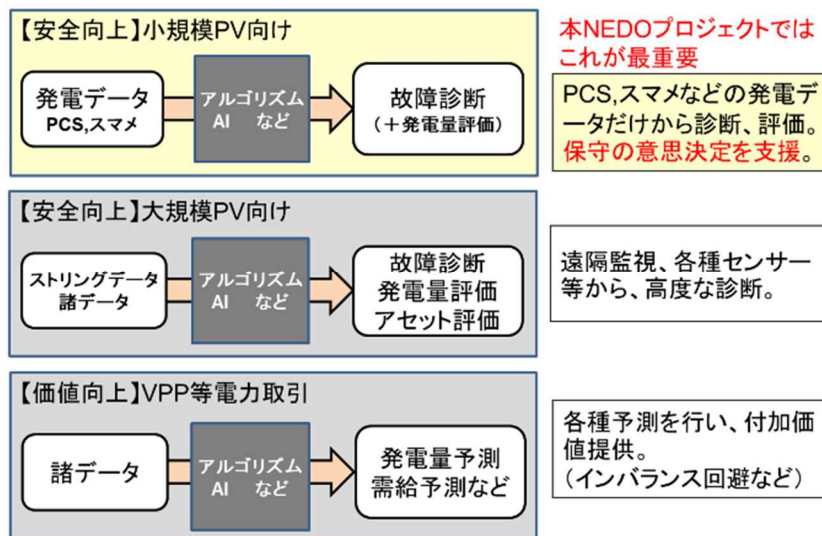
・逆流防止ダイオード有りでは端子間短絡では、抵抗値が300Ω程度では電流変化率は10%未満。  
・さらに抵抗値が大きくなると電流変化率は小さくなるので、正常時における変化率との区別が困難。  
・故障検出の精度向上には、電流変化率の算出以外の要素も必要 → (例)継続時間, 変化速度, 他

## A II) ビッグデータ活用手法の検討

[概要] 中小 PV の安全性に資するユースケース（ビッグデータの有効活用手法）を重点的に調査し、現状を把握するとともに課題抽出と対応策提言を行った。これにより中間目標を達成した。

[詳細]

太陽光発電でのビッグデータのユースケース（有効活用手法）を検討した結果、図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-7 に示すように 3 つのカテゴリーに分類できることがわかった。この中で本事業の主目的に合致する「小規模 PV 向け安全向上」に絞り込んで、さらに検討を進めた。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-7

ビッグデータユースケースの代表的 3 類型

「小規模 PV 向け安全向上」に向けたビッグデータ活用ケースは、スマートメータ（スマメ）発電データなどのビッグデータを用い、所定のアルゴリズムや機械学習を通して故障診断、発電量評価を行うものが主流である。代表的な課題と対応策を表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-3 に示す。主にスマメデータの扱い（法制度の課題）、データ取引に関する課題、技術課題があるが、データ取引以外は

課題解決に向けた取り組みが積極的に行われていることがわかった。一方、PV 発電所間のデータ取引などについては、現段階では費用対効果が見込めず、本格検討に至っておらず、長期視点での対応が求められている。

なお、本事業でのビッグデータ活用については、上述の結果を受け、2021 年度にて終了することとした。

表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-3  
小規模 PV 向け安全性向上に向けたビッグデータユースケースの現状と課題

		課題	現状	今後
スマメ 法制度 社会インフラ	スマメデータ使用ルール	スマメデータ使用許諾ルール、過度な個人情報保護にならないように	○検討始まった	引き続き個社で対応
	余剰売電PVの発電量計測	計量法改正、スマメ義務化	○計量法など検討中	
	スマメデータ回収インフラ	インフラの早期構築	○検討始まった	
	人材	データアナリストの育成		
データ取引/ 機械学習	PVデータ取引プラットフォーム	プラットフォーム構築	×費用対効果が見込めず、検討に至っていない	長期視点での対応
	教師データ取得	発電データは取れるが、紐づけられる「O&M」データがない		
	プレイヤー増	メリット明確化、実績作り		
技術	実証	実証の早期実施、実証規模拡大	○一部企業で実証始まった	引き続き個社で対応
	判定精度向上	多企業、研究機関の技術開発と導入、多種PVへの導入実証	△各社で取り組み	

## B) 太陽電池モジュールの火災安全設計技術の開発

[概要] モジュール火災発生メカニズムの解明に注力し、屋外実証試験で火災起因となるアークを強制的に発生させることが可能となった。また、予兆の可能性などの有力な知見を得ることができ、これらにより中間目標を達成した。今後、モジュールアーク発生へ影響する要因分析のための実証試験実施等により火災発生メカニズムの解明を進め、火災安全設計技術の技術基準を策定する。

[詳細]

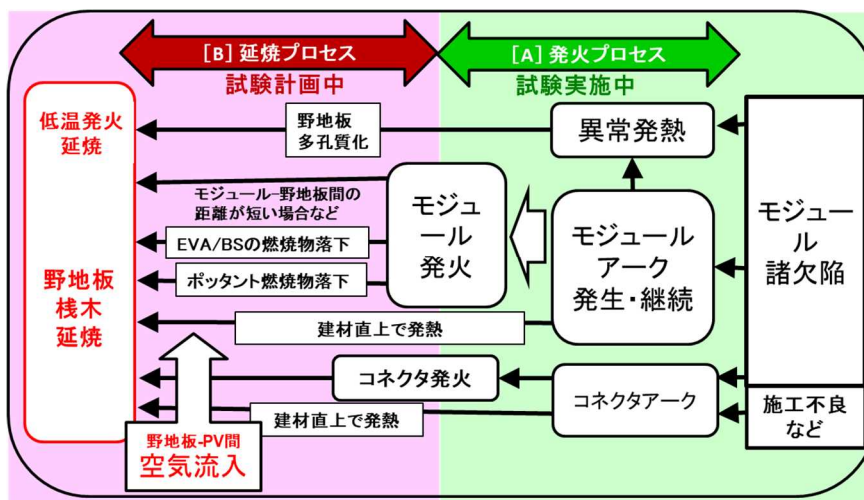
太陽電池モジュール火災安全の技術基準における最大の課題は、火災発生メカニズムの解明である。このため、太陽電池モジュールの火災発生メカニズムの解明に注力し、火災発生のキーであるアーク発生、発火の再現試験を行った。

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-8 に示すように、屋外 PV システムに試験モジュール（意図的に配線接続異常を内蔵）を組み込み、諸条件でアーク発生再現を図った。通常の動作環境ではアーク発生は認められなかったため、試験モジュールの断線箇所の電氣的な接続状態を意図的に制御することにより、強制的にアークを発生させることができた。また、アーク発生に際し、その予兆現象となりえる電流変動等の現象を確認することもできた。さらに、火災発生における全プロセスの整理(図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-9)を行ったうえで、アーク発生試験だけでなく、アーク発生から屋根材延焼に至るプロセス試験の準備も進めている。このように、モジュール火災安全の技術基準における最大の課題であるメカニズム解明に向け大きく進展し、中間目標を達成した。

今後、モジュールアーク発生へ影響する要因分析のための実証試験実施等によりアーク発生メカニズムの解明を進め、火災安全設計技術の技術基準を策定する。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-8  
モジュールアーク発生再現試験（屋外試験）



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-9  
モジュール起因の火災発生プロセス

## 2. 実用化・事業化見通し

### 2-1. 技術基準案等のガイドライン化、標準化

本事業で策定を行う技術基準案（システム診断技術）及び設計基準案等（モジュール火災安全技術）は、本事業終了後にガイドライン化、標準化を行う予定である。

システム診断技術については現行の「太陽光発電システムの定期点検及び不具合調査に関するガイドラインについての報告書」（事務局；電気安全環境研究所）を強化、補足するものとするを念頭に策定を進めている。一方のモジュール火災安全技術については、IEC規格（IEC61730等）に盛り込むことなどを想定している。

### 2-2. 技術基準案、ガイドライン等の普及促進活動

技術基準案（ならびにガイドラインや標準規格など）は策定過程で公開研究会の開催などを行うとともに、ガイドライン制定後も講演会や講習会などを開催し、普及促進に努める。但し、情報発信に際しては、ステークホルダーに誤解を与えるなど、高安全化に逆行しかねない事態を招かないよう、正しい情報発信を行っていく。

### 2-3. 本事業での技術基準案、ガイドラインの意義、位置づけ

なお、本事業での技術基準案等は、太陽電池モジュールを含む太陽光発電システムのDC側（パワーコンディショナ入力まで）を対象としている。これは、a)AC側はすでに多くの取り組みがなされているのに対してDC側の技術基準策定への取り組みが少なかったこと、b)AC側に比べて事故事例ははるかに少ないものの、モジュール火災事例などのDC側の事故も発生し、消費者庁などから改善指示が行われるなどDC側の安全性向上ニーズが高まったこと、などによる。

本事業では、DC側の安全性向上に対して、不安全状態の早期発見（システム診断技術）と不安全状態の抑制（モジュール火災安全技術）の両面から取り組んでおり、これにより安全性を高いレベルで実現で

きる見通しである。

### 3. 波及効果

技術基準やガイドライン、標準規格などにより、太陽光発電システムの安心、安全が高まり、太陽光発電システムの普及拡大に大きく貢献する。

PV 発電事業者にとっては、ガイドライン遵守により、事業リスクを低減しつつ、安定した発電事業を展開できる。また、PV 発電事業者を取り巻くステークホルダ（O&M 事業者、アセットマネジャ、EPC、機器メーカーなど）にとっても、顧客（発電事業者等）に安全、安心を提供できるうえ、事業リスクの低減、事業コスト低減にもつながる。さらには、PV 発電所の近隣住民を含む一般市民や自治体に対しては、PV に対する不安感を払しょくできるうえ、PV に対するポジティブな意識を持っていただくことができ、PV 普及促進につながる。

このように本事業での技術基準やガイドラインは、太陽光発電への安心感を醸成し、2050 年カーボンニュートラルへ向け、太陽光発電普及の野心的な目標実現に大きく貢献するものである。

### 4. 今後の展開

#### 4-1. 最終目標に向けて

##### A) 高安全 PV システム診断技術

最終目標である「システム診断技術の技術基準案策定」に向け、現在までに技術基準案を策定する診断技術候補のリストアップを完了しているが、現在、火災安全性と故障発生頻度も踏まえ、リストアップした診断技術の絞り込みを行っている。絞り込んだ診断技術に対して、最終目標となる技術基準案の策定を行う予定である。

##### B) 太陽電池モジュールの火災安全設計技術の開発

最終目標である「太陽電池モジュールの火災安全の技術基準（標準化素案）」策定に向け、現在までに火災発生のキーとなるアーク発火試験の試験方法を開発している。今後、この試験方法を用いて、各種太陽電池モジュールの設計基準の策定を進め、最終目標を達成する。

#### 4-2. プロジェクト終了後

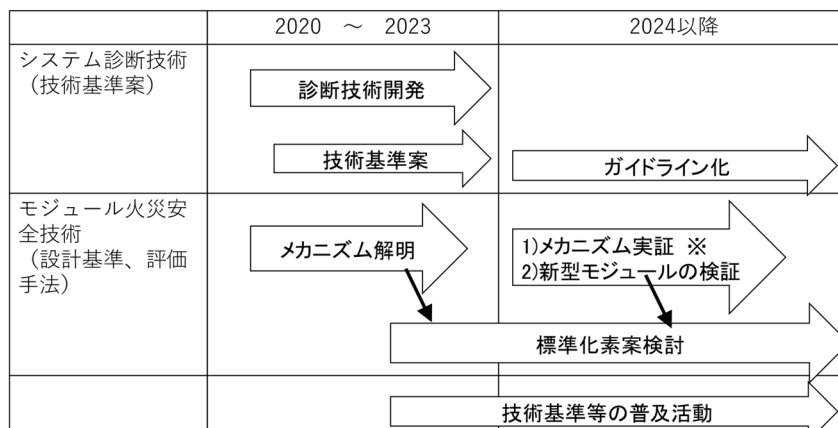
プロジェクト及び終了後のスケジュール案を図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-10 に示す。

##### A) 高安全 PV システム診断技術

策定した技術基準案のガイドライン化、標準化を進めるとともに、ガイドラインの活用に向けた広報活動なども行い、PV システムの高安全化を実現する。

##### B) 太陽電池モジュールの火災安全設計技術の開発

策定した技術基準案のガイドライン化、標準化を進めるとともに、ガイドラインの活用に向けた広報活動なども行い、PV モジュールならびに PV システムの高安全化を実現する。また、モジュール火災のメカニズム解明については、本プロジェクトで大きく進展することが見込まれるが、極めてまれにしか起こらない現象のメカニズム解明であるため、さらに試験等を積み重ね、メカニズム解明とその検証を進める。



※モジュール火災発生確率が極めて低いため、メカニズム解明に時間を要する  
また、新型モジュールなどの技術進展に応じた火災安全技術が必要

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A-10  
今後のスケジュール案  
Ⅲ-2-(ロ)-(i)-A[7]

5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	4 (0)	0 (0)	4 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(4)	(0)	(4)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

B 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン策定（国立研究開発法人産業技術総合研究所、学校法人北海道科学大学(再)、国立研究開発法人防災科学技術研究所(再)、一般社団法人構造耐力評価機構、公立大学法人大阪(再)、一般社団法人太陽光発電協会(JPEA)、八千代エンジニアリング株式会社、デロイトトーマツコンサルティング合同会社）

## 1. 成果詳細

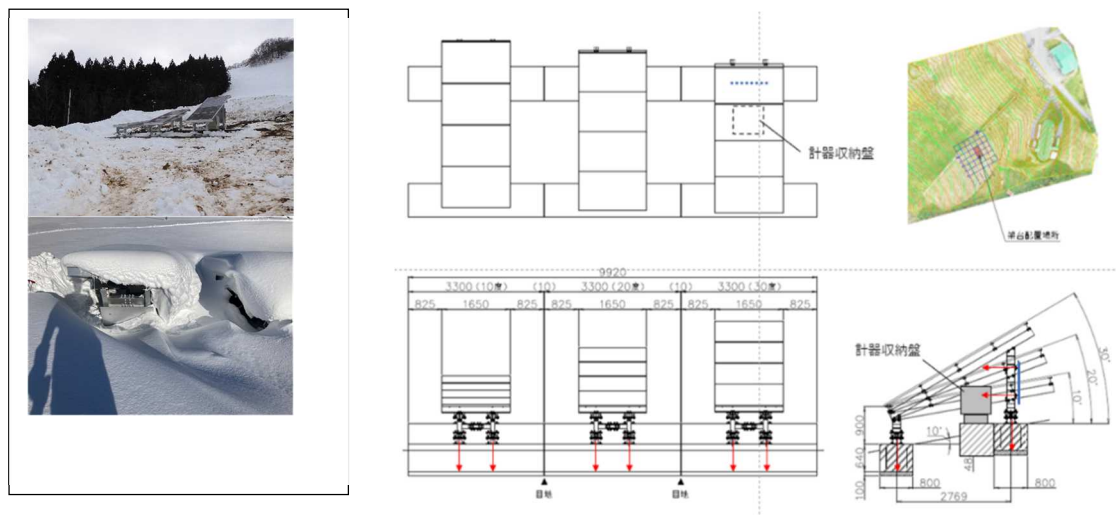
### (1) 傾斜地設置型ガイドラインの策定

傾斜地特有の事項については、土木・建築および電気の既往文献やヒアリング、また3回のワーキンググループにおいて有識者の意見を反映して、土木・建築の既往文献をもとに地盤、基礎・架台の計画・設計上の注意点や施工管理の要点、電気関係の機器の設置場所やアクセスの注意点などを含めた暫定版ガイドラインとして、2021年11月に傾斜地型ガイドライン（2021年版）を発行した。

風圧荷重に関する実証実験について、数値流体解析（CFD）、風洞実験の計画および設計用風圧荷重への反映方法についての検討を行った。傾斜地における風速増加に関するCFDでは、手法の異なる解析（RANSおよびLES）を実施し、既往の基規準との比較を行った結果、LESによる解析が有効であることを確認した。また、実在地形への対応を検討するために、CFDにおける樹木のモデル化について検討し、森林が風速に与える効果についても検討した。

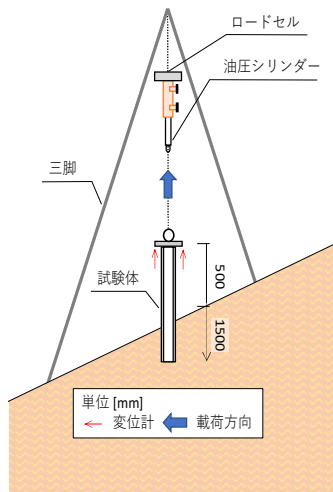
設計用積雪荷重の実測調査について、傾斜地での積雪状態における軒先荷重・沈降荷重および傾斜地に設置される架台やパワーコンディショナ（以下、PCS）の斜面積雪によるグライドやクリープ現象について調査を行うため、傾斜地PVの積雪荷重に関する実測調査内容の検討を行い、測定装置の製作・設置および実測調査を実施した。2022年の春までの測定結果から軒先荷重などの傾向を確認した（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-1参照）。

杭基礎の水平載荷試験について、勾配が10～30度程度の急傾斜地を対象に杭基礎の水平抵抗力の調査を行うために、代表的な試験場所の選定、対象とする杭基礎、載荷試験などの実験計画の立案を行った。勾配15°および30°の傾斜地盤において載荷試験を実施し、抵抗力低減の影響について検討した。これに併せて、傾斜地における杭の載荷試験方法の検討を行った（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-2参照）。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-1 積雪荷重測定装置（秋田県湯沢市皆瀬：とことん山キャンプ場）



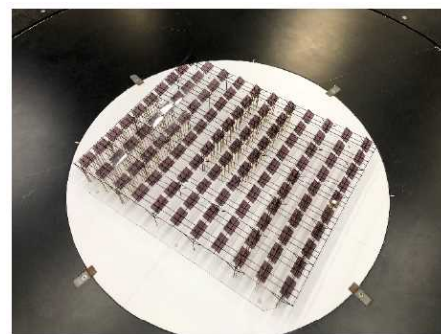


図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-2 傾斜地における杭の荷重試験 (千葉県君津市)

### (2) 営農型ガイドラインの策定

営農型特有の事項については、土木・建築および電気の既往文献やヒアリング、また3回のワーキンググループにおいて有識者の意見を反映して、営農環境と発電の両立を考慮した配置計画や農地における基礎・架台の設計・施工上の要点、電気関係の感電防護対策の注意点などを含めた暫定版ガイドラインとして、2021年11月に営農型ガイドライン(2021年版)を発行した。

風圧荷重に関する実証実験について、風洞実験の計画および設計用風圧荷重算定における注意点についての検討を行い、モジュール配置や遮光率等を変化させた代表的なアレイ構成についてなどの風洞実験の計画および模型製作した。これら実験模型を用いて風洞実験を実施し、設計用風力係数を検討するためのデータを取得した(図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-3参照)。

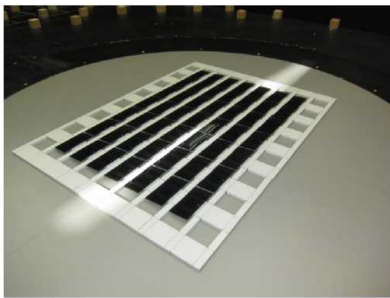


図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-3 営農型太陽光発電設備の風洞実験

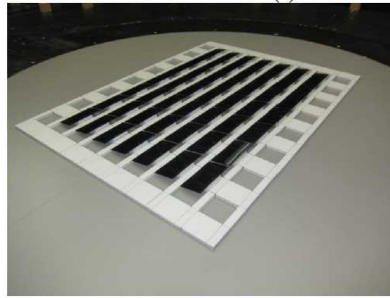
### (3) 水上設置型ガイドラインの策定

水上型特有の事項については、土木・建築および電気の既往文献やヒアリング、ワーキンググループにおいて有識者の意見を反映して、土木・建築・港湾の既往文献をもとに考慮すべき荷重条件、フロート・係留策・アンカーの設計上の注意点や施工管理の要点、電気関係の水上への配線方法や機器の配置における注意点などを含めた暫定版ガイドラインとして、2021年11月に水上型ガイドライン(2021年版)を発行した。

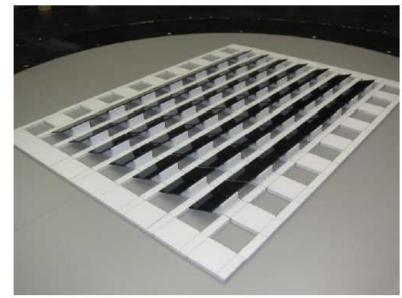
風圧荷重に関する調査について、国内で流通している典型的な水上設置型太陽光発電設備の縮小模型を用いた風洞実験を実施し、設計用風力係数を検討するためのデータを取得した(図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-4参照)。



アレイ面傾斜角 5°



アレイ面傾斜角 10°



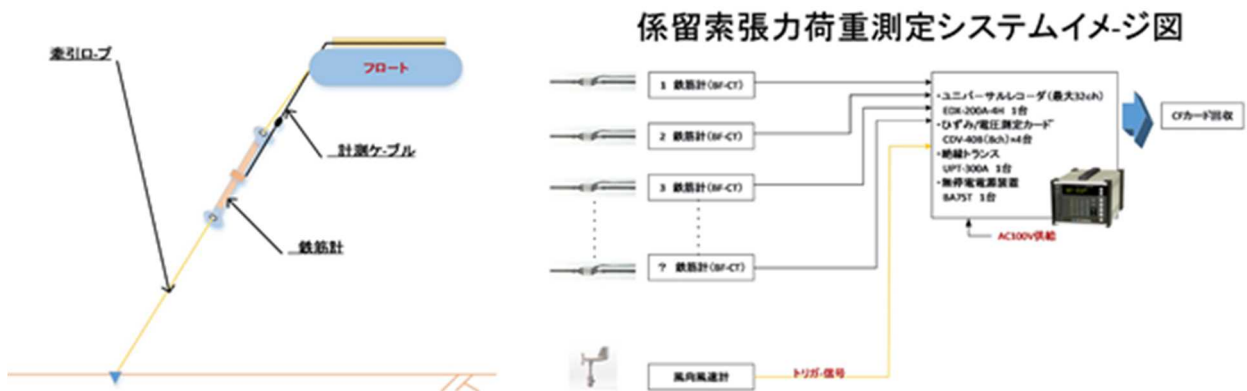
アレイ面傾斜角 20°

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-4 水上設置型太陽光発電設備の風洞実験

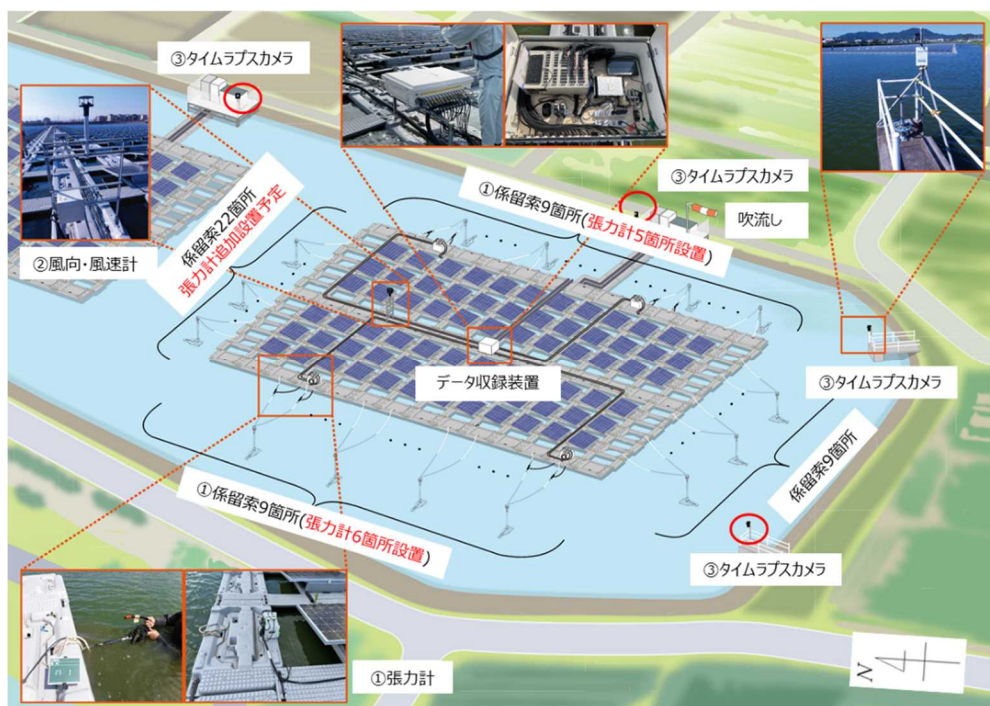
フロート間接合部の載荷試験に関する実証実験について、代表的なフロートメーカーにヒアリングを行い、載荷試験を行って接合部耐力の実力を把握し、アイランドにおけるフロート接続可能個数の検討を行うための実験条件の要件整理を行った。また、主要メーカーのフロートを入手し、載荷試験方法の検討と準備を行った。

係留索に作用する荷重の実測調査に関する実証実験については、強風時における係留ワイヤーに作用する荷重について実物大の水上PVの試験体を用いて測定するために、風況観測やタイムラプス（定点におけるインターバル撮影）の活用など、実験手法の検討を行った。検討した実験手法をもとに、実際の水上PVにおいて係留索に張力計を設置し、係留索に作用する静荷重に加え、衝撃荷重を含むピーク荷重や係留ワイヤー毎の荷重の偏りを計測した。（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-5）。

また、実測値の分析・考察を行うために風況観測やタイムラプスを活用した水上PVの水面上の移動記録を行った。（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-6）。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-5 係留索に作用する荷重の測定イメージ



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-B-6 係留索に作用する荷重の実測調査システムのイメージ

水上 PV の感電防止に関する実証実験について、水上部に設置することが許容される機器(モジュール、PCS、接続箱など)およびそれらを水上設置する場合に求められる IP 等級(防水性能)の検討、水上部に設置されるケーブル、コネクタ、接地線に求められる IP 等級(対候性、防水性能)の検討を行うため、代表 1 種類のコネクタについて水没させた状態の絶縁抵抗測定を行い、ほとんどの試験体は水没時間が 100 日間に及んでも計測可能レンジ(5GΩ)以上であったが、「パッキンなし」「はめ込み不足」の各試験体と、「4mm<sup>2</sup>-過少トルク」の一部と「5.5mm<sup>2</sup>-過少トルク」は、水没直後から絶縁抵抗が大きく低下するケースを確認した。また、形状が類似するコネクタについても水没させた状態の絶縁抵抗測定を行った。形状が類似するコネクタについては数日において絶縁抵抗が低下する事例が見られた。

バックシートに不具合があるモジュールのリーク電流について屋外における実測から湿度との関係などの分析を行った。また、絶縁抵抗測定方法については、地上設置型における測定原理の調査を行い、漏れ電流測定の実証実験のための装置を導入し、トランス有りの場合に漏れ電流測定では絶縁抵抗を正確に把握出来ないことを示した。また、実際の水上 PV において絶縁抵抗測定、温湿度データ等の測定を開始した。

接地抵抗測定について、実際の水上 PV において、岸(地面)あるいは水面に設置した補助電極によりシステムの接地抵抗測定を行い、水中に補助極をとった場合と地上部に補助極をとった場合の接地抵抗測定値は同程度であることを確認した。また、接地抵抗測定については、多極設置における接地抵抗測定について基礎的な実験を行い、多極接地に影響する架台などが測定に影響する効果について分析を行った。

#### (4) 傾斜地設置型、営農型、水上設置型ガイドラインの共通事項の検討

##### ①共有事項の検討

共有事項については、PV に特化した電気設計および施工(基礎・架台、電気設備)に関する実用的な技術資料は十分に整備されていないことから、本研究開発では既存の文献、ヒアリング等をもとに、一般的な PV に関する電気設計および施工についての要点を整理し、ガイドラインの共通項目としてとりまとめ、ワーキンググループにおいて有識者の意見を反映して、暫定版ガイドラインを作成した。

- ・電気設備の設計・施工に関する内容については、電気設備技術基準、内線規程、配電規程、各種 IEC、JIS をもとにとりまとめた。
- ・土木、構造の設計に関しては地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドラインをベースとし、施工に関しては、土木・建築の施工指針、標準仕様書などの既往の文献と最新の知見をも

とにまとめた。

## ②国内外の調査

国内事故原因調査について、デスクトップリサーチによる事故情報の収集及び関係者へのヒアリングを実施した。事故原因として機器、設計、施工、運用のどの項目にあたるものが多く、また被害として大きいのかを分析するとともに、現時点で検討されている事故対策について調査し、参考となる情報について暫定版ガイドラインへ反映した。また、低圧太陽光は、傾斜地での排水設計、接地設計、アレイ集中設置、整地状況を、メガソーラーは、急傾斜地や活断層直下、土石流危険渓流など、土石流発生のリスクが高い場所に設置された事例についてヒアリングを実施し、現状を把握した。

海外規制調査については、我が国のガイドライン策定の参考とするために、日本と同様に平地の少ない韓国、台湾のほか、英国、ドイツ、フランス、米国を対象として、傾斜地 PV、営農 PV、水上 PV に関する規制・ガイドラインの有無及びその概要について調査した。これらの結果を表形式にまとめ、暫定版ガイドラインの参考情報として記載した。

## ③ガイドラインの普及啓発

2021 年版の傾斜地設置型、営農型、水上設置型のガイドラインを太陽光発電協会（JPEA）のホームページに公開した。2021 年 12 月に公開した 3 つのガイドラインと関連事項について WEB によるセミナー（説明会）を実施した。ガイドラインセミナーの一部のセッションのビデオを JPEA のホームページに公開した。

## 2. 実用化・事業化見通し

2022 年度末に実証実験の結果を反映して、ガイドラインの改定を行い、公開する。

## 3. 波及効果

太陽光発電設備の事故は増加傾向にある。将来的に増加が期待される各導入分野への設計・施工ガイドラインを策定、広く普及啓発することで、事故低減の貢献が期待される。また、地域共生の課題が健在化しており、太陽光発電の導入拡大に向けた国民の受容性が低下している。地域共生の要因の一つとして、これら安全性の問題があるため、本成果が受容性の向上に貢献できる。

## 4. 今後の展開

2021 年に公開した各ガイドラインは、『発電用太陽電池設備に関する技術基準を定める省令（令和 3 年経済産業省令第 29 号）』の逐条解説に、設計・施工の技術的内容をできるだけ具体的に示した技術資料として規定された。同様に 2022 年度末に公開予定のガイドラインについても同様に法令との関連持つことで実効性が高まることが期待される。

公開後は、各事業者においてさまざまな講演会、セミナーなどを通じてガイドラインの普及啓発活動を継続していく。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	4 (1)	3 (2)	7 (3)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(1)	(1)
(国内・審査無)	(0)	(3)	(0)	(3)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

C 太陽光発電の安全性・信頼性評価、回復技術の技術情報基盤整備（国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般社団法人構造耐力評価機構、SOMPOリスクマネジメント株式会社、一般社団法人太陽光発電協会（JPEA））

1. 成果詳細

(1) 不具合、事故情報収集および分析

① 事故調査、現地調査による不具合事例の収集・分析

事故調査、現地調査による不具合事例の収集・分析における課題は、メカニズム解明に必要な事故時の説明や事故情報の収集である。今年度事業では、保険事故情報の収集とともに、その内容の整理・分析を進めた。その概要は、2017年から約2年間の保険事故情報では、191件の事故事例数であったのに対し、2019年から約2年間の事故事例数は240件となっており、事故件数は増加傾向を示している。事故原因については、自然災害に起因するものが累積（約4年間）でも約8割を占めるとともに、構造的な破損事故が大半を占めている状況である。また、他の保険会社からの事故情報の提供を受け統計的な分析を行った。

土砂災害事故の未然防止に役立てることを目的に、土砂災害と太陽光発電所事故の関連性を簡易的に把握する方法の検討として、全国の急傾斜地（傾斜角30度以上）分布図の作成、及び土砂災害警戒区域等に指定されていないが実際に土砂災害による被害が発生した太陽光発電所の抽出を行った。

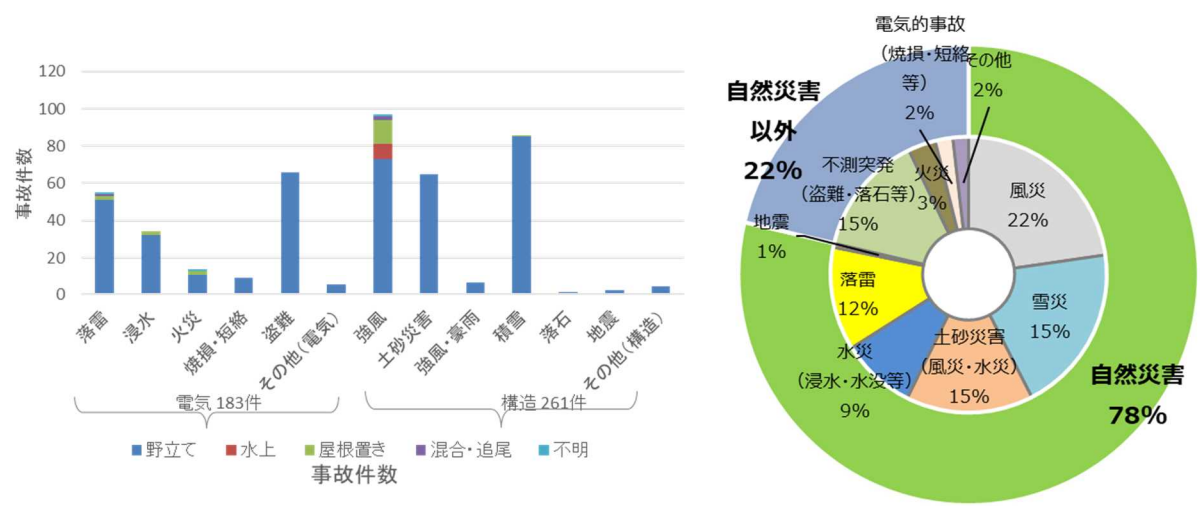


図 III-2-(ロ)-(i)-C-1 2017年から約4年間の保険金支払いのあった事故（1000万円以上）

② 実証実験による構造物事故のメカニズム分析

近年流通および事故が確認されている、72セル（約2000mm×1000mm×30～40mm）の太陽電池モジュール、両面発電の太陽電池モジュール、フレームレスの太陽電池モジュールを用いて耐圧試験を行った。モジュールの強度を分析する過程で、各モジュールメーカーの仕様書に記載されているモジュール強度がIEC61215で定義（試験荷重 =  $\gamma_m \times$  設計荷重  $\gamma_m$ : 安全係数で1.5以上）されている「設計荷重」と「試験荷重」のどちらを示しているか不明であることがわかった。

(2) 土木・構造安全のリスク評価、低減・回復技術に関する既存技術の応用可能性評価

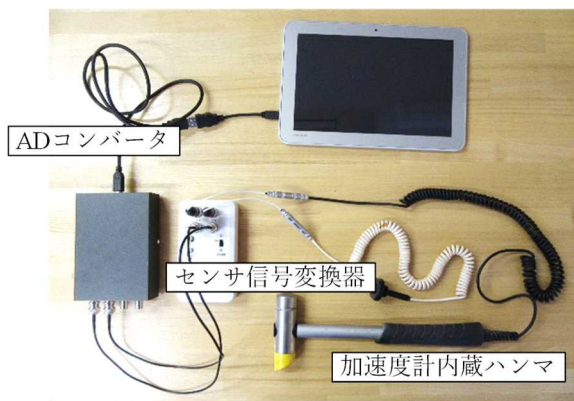
① 土木構造・土木、建築分野での地盤、構造評価技術のPVへの応用可能性調査

専門家が二次評価するために必要な情報を非専門家が集めることができるチェックリストの作成を行った。確認項目は大きく6項目（①設備の周辺②架台の状況③直接基礎の状況④杭基礎の状況⑤地盤の状況⑥支持物全体の不具合）とした。

オンサイトによる杭の支持力の簡易診断については、文献調査および測定器メーカーへのヒアリング結果から、有望と考えられる技術をいくつか抽出し、その中から1つの技術についてフィールドテストを実施した。試験および評価方法は、標準的に打込んだ杭と施工不良を模擬して打込んだ杭の2種類を

ハンマで打撃し、打撃によって与えられた荷重とその時の変位の関係から杭の剛性を評価する方法としている。解析結果から杭の支持力の比較が可能であることが確認できた（例えば A の杭と比較して B の杭は支持力が高い等の判断が可能）。ただし、検査機器が複雑であったため、現場作業員が誰でも使えるような簡易的な機器への改良に関する検討を行った。

設計図面がない設備に対する設計図面作成支援として、3D カメラによる写真撮影は現場で簡易的に撮影が可能で、画像から架台のフレーム図を描くことができることがわかった。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-C-2  
杭の支持力簡易診断装置（左） 杭の支持力間診断の様子（右）

## ②構造設計書の確認項目リストの策定

構造計算書の確認項目リストの策定について、2社の架台メーカーの構造計算書を基に確認項目のピックアップを行い、リストを作成した。また、架台メーカー約8社の構造計算書を参考に確認項目のブラッシュアップを行った。

## ③土木構造・土木、建築分野での地盤、構造補強技術のPVへの応用可能性調査

地盤補強・診断に関するリスク低減・回復技術について、文献調査およびメーカーヒアリングを行い、地盤の診断技術として、実際のフィールドで地盤の締固め度測定を行った。測定は関東ローム層の安定地盤で実施した。測定結果からも安定地盤であることが確認できたことから、地盤が締固められていることを確認するためには有望な技術であることがわかった。また、造成地盤作成時に地盤全体を均一に転圧できているかを検証するためにも使用可能であることが確認できた。

地盤の補強について、文献調査から「公共土木施設の維持管理に関する研究委員会報告書 3. 斜面・のり面の適切な点検方法の手引きと補修・補強工法選定資料」に法面保護技術の既存技術が多く紹介されていることが確認できた。また、リスク低減および回復として地盤の侵食を防ぐための法面保護に関する技術を2種類ピックアップ（種子吹付工、テラセル工）し、これらの法面保護工法の有効性を確認するために、実際の傾斜地盤に2種類の法面保護工の施工を行った。2種類の法面保護工の効果についてはタイムラプスカメラおよび現場での目視によって観察を行っている。

架台接合部に関する回復技術について、アルミニウム合金製架台の接合部をターゲットとすることを決定した。特に、ルーズホール、T溝スロット等の接合部に着目して補強、回復のための方法について検討を行った。補強方法に関する検証実験については実施する。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-C-3

地盤の締固め度測定装置（左）従来より使用されている計測機器（RI 計器）（右）




図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-C-4

法面保護（種子散布）状況（左） 法面保護（テラセル敷設）状況（右）

（3）電気安全、発電性能のリスク評価、低減・回復技術に関する既存技術の応用可能性評価

①電気安全・発電性能の現地評価方法の調査

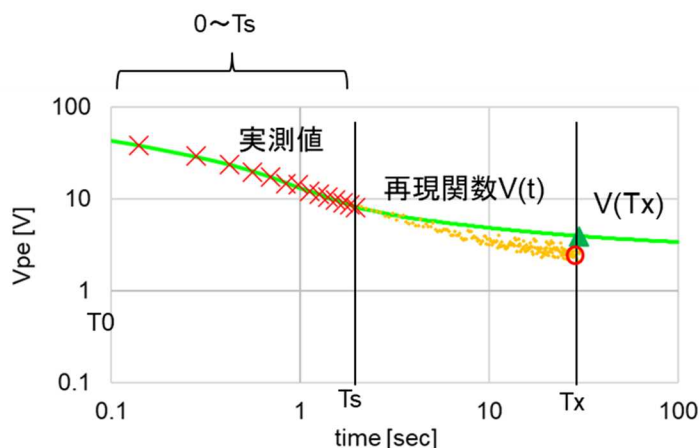
電気設計に関する事後的な設計図書の作成方法、設計図書や写真等から評価・診断する有効な技術、事業性を予測可能な有効な技術などについて、IEA PVPS TASK 13 や IEC TC82 の会合、国際会議へ参加や、文献調査を行い、資産価値評価のテクニカルデューデリで実施されている項目について、発電特性の推定方法について調査した。また、目視の限度見本となる事例について 90 事例程度収集を行った（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-C-5 参照）。

	事象	A 経過観測 B 電気測定 C 補修、交換 (他のアクションがあるか聞く)	判断した根拠 (法令違反、)	最終的な リスク	備考
	ケーブル擦れ	交換・補修	N/A	地絡、直列アークによる発火	
	異種嵌合	電気測定 (IR)	N/A	直列アークによる発火、焼損	

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-C-5 目視限度見本の例

## ②アセットマネジメントに関する各種リスク低減技術の応用可能性調査

アセットマネジメントのコストダウンの可能性として、常時監視の高度化と現地作業の時短化することが考えられる。アセットマネジメントに利用できるリスク低減技術（絶縁抵抗測定、等電位の確認方法常時監視方法）について、火災事例のリスクフローについて検討した。また、リスク低減技術の一つとして、電気事故時の各種検知方法（絶縁低下、アーク検知など）と各種遮断技術（Mid String など）の組合試験による電気安全性の向上、確保する設計方法の評価を行うために、絶縁抵抗測定の予防保全の高抵抗測定方法について、測定時短化に必要な推定モデルの検討を行った。また、アーク検知および遮断について、模擬電源を利用した実験を行い、直列アーク発生時の装置の検知状況について実験を行った（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-C-6 参照）。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-C-6 常時監視の絶縁抵抗測定の測定時間短縮方法の概要

### (4) PV 発電設備の評価・回復手法の技術情報整備および技術評価ガイドの作成

#### ①技術情報整備および技術評価ガイドの作成

太陽光発電事業ガイドの評価項目をベースとして、技術情報およびガイドの目次案をもとに内容についての素案を作成した。

#### ③既存ガイドラインや文書との整合性検討と広報による発電事業関係者への利用促進

太陽光発電設備の評価・回復手法の技術情報整備および技術評価ガイドの作成に資するために、安全性・信頼性を評価するための課題・要望等の抽出として「太陽光発電事業の評価ガイド」等の既存ガイドライン類の使用に関する調査を行った。また、太陽光発電システムの設計・施工の実態（実例）調査として、太陽光発電協会から太陽光発電システムの設計に関連する資料の収集を行った。

## 2. 実用化・事業化見通し

本研究の成果により、太陽光発電設備の信頼性・安全性向上技術に関する企画立案がなされ、抽出した課題に対応した技術がサービスや製品として社会実装され、セカンダリーマーケットにかかる太陽光発電の事業価値評価サービスや O&M サービス、それに伴う機器販売へ反映される。

## 3. 波及効果

本事業の成果を活用することで、最終的には、セカンダリー市場の活性化、発電コストの低減による賦課金の軽減、PV 導入量の増加、公衆安全の確保の 4 つの効果が得られる。以降では、成果の各々の具体的な活用方法と定量的なインパクトを示す。

第一に、本事業の成果である信頼性評価技術を用いることで、稼働済設備の残存発電量の把握が可能となり、設備の買い手側のリスクが軽減されることで設備の売買が促進され、セカンダリー市場が活性化される。一般的に、PV は 20 年以上の稼働が可能であり、今後は FIT を卒業した設備が多く現れる。これらの設備を適切に評価できれば、PV のセカンダリー市場が順調に拡大していくと考えられる。

第二に、既設の PV に対して本事業の成果である信頼性回復技術を適用し、設備を延命させることで、発電コストを低下させることが可能となる。2030 年に 7 円/kWh まで太陽光発電コストを低下させる目



標が掲げられており、2030年の目標を達成するには、モジュールの変換効率の増加だけでなく、運転年数を伸ばすことも必要となる。発電コストへのインパクトは、1%減した場合+0.47円/kWh、1%増加した場合で-0.52円/kWhである[1]。安全確保できず15年で事故が発生した場合、15/20年=-25%であり、リパワリングにより長期に利用した場合（リパワリングにかかるコストは除く）30/20年=+50%、50/20年=+150%のインパクトがある。

[1]出典：NEDO 太陽光発電開発戦略（NEDO PV Challenges）

第三に、PVシステムの適切な設計・施工と第二で述べた信頼性回復技術による性能維持を行うことにより、太陽光発電の導入量のストックの増加を図ることができる。

最後に、公衆安全の確保への貢献について説明する。50kW以上の太陽光発電設備の自然災害等による事故原因から、主に台風時の強風や豪雨時の土砂崩れにより被害が生じていることが分かる。これらの対策として、既設については、信頼性評価技術を使用して不適切な設備を洗い出し、それら設備に回復技術を適用し安全を確保することで、事故件数を減らすことが可能となる。

#### 4. 今後の展開

本研究の成果により、太陽光発電設備の信頼性・安全性向上技術に関する基盤整備がなされ、民間企業による技術がサービスや製品として社会実装を支援していく。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	1 (0)	0 (0)	1 (1)	2 (1)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(1)	(0)	(0)	(1)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

D 太陽光発電の長期安定電源化に向けた評価・回復の実用化促進技術開発（関西電力株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所(再)、一般社団法人構造耐力評価機構(再)、アジア航測株式会社、株式会社エクソル、株式会社CO2O、日本土工株式会社）

1. 成果詳細

【全般】 基盤整備側と本実用化技術開発側にて取組範囲の棲み分けをし、基盤整備側では、他分野における既存の技術において利用できそうな技術の基礎的な検討を行うとした。

実用化技術開発側では、評価、回復技術のうち、実用化に向けて技術開発が必要である、「現地での図面化」、「架台の補強」、「杭基礎の補強」、に特化し、有効性、経済性を考慮した技術開発を行うことで整理を行った。実現場では複数の不具合要因が関係していることが想定されるが、一つの不具合ケースごとに補強対策を整理することが取扱いがし易いと考え、各不具合設備のケースごとに補強対策を整理している。

【設備評価】 太陽光発電設備の評価技術および現地利用方法の開発については、昨年度事業の調査において明らかにした“発電所に内在すると考えられるリスク”に鑑み、今後必要となる“全国、各都道府県を網羅すると共に、主に低圧規模の発電所を評価するに妥当な者”の組織化を具体的に想定し、必要な教育マニュアルおよび評価シートの策定を行っている。

【杭の補強】 杭基礎補強技術の開発は、低廉かつ狭隘箇所でも施工可能な手法としてφ100程度の掘削穴を利用して簡単に打込み施工が可能なアンカーを開発（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-1参照）、各種地盤で引抜き耐力の検証試験を実施済みで結果は軟弱地盤でも10kN、良好な地盤であれば40kN以上と結果は良好であった。また、掘削穴を施工するための専用マシンとして、アタッチメント配管仕様のマイクロ油圧ショベルをベースに油圧回路を改良したベースマシンを開発した（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-2参照）。この改造によりオーガー減速機を取り付ける事を可能になり、さらには油圧切替バルブを設ける事でアンカー抵抗板展開用のブレーカー等、各種油圧アタッチメントの使用を可能とした。これら改造によりアタッチメント用機種としては最小クラスながらも、1台で発電所狭小箇所でのマルチな作業が可能に。また施工時の補助としてオーガーには自動垂直可視機能も搭載、オペレーター1人作業も可能である。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-1 杭補強の施工事例



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-2 掘削穴を施工するための専用マシン

【杭の調査】

杭基礎の引抜き強度判定技術の開発は、改訂 JIS による荷重や簡易的な地盤強度確認等により杭の引き抜き強度が判定できるシステムを開発中、その中で基礎杭の打音による支持力判定技術の開発にも着手し、まずは単管杭に関して教師データを各種条件で収集、基礎杭と引き抜き支持力の相関性がおおよそで確認できるまで精度を上げており、この技術も判定情報の一つに含める方向でデータ収集を継続中である（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-3、4参照）。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-3  
打音による支持力判定機材



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-4  
打音による支持力判定の様子

また、これまで太陽光発電用の架台杭のような微小な杭には利用されてこなかったインテグリティ試験（PIT-X（表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-1 参照）を用いた衝撃弾性波試験）を別途試みた（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-5）。

本試験機にて弾性波速度を表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-2 の様に設定（鋼製杭形状別）すれば、粘性土、砂質土を問わずほぼ1割以内の誤差で杭長を計測できることが判明した。杭上に架台が有っても測定可能だが、弾性波の伝搬が、杭先端方向（鉛直下向き）> 架台方向（鉛直上向き）と成るような打撃方法及び双方の反射波を見分けるコツが必要である。

表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-1 衝撃弾性波探査器（PIT-X）

機器名称	写 真	メーカー	仕 様
衝撃弾性波探査器 (PIT-X)		Pile Dynamics 、inc 社 (米国)	感 度 : 50mV/g 周波数特性 : 0.7~9000Hz 共振周波数 : 40kHz ハンマー : 3 ポンド 1.4kgf) 電 源 : 内臓バッテリー 重 量 : 約 0.45kg



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-5  
打音による杭長、支持力判定の様子

表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-2 杭の種類別設定弾性波速度

杭の種類	設定弾性波速度
スクリュー杭	6200m/s
鋼管	5120m/s
大ばね2枚	4500m/s
大ばね4枚	5120m/s
ハット型	6300m/s

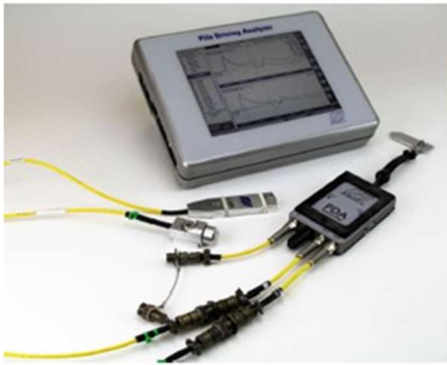
そのほか、杭の動的載荷試験から静的抵抗力（押し込み、引抜き）を推定する試験（PDA測定器とCASE法を用いた衝撃弾性波試験）も試みた（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-6、7 参照）。

本試験機にて弾性波速度を5,120m/sに設定（鋼製杭）の上、計測した杭の静的抵抗（粘性土、砂質土を問わず）とジャッキによる引抜試験結果との関係は（大羽根2枚杭を除く）、およそ

$$\text{油圧ジャッキ引抜試験値(kN)} \approx 0.80 \times \text{衝撃載荷試験値 (静的抵抗)} - 0.08$$

$$\text{油圧ジャッキ押込試験値(kN)} \approx 0.43 \times \text{衝撃載荷試験値 (静的抵抗)} + 8.80$$

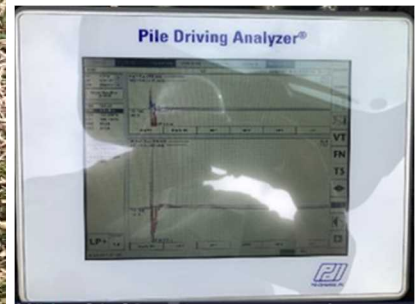
の関係にあることが判った。また、今後の課題として杭上に架台があった場合、杭頭を強打する関係上測定が困難。杭頭直上の架台柱材を部分的に避け、杭頭に特殊な治具を設置する等の改善が必要と思われる。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-6  
衝撃載荷試験装置 (PDA)



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-7  
衝撃載荷試験状況 (PDA)



【架台の補強】

JIS C8955 (2017 版) 以降、杭頭部へ 13~15 kN 程度までの荷重 (押し込み・引抜き支点反力) が載荷されるケースが珍しくない (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-8 参照)。しかし、アルミ架台に多く用いられてベースプレートの肉厚、形状、長孔、歯形・波形状等が各社相違し、鉛直方向の滑り (ズレ) に対する抵抗力も異なり、支点反力 (静的荷重) 13~15.5 kN/箇所に対して安全率が 1 前後で厳しいことも想定される。

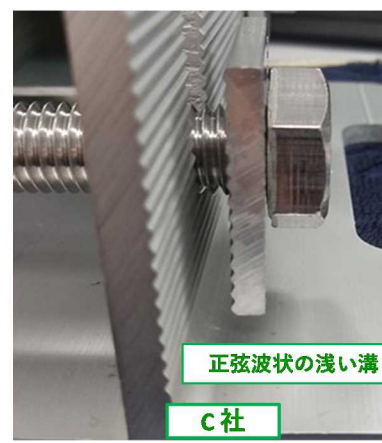
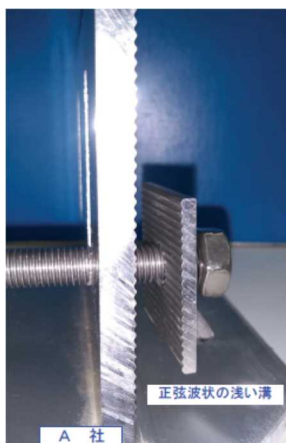
そこで、日本で多く販売されている中国製 3 社 (A~C 社) のアルミ架台にて補強試験を行った (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-9 参照)。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-8  
ベースプレート (柱下端〜杭頭)



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-9  
各社ベースプレート



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-10 ベースプレートの各社比較

ベースプレートは厚6mm以上の変形し難い板厚で溝は、方形波形の深い溝が噛み合わせの上で望ましく、ドリルネジM5以上を両面に打設することがズレ止めに効果的だと判明した。ベースプレート補強対策引抜き試験のズレ等の試験写真を示す。

- ① 無補強 (12.8～26.7 kN)
- ② 両面強力接着剤補強 (21.2～31.5kN) (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-11 参照)
- ③ 両面ドリルネジ補強 (19.1～34.1kN) (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-12 参照)
- ④ ベースプレートの浮上り変形、亀裂 (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-13、14 参照)
- ⑤ ベースプレートの浮上り変形防止対策 (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-15 参照)
- ⑥ 接着試験時の柱材下縁端部せん断破壊 (30 kN 超) (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-16 参照)
- ⑦ ベースプレートの反返りによる波形噛み合せ部 (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-17 参照)



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-11  
アクリル樹脂系強力接着剤補強



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-12  
ドリルネジ補強

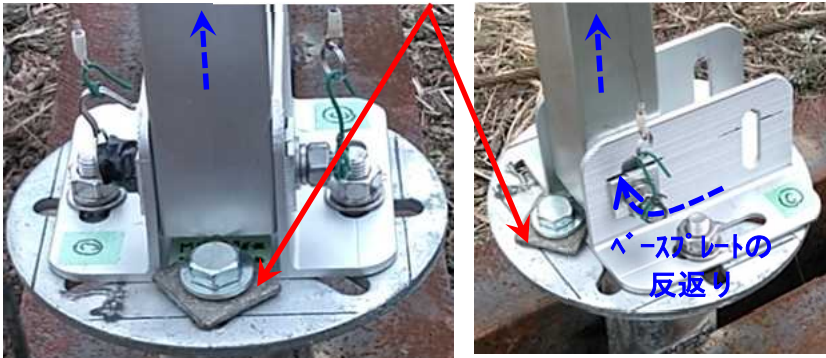


図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-13  
ベースプレート変形浮上り変形亀裂



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-14  
ベースプレート変形浮上り変形

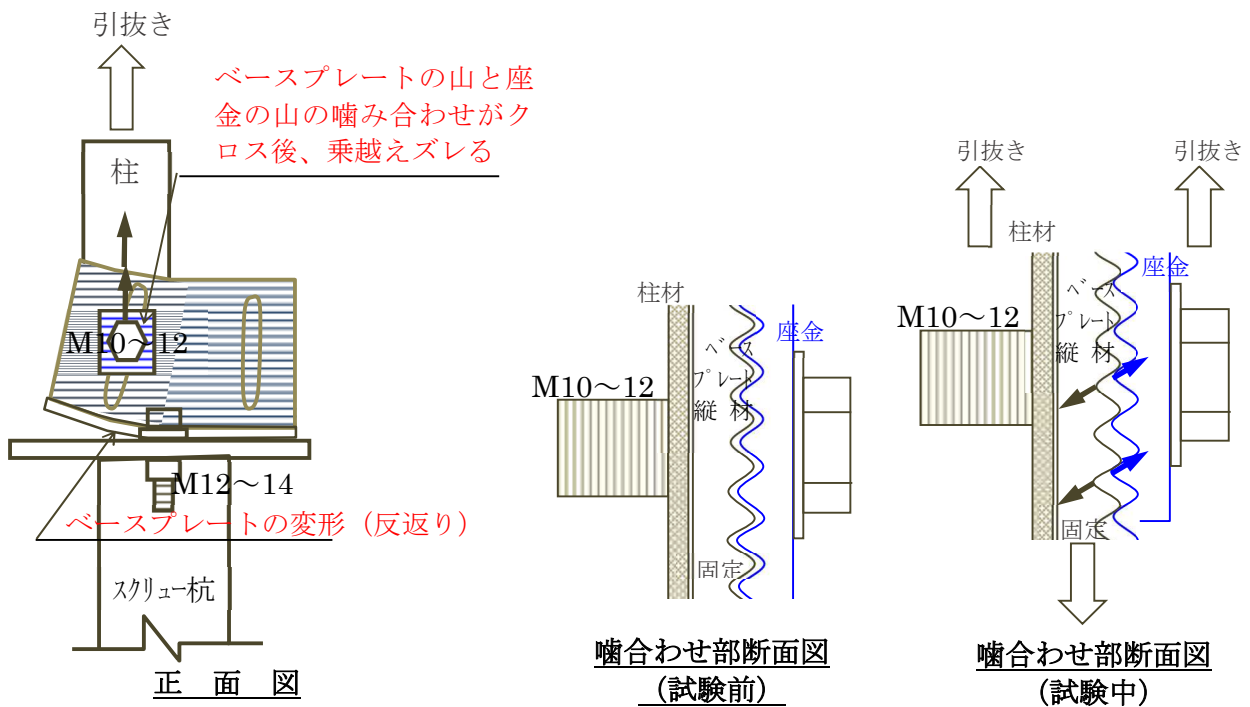
**M14 ワッシャ杭頭固定による  
反返り防止対策**



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-15  
ベースプレート変形防止対策



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-16  
柱材下縁端部せん断力破壊



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-D-17 ベースプレートの反返りによる波形噛み合わせ部のズレ

**【設計図面作成支援技術開発】**

架台等の補強等設計に伴う既存設備の図面を効率的に取得・作成するアプリケーションを成果とする。現状においては現地の設備情報については手動でのスケール等での情報取得等によるが、これらをモバイルデバイス等や付帯するセンサー等を用いて半自動的に設計図面や架台のフレームワーク等を生成し、現地作業の負担軽減を図るものである。また併せて現地の状況として地形や環境情報等の入力をおこない履歴とする仕組みを構築する。

**【緊急時点検技術】**

高解像度衛星(WorldView)による解析技術開発、発電施設規模と災害種別をシステムで判断するとともに衛星コンステレーション(アクセルスペース GRUS 衛星)によるモニタリングにより設備の監視サービスや有事の際の施設の状況を把握する効率的な手段仕組みとして構築する。

### 【設計図面作成支援技術開発】

架台等の補強等設計に伴う既存設備の図面を効率的に取得・作成するアプリケーションを成果とする。現状においては現地の設備情報については手動でのスケール等での情報取得等によるが、これらをモバイルデバイス等や付帯するセンサー等を用いて半自動的に設計図面や架台のフレームワーク等を生成し、現地作業の負担軽減を図るものである。また併せて現地の状況として地形や環境情報等の入力をおこない履歴とする仕組みを構築する。

### 【緊急時点検技術】

高解像度衛星(WorldView)による解析技術開発、発電施設規模と災害種別をシステムで判断するとともに衛星コンステレーション(アクセルスペース GRUS 衛星)によるモニタリングにより設備の監視サービスや有事の際の施設の状況を把握する効率的な手段仕組みとして構築する。

## 2. 実用化・事業化見通し

FIT 期間後も継続した発電事業を行うためには、リパワリングが重要である。そこで、本研究において開発を進める、現地の架台構造の3DCAD化や、構造欠陥を判別する技術、劣化した架台の補修、杭の引き抜き強度判定手法や補強技術等を本共同研究により確立することで、今後市場規模の発展が見込まれるある太陽光発電のセカンダリーマーケットにおいて、評価・回復技術を展開することが可能である。

本研究で確立されたリパワリング技術を用いて、セカンダリーマーケット上の設備診断を行い、そのメンテナンス技術を提供できるようになる。メンテナンスに用いる、必須となる材料、機材の調達先については、共同研究を行う各社が取扱う、架台・基礎の安全性診断技術を用いた機材や、補修技術を用いた材料となる。

当該リパワリング技術の販売先については、まずは国内の既設太陽光発電事業者が対象となるが、それに伴うO&M会社や、EPC業者に対しても、同技術を用いた施工方法を使用頂くことが可能である。また、海外では、まだこのような技術は検討されていないが、国際標準化の場では、構造設計や試験方法における標準化の議論も開始されており、構造安全にも注目が集まりつつある。海外に先行した技術となることが期待され、販売ルートは全世界が対象となる。

市場規模としては、10年後に不具合設備が散見されてくるという想定のもと、本サービス提供開始時点2024年での、10年経過となる10kW~50kW未満で累積件数は、13.8万件。(電源種別(太陽光・風力)のコスト動向等について(平成28年11月)資源エネルギー庁 P20)

その30%にあたる41,400件が不具合設備と仮定する。今回コスト目標としている2.4万円/kWを乗じると、120万円。スケールメリットを考慮し、50kWで、100万円/件と想定する。高圧以上や、海外も対象となれば、本技術を適用可能となるマーケットは非常に大きいものになると考えている。

## 3. 波及効果

地上設置型太陽光発電設備の不具合設備が排除されるしくみが導入され、本助成事業により設備の健全性が定量的に評価・回復することが可能になることで、不良設備は淘汰され、基準を満たす良設備のみが残っていく。それにより、太陽光発電設備の安全性が向上し、長期安定電源化に寄与することができる。

## 4. 今後の展開

設計図面の作成支援技術においては、モバイル等で設備の図面を作成し、架台設備等の構造的評価を簡易におこなう仕組みを構築し、太陽光発電事業者が自身の説明状況を把握、評価するためのアプリケーションとして利用することを想定したサービス提供を考えている。また、今後の太陽光発電設備の管理状況の把握や監視、評価等の面で事業者以外の第三者が設備状況を判断する材料として、これらのアプリケーションサービスの利用を想定する。特に第三者として、太陽光発電設備の売買における設備評価や保険等の事業者への情報提供サービスとしての展開も想定したい。

緊急時点検技術においては、遠隔地からの太陽光発電施設を事業者が監視、状況を把握する手段としてサービスの提供を考えている。

太陽光発電設備の評価技術および現地利用方法の開発については、全国各都道府県に在る低圧規模発電所を評価するにあたって充足可能と考えられる規模の評価人に対して、策定した教育マニュアルおよび評価シートを活用し、研修ならびに、実査指導を行うことを計画している。

架台の評価・回復技術および現地利用方法の開発については、これまで着手できていない添え木手法による梁補強の検討を行い、補強ラインナップの充実を図る。

杭基礎補強技術の開発については、今回開発する補強用アンカーを用いた引抜きに対する補強手法は狭隘箇所でも施工できるため、太陽光架台に限らずその他簡易的な構造物の補強に応用が可能であり、さらに低廉でもあることから海外への展開も十分に可能であると思われる。

今後、上記の各要素技術が確立し、それを組み合わせることで容易に他社が真似できない、設備の評価から回復補強まで一気通貫した体系的なサービスを提供できるようになることを想定している。

## 5. 特許・論文・对外発表

該当なし。

(2022年6月20現在)



## E 傾斜地設置型並びに営農型太陽光発電施設を対象とした凍上対策ガイドラインの策定（国立大学法人北海道国立大学機構北見工業大学）

### 1. 成果詳細

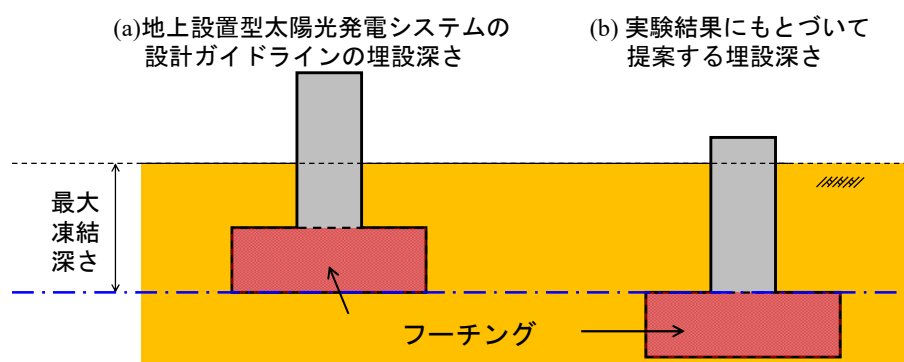
近年、北海道の山間部や遊休農地などにおいて、太陽光発電施設が積極的に建設されている。しかしながら、凍上現象によるものと考えられる様々な被害が、道東地域で散見されるようになってきた。凍上被害が発生する技術的な問題としては、凍上被害を回避することに主眼を置いた設計ガイドラインが策定されていないことが挙げられる。2019年に公開された太陽光発電システムの安全設計に関する検討委員会「地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン 2019年版」では、積雪寒冷地特有の積雪荷重、風荷重に関する対策については十分な議論がなされているものの、凍上に関する対策については不十分と言わざるを得ない。特に、布基礎については、ガイドラインで示された埋設深さでは、凍上対策として十分な効果が得られないと考えられる。また、杭については具体的な凍上対策について明示されていない。

そこで、太陽光発電施設の建設に使用されている布基礎と各種の杭について実物大模型実験を行い、その凍上挙動を明らかにすることに取り組んだ。特に、研究初年度である2021年度は営農型太陽光発電施設を対象とした実験を行った。

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-E-1は実証実験の成果に基づいて提案する凍上対策としての布基礎の適切な埋設深さである。図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-E-1(a)のように、現行のガイドラインでは布基礎の埋設深さを、フーチングの底面が凍結深さまで達していることと定められている。実験結果にもとづくと、この埋設深さではフーチングの上面に凍結深さが達した段階で凍着凍上現象が発生してしまうため、凍上対策としては不十分である。そこで、フーチングの上面を最大凍結深さよりも深くすることを提案する。図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-E-1(b)のように布基礎を埋設することで、凍結時にはフーチングの上面に凍上圧の反力が作用して基礎の持ち上がりを防ぐことができ、融解時にはフーチングの上面に土圧が作用して基礎の沈下を促進できる。布基礎の埋設深さをフーチングの厚さ分だけ深くするだけで、凍上対策として大きな効果が期待できる。

H鋼杭については、2021年度の実験では埋設深さに関係なく、凍上が発生することを確認した。一方、スパイラル杭については、2021年度の実験では最大凍結深さの2倍程度で埋設することが出来れば、凍上が発生しないことを確認した。以上の成果から、杭の凍上対策として、スパイラル杭が有効であることが確認できた。より具体的な設計方法については、今後の研究開発で明らかにしていきたい。

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-E-1 現行のガイドラインにおける布基礎の埋設深さと実験結果をもとに提案する布基礎の埋設深さ



### 2. 実用化・事業化見通し

本研究で得られた成果については終了後速やかに、「太陽光発電システムの安全設計に関する検討委員会」に全て提供する。また、その成果をもとに「特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のためのガイドライン」に凍上対策のガイドラインを盛り込むための協議も開始した。研究は順調に進んでおり、凍上対策のガイドラインの実用化は困難ではないと考えられる。

### 3. 波及効果

本研究で作成する凍上対策のガイドラインは、積雪寒冷地における太陽光発電の普及に大きく貢献できると確信するものである。凍上対策のガイドラインが作成されることで、太陽光発電施設の凍上被害を防止することが可能となる。これにより、積雪寒冷地で太陽光発電施設を建設する際のリスクが大きく低減され、北海道内外の企業が北海道を代表とする積雪寒冷地でのプロジェクトに参画しやすくなるものと考えられる。

凍上対策のガイドラインは積雪寒冷地の傾斜地や営農地、遊休農地の有効利用を可能とし、太陽光発電施設の建設を活性化させ、積雪寒冷地（特に北海道）の経済再生に貢献するものであると確信している。

### 4. 今後の展開

2021年度は、営農地での施工が想定される基礎、傾斜地並びに営農地での施工が想定される杭の凍上挙動について、平地での実物大実験を行い、その凍上挙動について明らかにした。また、2021年度の研究成果をもとに、実効的な凍上対策について検討した。2022年度は、傾斜地においても太陽光発電施設の実物大実験を実施する。なお、基礎、杭ともに、実物大実験の結果をもとに、寒冷地での施工に適していない工法について明示することにも取り組んでいきたいと考えている。

### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	—	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	—	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	—	0 (0)	1 (0)	1 (0)
(国際・審査有)	—	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国内・審査無)	—	0 (0)	1 (1)	1 (1)
(国際・審査無)	—	0 (0)	0 (0)	0 (0)
新聞・雑誌等への掲載	—	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	—	0	0	0
展示会への出展	—	0	0	0
受賞実績	—	0	1	1

(2022年6月20日現在)

F 特殊な設置形態の太陽光発電設備に関する安全性確保のための実証実験（一般社団法人構造耐力評価機構、八千代エンジニアリング株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所、キョーラク株式会社）

1. 成果詳細

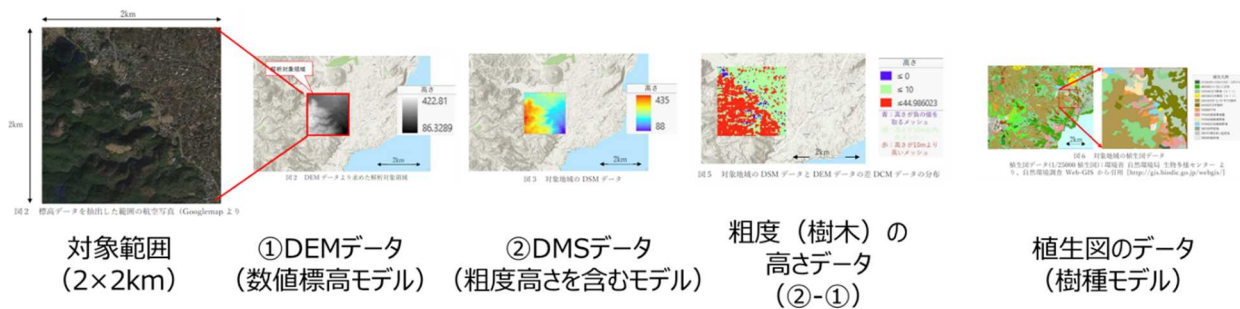
(1) 傾斜地設置型 PV に関する安全性確保のための実証実験

①傾斜設置型 PV の設備形態の実態調査

傾斜設置型 PV の現状のシステム設計、設備形態の実態を把握するために斜度の状況などについて標高データをもとに調査を行った。

②傾斜地設置型 PV の CFD 解析

これまでに、CFD（数値流体力学 Computational Fluid Dynamics）解析による傾斜地への風速増加に関する検討は行われているが、単純な地形における検討にとどまっており、実際の発電所のような複雑な地形を想定した検証が行われておらず、そのような地形での増速効果や CFD の適用性の検討が十分に確認できていない。そこで、強風被害があった実在する傾斜地設置型 PV を対象とした CFD 解析を実施し、風速増加と被害状況の関係について確認する。併せて実地形を対象とした CFD 解析でのモデル化についての検討を行う。2021 年度は、植生を含む実地形のモデル化についての検討を行い、強風被害があった実地形のモデルを完成させた（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-1 参照）。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-1 植生を含む実地形のモデル化についての検討

③傾斜地設置型 PV の杭基礎の載荷試験

傾斜地における杭基礎の抵抗力試験については、現在実施されている別プロジェクトにおいて 1 種類（スクリュー杭）の杭の試験が検討されている。しかしながら、市場に多数の杭の種類があり、設計・施工の適用性を広げる必要がある。本事業では、国内で多く導入されている 2 種の杭（小径鋼管杭、型钢杭）についての検討を行った。これに併せて、傾斜地における杭の施工方法および載荷試験方法に関する検討も行った。試験に供する傾斜地盤は、均等な固さで造成された地盤とし、地盤の勾配は 0 度、15 度、30° とした。載荷試験方法については、基礎施工の有識者からのヒアリングを基に重機を用いた方法と重機を用いない方法の 2 種類の検討を行った（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-2 参照）。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-2 傾斜地での載荷試験の様子

④傾斜地設置型 PV の地盤侵食保護に関する実証実験

PV の傾斜地において地盤侵食が発生している事例は多くみられる。地盤侵食の要因の一つに PV アレ

Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F[1]

イの軒先から雨垂れが考えられるが、これまでに雨垂れによる地盤浸食の影響や侵食対策（植生工）の効果については確認されていない。本事業では、盛土造成された傾斜地盤で PV アレイ模擬的に再現し、これらの内容について検討する。

2021 年度は、傾斜地盤の造成工事および植生工（種子散布）を行い、模擬 PV アレイとタイムラプスカメラの設置を行った。なお、模擬 PV アレイのひとつには、PV アレイ軒先からの雨だれ対策として、樋を設置した（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-3 参照）。



植生工なし



植生工あり



樋の設置

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-3 傾斜地設置型 PV の地盤侵食保護に関する実証実験の状況

## （2）営農型 PV に関する安全性確保のための実証実験

### ① 営農型 PV の設備形態の実態調査

営農型 PV の現状のシステム設計、設備形態の実態を把握するために約 60 件に対してアンケート調査を実施し、架台材料、基礎の種類、モジュールサイズ遮蔽率、設備容量、PCS の容量台数、電圧レベル、トランス有無、農機の架台への衝突事例等について実態把握を行った。

### ② 営農型 PV の杭基礎の載荷試験

営農型 PV の杭基礎は表土層が軟弱な農地に打設される。ところが農地における杭の抵抗力特性は把握されておらず、基礎・架台設計の妥当性が十分に確認できていない。本事業では、農地において杭基礎の載荷試験を行い、農地における杭の抵抗力の特性を調査する。

2021 年度は、水田 1 か所（乾燥状態）、畑 2 か所において杭基礎の載荷試験を実施した。選定した杭は 2 種類のスクリー杭、1 種類の小径鋼管杭とし、載荷方向は、鉛直上向き（引抜き方向）および水平方向とした（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-4 参照）。



農地での地盤調査

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-4 農地における地盤調査の様子

### ③ 営農型 PV の風洞実験の実施

藤棚式架台の PV アレイの風洞実験は別プロジェクトで実施されているが、足高式架台の PV アレイについては実施されていない。また、下部農地での農作物がアレイ面の風荷重に与える影響は十分に把握されていない。本事業では設計の適用性を広げるため、足高式架台の PV アレイの風洞実験を実施する。これに併せて、アレイ面下で農作物が育成に伴ってアレイ面の風荷重に与える影響についても検討する。2021 年度は、風洞実験模型の作成および風洞実験計画の立案を行った。

## （3）水上設置型 PV に関する安全性確保のための実証実験

### ①水上設置型 PV の設備形態の実態調査(産業技術総合研究所)

水上設置型 PV の現状のシステム設計、設備形態の実態を把握するためにアンケート等により約 100 件のシステムの調査を行い、水上・フロートの種類(個別/アイランド)、ため池の全体に占める割合(地上からの距離)、ため池の深さ、アンカーの種、アイランドの大きさ等について実態把握を行った。

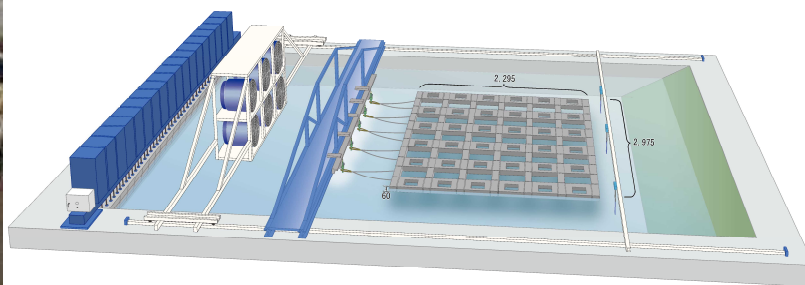
### ②水上型設置 PV の設置環境に関する実態調査

今後設置が進むと考えられるため池や海を対象に実地調査を行い、水上設置型 PV に与えられる環境要因の外力を把握ため、2021 年度は考慮すべき条件の模索を中心に活動、文献等により測定項目や測定方法の調査を進めるとともに、測定対象地の選定基準を決定した。また、参考に風速・風向、波高・波向・波周期を測定項目として抽出し、あわせて同測定のための機器仕様を選定、超音波式風向風速計を用いて風を、GPS 波浪観測用ブイを用いて波を測定することとした。

測定対象地は実際に水上設置型 PV が利用されているため池とし、池の大きさすなわち吹走距離を基準に選定することとした。1カ所当たり 1 週間、台風等により風が強くなる時期にため池の実地調査を行う予定とした。また、参考として 1カ所のみ洋上の波風調査も行うこととし、潮汐変動があるため対象期間を 15 日の昼夜の測定の計画を立案した。

### ③水上設置型 PV の連結浮体の動揺を踏まえた係留張力特性把握

水上設置型 PV の係留索には余裕長があり、強風等荒天時においてアイランド全体が変形・移動すると、係留索が弛んだ状態から緊張状態になる時点で衝撃的な張力が発生するとともに、特定の係留索に張力が集中することが予想される。本事業では、この現象を水理実験と数値解析により再現する。フロート群の形状変化と係留張力の偏りに関する水理実験については、日本大学理工学部の平面水槽を用いて予備実験を行った(図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-5 参照)。予備実験では S=1/4 スケール(フルードの相似則)のフロート模型に対して規則波を入射させ、波浪単独作用時のフロートに作用する水平波力およびフロート端部の動揺(傾斜)を確認した。予備実験で確認したフロート群の動揺(ローリング(x 軸回転運動)、ヒービング(z 軸並進運動))特性、フロート端部の動揺・めくれあがり現象の有無、浮体幅と波長の関係を踏まえ、2022 年度に実施する本実験計画の立案を行った。数値解析については、動揺解析モデルの手法検討を実施した。フロート間接合モデルの検討、作用外力の考慮方法等については、有識者ヒアリングを行った。

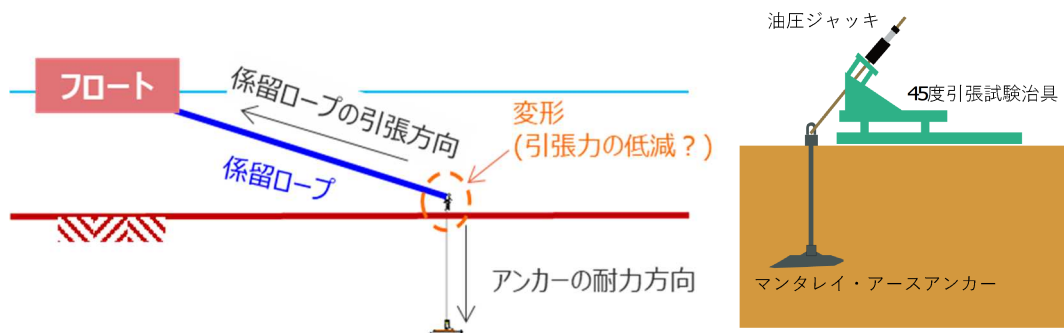


図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-5 水理実験の概要

### ④水上設置型 PV の水中アンカーの载荷試験

水上設置型 PV の水中アンカーの既往被災においては打込式アンカーが引抜かれたことによりフロート群(アイランド)が散乱した事例があり、アンカーに作用する外力が設計値を超過したか、あるいは、アンカー打込み角度(耐力方向)に対する係留索の引張方向が傾斜したことによる耐力低下が要因と想定される。本事業では、アンカーの打込み角度(耐力方向)に対して水平力が発生する場合のアンカーの耐力低下特性について把握するために、引張試験を行い、耐力低下状況を計測する(図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-6 参照)。

現地試験に先立ち、「①水上設置型 PV の設備形態の実態調査」の結果をもとに、現状の設計手法、引張耐力試験手法の課題を整理した。代表的な施設について潜水調査を実施し、アンカー頭部および周辺地盤の状況確認を行った。また、現地での引張試験計画の立案を行った。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-6 水中アンカーの载荷試験の概要

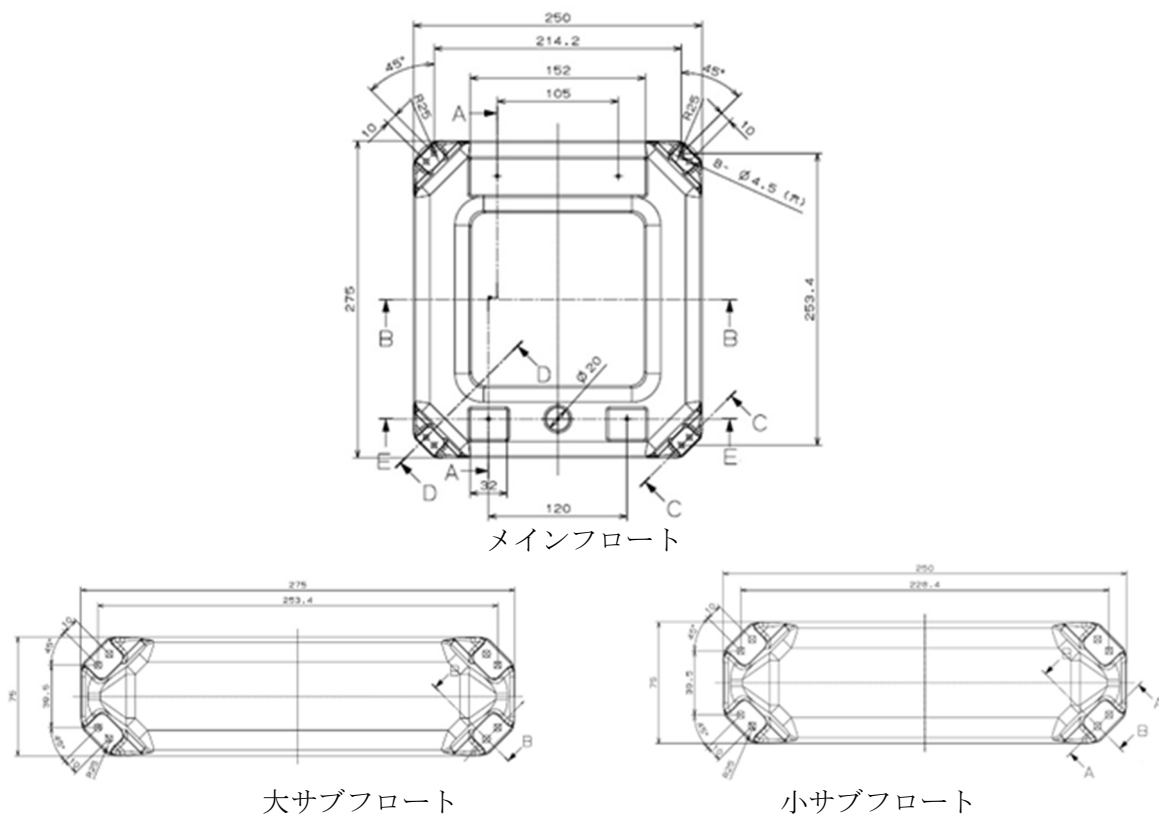
⑤水上設置型 PV のフロートの強度や性能評価方法の検討

本事業では、水上設置型 PV フロートに外力が印加された場合を想定した際の評価方法を検討している。2021 年度は接合部やフロートに用いられる素材について、基礎試験による機械強度データの測定及び確認を行った。その後 CAE にてフロート間を接続するボルトに引張荷重を与えるモデルを作成し、解析を施したが計算が収束しなかった。接続部周辺は複数の部材で構成されており設定パラメータに不備があることがこの要因であると思われるため、一定量の変化が生じるまで実物に引張荷重を与え、当試験結果を参照しながら解析条件や材料モデルを調整し整合性を取る必要があることが判明した。

⑥水上設置型 PV のフロートへの荷重検討のための風水洞実験

本事業では、水上設置型 PV フロートへは風と波による外力が与えられると想定される。これらの外力により生じるフロートの挙動及びフロート間接続部の荷重予測を行うため、評価用ミニチュアモデルを用いた風水洞実験を実施し、その結果をガイドラインに反映させる。

2021 年度は風水洞試験及び予備実験に用いるミニチュアモデルの設計を行った。同モデルのフロート部は実物の 1/4 スケールとしブロー成形にて作成する。フロートはメインフロート、大サブフロート及び小サブフロートの 3 種で構成され、試験では波風の流れる方向にメインフロートを 5 列、波風と直行する方向に同フロートを 3 列接続することとした (図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-7 参照)。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-F-7 水上設置型 PV のフロートへの荷重検討のためのフロートの概要

## 2. 実用化・事業化見通し

2022 年度末に実証実験の結果について、NEDO の他事業で実施している傾斜地設置型、営農型、水上型ガイドラインの策定プロジェクトに提供することで、ガイドラインに成果を反映、公開する。

## 3. 波及効果

太陽光発電設備の事故は増加傾向にある。将来的に増加が期待される各導入分野への設計・施工ガイドラインを策定、広く普及啓発することで、事故低減の貢献が期待される。また、地域共生の課題が健在化しており、太陽光発電の導入拡大に向けた国民の受容性が低下している。地域共生の要因の一つとして、これら安全性の問題があるため、本成果が受容性の向上に貢献できる。

## 4. 今後の展開

2021 年に公開した各ガイドラインは、『発電用太陽電池設備に関する技術基準を定める省令（令和 3 年経済産業省令第 29 号）』の逐条解説に、設計・施工の技術的内容をできるだけ具体的に示した技術資料として規定された。同様に 2022 年度末に公開予定のガイドラインについても同様に法令との関連持つことで実効性が高まることが期待される。

公開後は、各事業者においてさまざまな講演会、セミナーなどを通じてガイドラインの普及啓発活動を継続していく。

## 5. 特許・論文・対外発表

該当なし。

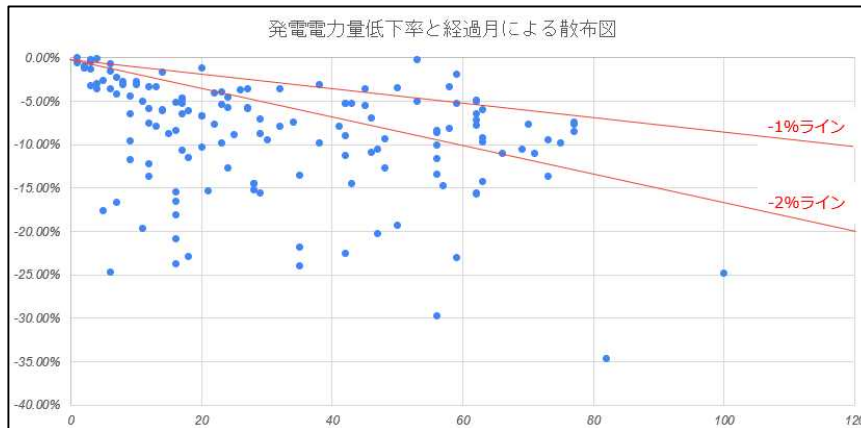
(2022 年 6 月 20 日現在)

G 次世代のO&Mを支える発電電力量評価等の技術開発（株式会社エナジービジョン、一般社団法人新エネルギーO&M協議会）

1. 成果詳細

(1) 発電電力量解析の高度化と阻害要因推定

- a. 新規に入手した発電電力量データを中心に 147 発電所の解析を行い（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G-1 参照）、推定される阻害要因候補を切出し、分類を作成した（表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G-1 参照）。



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G-1 発電効率の12ヶ月平均による解析結果の集計（発電低下の実態）

- ・横軸 遠隔監視システム計測開始からの経過月数
- ・縦軸 12ヶ月移動平均解析による年換算低下率

表Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G-1 解析結果から推定した発電阻害要因（1発電所につき最大3種を推定）

推定阻害要因1		推定阻害要因2		推定阻害要因3	
影（構内）	21	影（構内）	24	影（構内）	0
影（構外）	14	影（構外）	16	影（構外）	2
パネル汚れ	2	パネル汚れ	6	パネル汚れ	6
積雪	7	積雪	4	積雪	0
運転上の変動	4	運転上の変動	0	運転上の変動	0
故障・事故	15	故障・事故	4	故障・事故	1
その他	0	その他	0	その他	0
合計	63	合計	54	合計	9

- b. 年内に、上記の発電所のうちから、発電事業者の協力が得られる、データに特徴がある等の視点で選定した 25 発電所を対象に、推定した阻害要因の妥当性を検証する調査を行う。
- c. 上記 a と並行して、阻害要因影響パターンの基礎情報収集のため、次の取組みを行っている。
- (a) 2 発電所をモデルに詳細データの検討や新たな解析の試行
  - (b) 遠隔により、パネルの電氣的データを毎日 24 時に自動計測（2022 年 3 月 15 日から開始）
- (2) 遠隔での日常監視業務の自動化
- a. 現在人が行っている遠隔監視システムによる日常監視と同水準以上のアラート（短期的変状の恐れのある発電状況の低下）を効率的に把握すべく、同システムからデータを取得し、判定とアラート表示までを自動で行う RPA を 11 機種設定した（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G-2 参照）。
- b. 上記について、人による日常監視対比で見逃しが無いことおよび業務効率化効果を実証するため、6 月 6 日から 78 発電所を対象に毎週水・木に平行実施を開始している。



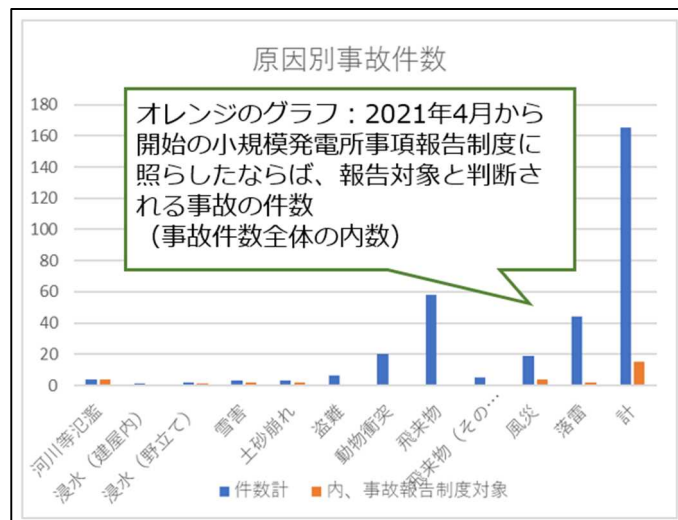
ID	発電所名	年月日	時刻	総発電量	PCS1電力(kWh)	PCS2電力(kWh)	PCS3電力(kWh)	PCS4電力(kWh)	PCS5電力(kWh)
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/12	12時	87.1	16.43	17.95	17.45	17.47	17.8
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/12	12時	87.1	91.50%	100.00%	97.20%	97.30%	99.20%
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/12	13時	50.98	12.95	9.66	9.39	9.45	9.54
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/12	13時	50.98	100.00%	74.60%	72.50%	73.00%	73.70%
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/14	10時	10.03	1.16	2.07	2.74	2.01	2.05
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/14	10時	10.03	42.30%	75.50%	100.00%	73.40%	74.80%
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/15	12時	111.85	22.62	22.66	22.02	22.15	22.4
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/15	12時	111.85	100.00%	100.00%	97.20%	97.70%	98.90%
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/17	12時	74.71	15.59	15.21	15.24	15.24	15.42
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/5/17	12時	74.71	100.00%	100.00%	97.60%	97.80%	98.90%
1	南房総市珠師ヶ谷								31.2
1	南房総市珠師ヶ谷								90%
1	南房総市珠師ヶ谷								9.19
1	南房総市珠師ヶ谷								80%
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/05/20	12時	92.22	17.43	19	18.47	18.51	18.81
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/05/20	12時	92.22	91.70%	100.00%	97.20%	97.40%	99.00%
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/05/25	12時	183.74	38.34	36.46	36.28	36.33	36.32
1	南房総市珠師ヶ谷	2022/05/25	12時	183.74	100.00%	95.10%	94.60%	94.80%	94.70%

指定した時間の取得データをスプレッドシートへ書き込み、変状発生（しきい値で判定）にフラグを立てる

図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G-2 RPAにより自動作成するアラート判定表

(3) 新たな検査ガイド

- a. 既に作成した検査チェックシートを見直すとともに、その使い勝手を検証した。この検証を踏まえた改訂は、次項の評価テーブルの確定を待って行う。
- b. 土木・構造の専門家等の協力も得ながら、リスクコストベースの事故ハザード評価テーブルを作成中であり、骨格がほぼ固まった。今後、仮置きしている細目数値の確定を行い、年内に実運用版を作成する。
- c. 合せて、この評価の実際上の裏付けとなる補償制度の検討を進めている。
- d. その他、評価テーブル作成のため、次のような基礎データを作成・収集した。
  - (a) 当法人（一般社団法人新エネルギーO&M協議会）が運営する補償事業（動産総合保険）の引受・事故データ集計・分析（図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G-3 参照）
  - (b) 保証・故障対応等に関するパネルメーカーへのアンケートを実施（10社から回答を受領）
  - (c) 過去5年間の落雷数データによる市町村の5段階多発区分を作成



図Ⅲ-2-(ロ)-(i)-G-3 当法人が運営する補償事業（動産総合保険）事故の原因別集計（2017年2月～2022年3月の当法人による事故報告受けベース）

(4) 発電電力量解析／新検査・評価実施支援システム

本助成事業に先行して、2021年5月からエキスパートシステム※の開発を実施しており、現在、最終調整段階にある。

※既保有技術による発電電力量解析を実施するとともに、その解析時に参照する不具合・修繕等の履歴の作成を行う。新たな検査についても、試作版を元に検査チェックシートおよび評

価テーブルのフレームワークを構築している。

(注) 本システムは、本助成事業の枠外であるが、構築したプラットフォームを本研究で高度化する発電電力量解析および検査・評価等の搭載用に転用可能である。

## 2. 実用化・事業化見通し

### (1) 事業構成

本事業は、小規模の太陽光発電設備（50kW 未満）を主たる対象に、開発成果を「次世代型 O&M」として一体で事業化するものである。事業実施者である当法人およびエネルギービジョンが、それぞれ次のようなサービスを提供する。

#### (a) 当法人

①新検査の資格試験、検査結果の評価の管理

②補償事業の実施

#### (b) エネルギービジョン

①発電電力量解析・ハザード評価等システムの使用許諾

②次世代型 O&M サービスの提供、同サービスの他事業者への展開

### (2) 事業化見通し

a. 本助成事業による研究開発に着手してまだ 7 ヶ月であり、この成果そのものは今後であるが、先行的に開始した既保有の発電電力量解析の外販などを通し、本格的な事業化に関し、次のとおり好感触を得ている。

#### (a) 発電電力量解析を柱とした O&M の販売

2021 年秋から実施している WEB 営業（正味従事者 0.5 人工）の成果

・WEB 説明 47 者

・内、受注 20 者（82 発電所）

#### (b) 遠隔での日常監視業務の自動化

イ. RPA による自動化β版による試行を経て、プロセスのフリーズ等を改良したうえで、6 月 6 日から平行実施を行っているが、78 発電所を監視し、人による正味所要時間 60 分を 10 分へ削減できている。

ロ. 6 月に入り、エネルギービジョンから当法人会員の数社（O&M 事業者）へ案内したところ大変好評であり、近々では 3 社・65 発電所の実運用を受託する見込みである。

#### (c) 本年 4 月以降、発電電力量解析を含む当法人の取組に興味を持った 3 社が新規入会

#### b. 新検査・補償

年内の実施へ向け、開発が着実に進捗中。

## 3. 波及効果

### (1) 小規模発電所の長期の事業継続

a. 発電電力量解析により、発電の低下および阻害要因を把握することで、その回復および売電収入の維持に貢献する。

b. FIT 期間終了後の売電収入（年間 560～640 千円と想定）に鑑みると O&M 費用の削減が必須であり、発電電力量解析を中心とした次世代型 O&M により価格を半減\*する。

※エネルギービジョンの価格を元に計算

### (2) 小規模発電所の事故による国民経済上の損失の減少

新検査に基づき、費用対効果を踏まえた実際的な回復提案により、小規模発電所が回復すれば、周辺住民の不安感を和らげる信頼性の向上とともに、自然災害等の外来事故の防止に資する。

【大手損害保険会社の引受姿勢の厳格化に鑑みて推算した損害額改善効果】

①小規模発電設備の蓄積資産規模 15 百万円/個所×620 千個所=9.3 兆円

②外来事故による損害額 9.3 兆円×保険料率水準 4‰×損害率 150%（仮定）  
=損害額 558 億円

③保険会社の予定損害額 9.3 兆円×保険料率水準 4‰×予定損害率 60%=損害額 223 億円

④③の水準まで損害率が改善するとして、減少する損害額 ②-③=335 億円

### (3) アフターマーケットの確立

発電の低下を防止するプラスの効果と価格を半減する次世代型 O&M により、小規模発電所向けの O&M が普及すれば、保守点検の担い手にとって、発電所の新設の減少を補う大きなマーケットになる。

#### 【小規模発電所の O&M マーケット】

・ 2020 年度のマーケット開拓率（出力ベース） 3.2%<sup>Ⅲ-1</sup>

・ 次世代型 O&M の普及によるマーケット規模

O&M 平均単価 91 千円×620 千個所×開拓率 60%=338 億円/年

#### (4) 発電電力量解析・ハザード評価等システム

このシステムにより発電電力量解析の平易な実施および新検査の評価の統一・管理を担うことで、上記の(1)から(3)を推進する。

#### 4. 今後の展開

これまで同様に、計画に沿って着実な研究開発から事業化を進めていく。

発電電力量解析は、上記 2(2) a (a) に記した実績から窺えるように、発電事業者へ説明ができれば受注にいたる確度が非常に高い。ただし、1 件単価が低く営業に掛けられるコストが限られるので、どのように発電事業者へ情報を届けるのかが鍵になる。そのためには、本事業の成果を安価に他の O&M 事業者へ開放して、次世代型 O&M の普及を図るのが得策と思料する。

#### 5. 特許・論文・対外発表

該当なし。

(2022 年 6 月 20 日現在)

#### 【参考文献】

Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-1 2020 年 7 月「2020 年版 太陽電池関連技術・市場の現状と将来展望」  
株式会社富士経済 P. 155 を元に当法人で推算

(ii) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

【A 太陽電池モジュールの低温熱分解法によるリサイクル技術開発】(株式会社トクヤマ)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
太陽電池モジュールの低温熱分解法によるリサイクル技術開発	【2021年度中間目標】 分解処理コスト 3 円/W以下の技術の確立	3.76 円/W(10,8000 枚/年)の結果が得られた。	○	
	【2021年度中間目標】 部材として再利用可能な状態で資源回収率 80%以上。	セル、リボン、端子BOXが有価販売できることを確認した。	○	
	【2021年度中間目標】 太陽電池モジュール由来の回収物のマテリアル技術を開発する。	熱分解後のガラスが、板ガラスメーカーから実プラント評価レベルと評価を受けた。	○	

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

【B 結晶シリコン及びCIS太陽電池モジュールの低環境負荷マテリアルリサイクル技術実証】  
 (ソーラーフロンティア株式会社、宮崎県工業技術センター(再)、国立大学法人宮崎大学(再))

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
結晶シリコン及びCIS太陽電池モジュールの分離処理技術確立	【2021年度中間目標】 ・分離処理コスト3円/W以下 ・部材として再利用可能な状態で資源回収率80%以上	・結晶シリコンモジュールに対応したパネルセパレータプロセスを開発、CISと同等のEVA残渣を確認	○	
結晶シリコン及びCIS太陽電池モジュールを構成する全マテリアルの効率的回収及び清浄化技術確立	・太陽電池モジュール由来の回収物のマテリアルリサイクル技術を開発する	・効率的なシーケンシャルプロセスが可能なエッチング設備を開発 ・利材性の高い結晶シリコンマテリアル選別技術を開発 ・マーケットとプロセスコストを考慮したリサイクルプロセスにより92%のマテリアルリサイクル率見込みを確認	○	
結晶シリコン及びCIS太陽電池モジュールを構成する全マテリアルのリサイクル用途開発		・PVガラスを骨材としたコンクリートを開発、ASRの抑制とガラス内規制物質の溶出抑制を確認 ・アスファルト骨材としてPV構成樹脂を添加したアスファルトを試作評価、性能を確認	○	
カバーガラスの水平リサイクル及びリユースに対する用途開拓と、その実現のための清浄化技術及び品質評価技術の開発		・グラスファイバー用途に対し、セパレータ処理ガラスの有機物残留値および規制物質含有量が要求スペックを満たしていることを確認、買取価格を設定	○	
汎用性のあるフレーム分解技術開発		・多様なフレーム構造に対応し、カバーガラスを割らずに分解可能な設備を開発	○	
実証プラントにおける技術実証運転		・種々の結晶シリコンモジュールサンプルの入手ルートを開拓 ・導入設備の安定稼働を確認	○	

\*1 達成度

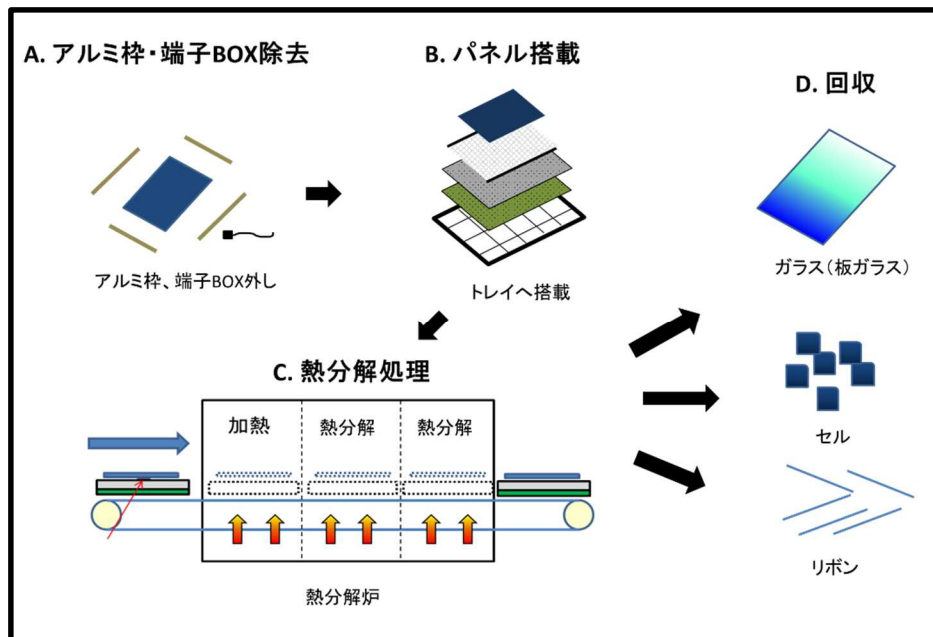
◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

## A 太陽電池モジュールの低温熱分解法によるリサイクル技術開発(株式会社トクヤマ)

### 1. 成果詳細

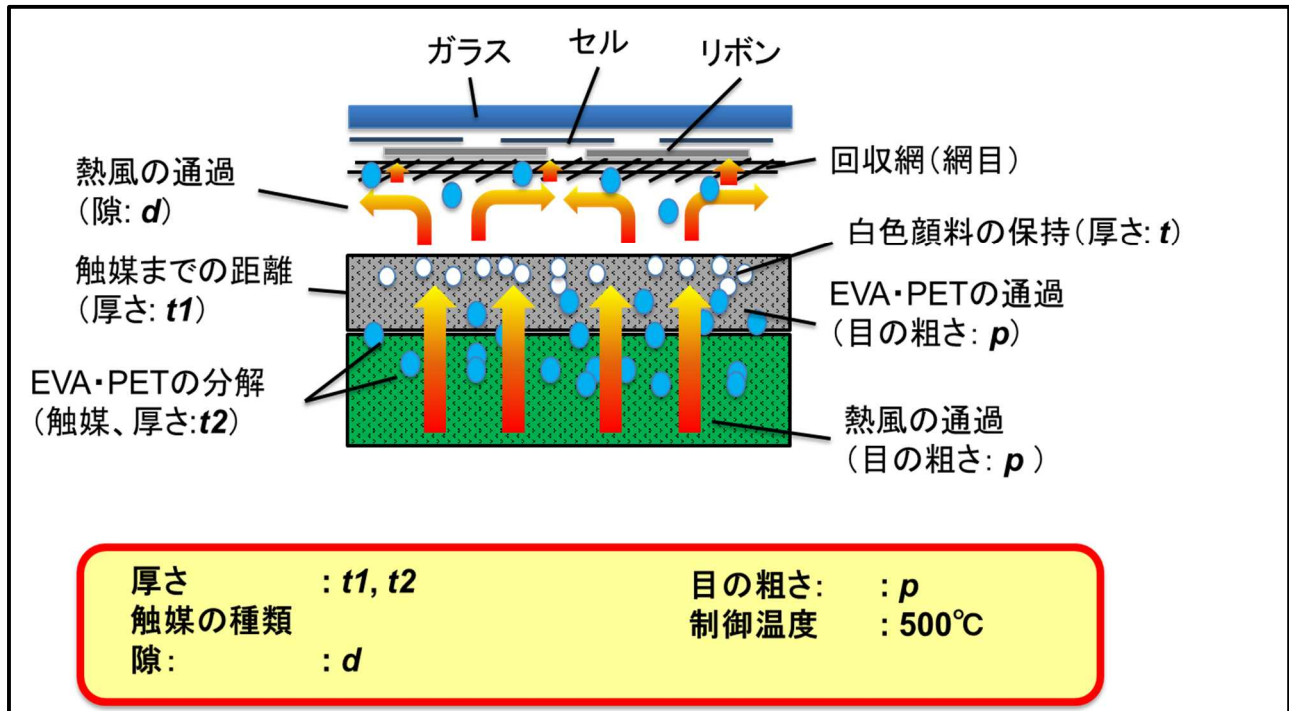
今回開発する処理プロセスの全体フローを図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-1に示す。

- A) 太陽電池モジュールからアルミ枠と端子ボックスを除去する。
- B) SUS製のフレーム内に触媒添着したセラミックフィルタ、セラミックフィルタを積載したセラミックフィルタトレイの上に、太陽電池モジュールを搭載する。
- C) 熱分解炉へ投入→加熱→熱分解→排出の工程にて熱分解を行う。
- D) 排出された太陽電池モジュールから、ガラスと、セル及びリボンを回収する。



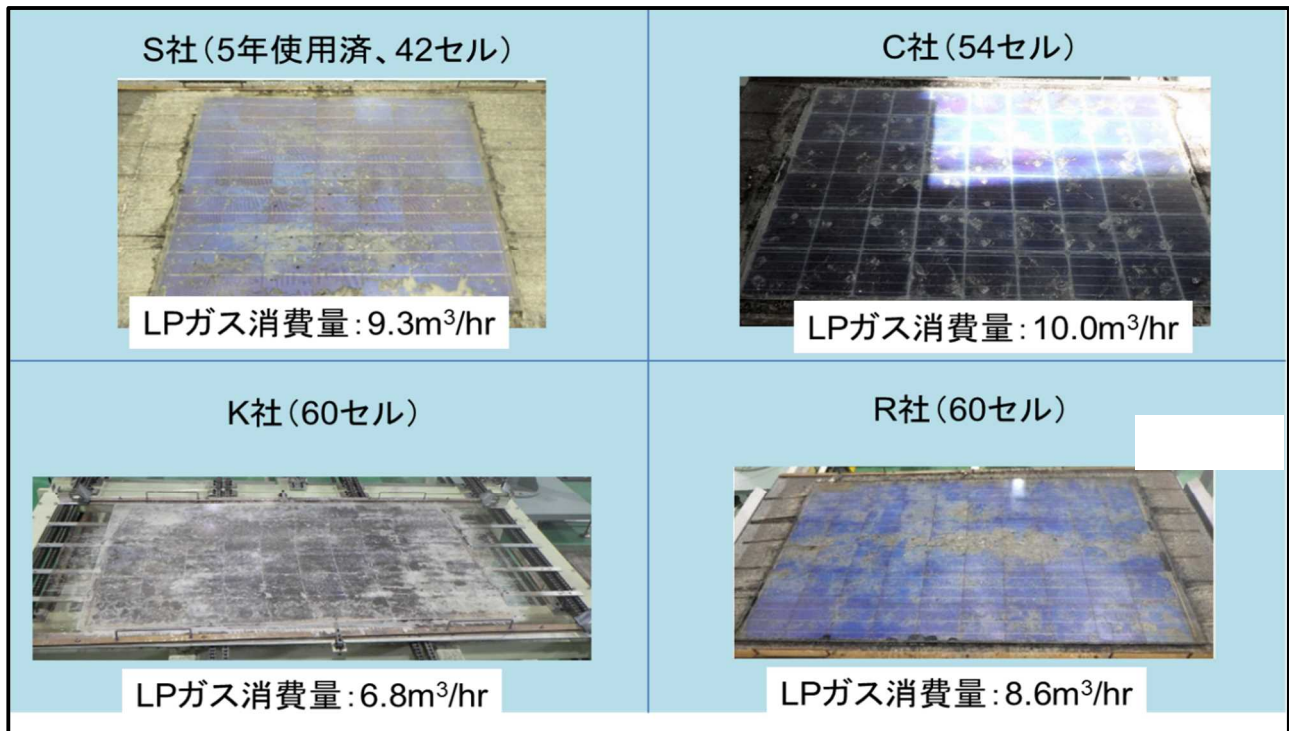
図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-1、太陽光モジュール処理フロー

① 分離技術の開発と最適化された触媒システムの開発



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-2、熱分解条件のパラネーター

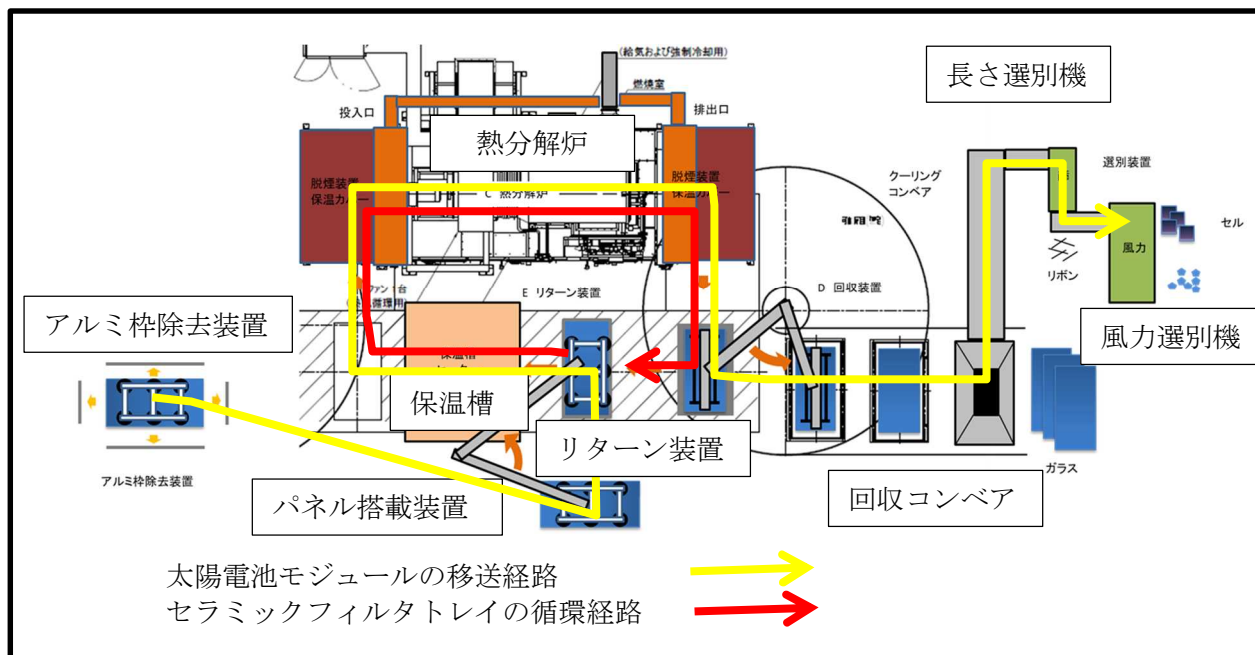
熱分解条件のパラメーターを図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-2に示す。各パラメーターの最適値をテスト評価により決定した。決定した数値を基に、4社の太陽電池モジュールの熱分解テストを行った。結果を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-3に示す。各社ともきれいな状態で処理することができた。また、熱分解炉では、樹脂の燃焼熱を他の太陽電池モジュールの熱分解へ活用している。結果、大きいパネルほどLPガスの消費量が抑えられており、大きいパネルは樹脂の量が多いため、その燃焼熱を有効利用できていることがわかる。



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-3、各社の太陽電モジュール処理結果

② リサイクル全体工程の開発

太陽電池モジュールのリサイクル全体工程を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-4に示す。また、各工程および装置について以降説明する。



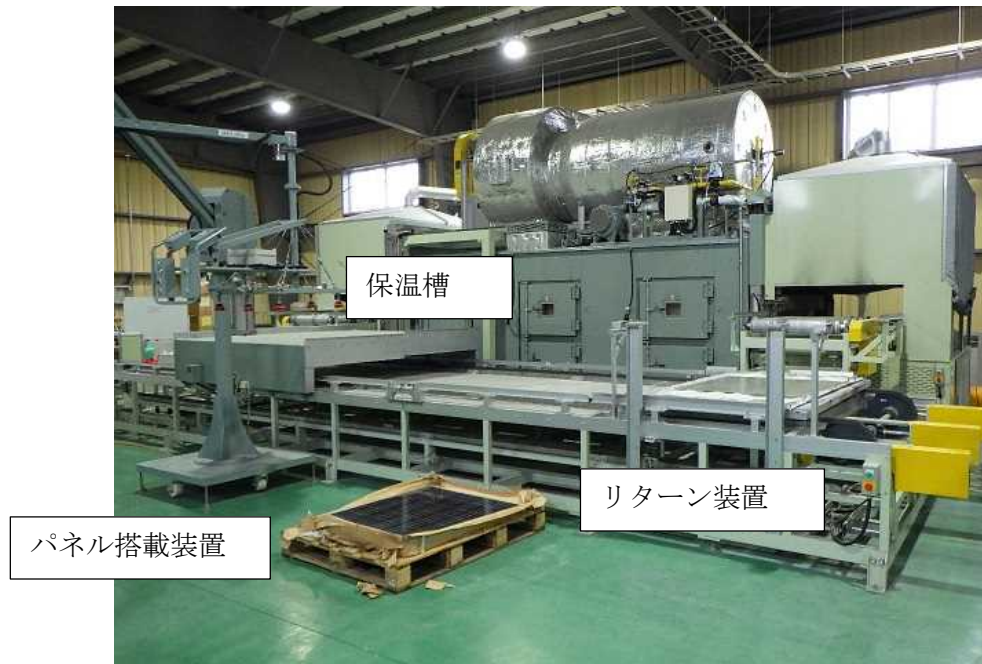
図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-4、リサイクル全体工程



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-5、アルミ枠除去装置

図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-5はアルミ枠除去装置で廃棄された太陽電池モジュールを装置にセット、起動することでアルミ枠と電源端子ボックスを自動的に除去する装置である。





図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-6、リターン装置、保温槽、パネル搭載装置

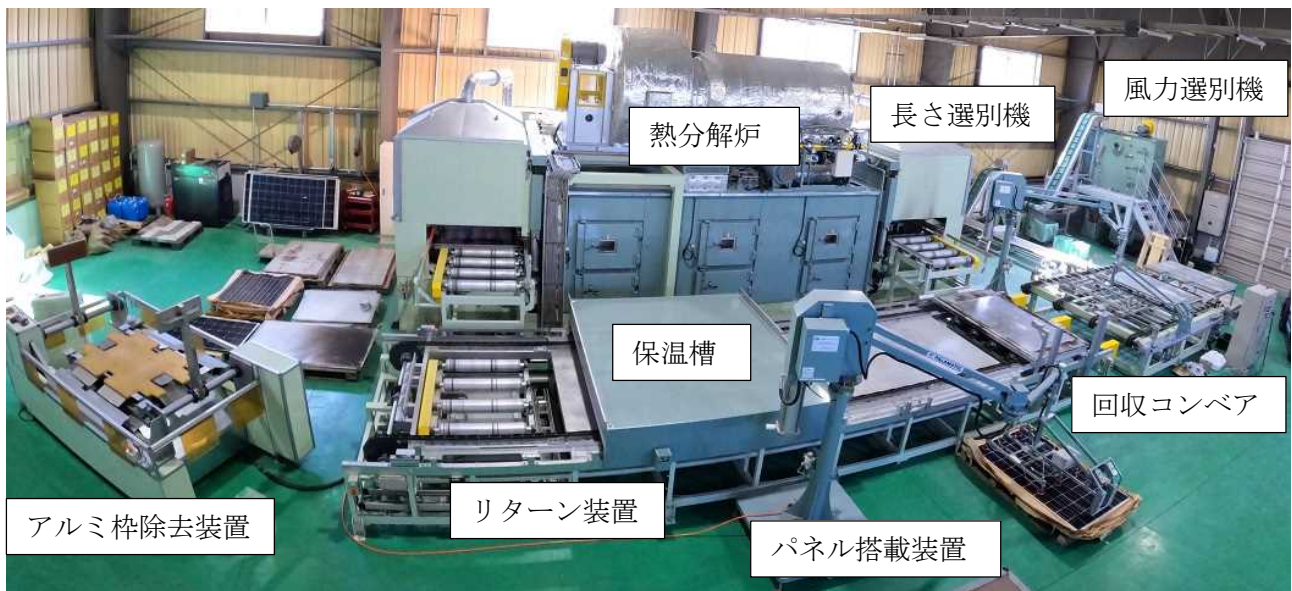
図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-6にリターン装置、保温槽、パネル搭載装置を示す。リターン装置は、太陽電池モジュールを搭載するセラミックフィルタトレイを太陽電池モジュール搭載⇒熱分解⇒回収⇒太陽電池モジュール搭載の各工程に循環・搬送させる装置である。

パネル搭載装置はエアのバキュームにより太陽電池モジュールを簡単に移載補助することができ、人の操作でセラミックフィルタトレイに搭載する。さらに循環するセラミックフィルタトレイは高温状態であるため、熱ロスを低減させるために、保温槽で待機させておく。



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-7、回収コンベア、パネル回収装置、長さ選別機、風力選別機

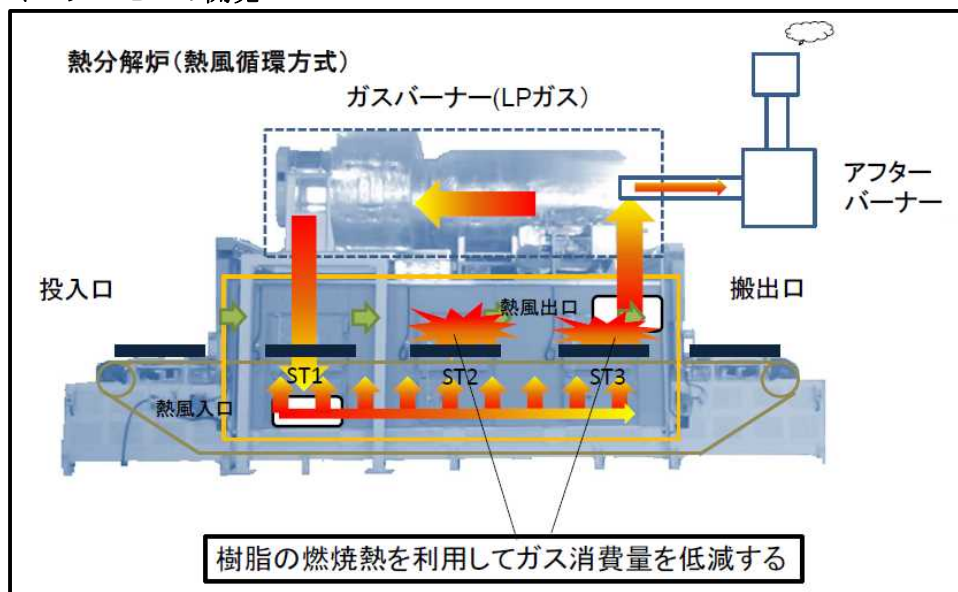
図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-7に回収コンベア、パネル回収装置、長さ選別機、風力選別機を示す。熱分解後にパネル回収装置にて回収し、回収コンベアで移送後に、板ガラスとそれ以外のセル・リボン・破碎ガラスに分ける。セル・リボン・破碎ガラスはコンベアで移送されて、長さ選別機でリボンが選別され、セルと破碎ガラスは風力選別機で各々選別される。



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-8、リサイクル全体工程

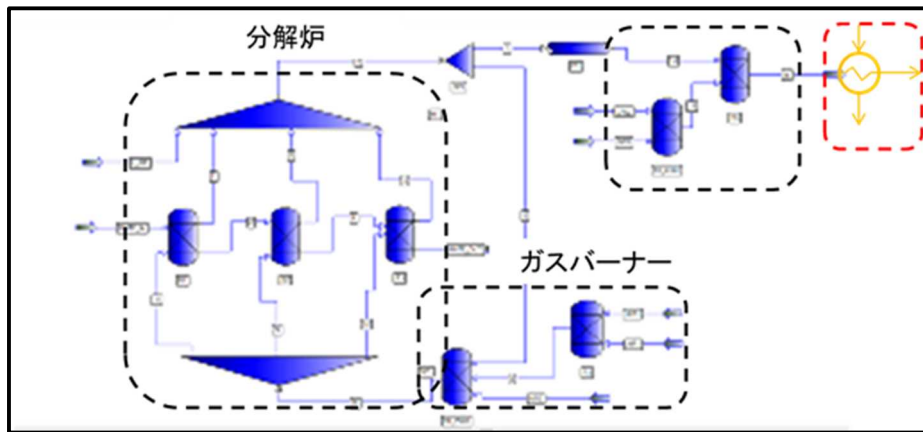
実際の全体工程写真を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-8に示す。現在は太陽電池モジュールの搭載、回収は人による作業であるが、2022年度末までには、すべて自動化し、投入～処理～回収までの人による作業工程をゼロにする予定である。

### ③ 省エネルギープロセスの開発

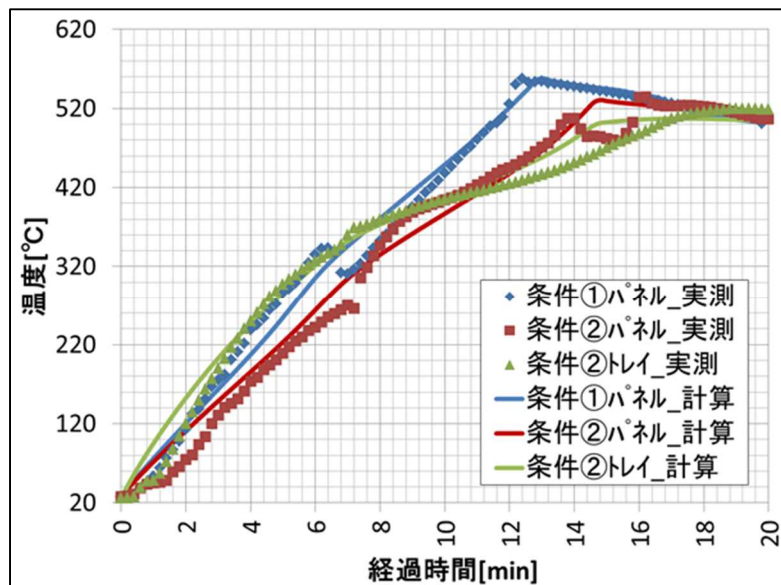


図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-9、熱分解炉の模式図

熱分解炉の模式図を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-9に示す。①で述べたように、樹脂の燃焼熱を利用してLPガスの消費量を低減する熱風循環炉である。その熱分解炉をモデル化した図を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-10に示す。シミュレーションすることで、各部での熱収支を机上で計算できるようになった。また、太陽電池モジュールの熱分解モデル式をたてて、熱分解の予測を行い、条件を変更しながら熱分解条件の効果予測ができるようになった。図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-11は条件を変えた太陽電池モジュールの熱分解時の温度変化を示し、その計算値(実線)と実測値(点)はよく再現できており、モデル式が有効であることを確認できた。



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-10、熱分解炉モデル

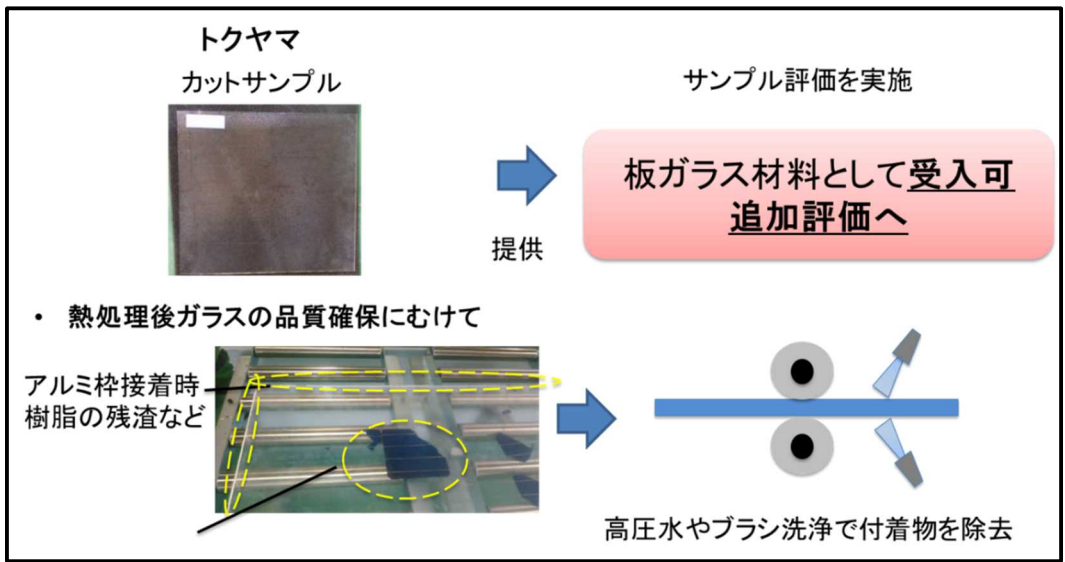


図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-11、モジュール分解状態のモデル化

#### ④ マテリアルリサイクルの開発

熱分解した後の各部材について、マテリアルリサイクルの評価を実施した。熱分解処理後のカットサンプルを板ガラスメーカーにて板ガラスのリサイクル材料としての品質評価を行った(図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-12)。結果としては、材料として受け入れ可能な品質であった。ただし、処理後には、セル破片やリボン、樹脂の残渣などが付着しており、それらを除く必要があるため、除去装置を今後導入して継続して評価を行っていく。

処理後のセル・リボンと端子 BOX を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-13 に示す。セルは含有する銀のリサイクル、リボンは銅、端子 BOX も銅へリサイクル可能であり、アルミ枠と合わせて排出される部材はすべてリサイクル可能であることを確認できた。



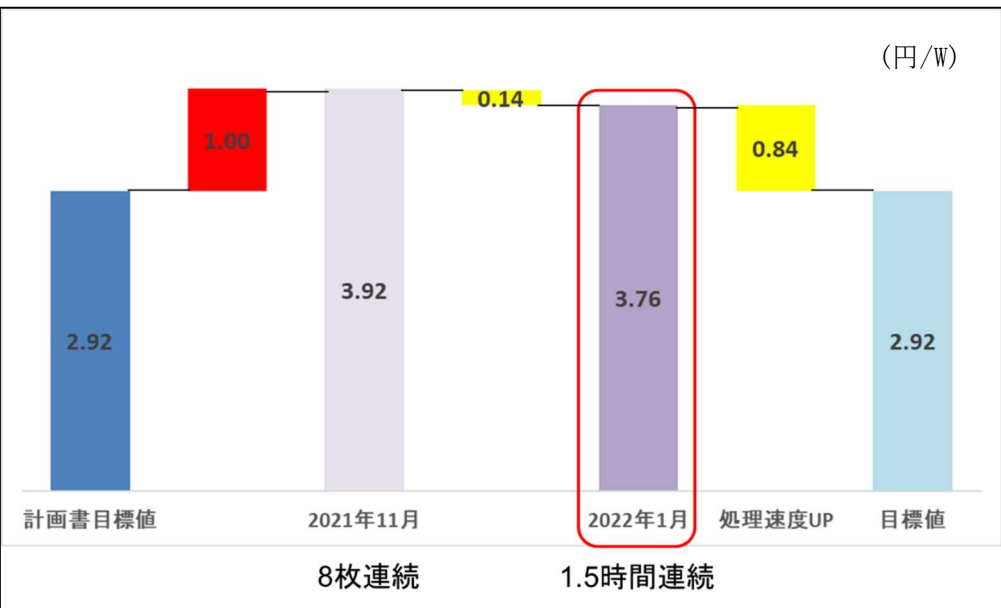
図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-12、板ガラス材料として評価



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-13、リサイクル処理後のセル・リボン・端子BOX

⑤ 実証プラントを構築し、連続運転で分離・マテリアルリサイクル技術の実証

現状完成している工程を用いて、1.5時間と3時間の連続運転を実施した。1.5時間運転では、処理速度を12枚/hrで実施し、処理コストは3.76円/W(108,000枚/年処理時)であった(図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-14)。3時間運転では、処理速度をさらに上げて15枚/hrで実施したが、ガラスに溶解した樹脂がわずかに見られるものがあったため、最適条件を再検証・確認しコスト精査する予定である。



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-A-14、1W当りの処理コスト推移

## 2. 実用化・事業化見通し

2022 年度中に 2 人作業可能な自動化設備導入、2023 年度に連続運転時の不具合等の問題点を解決し、研究開発を完了させる予定である。事業化には、産業廃棄物の中間処理業の許可が必要であり、北海道空知総合振興局へ相談を開始した。2022 年度に太陽電池パネル置場を建設し、2023 年度にガラスやアルミ枠等の有価物置場を建設し、2024 年度に中間処理業の許可申請を行い、2025 年度に事業化開始の予定である。

## 3. 波及効果

金属酸化物を利用した低温熱分解技術は、まだ少ししか事業化されていない。そのため、今回開発した技術が事業化できれば、焼却に変わる低温熱分解処理技術としてCO<sub>2</sub>削減技術として他の分野での応用も期待される。また、太陽電池で使用したガラスを太陽電池へ戻すという技術実現の可能性が大きく高まる。

## 4. 今後の展開

今月中旬から東京に営業担当を配置し、事業化に向けた調査を本格的に開始した。太陽電池の廃棄モジュールは、国内だけでなく、海外でも今後増大する。中国上海やドイツ等への展開を考えている。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内／国際)	1 (1／0)	2 (2／0)	0 (0／0)	3 (3／0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	1 (0)	0 (0)	1 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(1)	(0)	(1)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

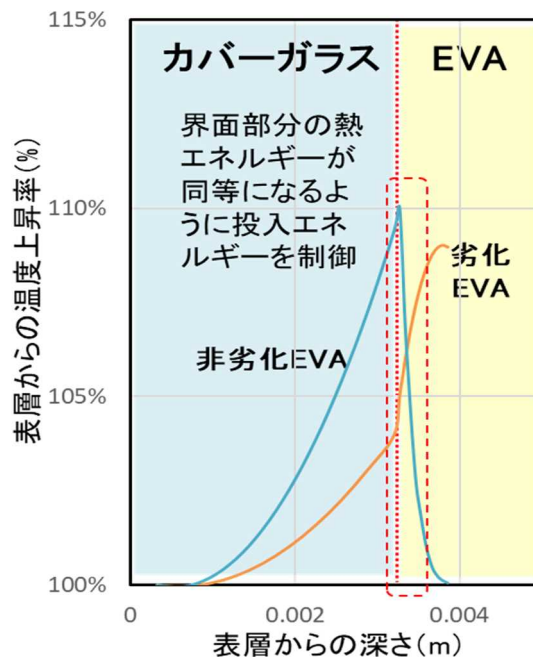
B 結晶シリコン及び CIS 太陽電池モジュールの低環境負荷マテリアルリサイクル技術実証  
 (ソーラーフロンティア株式会社、宮崎県工業技術センター (再)、国立大学法人宮崎大学(再))

1. 成果詳細

1-1. 結晶シリコン及び CIS 太陽電池モジュールの分離処理技術確立

結晶シリコンモジュールは CIS 太陽電池モジュール特有の合せガラス構造では無いことから CIS 用に調整したパネルセパレータプロセスでは分離不具合が発生していた。このため結晶シリコンに対応したブレードセッティング及び印加温度条件の適正化により CIS と同等レベルの EVA 残渣を実現した。

また EVA の劣化度合いにより封止材残渣が異なる挙動を示したことから、劣化 EVA に対するパネルセパレータプロセスの最適化を検討した。パネルセパレータはカバーガラスと封止材である EVA 界面を赤外線により加熱することにより、密着性を制御することにより分離を行う。そのため、モジュール各構成部材の赤外線吸光度特性は重要であるが、カバーガラスが強化ガラスの為、非破壊にて分析することは困難である。そこで各マテリアルのバルク特性を用いて新品(非劣化)のモジュールとフィールドから回収した劣化したモジュールの吸光度特性のシミュレーションを行った結果を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-1 に示す。非劣化モジュールは、ガラス/EVA 界面にて選択的に赤外線を吸収していることにより界面温度が上昇するのに対し、劣化したモジュールは EVA の内部まで赤外線が侵入し、高温部分が内部にシフトしていることが分かる。また実モジュールにおける表面温度実測結果を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-2 に示す。同一エネルギーを印加してもモジュールの表面と裏面に温度差が見られ、シミュレーション結果をサポートしている。そこで投入エネルギーを制御し、表層部分に熱エネルギーをとどまらせることにより剥離性の向上と EVA の内部崩壊の抑制が可能となり、劣化したモジュールにおいても良好な剥離特性を得られることが分かった。



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-1 モジュールの赤外線吸光度シミュレーション

	加熱中パネル表面温度		非劣化EVA 劣化EVA	
	パネル温度実測値(°C)			
	表面	背面	高温部	高温部
非劣化EVA	203	47	CG	
劣化EVA	192	45	EVA	高温部
温度差(°C)	+11	+2	Si	
			BS	

図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-2 実モジュールにおける表面温度実測結果

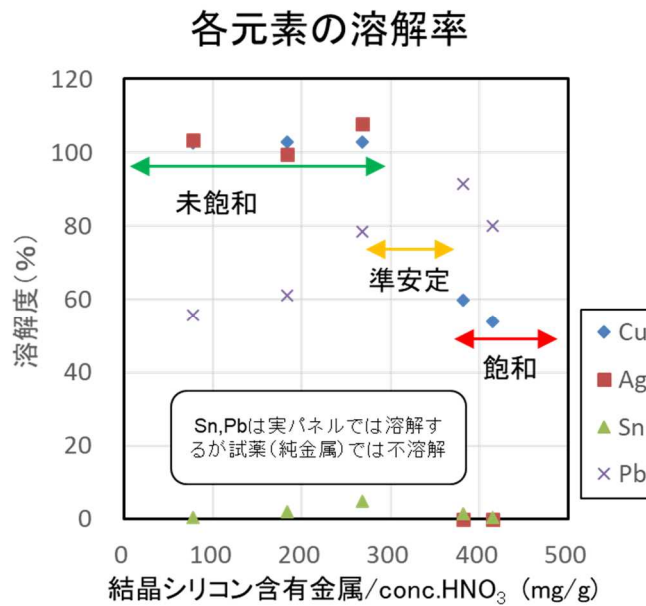
## 1-2. 結晶シリコン太陽電池モジュールを構成する全マテリアルの効率的回収及び清浄化技術

結晶シリコン太陽電池構成マテリアルの回収手段として、前プロジェクトにてCISにおいて開発した酸溶解回収方式を検討した。まずコスト因子として挙げられる酸溶解液の飽和濃度について調査を行った結果を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-3に示す。結晶シリコン太陽電池構成マテリアルもCISと同様、約30%から40%構成金属の溶解を確認した。これは200MWのリサイクル工場から排出される溶解液として1.5トン以下に相当し、回収した溶解液の運搬コストにおいても比較的リーズナブルであることが分かった。

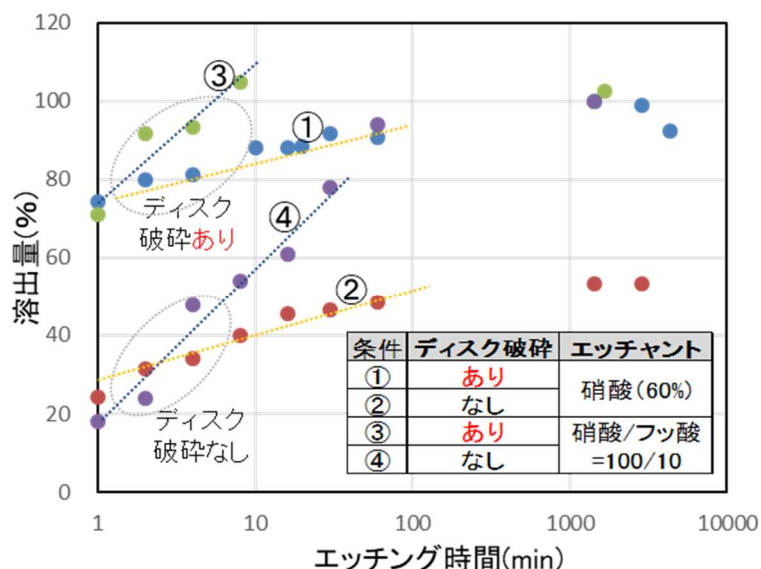
次に同じくコスト因子として結晶シリコン中で最も有価性の高いマテリアルである銀(Ag)の溶解速度の検討を行った結果を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-4に示す。横軸はエッチング時間、縦軸はワーク内全てのAgに対する溶出比率であり、ワークの破碎方式としてディスク型破碎機の追加効果を、またエッチャントとして、硝酸に10%フッ酸を添加した効果について調査を行った。

破碎方式に注目するとディスク型破碎を行うことにより初期のエッチングの立ち上がり(溶出量における切片値)が高比率であること、またフッ酸を添加することにより溶出量が急峻(エッチング速度が高速)であることがわかった。

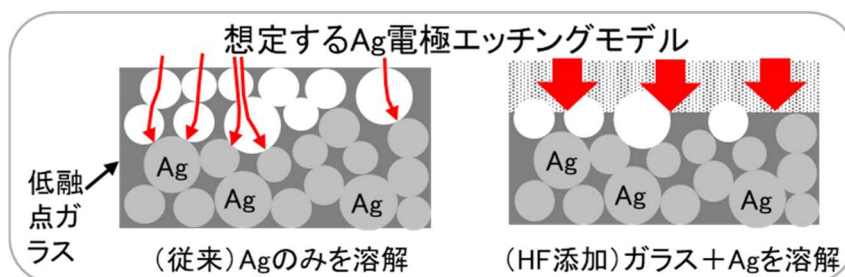
この要因としてディスク型破碎は、ワークである低融点ガラス内のAgに対し、ディスク破碎により露出面積が増加すること、またフッ酸添加効果は、図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-5に示すように低融点ガラスをAgと同時にエッチングすることで、エッチングが拡散律速反応系から反応律速系に移行したためと考えられる。これらの結果、図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-4に示すように、エッチングは5分という短時間にてワーク内の全てのAgの抽出が可能であり、コストの抑制とマテリアル収率に大きく寄与することがわかる。



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-3 結晶シリコン太陽電池構成マテリアルに対する酸溶解液の飽和濃度



図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-4 Agの溶解速度に対する破碎方式およびフッ酸添加効果



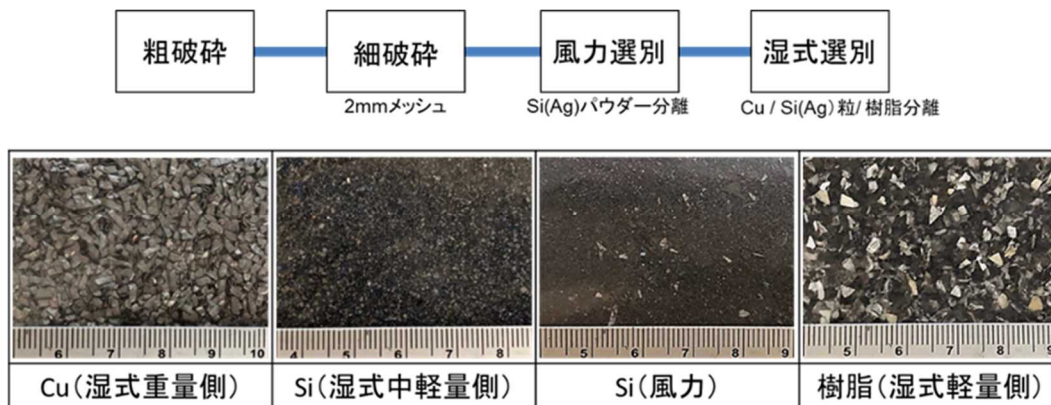
図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-5 結晶シリコン太陽電池含有Agのエッチング特性

一方、現状の市場に適合したマテリアル採取方式の検討も行った。酸溶解した状態のマテリアル採取は収率の点で有効であるが、独自の方式であることから、回収コストおよび精錬コストの増大を招くことが懸念される。そのため一般に流通している固体(粉体)状態での回収を検討した。

開発した回収フローを図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-6に示す。Siセルシートを2段階の破碎により、各マテリアルに分離し、分離されたマテリアルの性状に対応した選別シーケンスとして、粉体になった軽量部分のSiパウダーの選別を風力選別、粒状態のSiとバスバー電極(主としてCu)、封止材およびバックシートの混合物を湿式選別機にて分離した。それぞれのマテリアルに対する回収比率と品位を表Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-1に示す。分離されたCu電極およびSi中の有機成分は、Cu電極中においては測定限界以下であり、粒状態のSiには1%弱、パウダー状態のSiには約30%であり、精錬業者により高い有価性の評価を得た(結果はコスト試算結果にフィードバック)。

またSiセルシート内のAgの存在分布は樹脂中に5%以下の含有量となっており、Siセルシート中の95%の銀が回収可能である。





図III-2-(ロ)-(ii)-B-6 Siセルシートからの固体マテリアル回収フロー

表III-2-(ロ)-(ii)-B-1 開発したセルシートからの固体マテリアル回収法における回収比率と品位  
分離されたマテリアルの組成

	分離されたマテリアルの組成							各産物中の品位		
	回収比率	Si	Ag	Cu	Pb	有機物	Ag/Si	産物名	着目成分	品位
Cu電極	18.6%	0.0%	0.0%	95.6%	1.8%	0.0%	-	Cu電極	Cu	96%
Si粒	23.4%	92.2%	1.5%	1.0%	0.5%	0.8%	1.7%	Si粒	Ag	1.54%
Siパウダー	22.6%	60.4%	2.6%	0.2%	0.8%	30.3%	4.4%	Siパウダー	Ag	2.61%
樹脂	35.4%	12.2%	0.2%	0.0%	0.1%	84.7%	1.2%			

### 1-3. 結晶シリコン及びCIS太陽電池モジュールを構成する全マテリアルのリサイクル用途開発

リサイクル用途の開発に対しマテリアルの組成を知ること、リサイクルフローの設計に対してそれらの層構造を知ることが重要である。そのため我々は市場から回収したモジュールの受け入れ検査として、カバーガラスに対してはXRFにより分析確認し、樹脂組成構造に関しては顕微ラマンによる分析確認手法を開発した。

前者に関しては規制物質としてヒ素、鉛、アンチモンの含有を確認した。入手したモジュールに対する使用実績を表III-2-(ロ)-(ii)-B-2に示す。ヒ素、鉛含有ガラスは約30%に適用されており、アンチモンに関しては全てのガラスから確認された。

一方、後者に関しては、封止材としてはEVAとオレフィンの2種類であるが、バックシートに関しては、複雑な層構造を持つことが判明している。代表例を表III-2-(ロ)-(ii)-B-3に示す。またこの手法により、入手したモジュールを分析し、特に分離が必要であるハロゲン化物をバックシートに採用している例を表III-2-(ロ)-(ii)-B-4に示す。ハロゲン化物を用いたバックシートは約30%に適用(調査14メーカー28種中8種)を確認し、海外製品に適用例が多いことが判明した。

表Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-2 結晶シリコンモジュールカバーガラス中の規制物質含有状況

	メーカー	型格	含有規制物質(ppm)				メーカー	型格	含有規制物質(ppm)		
			As	Pb	Sb				As	Pb	Sb
1	A社(国内)	A-1	10	6	1,962	15	E社(国内)	E-1	26	12	2,363
2		A-2	ND	ND	2,645	16	F社(国内)	F-1	ND	15	3,710
3		A-3	ND	10	2,621	17	G社(海外)	G-1	36	21	2,331
4		A-4	ND	ND	2,602	18	H社(海外)	H-1	ND	ND	2,000
5		A-5	ND	ND	2,732	19		H-2	ND	ND	2,000
6		A-6	ND	ND	2,549	20		H-3	23	11	1,871
7	B社(国内)	B-1	53	6	1,918	21	I社(海外)	I-1	ND	ND	2,036
8		B-2	ND	ND	1,925	22		I-2	ND	ND	2,079
9		B-3	ND	ND	2,634	23	J社(海外)	J-1	ND	ND	2,019
10	C-1	ND	ND	2,156	24	J-2		ND	ND	2,073	
11	C社(国内)	C-2	ND	ND	2,562	25	K社(海外)	K-1	42	ND	2,373
12		C-3	ND	ND	1,849	26	L社(海外)	L-1	ND	6	1,695
13		C-4	ND	ND	2,631	27	M社(海外)	M-1	8	ND	1,962
14	D社(国内)	D-5	ND	ND	1,816	28	N社(海外)	N-1	ND	ND	2,564

カバーガラス内規制物質		
As	Pb	Sb
7/28=25%	8/28=29%	全数=100%

表Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-3 バックシートおよび封止材構造の代表例

BSおよび封止材構造(代表例)  
(N社 海外) (A社 国内)

層構造/組成			膜厚 (um)	層構造/組成			膜厚 (um)
1	PVDF+TiO <sub>2</sub>		16	1	PET+TiO <sub>2</sub>		42
2	DAI		10	2	PET		213
3	PET+TiO <sub>2</sub>		13				
4	DAI		10				
5	PET		196	3	EVA		402
6	DAI		13				
7	PE		51				
8	EVA		373				

	メーカー	型格	BS材料		メーカー	型格	BS材料
1	A社(国内)	A-1	PET	15	E社(国内)	E-1	PE
2		A-2	PET	16	F社(国内)	F-1	PET
3		A-3	PET	17	G社(海外)	G-1	PVDF
4		A-4	PET	18	H社(海外)	H-1	PVDF
5		A-5	PET	19		H-2	PVDF
6		A-6	PET	20		H-3	PVDF
7	B社(国内)	B-1	PET	21	I社(海外)	I-1	PE
8		B-2	PET	22		I-2	PVDF
9		B-3	PET	23	J社(海外)	J-1	PVDF
10	C社(国内)	C-1	PET	24		J-2	PVDF
11		C-2	PET	25	K社(海外)	K-1	PE
12		C-3	PET	26	L社(海外)	L-1	PET
13		C-4	PET	27	M社(海外)	M-1	PET
14	D社(国内)	D-5	PET	28	N社(海外)	N-1	PVDF

※PVDF:ポリフッ化ビニリデン

表Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-4 結晶シリコンモジュールバックシート中のハロゲン物質使用状況

それらのマテリアルに対し、1-1 項に示した分離技術を施し、開発した用途と現時点におけるマテリアルリサイクル率を表Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-5 に示す。リサイクル物の市場規模と回収物の商流、汎用性としてプロセスコストを考慮した結果、ガラスに関してグラスファイバー用途とコンクリート用途にて94%、樹脂に関してはコンクリート用途とアスファルト用途にて93%、金属および半導体に関しては精錬用途として89%の用途をそれぞれ確認した。

一方ハロゲン化合物および銀を回収した後のシリコン結晶に関しては現時点で用途先が不明であり、引き続き用途を検討中である。

これらを総合してマテリアルリサイクル率は92%と目標を大きく上回る成果を達成することが可能となった。

表Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-5 マテリアルリサイクル率と用途

マテリアル	リサイクル率(*1)	マテリアル	用途	リサイクル形態	回収プロセス
ガラス	94%	カバーガラス(As,Pb含む)	グラスファイバー	水平リサイクル	パネルセパレータ ガラスプラスト
		基板ガラス	コンクリート	カスケードリサイクル	
樹脂	93%	ガラス+樹脂			アスファルト
		EVA PET			
		ハロゲン化合物(*2)	不明	廃棄	
金属	89%	Ag, Cu	汎用	精錬	エッチング フレーム解体
		CIS			
		アルミフレーム			
半導体		Si結晶	不明	廃棄	精錬業者にて廃棄
Total	92%				

(\*1)リサイクル率=用途先グレードへの選別効率/各マテリアル(重量比)

(\*2)プラスト投射材ガラスと混入した状態にて排出

#### 1-4. カバーガラスの水平リサイクル及びリユースに対する用途開拓とその実現のための品質評価技術の開発

カバーガラスの水平リサイクルの為にはそのニーズ開拓とそれに必要なガラスの清浄度、およびその評価技術が必要である。我々の独自技術であるパネルセパレータプロセスはカバーガラスに付着した封止材である EVA をガラス界面から剥がす特徴を持ち、後処理無しでガラスを水平リサイクルが可能となること、およびこの技術が結晶シリコンパネルにおいても適用可能であることは 1-1 項に示した。その際に開発した画像処理による 2 値化品質評価技術を図 III-2-(ロ)-(ii)-B-7 に示す。パネル種に依存しない残渣量が実現できていることが確認できると同時に、表 III-2-(ロ)-(ii)-B-5 に示す用途先において有機物残渣は最重要な管理項目であり、本技術により品質評価を適時行うことにより安定した水平リサイクル実現が可能になると考える。

またカバーガラスのリユース用途として、次世代施設園芸の検討を行った。国内の施設園芸ハウスにおいて、現在廃プラスチック抑制の観点から従来の塩ビに代えて 10 年間張替え不要のフッ素フィルムへの変換が促進されている。ただしフッ素フィルムは実売価格平米当たり 2500 円と非常に高価であり、さらにリサイクルが不可能であるといった懸念がある。そこでカバーガラスのリユース検討を農業資材メーカーと共同で行った結果を表 III-2-(ロ)-(ii)-B-6 に示す。

屋根材料費は大きく抑制可能であるが、重量物を載せるため、各部強化する必要があり、トータルで 20% 弱のコスト上昇となる。ただし、張替え不要であることから長期的にはコストダウンに繋がり、今は顕在化していないフッ素フィルムのリサイクルを考慮すると有望であるとの回答を得た。



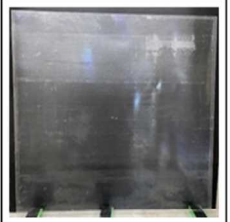

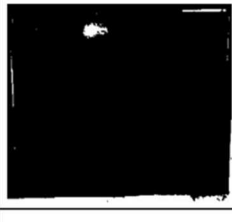

	CIS	結晶シリコンパネル(代表例)	
		C社	F社
カバーガラス 外観 (下地黒)			
画像解析 ※白色部: 残渣あり			
封止材 残渣率	0.3~6.0%	0.5%	4.7%

図 III-2-(ロ)-(ii)-B-7 パネルセパレータの品質評価技術

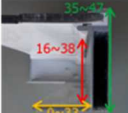

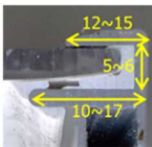
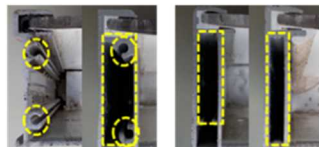
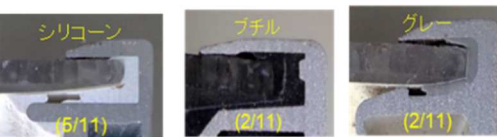
表 III-2-(ロ)-(ii)-B-6 カバーガラスの農業用ハウスへのリユース検討

#### 間口8m×2連棟×51m(816m<sup>2</sup>)ハウスの建築費試算

	リサイクル ガラス	フッ素 フィルム	備考
屋根材料	¥95,000	¥2,375,000	リサイクルガラスは 100円/m <sup>2</sup> にて試算
基礎工事	¥695,758	¥512,860	ガラス屋根対応による 各部フレーム強化
鉄骨工事	¥6,573,808	¥5,914,576	
外装工事	¥6,657,604	¥4,377,604	
施工費	¥4,252,000	¥3,328,000	
共通部分	¥8,591,978	¥8,496,978	
合計	¥26,771,148	¥22,630,018	18%のコストアップ

### 1-5. 汎用性のあるフレーム分解技術開発

市場から回収された各社結晶シリコンモジュールのフレーム構造を解析し、構造スペックを調査し、さらに破損および運搬時の歪みも考慮しながら、汎用性を持ちかつカバーガラスを割らないフレーム分解設備の検討を行った。調査したフレーム構造のスペックを図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-8に、またこれらすべての構造に対し、接合状態を整理し、カバーガラスを割らずに分解する観点から、大きく分けて2点、すなわち化学接合に対する対応として、加熱機構による熱可塑性接着樹脂の軟化作用。物理接合に対し、分解時に作用する力点と方向の最適化を行った。その結果ある程度のダメージを受けたモジュールも含めた極めて汎用性の高いフレーム分解設備を開発した。

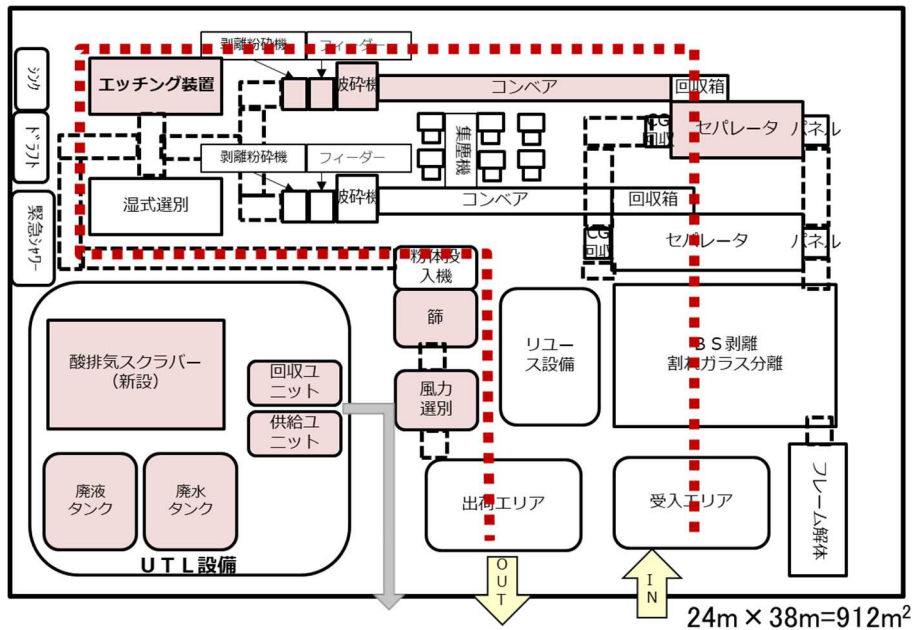
観点	分析項目		分析結果
水平解体 押し幅	① パネル距離	24.6~39.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・実効距離 ≒ 16~38mm</li> <li>・下つば内寸 ≒ 0~33mm</li> <li>・背板①長さ ≒ 35~47mm</li> <li>・下つばの長さ≒背板の枚数で3種類に大別</li> <li>・長辺と短辺で違う種類が組み合わさっている品種もある</li> </ul>  
	② 実効距離	15.6~37.8	
展開解体 つかみ幅	③ 下つば外寸	20.6~35.2	
	④ 下つば内寸	0.0~32.8	
その他寸法	⑤ 背板①長	34.9~46.5	
	⑥ 背板②長	32.0~39.4	
	⑦ 背板幅	6.9~33.6	
フレーム 密着強度	⑧ 加え込み高	4.9~6.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>・加え込み高さ ≒ 5~6mm</li> <li>・接着剤① : 5種類</li> <li>・ビス/L金具 : ビス有(7/11) L金具(4/11)</li> </ul>  
	⑨ 上つば長	12.2~14.9	
	⑩ 中つば長	9.7~17.4	
	⑪ 接着剤①	5種類	
	⑫ 接着剤②	3種類	
	⑬ ビス穴数	0~2	
フレーム コーナ強度	⑭ L金具高	27.1~33.3	
	⑮ L金具幅	3.9~6.9	

図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-8 結晶シリコンモジュールのフレーム構造調査結果

### 1-6. 実証プラントにおける技術実証運転

現在導入されている設備による実証プラントの状況を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-9に、稼働状況と処理実績を図Ⅲ-2-(ロ)-(ii)-B-10に示す。

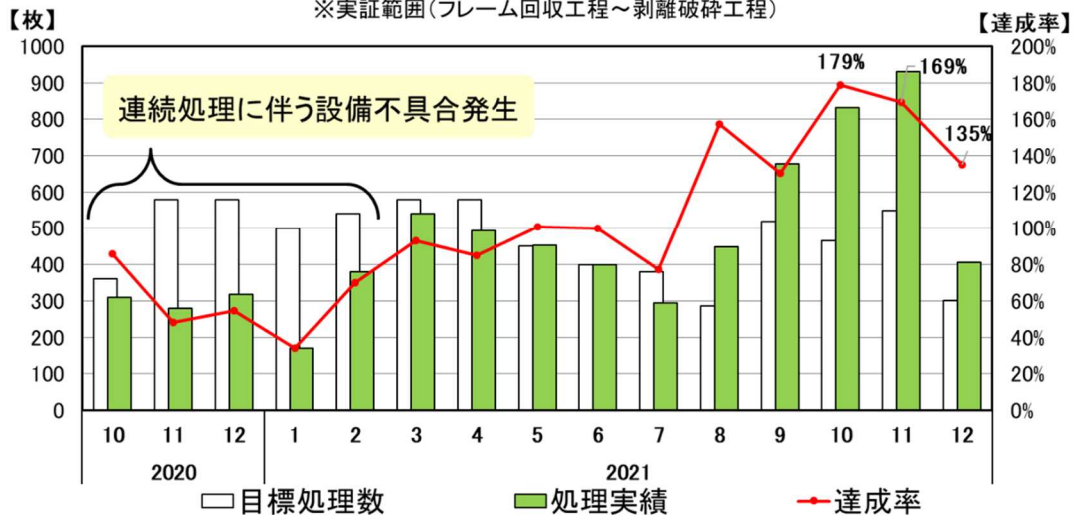
当初、設備立ち上げ後の連続処理運転において各部に不具合が発生していたが、設備の改良とプロセスのブラッシュアップを進め、8月以降は目標処理数を達成している。またその結果、実証開始2020/10月~2021/12月実績において CIS と結晶シリコンの合計で 6,929 枚、1,247.2 kW の処理を実施した。



図III-2-(ロ)-(ii)-B-9 実証プラントの設備状況

### 実証プラント処理実績

※実証範囲(フレーム回収工程～剥離破碎工程)



図III-2-(ロ)-(ii)-B-10 実証プラントの稼働状況

## 2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクト終了後の2023年から5年間は、災害によって破損した太陽電池や市場不良品が主なリサイクル対象となるため、5MW/年の規模を有するリサイクル処理設備の投資計画を検討中である。その後、小規模工場における運転ノウハウを元に市場回収品が大量に発生すると想定される2030年台に間に合うよう、数百MWスケールのリサイクル工場建設への投資を検討する。

## 3. 波及効果

本プロジェクトの成果は、結晶シリコンモジュールに対しても高い材料リサイクル率と経済合理性を両立できる可能性が確認された。その実現のために開発した弊社独自の方式は、その原理を解析することにより、技術を汎用化することでディファクトスタンダードな技術へと展開出来る見通しを得た。また、市販汎用設備のリサイクルプロセスへの応用においても同様、今後対象処理数の増加が見込まれる太陽光パネルリサイクル市場へ適用することで設備市場の活性化と同時に設備コストを抑制出来ることが予測される。

さらに、Siセルシートでの材料リサイクルに取り組み、その効率的な回収方式と構成する樹脂材料について用途を開拓したことから、従来精錬業者により燃焼していた方式からの転換による二酸化炭

素の排出抑制が可能となり、マテリアルリサイクルとカーボンニュートラルの両面から環境政策に寄与することが可能となる。

#### 4. 今後の展開

本技術が実証されることで、従来相反する関係にあったリサイクル率の向上とコストの抑制が両立でき、さらに市場性を考慮し複数のマテリアル回収方式の開発は、故障パネルの処理が中心の事業開始時点から出力低下に伴いリプレースされる大量のモジュール処理の時期に至るまで大きく工程を変更することなくシームレスな対応が可能となる。

当該技術は、自社としての取り組みに活用するばかりでなく、広く他の事業者への活用も含め推進していきたい。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内／国際)	7 (5/2)	6 (6/0)	0 (0/0)	13 (11/2)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	1 (0)	4 (0)	0 (0)	5 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(1)	(4)	(0)	(5)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	2	9	0	11
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	5	0	5
展示会への出展	0	1	1	2
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

(iii) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

【A 太陽光発電による調整力創出技術の実現可能性に関する研究】

(国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
太陽光発電による調整力創出技術の実現可能性に関する研究	【2020年度最終目標】 PVが自ら創出する調整力 を活用するための技術課題を抽出。	持続的なPV発電事の実現のため、 Headroom制御による電源価値向上に向けた フィジビリティスタディを行い技術的課題を抽出した。	○	

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

【B 多地点間における自己託送を活用した需給一体型太陽光発電システムの基本設計】

(日本電気株式会社、東京電力エナジーパートナー株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
多地点間における自己託送を活用した需給一体型太陽光発電システムの基本設計	【2020年度最終目標】 自己託送制度を活用した 需給一体型システムの上モデル検討	実証プランの策定と制度面における課題の確認ができた	○	

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達



【C 太陽光発電による調整力創出技術の実証研究】

(東芝エネルギーシステムズ株式会社、学校法人東京理科大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
太陽光発電による調整力創出技術の実証研究	<p>【2023年度最終目標】</p> <p>需給調整市場の応動・継続時間の要件（一次から三次調整力）に適合する計画技術・制御技術を備えたシステムを構築する。また、それらの成果については、調整力創出のための知見として詳細を幅広く公開する。</p>	<p>FREAのPVの実測データを利用して、日射強度のばらつきおよび回帰式の検討を行った。</p> <p>エネルギー価値および調整力価値と各市場を利用した最適計画アルゴリズムとして、線形計画法を用いて収益が最大となる計画の算出の検討、PVが大量導入されたとときの電力市場価格のシミュレーションモデルを更新、調整力確保時間帯の不足インバランスを極力減らすことが可能な制御方法の検討を実施した。Headroom制御の実システムへの実装技術の開発として、実システムを見据えたシステム構成を検討した。郡山のFREAの設備を拡張、複数地点のHeadroom制御可能なPCS制御、計測装置の導入として、郡山におけるPVおよび蓄電池の制御する装置の導入および仙台およびつくばに設置予定のPCSを制御するためのソフトについて一部の開発を行った。</p>	△	<p>「需給調整市場の応動・継続時間の要件に適合する計画技術・制御技術を備えたシステムを構築」の実現について、課題としては、実際のPVシステムによる実証実験になるがシステム構築、その実証実験に準備は順調に進んでおり、今年度末から来年度にかけて実施することで解決可能。</p> <p>また、本研究による調整力創出技術の有効性はオフラインシミュレーションも含めて検討していく。</p>

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達

## A 太陽光発電による調整力創出技術の実現可能性に関する研究 (国立研究開発法人産業技術総合研究所、一般財団法人電力中央研究所)

### 1. 成果詳細

(1) PVによる調整力創出の技術的可能性と電源価値評価

#### ① Headroomを利用した予測制御アルゴリズムの検討

PVによる調整力創出に必要な予測と制御手法について検討を行い、産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所に設置したPVシステムの発電データ、日射データ、衛星観測データからの推定日射データを利用して、単地点や複数地点におけるならし効果も考慮した予測、制御方法を模擬できるようにした。

Headroom制御を活用したユースケースについて検討を行った。現状では4つのユースケースが考えられる。

#### a. インバランス低減

- ・計画断面におけるユースケース。
- ・不足インバランスを低減するために、予測誤差を想定して低めに計画をする(計画時 $\Delta$ kW)。
- ・計画値による約定量の低下とインバランス(不足インバランスによるペナルティおよび余剰インバランスの増加による機会損失)がトレードオフ。
- ・計画のみであるため、リアルタイムのHeadroomは不要。

#### b. 需給調整市場調整力創出

- ・計画断面におけるユースケース。
- ・需給調整市場用にある程度確保して計画を行う。
- ・需給調整市場分に拠出するために確保するkWhと需給調整市場の価格がトレードオフ。
- ・需給調整市場分はHeadroom制御により常に確保しておく必要がある。
- ・需給調整市場を優先して、スポット(or 時間前)はインバランスとして処理。

#### c. 時間内変動抑制

- ・実需給断面におけるユースケース。
- ・30分の時間内変動の調整に利用。
- ・先にできるだけ出して、残りは抑制することでも実現できる。
- ・時間内変動のkW制約などがなければ利用しない。

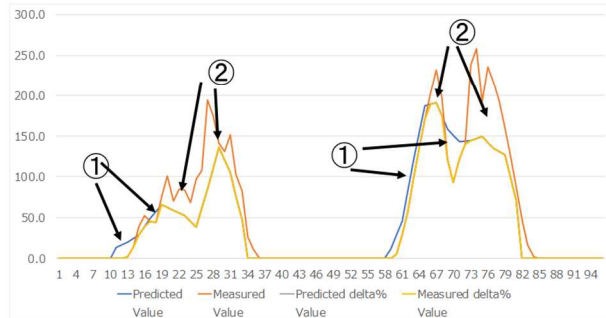
#### d. 自端制御による系統サポート

- ・実需給断面におけるユースケース。
- ・Headroom利用による自端制御
- ・Frequency-Watt(上下)
- ・慣性力提供 など

#### ②インバランス回避調整力の評価

インバランス回避調整力の評価として、前日スポット市場への売電計画と需給調整市場への調整力供出計画において、PV発電出力の予測誤差と時間内変動によるインバランスリスク低減のため、Headroom制御と蓄電池運用を想定したシミュレーションを行い、インバランス発生リスクを定量的に評価した。図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-1にインバランスゼロを想定した分析方法の概要を示す。分析結果を表Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-1に示す。市場価格や需給調整市場価格に依存するが、制御することによる経済性の優位性を示した。完全にインバランスをゼロにする制御した場合は、無制御の場合よりも18%の収益改善が見込まれる。その場合の計画値の $\Delta$ kWは年間で20%程度となった。

- ①不足インバランスゼロ：実測値<計画値 → 計画値を下げる
  - 実測値が計画値より不足しているケースは、計画値を実測値に合わせた計画（少な目に計画ΔkW）。
- ②余剰インバランスゼロ：実測値>計画値 → 実測値を下げる
  - 実測値が計画値より大きいケースは、抑制する。



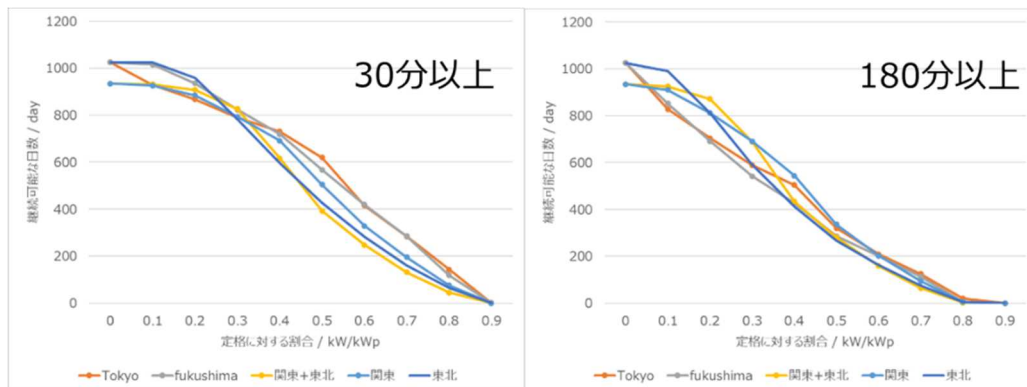
図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-1 インバランスゼロを想定した分析概要

表Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-1 インバランスゼロを想定した場合の効果

Predicted Value	Measured Value	計画値 [kWh/kW]	実測値 [kWh/kW]	計画値の ΔkWの平均 Value		BAU [万円]	調整後 [万円]	調整後 /BAU
1364	1154	899	899	20%		194	230	118%

### ③Headroom を利用した電源価値評価

短時間変動調整力の評価として、需給調整市場の要件を満たせるような持続時間等技術的に実現可能であるかについて評価を行った。図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-2 に 2.5 分データ、3 年間のデータを利用した結果を示す。需給調整市場の二次および三次調整力においても、0.5p.u(定格に対して 50%の kW)においても 3 割程度抛出が可能であることを示した。

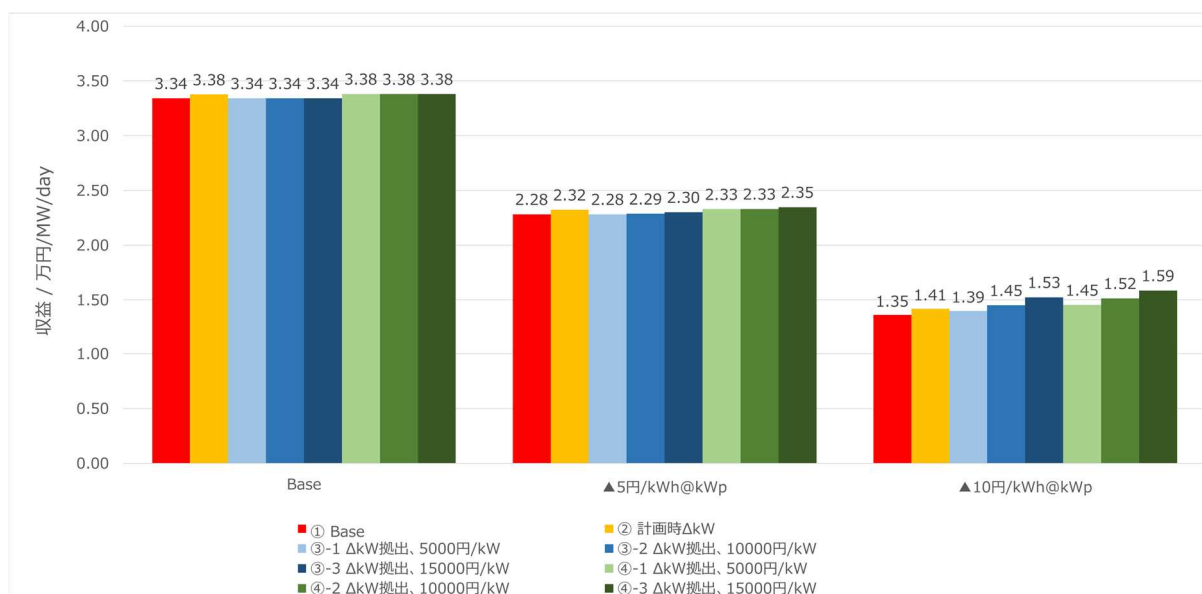


(a) 30 分以上の継続時間が確保できる日数 (b) 180 分以上の継続時間が確保できる日数

図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-2 持続時間の評価結果

### ④Headroom を利用した電源価値評価

インバランス回避調整力 (kWh 価値)、短時間変動調整力 (ΔkW 価値) について、複数のユースケースにより経済性の評価を行った。蓄電池を利用しない条件において、Headroom 制御のユースケース「インバランス低減」と「需給調整市場調整力創出」を組み合わせた検討として、市場価格や個別制御のみを想定したシナリオごとに、収益への影響について評価を行った。制御としては、日ごとの収益最大化を目的として、計画値および確保する Headroom を最適化計算した。計画時に低めに計画する ΔkW は予測値の%、需給調整用に確保する Headroom は、理想ケースを想定するため、実測がわかっている条件として、予測と実測がともにゼロにならない範囲で確保できる量とした。シナリオとしては、需給調整市場の金額設定および、スポット価格 (▲5 円/kWh、▲10 円/kWh、) の違いを考慮した。分析結果を図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-3 に示す。スポット価格の影響を強く受けるが、「インバランス低減」と「需給調整市場調整力創出」を組み合わせたケースそれぞれ最も良い結果なった。また、スポット価格が低くなるほどのその傾向が強くなることわかる。



産総研(福島県郡山市)250kWの発電データ1分値。

2017年04月01日-2018年03月31日(279日間)

調整量単価：5000円=1.7円/kW/kWh、10000円=3.4円/kW/kWh、15000円=5.1円/kW/kWh

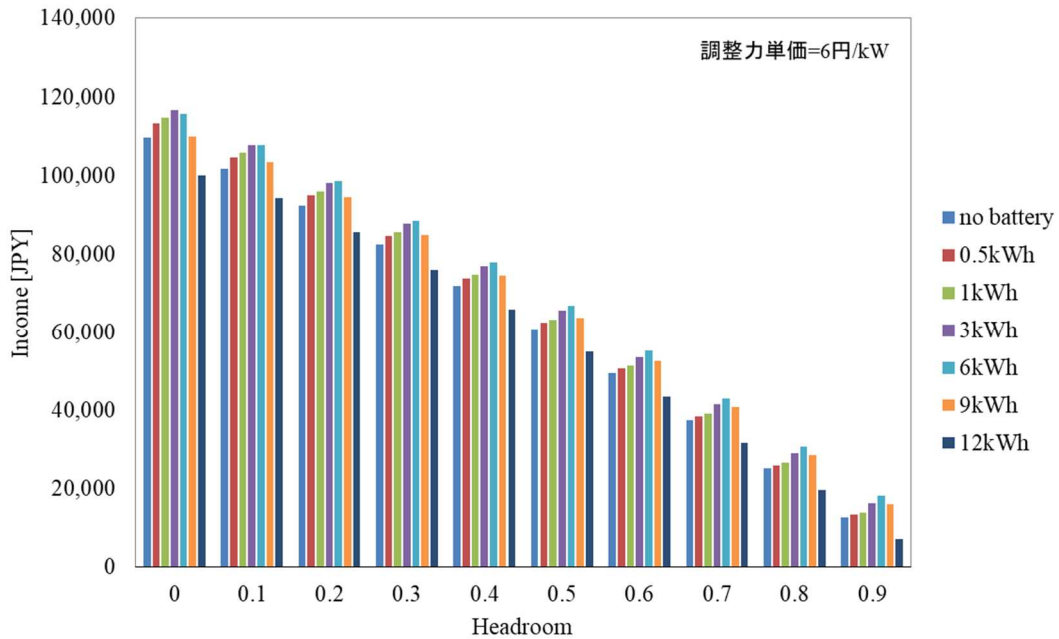
スポット価格：2017年度の東北エリアのデータ

PV出力のピーク時の価格を設定。出力に線形に価格が変化する簡易的なモデル

図III-2-(ロ)-(iii)-A-3 Headroomを利用した電源価値評価結果

また、蓄電池併設型PV発電所を対象に、インバランスリスク低減を行うためのHeadroom制御と蓄電池運用を検討した。Headroom割合 $h$ を予測値の0から9割まで1割ずつ増やし、調整力供出計画値割合 $r$ を予測値の0から1まで1割ずつ増やして、合計65通りのインバランス量と収益を求めた。蓄電池容量はPVシステム容量1kW(最大出力)に対して0.5kWh、1kWh、3kWh、6kWh、9kWh、12kWhの6パターンを設け、インバータ定格出力を1kW、変換効率を95%とした。

図III-2-(ロ)-(iii)-A-4は調整力単価を固定した際の蓄電池容量とHeadroom割合の変化による年間収入を示す。図III-2-(ロ)-(iii)-A-4より蓄電池容量3kWh又は6kWh導入の場合の年間収益が最高となり、12kWh導入場合の年間収益は蓄電池導入しない場合より低い結果となった。



発電データ：AMeDAS からの推定データ（東京）、PV 1kW を想定。

期間：2016 年 8 月 1 日～2017 年 7 月 31 日、5 分値

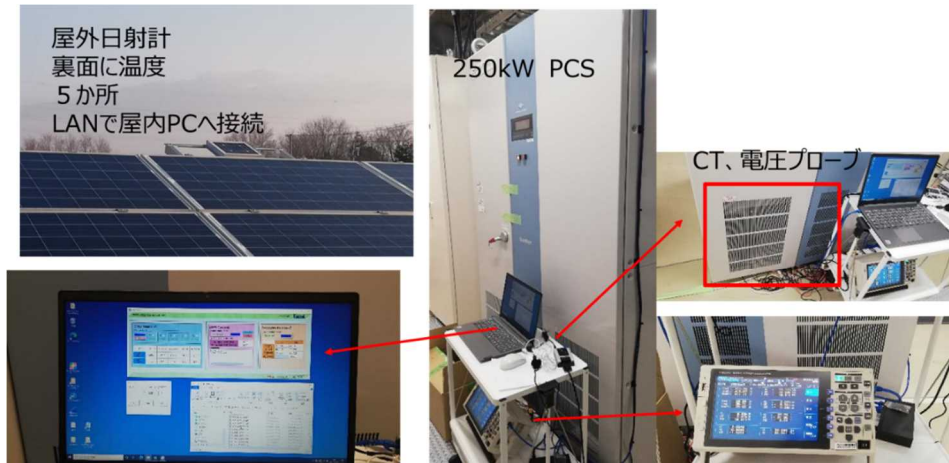
スポット価格：CAISO 推定モデルベース（2020 年東電スポット実績をベース）

図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-4 蓄電池容量と Headroom 割合の変化による 1kW あたりの年間収入（調整力単価 6 円/kW）

### ⑤実フィールドにおける基礎的な実験

実フィールドにおける基礎的な実験として、Headroom 制御について、実際の PV システムを利用した基礎的な実験を行った。産業技術総合研究所に設置している 250kW のシステムを利用して PV アレイに設置された太陽電池式日射計による日射データ収集装置、日射データを利用して期待発電電力を推定する装置、期待発電電力に対して確保する Headroom の比率により制御可能な PCS により構成し、実証データを収集した（図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-5 参照）。

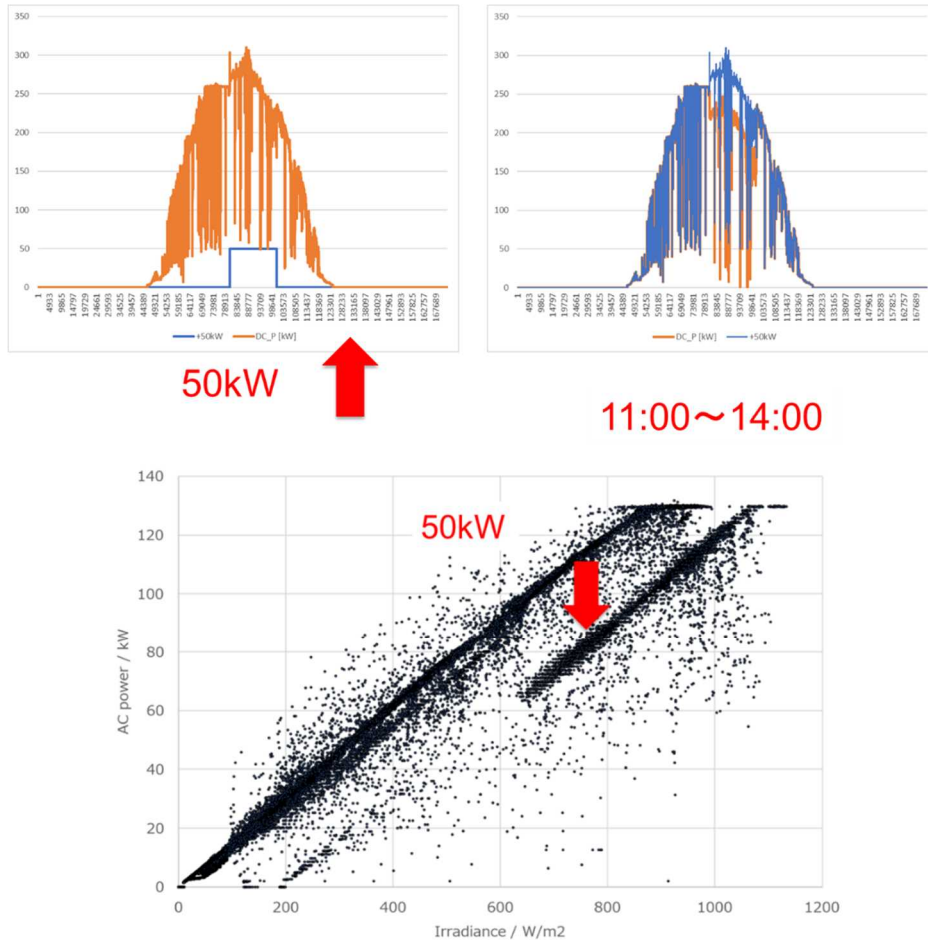
Headroom 指令を行ったデータの例を示す。ここでは、日射から期待発電の推定は簡易的な多項式とした。昼の 11～14 時に 50kW の Headroom を確保するような制御指令を行っている。図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-6 に示す通り、大きな変動をしているが 50kW を確保していることがわかる。また、日射と出力との相関図から特定の日射に対して 50kW オフセットして動作していることが確認できる。日射とのばらつきや期待発電電力の推定精度の確認は今後の課題である。



PCによる計測・制御

パワーメータ

図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-5 実証実験の各センサ、パワーコンディショナの外観



図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-6 50kW の Headroom を確保した実験データ例

(2) PV の期待発電電力リアルタイム推定技術の検討

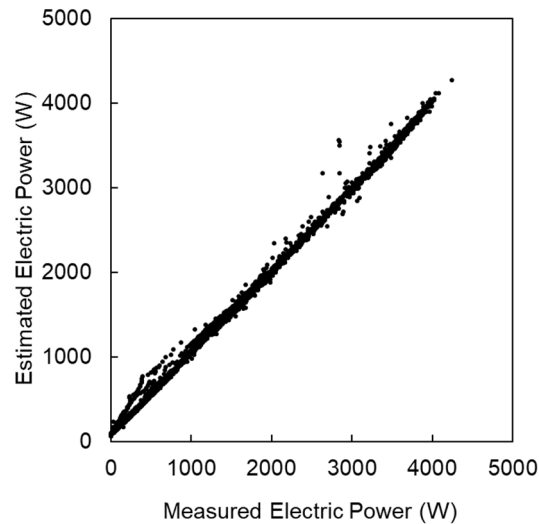
期待発電電力は、日射強度、PVセル温度、年劣化率、システム出力係数から算出することができる<sup>1)</sup>。以下に、PV システムの期待発電電力 ( $P_{MAX(AC)}$ ) の算出式を式Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-(1)に示す。

図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-7 に、電力中央研究所赤城試験センターに設置されている PV システムの実測 AC 発電電力と推定 AC 発電電力を示す。実測値と推定値が非常によく一致していることを示している。

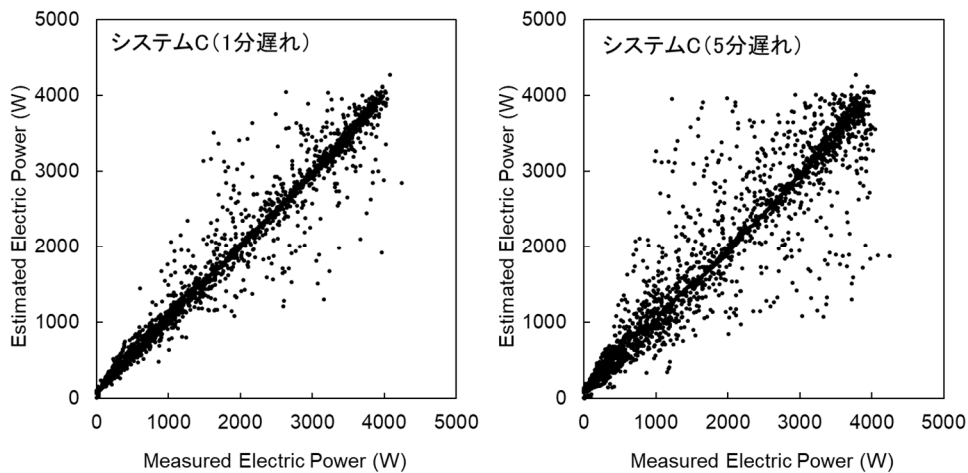
$$P_{MAX(AC)} = P_{MAX(STC)} \times \frac{G}{G_{STC}} \times \{1 + \gamma(T_M - T_{STC})\} \times \eta_{DC} \times \eta_{PCS} \times \eta_{VCT} \times \eta_{DEG} \times \eta_{AMB}$$

式Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-(1)

また、複数地点の気象データをリアルタイムで取得し、ヘッドルーム制御している PV システムそれぞれの上げ調整力を推定する際に、情報通信等の遅延により制御遅れが発生することが想定される。電力中央研究所赤城試験センターにて計測されている環境データから推定される期待発電電力を実測発電データから1分及び5分遅らせることにより、期待発電電力の推定誤差への影響を評価した。推定 AC 発電電力 (1分遅れ及び5分遅れ) と実測 AC 発電電力のピアソンの積率相関係数はそれぞれ 0.985 及び 0.954 であり、二乗平均平方根誤差はそれぞれ 237 及び 403 [W] であった。快晴日のような日射強度が安定している天候では、制御遅れによる推定誤差は小さくなる。しかし、日射強度が大きく変動する曇天日では、制御遅れによる推定誤差が大きくなる。売電価格が高くなる曇天日において十分な上げ調整力を確保するには、大きく出力抑制するか蓄電池を併用することが必要となると考えられる。



図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-7 PVシステムの推定及び実測 AC 発電電力の相関関係



図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-8 PVシステムCの推定 AC 発電電力と実測 AC 発電電力の相関関係  
(左：1分遅れ右、右：5分遅れ)

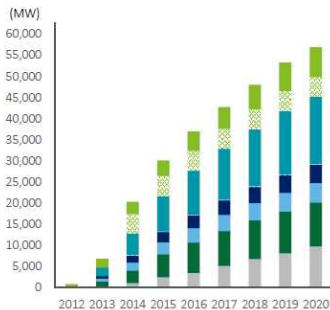
### (3) 将来的な需給一体型モデルの調査

地上設置型の FIT 終了の事業形態の調査や、人口減少とインフラ更新を加味した、分散電源として PV を利活用可能な需給一体モデルなどについてシステム形態や技術的な課題について分析を行った。

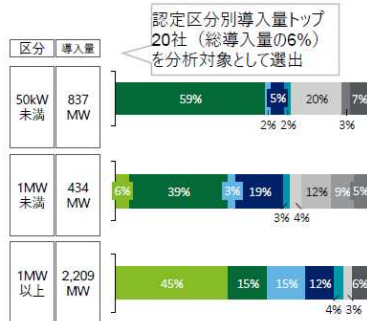
地上設置型 PV の導入量及び発電事業者のシェアについて整理、FIT 終了後の事業形態を推測した。調査方法のフローを図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-9 に示す。2040 年以降に FIT 切れ PV の大量発生や系統設備の更新に加え過疎地域の拡大が複合的に発生することが予想される。また、将来の PV の絵姿を図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-A-10 に示す。FIT 切れの発生とグリッド更新時期の到来を契機に過疎地域でオフグリッド化が進行することが想定される。

1-1 地上設置型PVの導入容量      1-2 発電事業者シェア      1-3 FIT終了後の事業形態

✓ 経済産業省が公開するFIT認定容量等から地上設置型PVの導入容量を整理した



✓ 経済産業省が公開する事業計画認定情報等を基に発電事業者の分類ごとに市場シェアを推計した



✓ 文献やWEB調査によりFIT終了後の事業形態を推測した



図 III-2-(ロ)-(iii)-A-9 地上設置型の FIT 終了後の事業形態の調査概要

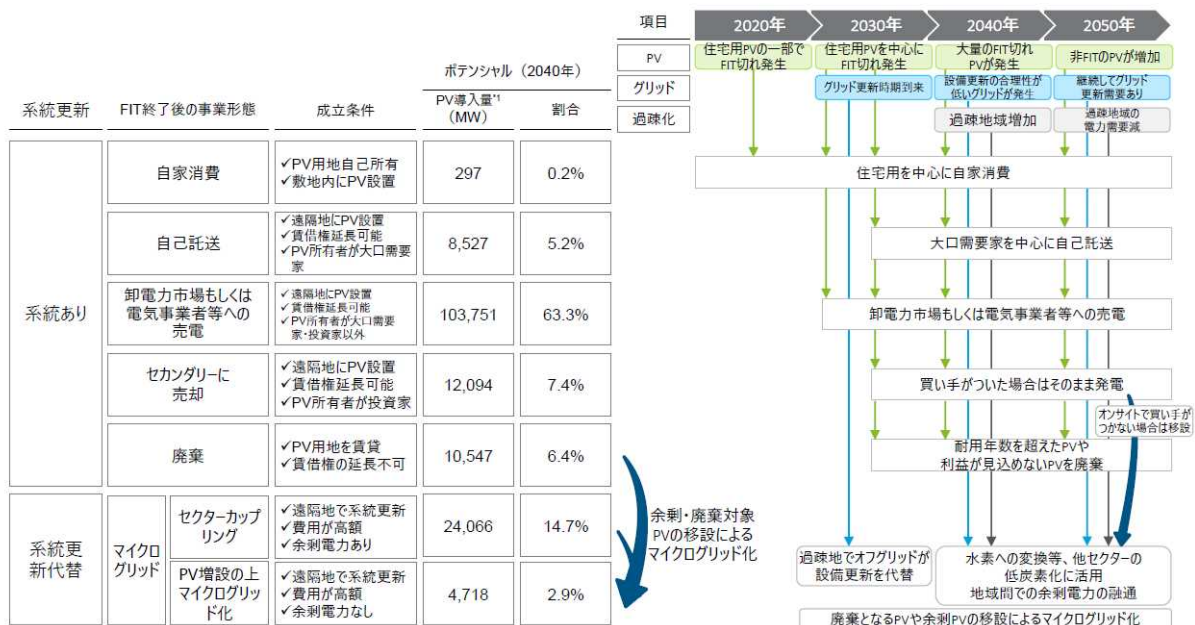


図 III-2-(ロ)-(iii)-A-10 将来の PV の絵姿



#### (4) 技術開発課題と必要な実証実験に必要な実験環境まとめ

本事業では、持続的な PV 発電の実現のため、Headroom 制御による電源価値向上に向けたフィジビリティスタディを行った。本事業を通じて、下記のような技術的課題を抽出した。

##### (1) インバランス低減技術

- ・予測誤差を考慮した計画方法の開発
- ・時間内変動の制御方法の検討
- ・バランシンググループにおける計画方法の検討
- ・蓄電池を利用した最適化制御、蓄電池容量低減方法の検討

##### (2) 需給調整市場への抛出技術

- ・予測誤差を考慮した計画方法の開発
- ・連続した時間帯を想定した検討
- ・30 分以下のデータを利用した検討
- ・バランシンググループにおける計画方法の検討
- ・将来の市場価格におけるフィジビリティの検討

##### (3) Headroom 制御の実現

- ・Headroom の期待発電電力推定誤差の影響評価
- ・計測、制御通信遅れの影響評価と移動平均、短期間予測の利用による緩和方法の検討
- ・バランシンググループにすることによる計測・制御の時間遅れなどによる制御誤差。
- ・エリア内日射強度ばらつきによるセンサ利用方法の検討

##### (4) システム化の検討

- ・パワーコンディショナの通信、制御、計測方法の検討
- ・電力市場システムの計画、実需給断面の計測、制御システムの検討

また、実用化に向けて、下記のような環境を準備して実証実験により有効性を確認する必要がある。

##### (1) Headroom 制御システム構築

- ・日射、温度計測の計測、その値からパワーコンディショナ制御可能なシステム
- ・1 秒以下で計測、制御可能なシステム

##### (2) 電力市場を想定した計画、制御システム構築

- ・スポット市場、需給調整市場を想定した予測、計画が可能なシステム

##### (3) バランシンググループの計画、制御システム

- ・①、②が複数地点のデータが利用可能なシステム

##### (4) 蓄電池制御システム

- ・蓄電池との併用もしくは、それを模擬可能な計測、制御システム

## 2. 実用化・事業化見通し

PV を調整力として活用するための方法として Headroom 制御技術についてのフィジビリティスタディであり、インバランス回避調整力および短時間変動調整力に関する技術開発課題の抽出および費用対効果の経済性評価を行った。本成果を民間企業への技術移転を行うことで、社会実装、普及を進める。

## 3. 波及効果

本技術の競合技術や事業としては、バランシンググループを組まない相対取引による工場屋根などの完全な自家消費モデル、蓄電池などのエネルギーストレージによる調整力創出技術となる。これらの PV システムの FIT 制度終了後に移行する事業モデルとしては、需要地遠隔システムがほとんどのため、本事業で開発する技術を適用できる潜在的なユーザーとなる。また、今後の FIT から FIP に移行するユーザーは、当初より市場と連動したシステムとなるため、本事業における技術が利用するユーザーとなる。資源総合システムの「太陽光社会到来に向けた 2020 年代の太陽光発電市場展望」では 2030 年までに 150GW の導入量、太陽光発電協会の「JPEA ビジョン PVOUTLOOK2050 ビジョン」では 2050 年までに 200GW

の導入量が想定されており、これらが市場として期待される。

#### 4. 今後の展開

本フィジビリティスタディをベースとして後継事業を開始した。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0
研究発表・講演 (国内・審査有)	3 (0)	3 0
(国際・審査有)	(0)	0
(国内・審査無)	(3)	3
(国際・審査無)	(0)	0
新聞・雑誌等への掲載	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0
展示会への出展	0	0
受賞実績	0	0

(2022年6月20日現在)

## B 多地点間における自己託送を活用した需給一体型太陽光発電システムの基本設計 (日本電気株式会社、東京電力エナジーパートナー株式会社)

### 1. 成果詳細

多地点間の自己託送における代表的なパターンを分類し、業務イメージ図、業務タイムチャート図を作成。システム要件を洗い出し、実現可能性の高い実証プランの策定と制度面における課題の確認ができた。

### 2. 実用化・事業化見通し

実証プランは未実施。協業可能なお客さま企業を選定し、提案中。販売開始後5年間で10万kW(太陽光発電設備新設金額ベースで約10,000百万円)のサービス受注を目指す。

### 3. 波及効果

本事業による効果は、“太陽光発電設備の発電量拡大”および“電力需給調整技術の向上・普及拡大”によりCO2削減コストが低下し、日本企業の国際競争力が強化されることである。

具体的には、太陽光発電設備の導入時において「負荷が少ないため、設置パネル容量を抑制しているケース」や「既設発電設備の発電容量が多いため、土日祝日に自家消費しきれないケース」等が改善され、発電量拡大に繋がる。発電量拡大に併せ、電力需給調整技術の開発が誘因され、当該技術の普及拡大、環境技術産業の優位性向上、日本企業の国際競争力強化に繋がると考えられる。

### 4. 今後の展開

事業化を達成するため、実証プランにて協業可能なお客さま企業の選定を急ぐ。

### 5. 特許・論文・対外発表

該当なし

(2022年6月20日現在)

## C 太陽光発電による調整力創出技術の実証研究

(東芝エネルギーシステムズ株式会社、学校法人東京理科大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所)

### 1. 成果詳細

#### (1) Headroom 制御方法の開発

上げ側の出力調整をする方法（上げ調整制御）として、Headroom 制御がある。これは、意図的に一定程度出力を下げた状態で運転を行い、必要なときに出力を増加させる方法である。しかしながら、PV は天候変動により出力変動を伴うため、出力を下げておく必要幅を想定する必要がある。その方法としては、日射強度に対応した発電出力（期待発電電力）のリアルタイム推定を行い、そこから指令する割合の出力を事前に低下させて運転させることで上げ調整力を確保する方法を検討する。具体的には、産業技術総合研究所（郡山）に設置している DC250kW/AC250kW のシステムを利用して検討を行う。PV アレイに設置された太陽電池式日射計による日射データ収集装置、日射データを利用して期待発電電力を推定する装置、期待発電電力に対して確保する Headroom の比率（ $\Delta P$ ）により制御可能な PCS により構成されており、日射強度については 5 か所の計測を実施した。2021 年度は、FREA の PV の実測データを利用して、日射強度のばらつきおよび回帰式の検討を行った。2 次式による回帰式において過去データの利用日数の影響などについて検討を行った（図 III-2-(ロ)-(iii)-C1 参照）。

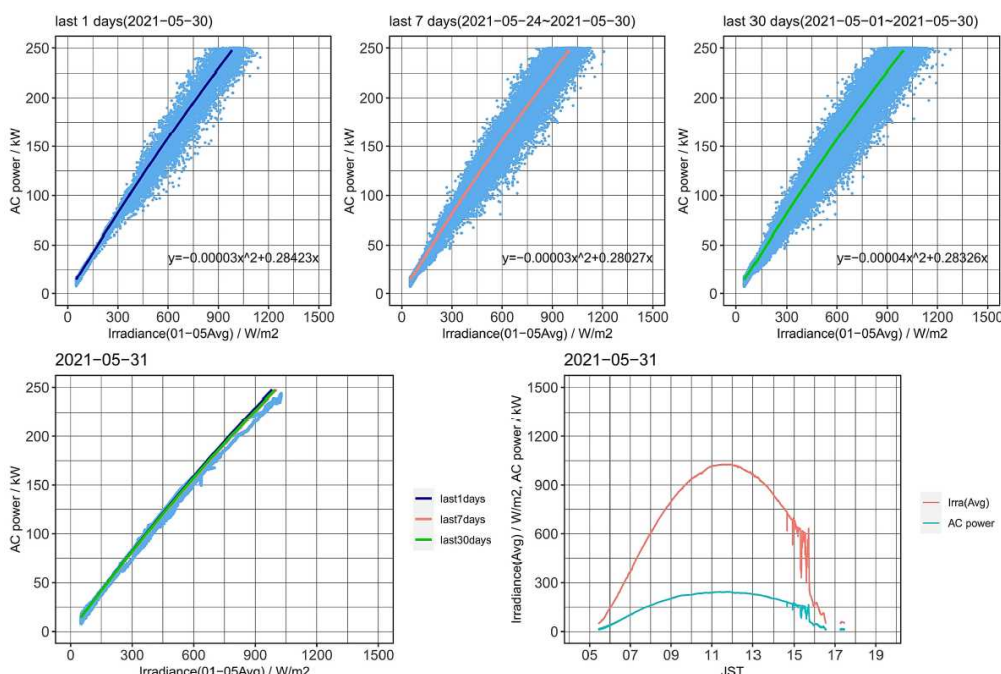
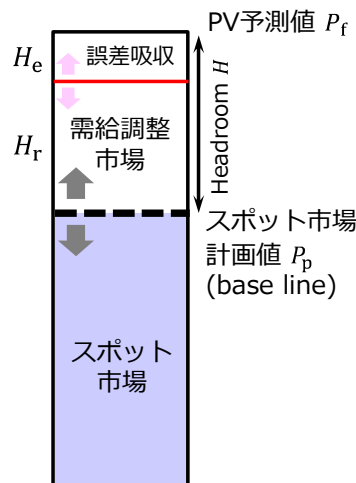


図 III-2-(ロ)-(iii)-C1 Headroom 制御に用いる回帰式の検討例

#### (2) エネルギー価値および調整力価値と各市場を利用した最適計画アルゴリズムの開発

##### ① スポットおよび需給調整市場利用の最適計画アルゴリズムの開発

PV 出力は日射量などの気象条件に依存し時々刻々と変化するが、その期待される発電電力に対して予め出力を抑制 (Headroom 制御) することで、上げ調整力を創出することができる。一方、PV の大量導入が進んだ将来のスポット市場では、多くの PV の出力が期待できる快晴日の日中などは、スポット価格が極端に安価になるなど、PV 発電事業者の収益の悪化が懸念される。そこで、先に述べた出力の抑制制御により創出した上げ代の一部を調整力として需給調整市場に供給する事で、発電所としての事業性を改善できる可能性がある。実証試験に適用可能な Headroom 制御を用いたスポットおよび需給調整市場利用の最適計画アルゴリズムの開発に向けた定式化として、図 III-2-(ロ)-(iii)-C2 に示すように PV 発電出力予測値  $P_f$  を、Headroom のうち予測誤差吸収を目的とする  $H_s$ 、需給調整市場への応札分を想定する  $H_r$ 、スポット市場への売電を想定する  $P_p$  に割り振る最適化問題を設定し、実際の市場を想定した各種制約条件などの検討を行った。



図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-C-2 Headroom 制御を利用した最適計画の考え方

前日計画段階において式Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-C-(1)のような等式制約とし、 $H_e$ について適切な値を決定するアルゴリズムと、 $H_e$ 決定後右辺  $H_r$  と  $P_p$  を決定するアルゴリズムに分けて検討を行った。

$$P_f - H_e = P_p + H_r \quad \text{式Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-C-(1)}$$

$H_e$ については、過去のデータより PV 発電予測値の誤差分析を行い、誤差吸収に必要な  $H_e$  を決定する手法の開発を開始した。 $H_r$  と  $P_p$  の割合の決定には、線形計画法を用いて収益が最大となる計画の算出に向け、開発を開始した。

## ② 大量導入時の効果検証(市場モデルの検討)

これまでの研究で開発した将来の再生可能エネルギー、特に PV が大量導入されたときの電力市場価格のシミュレーションモデルを更新し、エリア内の PV 発電量を考慮した東京エリアプライスのシナリオを作成し、シミュレーション用のデータセットを構築した。

## ③電源価値の更なる向上に向けた計画および運用手法の検討

①で開発する実証試験に適用可能な最適計画アルゴリズムの拡張として、機械学習による計画の作成や蓄電池の導入、時間前市場の活用など、将来想定される事業環境のシナリオ検討と、それらの環境下でも適用可能な最適計画アルゴリズムの検討を開始した。

機械学習を用いた計画作成手法として、強化学習により  $H_e$ 、 $H_r$ 、 $P_p$  を決定する手法の検討を行った。また、時間前市場の活用手法として、前日に作成した計画値からの当日逸脱量を蓄電池の充放電および時間前市場を活用して吸収することにより調整力確保時間帯の不足インバランスを極力減らすことが可能な制御方法について検討を行った。

### (3) Headroom 制御の実システムへの実装技術の開発

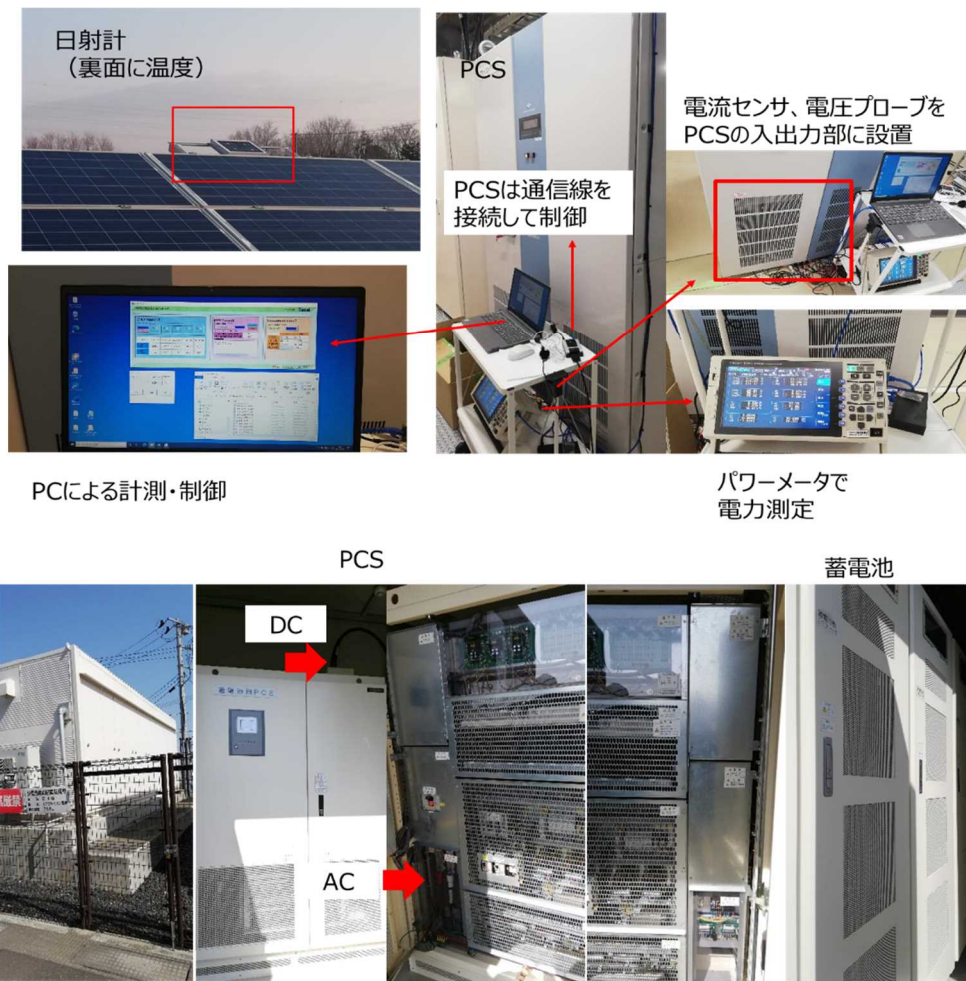
本事業では Headroom 制御の実用化を目指すにあたり、実証実験を通して、実用化に向けたシステム構成を検討し、実システムを開発する。

2021 年度は、実システムを見据えたシステム構成の検討を実施する。JEPX（日本卸電力取引所）のスポット市場や、TDGC（送配電網協議会）の需給調整市場とのシステム連携が可能なシステムを検討した。システムは計画作成機能を持ち、遠隔で制御可能なシステムとした。遠隔で制御するシステムと、ローカルに備えるべき機能を検討し、計測項目や計測頻度など、実システムへの実装に考慮しつつ、実システム全体の構成を検討した。

### (4) 実証実験の実施

(1)～(3)において検討した技術を実証設備により検証を行う。具体的には、産総研の郡山の FREA に設置されている PV および蓄電池設備を計測、制御できる環境構築を行う。PV については、既存の装置を改良し、複数地点との連携および自端の周波数計測をもとにして制御できる機能も実装する。複数地点には、産総研の郡山以外に設置されている PV について、郡山の設備同様に計測、制御装置を導入する。システム化の検討として、(2)の機能を実装した、(3)のシステムと連携した実証実験が行える環境構築を行う。

2021年度は、郡山のFREAの設備を拡張、複数地点のHeadroom制御可能なPCS制御、計測装置の導入として、郡山におけるPVおよび蓄電池の制御する装置の導入および仙台およびつくばに設置予定のPCSを制御するためのソフトについて一部の開発を行った。



図Ⅲ-2-(ロ)-(iii)-C-表3 産総研 郡山における実証実験装置の概要

(5) PVの調整力活用技術の導入ポテンシャル調査(産業技術総合研究所/東京理科大学)

本事業において開発する技術の導入ポテンシャルの調査として、ドイツ、米国 PJM、豪州 AEMO について、スポット市場の動向に加え、需給調整市場(調整力市場)の商品やルール、および直近の価格動向を調査し、国内の状況と比較した。

2. 実用化・事業化見通し

PVを調整力として活用するための方法としてHeadroom制御技術に関する有効性を実証することを目的としている。本事業の実施者である、産業技術総合研究所および東京理科大学の技術をベースとして、東芝エネルギーシステムズ社への技術移転により実用化を想定している。

3. 波及効果

本技術の競合技術や事業としては、balancing groupを組まない相対取引による工場屋根などの完全な自家消費モデル、蓄電池などのエネルギーストレージによる調整力創出技術となる。現在、PVの導入量は約60GWである。正確には内訳は無いが工場屋根などの完全な自家消費モデルは非常に少ないと考えられる。これらのPVシステムのFIT制度終了後に移行する事業モデルとしては、需要地遠隔システムがほとんどのため、本提案で開発する技術を適用できる潜在的なユーザとなる。また、今後のFITからFIPに移行するユーザは、当初より市場と連動したシステムとなるため、本提案における技術が利用されるユーザとなる。資源総合システムの「太陽光社会到来に向けた2020年代の太陽光発電市場展望」

では 2030 年までに 150GW の導入量、太陽光発電協会の「JPEA ビジョン PVOUTLOOK2050 ビジョン」では 2050 年までに 200GW の導入量が想定されており、これらが市場として期待される。

#### 4. 今後の展開

本事業により PV を調整力として活用するための方法として Headroom 制御技術に関する有効性を実証し、東芝エネルギーシステム社への技術移転により実用化を想定している。各種実証データなどの成果については、調整力創出のための知見として詳細を幅広く公開する。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	0
研究発表・講演	4	1	5
(国内・審査有)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(4)	(0)	(4)
(国際・審査無)	(0)	(1)	(1)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0
展示会への出展	0	0	0
受賞実績	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)





(ハ)先進的共通基盤技術開発

(i) 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発

【A 新型太陽電池評価要素技術の高度化・高精度評価技術の開発】  
(国立研究開発法人産業技術総合研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
新型太陽電池の性能評価要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 新型太陽電池等について、その設置形態・設置環境・形状を考慮した測定技術開発し、屋内測定において性能評価再現性±1.0% (1σ) 以内を達成する。</li> <li>・ 海外主要機関との国際比較測定等を通して、新型太陽電池を含む太陽電池の性能評価技術の国際整合性を検証する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 曲面形状太陽電池セル・モジュールの性能測定技術の開発、発電量シミュレーションの実施。各種新型太陽電池(c-Si、ペロブスカイト、多接合型(ペロブスカイトを要素セルとする構造も含む))の高精度性能測定技術の開発・実施・実証。測定再現性±1.0%(1σ)以内となる見通しを得た。</li> <li>・ 海外主要機関との多接合太陽電池セル、ペロブスカイト太陽電池セル、曲面太陽電池モジュール等の国際比較測定を実施し、性能評価技術の国際整合性の検証を進めた。</li> </ul>	○	
屋外環境における新型太陽電池の発電性能評価要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 自然太陽光下での新型太陽電池高精度性能評価に向けた性能評価要素技術の開発を行う。</li> <li>・ 太陽電池システムの発電出力連続計測を実施し、性能評価精度を検証する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 太陽電池モジュール日射センサ(PVMS)を用いた太陽電池出力の高精度連続監視技術を開発。高効率系を含む結晶シリコン系PVシステムでの実験検証において、測定再現性±1%以内の結果を得た。</li> <li>・ 屋外曝露PERCモジュールの屋内測定において、夏季に特性が低下する現象を確認。連続計測結果においても同様の現象を観測した。</li> <li>・ 新型太陽電池の屋外性能評価測定に向けたPVMSの開発、照度補正方法の検討を進めた。</li> </ul>	○	
基準太陽電池校正技術の高度化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 基準太陽電池の最高校正能力0.5% (k=2)以上を目指し、新型太陽電池評価技術の高度化を支援する。</li> <li>・ 太陽電池分光感度特性の入射角依存性を高精度評価するためのレーザ利用基本技術を確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超高温定点黒体炉を利用した校正技術の高精度化に向けて、ドライエア、窒素、アルゴンガスの適用により、黒体炉の分光放射照度測定結果に影響する大気中の水蒸気吸収の影響を排除ことに成功した。</li> <li>・ 構造精緻型絶対放射計の受光部構造を改良した。国際比較校正に参加し、世界標準器群の加重平均に対する補正を0.1%まで低減できたことを確認した。</li> <li>・ 上記の開発成果により最高校正能力向上の目途を得た。</li> <li>・ スーパーコンティニウム(SC)レーザと波長セレクタを組み合わせた基準セル角度特性評価光学系を構築し、精度検証を開始した。</li> </ul>	○	

\* 1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、 ○ : 達成、 △ : 達成見込み、 × : 未達

## A 新型太陽電池評価要素技術の高度化・高精度評価技術の開発(国立研究開発法人産業技術総合研究所)

### 1. 成果詳細

#### ① 新型太陽電池の性能評価要素技術開発

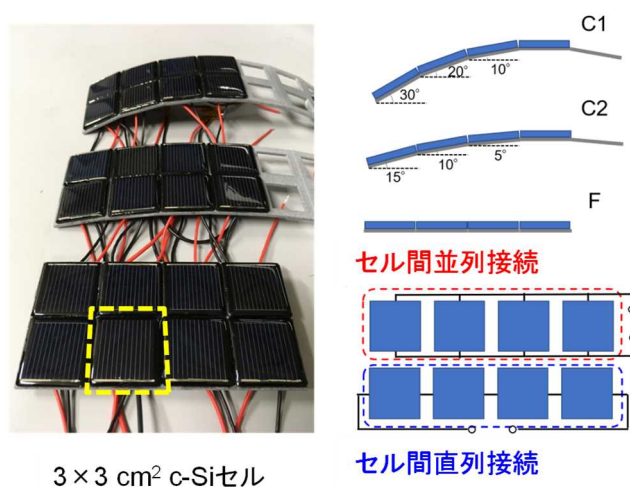
##### i) 新型太陽電池の性能評価要素技術開発

新型太陽電池の性能評価要素技術開発として、曲面形状太陽電池の性能評価技術の開発、また、各種新型太陽電池の性能評価技術の高精度化に向けて、構造・特性に応じた性能評価手法の開発を進めるとともに、開発の評価手法を用いて高精度性能評価測定を実施し、開発手法の有用性やその精度検証を行った（高精度性能評価測定の詳細は ii)に記載する）。

曲面形状太陽電池モジュールにおけるセル間の電流ミスマッチによる発電性能、発電量への影響を分析するため、曲面を模擬した非平面型の結晶シリコン太陽電池ミニモジュールを作成し、その性能評価を実施した。曲面形状ミニモジュールとして、 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ の結晶シリコンセルを非平面形状のフレーム上に設置した疑似曲面形状ミニモジュールを作製（図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-1）した。ミニモジュール C1 および C2 の断面図（図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-1：右上）に示すように、傾斜角がもっと大きなセルは、それぞれ、 $30^\circ$  と  $15^\circ$  に傾斜している。16 cm 角の結晶シリコンセルを用いて同様の非平面構造の大型モジュールを構成した場合に、曲率半径がそれぞれ 1 m と 3 m の曲面モジュールに対応する。また、セル間の接続が曲面方向に直列または並列で曲面モジュールの出力を比較することにより、セル間接続が発電性能に及ぼす影響を調べた。照射光強度の不均一性は 1.5%以下 ( $5 \times 5 \text{ mm}^2$ での測定空間分解能にて)、また、全光量の 90%が  $1.6^\circ$  以内の入射角度に入る平行度の高い光照射条件下で測定を実施した。

図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-2（左）は、曲面太陽電池ミニモジュールの電流-電圧 ( $I$ - $V$ ) 曲線を示す。モジュールの曲率の増大（曲率半径の減少）により、光電流が低下し発電量が低下した。得られた太陽電池パラメータを図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-2（右）にまとめる。太陽電池セルが曲面方向に直列接続されたモジュールにおいては、フィルファクター ( $FF$ ) が平面モジュールに比べて増大するものの、発電量は低下することがわかった。 $FF$ の増大は、各太陽電池セル間に電流ミスマッチが生じた際に、それらを直列に接続した太陽電池構造に見られる効果として理解される。短絡電流は、太陽電池セルの傾斜角度を考慮した計算の結果（図中×印）と良い一致を示す。短絡電流の低下は、傾斜した太陽電池セルでの光電流の低下によって理解され、最大傾斜面への入射光量がミニモジュールの電流を律速しており、セルへの入射光量の校正が性能評価の高精度化に重要になることが分かった。

また、曲面方向に太陽電池セルを並列に接続したモジュールと性能を比較すると、並列接続したモジュールでは、曲面による電流ミスマッチの影響が緩和される傾向がみられた。一方で、電流値が増大することから直列抵抗による損失が性能低下を引き起こす場合もあるとも考えられる。以



図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-1 結晶 Si 太陽電池曲面ミニモジュールの外観写真（左）と構造図（右）

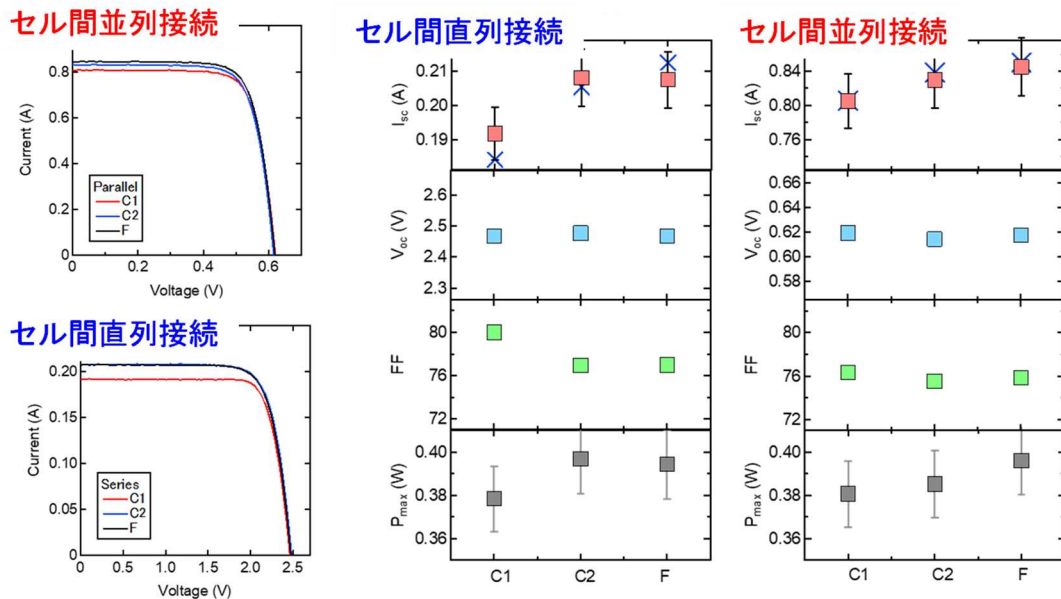


図 III-2-(ハ)-(i)-A-2 結晶 Si 太陽電池曲面ミニモジュールの電流-電圧特性と太陽電池パラ

上の結果から、曲面モジュールの性能評価の際には、太陽電池セルの性能に加えて、モジュールにおけるセル間の接続特性を考慮した性能評価を行う必要があることがわかった。

次に、曲面形状モジュールの発電量評価として、屋外日射データセットを用いた発電量シミュレーションと合わせることで、モジュールの曲面形状、太陽電池セル間の接続が年間発電量に及ぼす影響を分析した。上述したミニモジュールでの知見をもとに、傾斜した平面太陽電池セルの組み合わせにより曲面モジュールを構築した。モジュールは、 $16 \times 16 \text{ cm}^2$ のサイズの  $7 \times 4$  個の太陽電池セルで構成されると仮定した (図 III-2-(ハ)-(i)-A-3)。太陽電池セルの傾斜角を  $\{30^\circ, 20^\circ, 10^\circ, 0^\circ\}$  と仮定した曲率モジュール C1、および傾斜角を  $\{15^\circ, 10^\circ, 5^\circ, 0^\circ\}$  と仮定したモジュール C2 について検討した。それぞれ、曲率半径  $R_c = 0.92$  および  $1.83 \text{ m}$  に対応する。簡単のため、1 つのコンポーネントモジュールは南向き、もう 1 つは北向きである場合について検討した。また、参照用として平面モジュール (F) についても検討した。

年間発電量の計算には、世界 6 か所の日照データ (IEC 61853-4) を使用した。対象地域は、1) 熱帯湿潤 ( $1^\circ \text{ S}$ )、2) 亜熱帯乾燥 (砂漠) ( $33^\circ 30' \text{ N}$ )、3) 亜熱帯沿岸 ( $33^\circ 22' \text{ N}$ )、4) 温帯沿岸 ( $56^\circ \text{ N}$ )、5) 高地 (3000 m 以上) ( $34^\circ \text{ N}$ )、および 6) 温帯大陸 ( $57^\circ \text{ N}$ ) である。地域場所 1、

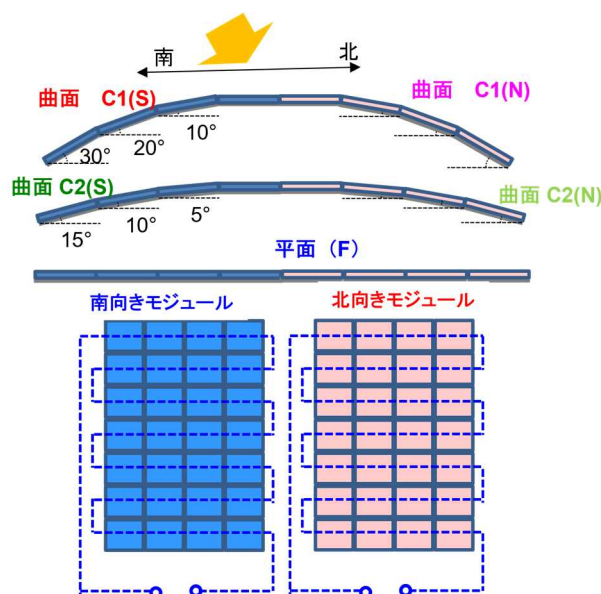
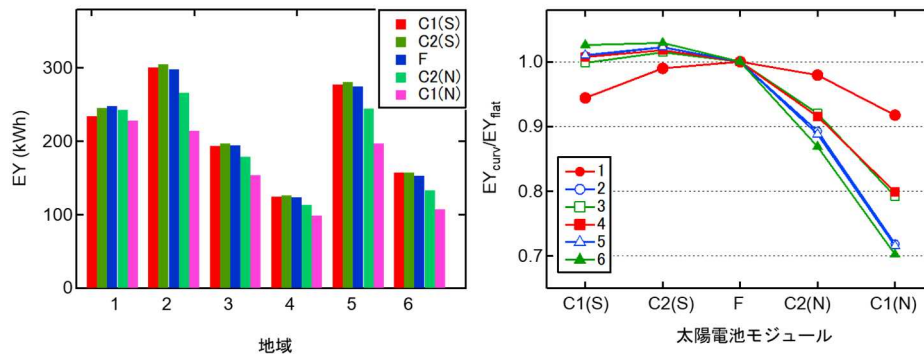


図 III-2-(ハ)-(i)-A-3 曲面太陽電池モジュール断面の概念構造図 (上) と太陽電池セルが直列接続されたモジュールの概念図 (下)

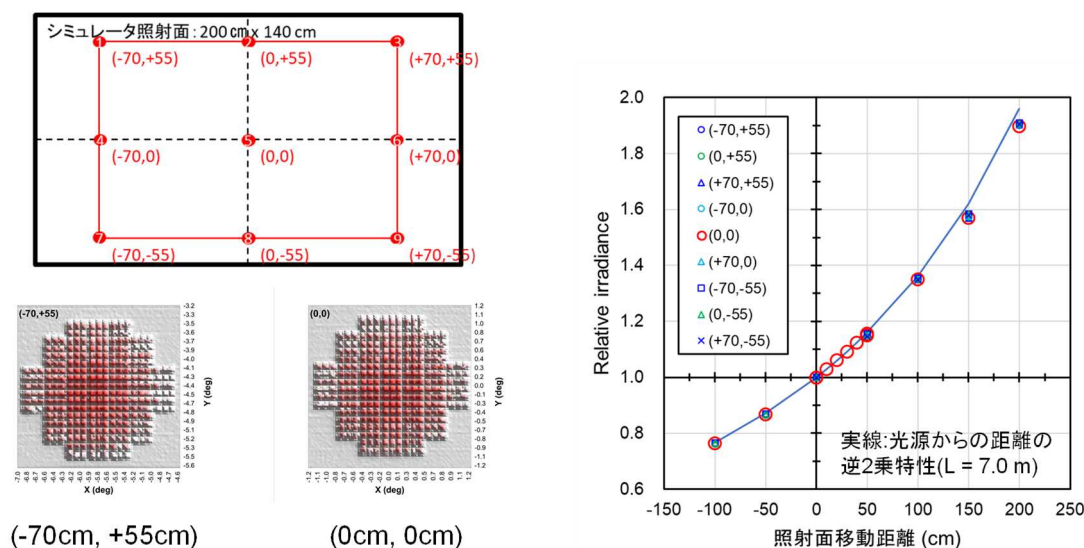


図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-4 世界6か所の日照データ (IEC 61853-4) から計算した南向きおよび北向きの曲面太陽電池モジュールの年間発電量 (左) と平面モジュールの発電量で規格化した曲面太陽電池モジュールの年間発電量 (右)。

3、および4では、散乱日射量(DHI)が優勢であり、モデルシミュレーションでは、散乱日射光の影響、つまり入射角分布に焦点を当てた。入射角の分布は、太陽放射照度成分によって異なるので、直達日射量(DNI)とDHIで構成されるグローバルスペクトル放射照度を使用して年間発電量を計算した。直達日射光および、散乱日射光により異なる角度依存性を考慮して光電流生成を算出し、ダイオードモデルを使用して太陽電池セルのI-V曲線と発電量を計算した。曲面太陽電池モジュールの特性は、直列接続された太陽電池セルの電流と電圧の関係から算出した。最大電力をI-V曲線から抽出し、年間発電量は計算された電力を1年間分合計することにより算出した。

図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-4は、南向き(C1(S)およびC2(S))および北向き(C1(N)およびC2(N))の曲面太陽電池モジュールと参照平面モジュール(F)について、6地域における計算結果を示す。各地域の年間発電量総量は、各地域の日照を反映する。そこで、曲面の影響を分析するために、曲面モジュールを参照平面モジュールで規格化して比較した。場所1(低緯度)では、太陽光は天頂から来るが、中緯度および高緯度の他の地域では、太陽放射の直達光は水平面に対して有限の入射角で南から照射される。また、曲面太陽電池モジュールの年間発電量は、地域により2グループに分割された。2グループの特徴は地域の緯度ではなく、散乱日射光の割合が異なることがわかった。以上の結果から、曲面モジュールの屋外発電量を評価するには、直達光のみでなく散乱光の影響を考慮した性能評価を行う必要があることが示唆された。曲面モジュールの性能評価においてはモジュール正面からの照射条件のみでなく、異なる入射角からの照射に対する出力特性の評価、入射光角度依存性の性能評価が重要であることがわかった。

次に、フルモジュールサイズ(メートルサイズ)曲面太陽電池モジュールのソーラシミュレータを使用した屋内性能評価測定に向けた要素技術開発を進めた。平行光ではないソーラシミュレータ光を使用した曲面形状モジュールの性能評価測定では、照射光の放射角度分布、また、測定基準



(-70cm, +55cm)

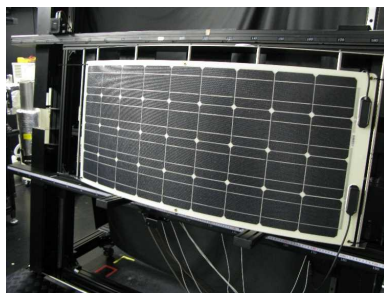
(0cm, 0cm)

図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-5 シミュレータ光角度分布

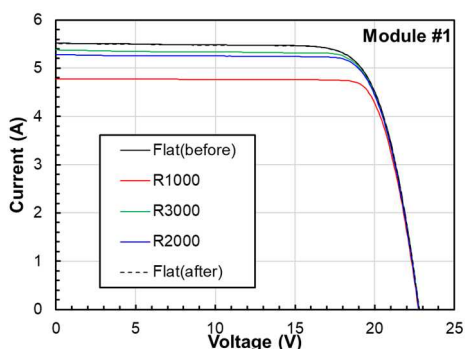
図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-6 設置面前後方向での光照度分布  
Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A[3]

面の面内照度分布だけでなく、基準面前後方向の空間分布も考慮した解析が必要となる。そこで、性能評価測定に使用するモジュール用ソーラシミュレータ(LAMS) (WACOM WPSS-2.0×1.4 - 50×6 AM1.5GF) の光角度分布、照度分布を高精度に評価した。図III-2-(ハ)-(i)-A-5にモジュール設置基準面の中央位置(0, 0)と中央から離れた位置(-70cm, +55cm)における照射光の放射角度分布を示す。設置基準面では、光角度分布は位置に依らず±1.2°以内であることを確認した。また、各測定位置での光角度分布の重心角度は観測位置からシミュレータ出射レンズ中心を見た際の見込み角にほぼ等しいことを確認した。次に、照度空間分布として、モジュール設置基準面から前後方向に観察位置を移動した場合の照度分布を図III-2-(ハ)-(i)-A-6に示す。実線は照度分布が光源(出射レンズ)位置から距離の2乗に反比例するとして計算結果であり(基準面での照度で規格化した相対強度で表示)、実験結果とよく一致することを確認した。得られた角度分布・空間分布を用いて、曲面形状モジュールの性能評価結果を解析することが可能となる。平板太陽電池モジュールを用いて、その短絡電流( $I_{sc}$ )の設置角度依存性を評価したところ、得られた角度依存性がソーラシミュレータ光の放射角度分布・照度空間分布を考慮した計算でよく再現できることを確認した。

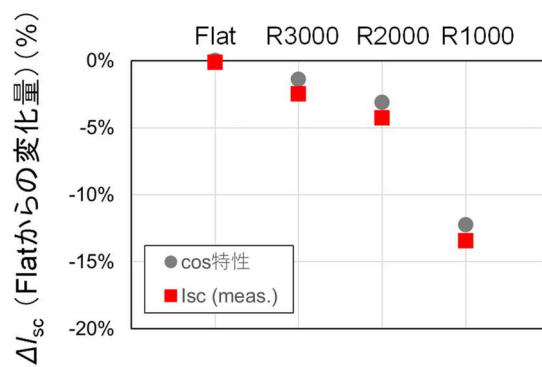
実際に、曲面形状モジュールの性能評価に取り組んだ。フレキシブル結晶Si太陽電池モジュールを使用し、曲面形状に設置することで曲面形状でのモジュール出力特性を測定した。図III-2-(ハ)-(i)-A-7(a)に測定時の曲面形状モジュール設置の様子を示す。市販のフレキシブル結晶Si太陽電池モジュール(36セル(9×4)、2バイパスダイオード)を円筒状に曲率をつけて設置し、曲率半径( $R$ )を $R = 1, 2, 3$  mの3水準として設定し、各水準で $I-V$ 特性を測定した。また、比較としてフラット( $R = \infty$ )に設置した場合の $I-V$ 特性測定も行なった。図III-2-(ハ)-(i)-A-7(b)に曲率半径を変えた $I-V$ 特性を示す。設置の曲率半径を小さくするに従い、短絡電流が減少していくが、これは照射光の光軸に対して大きな傾斜角となる両端のセルでの電流律速によるものである。図III-2-(ハ)-(i)-A-7(c)に各曲率半径での $I-V$ 特性から算出した短絡電流 $I_{sc}$ のフラット設置からの変化量を示す。0次近似としては、シミュレータ光の光軸と電流制限セルの設置角による光入射角の $\cos$ 特性となり、図III-2-(ハ)-(i)-A-7(c)に示すように概ね $\cos$ 特性に従う変化を示す。しかし、結果をより詳細にみると $\cos$ 特性からのずれが見られる。これは、ソーラシミュレータ光の放射角度分布に加え、照度基準面での面内照度分布や前後方向の照度分布の影響によるものと考えられ、その解析を進めている。また、よりリジッドな曲面形状モジュールを使用した性能評価測定も実施しており、こちらについても照射光の角度分布・空間分布を考慮した解析を進めている。



(a) 曲面形状モジュール設置時の様子



(b)  $I-V$ 特性の設置曲率半径依存性



(c) 短絡電流  $I_{sc}$  の曲率半径依存性

図III-2-(ハ)-(i)-A-7 曲面形状太陽電池モジュールの出力特性評価(曲率半径  $R$  (mm))

表Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-1 新型太陽電池の高精度性能評価測定実施実績 (2020年度～2021年度)

種類	2020年度(下期:'20/10月～'21/3月)			2021年度('21/4月～'22/3月)		
	セル	モジュール	年度計	セル	モジュール	年度計
c-Si, 薄膜Si, Si系多接合	6	12	18	6	13	19
CIGS系	2	1	3	2	1	3
III-V, III-V系多接合	2	0	2	11	1	12
ペロブスカイト, ペロブスカイト多接合	10	2	12	25	6	31
合計	20	15	35	44	21	65

ii) 新型太陽電池を含む各種新開発太陽電池の高精度性能評価

新型太陽電池の屋内性能評価技術開発として、各種新型太陽電池の構造・特性に応じた性能評価手法を開発すると共に、開発した評価手法の有用性を検証するために、NEDO 開発品等新型太陽電池（結晶シリコン、ペロブスカイト、CIGS、III-V、多接合等）の高精度性能評価を実施した。多接合型太陽電池として、III-V 半導体化合物系に加え、ペロブスカイト太陽電池を要素セルとする多接合型太陽電池等の測定も実施した。

表Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-1 に 2020 年度と 2021 年度に実施した高精度性能評価測定数をまとめる。セル・モジュール合わせて、2020 年度（下期のみ）は 35 サンプル、2021 年度は 65 サンプルの高精度性能評価測定を実施した。これまでの NEDO プロジェクトと同程度の数量の高精度測定を実施しており、得られた測定結果は太陽電池開発元へフィードバックし、新型太陽電池の開発に貢献した。また、2022 年度も同数程度の高精度性能評価測定を計画し、測定を開始した。

結晶シリコン系セル・モジュール、III-V 系多接合構造等の新型太陽電池について、高精度性能評価測定での測定精度を検証し、性能評価再現性±1.0%以内となる見込を得た。ペロブスカイト太陽電池については、特性の安定したサンプルにおいて、実施する測定手順の下で測定再現性±1.0%以内となる見込みではある。

また、高精度性能評価測定として、開発する性能評価技術の国際整合性検証として、国際比較測定を実施（参加）した。産総研が主催する RD20（クリーンエネルギー技術に関する G20 各国の国立研究所等のリーダーによる国際会議）の国際連携を活用し、国際主要研究機関（ESTI、NREL、ISE）との多接合型太陽電池セルの国際比較測定を開始し、現在、順に各機関にて性能評価測定を実施中である。また、曲面太陽電池モジュール、ペロブスカイト太陽電池セル等の国際比較測定に参加し、他機関での測定結果との比較により、本 NEDO プロジェクトで開発を進める性能評価技術の整合性検証を進めている。

②屋外環境における新型太陽電池の発電性能評価、信頼性・安定性評価

i) 屋外環境における発電性能評価要素技術開発

屋外環境での新型太陽電池の屋外発電性能評価に供する技術として、太陽電池モジュール型照度センサ（PVMS）を高速日射センサとして使用した太陽電池出力（ $P_{max}$ ）連続常時監視技術の基礎検討と課題抽出を進めた。

本研究では、プロジェクト実施者らが以前より開発を進めていた最大出力動作電圧  $V_{mp}$  及び最大出力動作電流  $I_{mp}$  の温度補正式を用い、MPPT 動作中の PV システムの動作を中断せずに計測可能な最大出力動作電流  $I_{mp}$  と最大出力動作電圧  $V_{mp}$  の実測値から、STC における  $I_{mp}$ 、 $V_{mp}$ 、 $P_{max}$  等の性能を再現性良く評価できる方法を開発し、その精度検証を行なった。精度検証実験は産総研九州センター（佐賀県鳥栖市）の太陽電池モジュール屋外曝露サイトで稼働中の従来型結晶シリコン太陽電池 E-1A、E-1B ストリングと、新型の裏面不導態型単結晶 Si 太陽電池（PERC）W-1C、W-1D ストリングを用いて行った。MPPT 動作中の  $I_{mp}$  と  $V_{mp}$  は、電流センサと電圧センサをそれぞれモジュール

と PCS 間のケーブルに設置して計測、また、日射照度  $G$  はシステムに隣接して設置した PVMS を用いて計測した (図 III-2-(ハ)-(i)-A-8)。

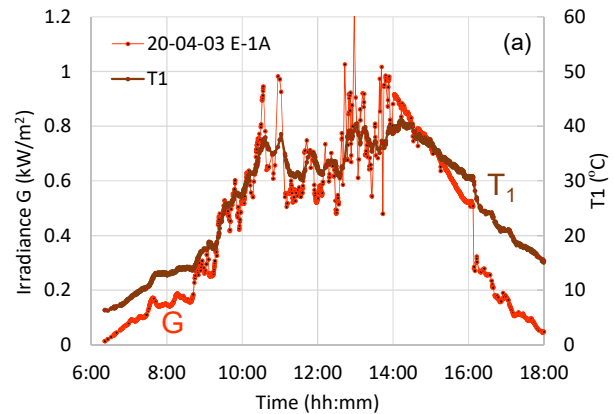
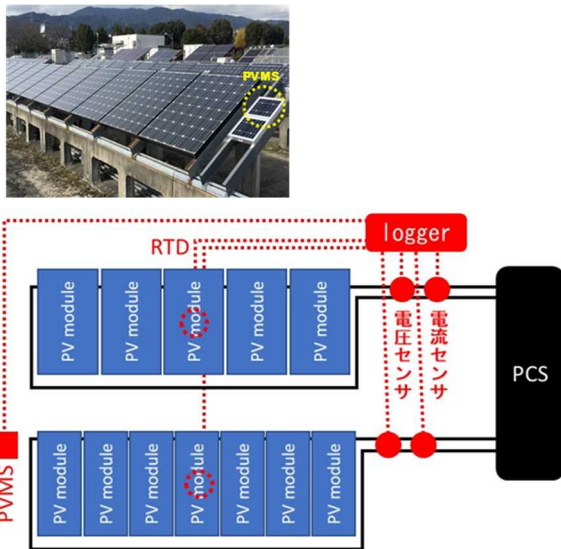


図 III-2-(ハ)-(i)-A-8 屋外高精度連続監視システム

図 III-2-(ハ)-(i)-A-9 照度  $G$ 、モジュール裏面温度  $T_1$  測定例

図 III-2-(ハ)-(i)-A-9 と図 III-2-(ハ)-(i)-A-10 にある曇天日における照度  $G$ 、モジュール裏面温度  $T_1$  と  $V_{mp}$ 、 $I_{mp}$  の経時変化を示す。プロジェクト実施者らが開発した  $I_{mp}$ 、 $V_{mp}$  の温度補正式 III-2-(ハ)-(i)-A-(1) および (2) を用い、図 III-2-(ハ)-(i)-A-9、図 III-2-(ハ)-(i)-A-10 の測定値から任意の温度における  $I_{mp}$  と  $V_{mp}$  を求める。以下、温度 25°C に補正した  $V_{mp}$  及び  $I_{mp}$  を  $V_{mp2}$  及び  $I_{mp2}$  と記す。

$$V_{mp2} = \left\{ V_{mp1} + \frac{T_2 - T_1}{T_1} \left( V_{mp1} - \frac{N_C n E_g}{q} \right) \right\} \times \{ 1 + \alpha (T_2 - T_1) \}$$

式 III-2-(ハ)-(i)-A-(1)

$$I_{mp2} = I_{mp1}$$

式 III-2-(ハ)-(i)-A-(2)

- $V_{mp1}$ 、 $V_{mp2}$  : 補正前後の  $V_{mp}$ 、
- $I_{mp1}$ 、 $I_{mp2}$  : 補正前後の  $I_{mp}$ 、
- $T_1$ 、 $T_2$  : 補正前後のモジュール絶対温度、
- $N_C$  : セル直列数、
- $n$  : 太陽電池セルのダイオード理想係数、
- $E_g$  : 結晶シリコンのバンドギャップ ( $\approx 1.12$  eV)、
- $q$  : 電子の電荷、
- $a$  :  $I_{sc}$  の温度係数。

図 III-2-(ハ)-(i)-A-11 に一例として、 $I_{mp}$  と  $V_{mp}$  の積から求まる最大出力  $P_{max}$  を照度で割った  $P_{max}/G$  示す。温度補正前の  $P_{max}/G$  (図中灰色) はばらつきが大きく、主に午前と午後の温度差によって 2 つの枝に分かれているが、温度補正後の  $P_{max}/G$  (図中赤色) は午前午後共にほぼ同じ値となり、正確な温度補正が可能であることを確認できた。照度 1 kW/m<sup>2</sup> における値 (白抜き○印) は STC での性能に対応している。 $I_{mp}$  と  $V_{mp}$  の値は屋内測定値と 1~2% の差が見られるが、 $P_{max}/G$  は良く一致している。

次に、ストリング性能連続監視の一例として、E-1B ストリングにおける約 2 年間 (2019 年 12 月 ~ 2021 年 12 月) の  $V_{mp2}$  と  $I_{mp2}/G$  の日平均値を図 III-2-(ハ)-(i)-A-12 (a) と (b) に示す。青色丸印は照度 0.66~0.74 kW/m<sup>2</sup>、赤色は 0.9~0.97 kW/m<sup>2</sup> での  $P_{max}$  の日平均である。いずれも 2 年間で大きな変動は無いが 0.5% 程度の減少傾向が見られ、緑三角印で示す屋内測定でも同じ傾向が確認された。また、2021 年 10 月の屋内測定で、モジュール表面を掃除したことによる一時的な 1% 弱

の  $I_{mp}/G$  の増加も検出できている。E-1A 等他のストリングでも同様の結果が得られた。これらの結果から、本研究の方法で算出した  $V_{mp2}$  と  $I_{mp2}/G$  (及びそれらの積から導出される  $P_{max2}/G$ ) によってストリング性能の変化を検出でき、その感度は 1%以内の僅かな変化も検出できる非常に優れたものであることを実証することができた。

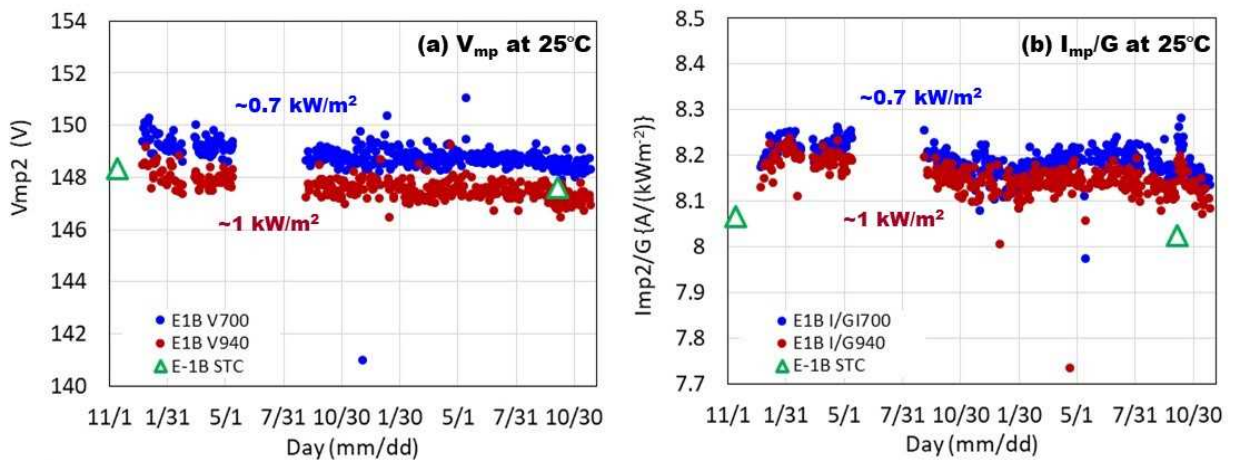


図 III-2-(ハ)-(i)-A-12 E-1B スtringの (a)  $V_{mp2}$  及び (b)  $I_{mp2}/G$  の約 2 年間の変化

また、動作診断として、モジュールに部分影が生じると  $V_{mp}$  が増減することを利用して、部分影の存在を検出できることを見出し、更にストリングへの適用可能性を検討するために、ダイオード特性の理論式を用いたシミュレーションと、産総研九州センターにおける MPPT 動作中のストリングを用いた実験による検証も行った。実験とシミュレーション解析による検証により、温度補正した  $V_{mp2}$  と  $I_{mp2}$  を用いて、複数モジュールが直列接続された PV スtringにおける部分影の発生を敏感に検出することができること、更にバイパスダイオードの動作を推定することも可能であることが明らかになった。

本手法では  $V_{mp}$ 、 $I_{mp}$ 、照度  $G$  とモジュール温度  $T$  の瞬時データだけを用いるので、モジュールに特有の温度係数や運転履歴の統計データ等は不要であり、PV スtringのリアルタイム診断と長期連続監視の両方を行うことが可能である。更に  $0.2 \sim 1 \text{ kW/m}^2$  以上の幅広い照度範囲で、また快晴、曇天、雨天を含めて様々な天候における PV 性能の  $25^\circ\text{C}$  に換算した値を、ほぼリアルタイムで監視することができることも利点である。

また、本研究で照度測定に用いた PVMS は市販の結晶シリコン太陽電池とほぼ同じ分光感度特性・角度特性等を持ち、PERC やヘテロ接合単結晶 Si (SHJ) 等の新型結晶シリコン太陽電池にもほぼそのまま適用することができる。分光感度特性が大きく異なる薄膜太陽電池に適用する場合には、スペクトルミスマッチ (SMM) が  $I_{mp}/G$  を測定する際の大きな誤差要因となるが、フィルタ等を用いて分光感度特性の異なる二種類の PVMS を用いて照度を測定することにより、1%程度以内の

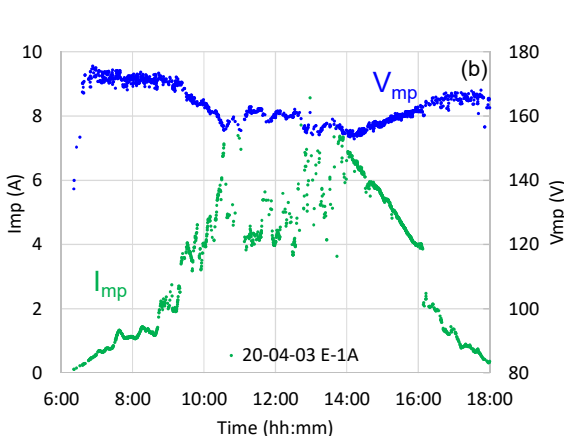


図 III-2-(ハ)-(i)-A-10  $I_{mp}$ 、 $V_{mp}$  測定値例

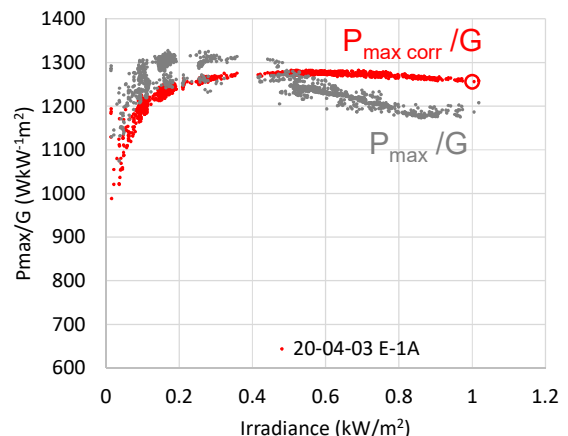


図 III-2-(ハ)-(i)-A-11  $I_{mp}$  と  $V_{mp}$  の積から求めた  $P_{max}$  測定値 (灰色) 及び、 $25^\circ\text{C}$  に温度補正した値 (赤色)



精度で SMM を見積もって補正できることを明らかにした。

ii) 新型太陽電池の屋外高精度性能評価、信頼性・安定性評価

i) で実施する出力連続監視装置による発電性能測定技術開発の測定精度の検証として、同じ屋外曝露サイトに設置の太陽電池アレイの発電量データを継続取得し、劣化特性を考慮した発電量解析を実施した。

産総研九州センターの屋外曝露サイトには、表Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-2 に示すように、計 25 型式の各種太陽電池モジュールを設置しており、その発電量評価を行っている。2020 年からは、高効率結晶 Si 系太陽電池モジュール 11 型式 (SHJ 4 種 (M-1D: 測定したモジュールの枚数 5 枚 (以下同様)、M-3C: 5 枚、W-1A: 5 枚、W-2A: 20 枚)、バックコンタクト型単結晶 Si 太陽電池 (IBC) 2 種 (W-1B: 5 枚、W-2B: 24 枚)、PERC 4 種 (M-3E: 5 枚、M-3F: 5 枚、W-1C: 5 枚、W-1D: 5 枚)、n 型単結晶 Si (n-type) 1 種 (M-3D: 7 枚)) に対象を絞り、発電量評価を継続している。これらの太陽電池モジュールは、パワーコンディショナーを介して太陽光発電システムとして系統連系され、太陽電池アレイの発電量の推移を基礎データとして取得している。また、これらのモジュールの屋内測定をおこなうことでその経年劣化を評価している。屋内測定は、対象としたモジュールを取り外し、洗浄後、ソーラシミュレータを用いて、標準試験条件 (1 kW/m<sup>2</sup>, AM1.5G, 25°C) で特性を評価した。また、対象のモジュールは屋外曝露を開始する前 (設置を開始する前) に屋内測定を実施しており、その屋内測定値 (初期値) で規格化した結果を示す。

各種太陽電池モジュールの屋内測定結果の年次推移を図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-13 に示す。図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-13 は、表Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-2 に示している曝露開始した年月 (Installed) を基準に、その後屋内測定を実施したタイミングで測定点を追加し、2022 年 1 月までの年次推移を示している。

SHJ では、M-1D は設置後から徐々に特性が低下する傾向を示すが、W-2A、W-1A、M-3C はともに、ここ 1 年ではその変化は類似し、大きくは低下しない傾向が見られる。

IBC では、W-2B は特性がやや低下し、W-1B は特性がやや回復した。測定したモジュールの中には、PID-polarization が見られるモジュールが存在している。

n-type では、2020 年度に大きく劣化したモジュールの特性がさらに低下した。Electroluminescence (EL) 像から、1 スtring (セル 20 枚の直列) が発光していないことを確認している。

表Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-2 九州センターに設置しているモジュール一覧

Location	Kinds	Total	Array	Installed
		$P_{\max}$ (kW)	Configuration	Mon/Year
E-1A	p-type mono-Si	5.04	7S x 1P x 4A	09/2010
E-1B	p-type mono-Si	4.9	5S x 1P x 4A	12/2012
E-2A	p-type multi-Si	5	6S x 1P x 4A	09/2010
E-2B	p-type multi-Si	5	5S x 1P x 4A	12/2012
E-3A	CdTe	1.35	4S x 3P x 1A	11/2016
M-1A	a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H	5.12	5S x 2P x 4A	09/2010
M-1B	a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H	1.76	4S x 4P x 1A	07/2011
M-1C	CIGS	1.65	3S x 2P x 1A	08/2014
M-1D	SHJ	1.3	5S x 1P x 1A	01/2019
M-2A	CIGS	5	4S x 2P x 5A	09/2010
M-2B	CIGS	4.95	2S x 5P x 3A	03/2014
M-3A	a-Si:H	3	2S x 5P x 3A	09/2010
M-3B	a-Si:H	1.35	3S x 6P x 1A	07/2011
M-3C	SHJ	1.55	5S x 1P x 1A	06/2016
M-3D	n-type mono-Si	1.89	7S x 1P x 1A	06/2016
M-3E	PERC mono-Si	1.25	5S x 1P x 1A	02/2020
M-3F	PERC mono-Si	1.55	5S x 1P x 1A	02/2020
W-1A	SHJ	1.25	5S x 1P x 1A	06/2016
W-1B	IBC mono-Si	1.05	5S x 1P x 1A	06/2016
W-1C	PERC mono-Si	1.48	5S x 1P x 1A	06/2016
W-1D	PERC mono-Si	1.45	5S x 1P x 1A	06/2016
W-2A	SHJ	4.8	5S x 1P x 4A	12/2012
W-2B	IBC mono-Si	4.68	6S x 1P x 4A	12/2012
W-3A	CdTe	5.2	5S x 4P x 4A	12/2012
W-3B	a-Si:H/a-SiGe:H	2.5	3S x 6P x 2A	08/2014

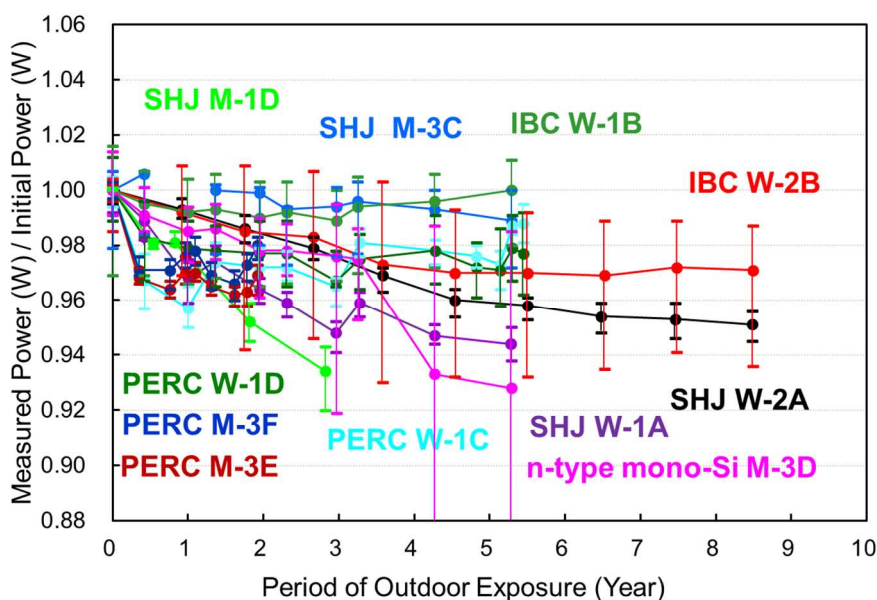


図 III-2-(ハ)-(i)-A-13 高効率結晶 Si 系太陽電池モジュールの屋内測定結果の年次推移

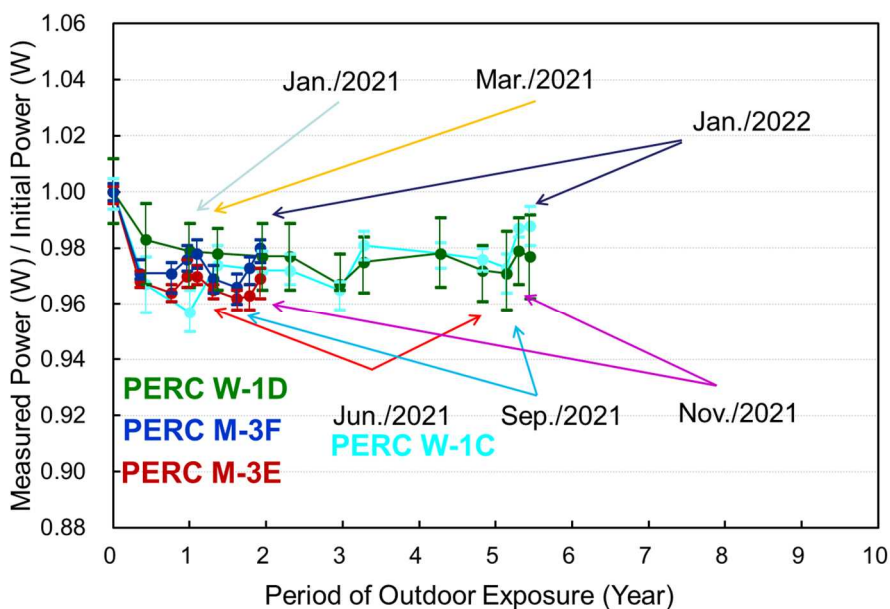


図 III-2-(ハ)-(i)-A-14 PERC モジュールの屋内測定結果の年次推移  
(図 III-2-(ハ)-(i)-A-13 からの抜粋)

PERC では、図 III-2-(ハ)-(i)-A-14 に示すように、2021 年に実施した 5 回の屋内測定のうち、夏季の測定時(6 月と 9 月)では特性が低下し、冬季の測定時(1 月、3 月、11 月)には回復する傾向が明確に見られた。モジュール温度が 50°C 以上になるときに Light- and elevated temperature-induced degradation (LETID)が生じることが報告されていることを鑑みると、夏季の測定時では LETID が生じている可能性が示唆される。2021 年に W-1C のモジュール温度を調べたところ、概ね 4 月から 10 月にかけて 50°C 以上となることを確認している。

これら高効率結晶 Si 系太陽電池モジュールの屋内測定を今後も継続する。特に、PERC については、LETID が示唆された現象の再現性確認のため屋内測定の頻度を上げた測定を実施していく。また、高精度モニタリング技術及び太陽電池発電システムの結果と相補的な解析を行い、経年性能変化および発電量変化を検証していく。

### ③基準太陽電池校正技術の高度化

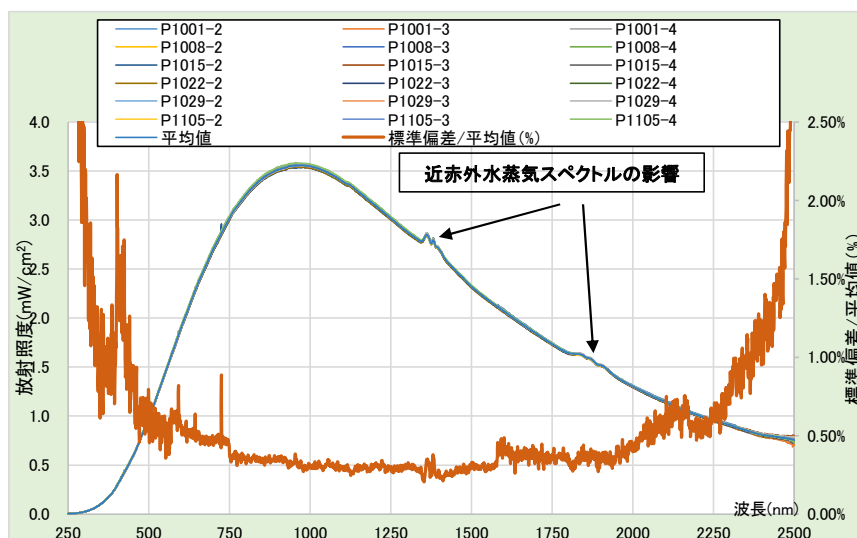
#### i) 基準太陽電池校正技術の高度化

##### i-1 超高温定点黒体炉利用技術

基準太陽電池の一次校正に用いる分光放射照度の上位標準を、従来の分光放射照度標準電球から超高温定点黒体炉の黒体放射に更新するための技術の開発を行い、合成拡張不確かさに占める主要な不確かさ要因の一つである相対分光放射照度の再現性の抜本的な改善に取り組んだ。

まず、超高温定点黒体炉の放射を基準光源として利用するための測定技術の高度化を目的として、超高温定点黒体炉の繰り返し温度サイクル運転を行い、分光放射計を校正する際の計測上の問題点の抽出と効果的な改善を図った。超高温定点黒体炉での融解プラトー発生(2748°C)工程は、黒体炉運転開始から坩堝内の温度を上昇させて、はじめに温度が2722°Cで一定に保たれた状態になるよう制御し、その後、2722°C→2748°C(融解プラトー約3分)→2762°C→2748°C(融解プラトー約1分)→2722°Cの温度工程(1サイクル)を行う。温度上昇と温度下降の際に、それぞれ約3分、約1分間融解プラトー温度が維持される。この温度工程(1サイクル)を4回繰り返し、温度測定を行ったところ、1回目以降の2～4回目の坩堝温度が1回目のスタート温度2722°Cには戻らず、0.6～2.3°Cほど温度が上昇することを確認した。この温度工程1回目と2回目～4回目のプラトー開始温度の違いは、融解プラトー測定直前の坩堝内の固体状態の違いにより黒体放射の温度勾配の形状が異なることが原因と推測される。そこで、測定では温度工程を4サイクル行い、工程1回目は黒体放射温度の温度を記録し、再現性のある工程2回目～4回目に、6分岐ファイバ型分光放射計で分光放射照度の測定を行うこととした。

図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-15に繰り返し測定(3回測定×6日)した超高温定点黒体炉の分光放射照度と、その平均値に対する標準偏差を波長毎に示す。相対分光放射照度はプランクの理論式で算出される値とほぼ一致していることが確認され、平均値に対する標準偏差は500 nmから2200 nmの波長範囲では0.7%以下となることを確認した。500 nm未満と2200 nmを超える波長域では分光器の特性に依存して大きくなっており、積算放射照度の測定不確かさを低減させるには両波長域の分光器の特性を改善する必要がある。これまでに、太陽電池の感度波長帯域であるために改善効果の高い紫外・可視分光器の開発と導入を行い、迷光の大幅な低減、明るさの向上(NA値を1.4倍)、波長分解能の向上(3 nmから2.5 nmへ)を実現し、太陽電池の感度波長領域での不確かさの改善を実現した。また、近赤外・赤外波長領域に、大気中の水蒸気による吸収が複数(1350 nm及び1900 nm付近)観測される。この外乱は、光源(黒体炉)から分光器までと、分光器内の入口からセンサまでの光路における水蒸気の影響である。そこで、分光放射計の近赤・赤外分光器にドライエア(10 L/分)を充填する方法を採用し、内部の水蒸気を排除することで、超高温定点黒体炉の放射を測定する際の水の吸収の影響を解消することができた。年間の湿度変化に応じて、窒素、アルゴンの併用についても実験を開始した。



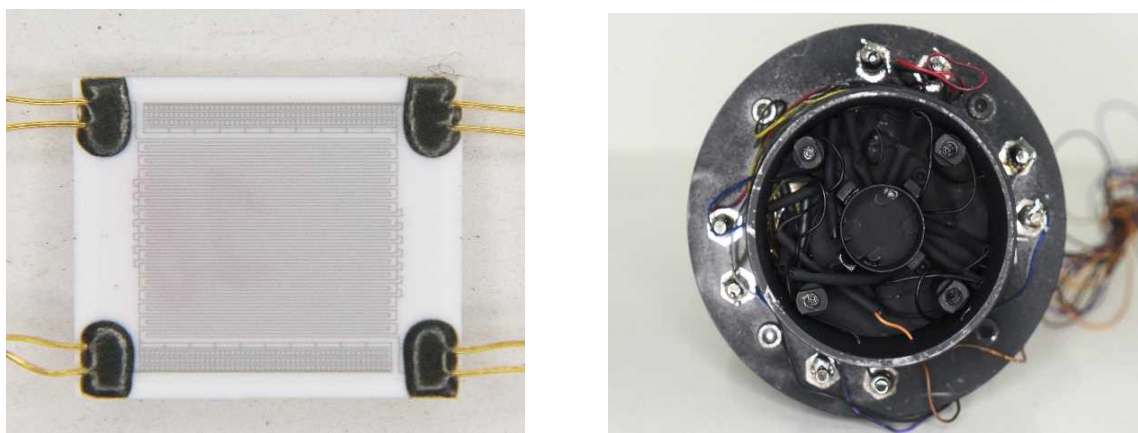
図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-15 超高温定点黒体炉の分光放射照度と平均値に対する標準偏差

## i-2 絶対放射計測技術の開発

分光放射照度標準電球は校正の不確かさが大きいため、これを上位標準とすると基準太陽電池の一次校正の不確かさは2%を超えてしまう。国際競争力を確保するためには、不確かさは1%以内であることが必須で、国際的な根幹ラボにおいては0.5%がベンチマークである。ソーラシミュレータ法では、ソーラシミュレータの放射照度を校正の不確かさの小さい方法で測定する必要があることから、高平行度ソーラシミュレータとWRRファクタの検証されている絶対放射計を組み合わせることで、基準太陽電池の一次校正の不確かさを1%以内に抑制してきた。

i-1で述べた超高温定点黒体炉利用技術の高度化により、更なる最高校正能力の向上を追求するため、測定再現性を改善した構造精緻型絶対放射計を開発した。世界気象機関(WMO)が主宰する5年毎の国際直達日射比較(IPC)に参加し、そこで決定される世界日射計測標準(WRR)ファクタを検証した。前回参加時の課題であった応答性の向上と、吸収率が極めて高い(99.9%)カーボンナノチューブ(CNT)を塗布した新しい構造の受光部を搭載した絶対放射計の特性評価を主な目的に、2022年度に開催されたIPC-XIIIに日本から唯一参加した。解析の結果、開発した絶対放射計のWRRファクタは、1.000969となり、世界標準器群(WSG)との差を、前回の1%から0.1%まで大幅に縮小することができた。吸収率の極めて高いCNTを塗布することで、これまで属人性の高かったキャピティの構造を円錐形から平面形に変更可能であることが判った。

また、WRRファクタは、SI放射標準と約0.3%の系統差があり、AIST、NREL、ESTIともに、WRR→SIの換算によって校正用光源の絶対分光放射照度を得ている。この換算自体が不確かさ要因でもあること、また、黒色塗料の吸収率が低い時代に銀を円錐形として抵抗線を巻き付けて受光部としたため、作製法と構造が複雑で属人性が高いことなどが技術的な課題であった。今回、吸収率の高いCNTを塗布することで、受光部を円錐形から平面形に変更可能であることが見いだされたので、更に製作の属人性が低く、安定で製作が容易な受光部として、白金薄膜受光素子の開発とその評価実験を行った。図III-2-(ハ)-(i)-A-16に新たに開発した平面型受光部の概要を示す。セラミック基板上に白金薄膜を2系統形成し、ヒータ用、測温体用のどちらもPt1000クラスAの精度を実現している。電気的・熱的性能が同等。基板サイズは10mm×10mmである。ソーラシミュレータ光連続照射による抵抗値の変化を測定

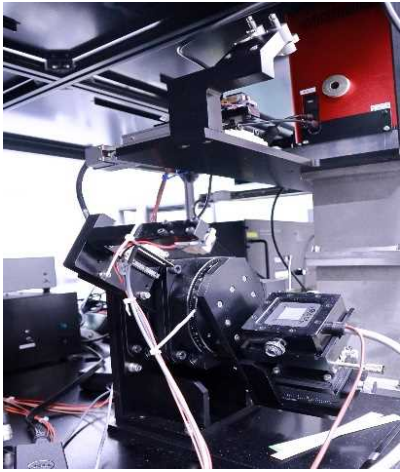


図III-2-(ハ)-(i)-A-16 試作した平面型白金薄膜受光部(左)と実験用受光部(右)

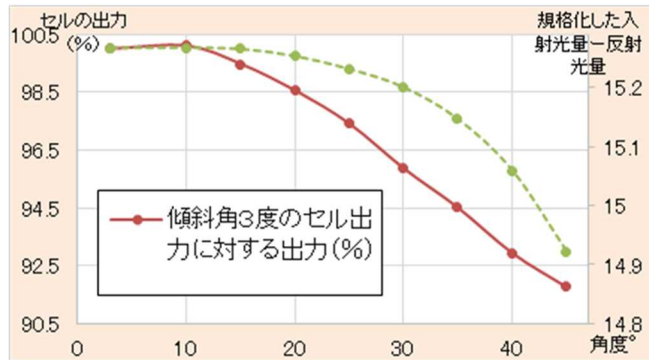
したところ、光連続照射下での出力変動 $\pm 0.15\%$ と高安定であること、また、光照射シャッタの開閉繰り返しによる抵抗値の繰り返し測定において、抵抗値の再現性を確認した。また、白金薄膜抵抗体の電圧-電流特性を確認し、決定係数が1.00オーダーと、ほぼ、完全な線形性を示すことを確認した。試作した白金薄膜受光素子は高安定・高再現性・高線形性と優れた特性を持つが、温度変化(=照度変化)に対する応答速度が比較的遅い。今後、受光素子の構造の改良、もしくは、基板材質や原理の変更による応答速度の改善を検討する。

## ii) 分光感度の角度依存性評価技術開発

太陽電池の用途拡大に向け、その出力の入射角度特性を評価する上で、ソーラシミュレータ等の従来光源では照度角度分布が不十分であり、均斉度の空間的な補正等の技術が必要となる。この課題を解決する目的で、スーパーコンティニウムレーザー(SCレーザー)と高透過率でレーザー耐性を持つ波長セレクタを組み合わせた、入射角が異なっても放射照度とその均斉度が変化しない光学システムの基本技術を開発した(図III-2-(ハ)-(i)-A-17)。図III-2-(ハ)-(i)-A-18に開発した光学システムを使用した



図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-17 SC レーザ、波長セクタ、ゴニオ回転ステージを用いた分光感度の入射角依存性評価装置



図Ⅲ-2-(ハ)-(i)-A-18 計測データの一例 (単結晶 Si、波長 660 nm)

基準セルの角度依存性測定結果の一例を示す。今後、角度制御と計測の自動化を行うとともに、現時点では SC レーザと波長セクタの特性により測定可能な波長帯が限定的であるため、その解決技術についても検討する。

## 2. 実用化・事業化見通し

### ①新型太陽電池の性能評価要素技術開発、③基準太陽電池校正技術の高度化

- ・本プロジェクト研究開発成果の IEC、JIS 規格等への標準化を推進し、太陽電池評価の国際整合性と公正な競争の基盤を強化する。国際標準開発への技術的貢献として、国際標準化委員会等が実施する国際比較測定に積極的に参加する。比較測定での開発技術の有用性・整合性の検証を通じて、国際標準に反映することが期待できる。

- ・国際根幹比較校正 (WPVS) を定期的 to 実施し、最高校正能力の推定不確かさの妥当性を検証する。WPVS 根幹ラボとして、日本の国際的プレゼンスを維持しつつ、世界の校正機関での校正品質の改善が継続的に取り組まれるよう先導する。

### ②屋外環境における新型太陽電池の発電性能評価

- ・新型太陽電池の屋外性能評価技術として、特に、今後開発が進むペロブスカイト太陽電池モジュールの屋外高精度性能評価への適用が期待できる。

- ・稼働中 PV システムの動作中断のない出力連続常時監視技術として、大量導入が進む結晶シリコン PV システムの O&M 技術等への応用展開も期待できる。

## 3. 波及効果

### ①新型太陽電池の性能評価要素技術開発、③基準太陽電池校正技術の高度化

- ・高精度かつ国際整合性が確保された性能評価技術・基準太陽電池校正技術が、メーカーや試験機関等に普及することで、太陽電池デバイス開発能率向上・高効率化・低コスト化が促進され、また、開発される太陽光発電の信頼性や価値向上に繋がる。新市場に向けて新型太陽電池開発を進めるメーカーへの開発支援、また、国際標準化を通して健全な市場形成にも繋がるものと期待される。
- ・民間校正事業者 (試験機関) へ一次基準セルの供給、二次校正技術の提供を行うことで、事業者の校正技術の向上が期待される。

### ②屋外環境における新型太陽電池の発電性能評価

- ・高精度かつ公正な性能評価基準を提供することで、メーカーでの新市場へ向けた新型太陽電池開発が促進される。

・オンサイトでの連続常時監視技術として、瞬時性能の高精度評価の実現、不具合検出の高精度・迅速化が期待できる。太陽電池モジュールの取外し・運搬・屋内測定などの維持管理のためのコストの低減を図ることができる。評価測定精度を担保した標準的手法として O&M 技術に実装することで、保守点検費等の大幅な低コスト化が見込まれる。

#### 4. 今後の展開

##### ①新型太陽電池の性能評価要素技術開発

・新たに開発される新型太陽電池に対応した性能評価技術の開発を引き続き進めるとともに、国際比較測定を通して、開発技術の測定整合性を検証し、測定精度（不確かさ）の向上を進める。

##### ②屋外環境における新型太陽電池の発電性能評価

・新型太陽電池の屋外性能評価の要素技術開発として、新型太陽電池向けに開発する PVMS を使用した連続監視技術の実験検証・精度評価を進める。GI 基金プロジェクトで開発を進める大面積ペロブスカイト太陽電池モジュールの屋外計測技術への適用を視野に入れて開発を進める。共通基盤技術として、メーカーや試験所等への開発技術の広い普及を図る。

##### ③基準太陽電池校正技術の高度化

・超高温定点黒体炉からの黒体放射を分光放射照度標準とする校正技術の開発を引き続き進めて、最高校正能力の向上を図る。

・SI 単位系で自己校正可能な絶対放射計の開発を進め、校正のトレーサビリティ維持の低コスト化を図る。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	1	2	1	4
研究発表・講演	8	13	0	21
(国内・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査有)	(0)	(4)	(0)	(4)
(国内・審査無)	(8)	(9)	(0)	(17)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	1
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

(ii) 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発

【A 日射量の短期予測に関する研究開発】(一般財団法人日本気象協会)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発(日射量の短期予測に関する研究開発)	【2022年度最終目標】 1km四方程度のエリアを想定した数時間先の発電量の予測に向け、想定エリアの日射量予測情報を提供する技術を開発する。数時間程度先の日射量予測に関しては、現行の手法より予測精度をRMSEで15%改善する。また開発する手法は、実際の情報提供での有用性を考慮して、数十分以内で計算可能な手法とする。	<ul style="list-style-type: none"> <li>数時間先の日射量を予測する手法として、衛星による雲分布と物理学的予測を組み合わせた物理AIモデルの開発を行った。</li> <li>本手法は、実用化を見据えた手法(計算負荷等)となっており、数十分以内での予測計算が可能である。</li> <li>新潟、つくば地点での検証の結果、ベースライン手法(相互相関法)と比較して、RMSEで15%程度の精度改善を確認した。現在他地点での検証を進めている。</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>2地点(つくば、新潟)での精度検証の結果、最終目標(RMSEで15%)と同程度の精度改善を既に確認済</li> <li>2地点以外に関しては現在検証中であるが同程度の予測精度改善となる見込み</li> <li>気象モデルの改良・調整を進めており、更なる予測精度向上が期待できる。</li> </ul>

\*1 達成度

◎:大きく上回って達成、○:達成、△:達成見込み、×:未達

【B 発電量予測評価技術の研究開発】(学校法人東京理科大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発(発電量予測評価技術の研究開発)	【2022年度最終目標】 共同実施者(日本気象協会)が1km四方程度のエリアを想定した数時間先の発電量の予測に向け、想定エリアの日射量予測情報を提供する技術を開発する。その開発成果となる日射量予測技術を用いて発電量予測評価を行うための技術を開発する。アグリゲータや太陽光発電事業者向けを想定した日射量予測技術を用いた発電量評価技術として、推定日射を用いた対象エリアの発電量の毎時の推定精度の%RMSEを現行の手法に対して15%以上改善する。	<p>発電量予測評価技術として、日本気象協会から提供を受けた推定日射量、発電所近隣の気象官署における実測日射量、発電所において計測している日射量を用いて、メガソーラ、住宅PV、実証試験サイトの発電量推定を行った。</p> <p>物理モデルを用いた現行の発電量推定手法に対して、機械学習モデルを追加で用いることで、推定精度の向上が確認できている。</p> <p>また、当日補正を用いる短期予測では、当日朝の推定誤差を用いた短時間先予測値の補正手法の開発に着手しており、今後は、これらを組み合わせた短期予測に向けた発電量の予測評価技術の開発を進めていく。</p>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>限られた評価期間では推定精度、15%以上の改善を確認済み。</li> <li>今後は評価期間・評価対象サイトを増やして最終的な推定精度の向上を達成見込み。</li> </ul>

\*1 達成度

◎:大きく上回って達成、○:達成、△:達成見込み、×:未達

## A 日射量の短期予測に関する研究開発(一般財団法人日本気象協会)

### 1. 成果詳細

#### (1) 入力データ・検証用データの作成

予測計算における入力データ、検証用データとして以下のデータを収集・作成・整理した。

- ・地上気象観測データ、アメダスデータ（気象庁観測データ）
- ・ひまわり 8 号のデータ（ひまわり標準データ）
- ・全国 5 地点（長沼、鳥栖、つくば、岐阜、沖永良部）の測定データ
- ・発電量実績データ
- ・衛星データから推定した日射量データ

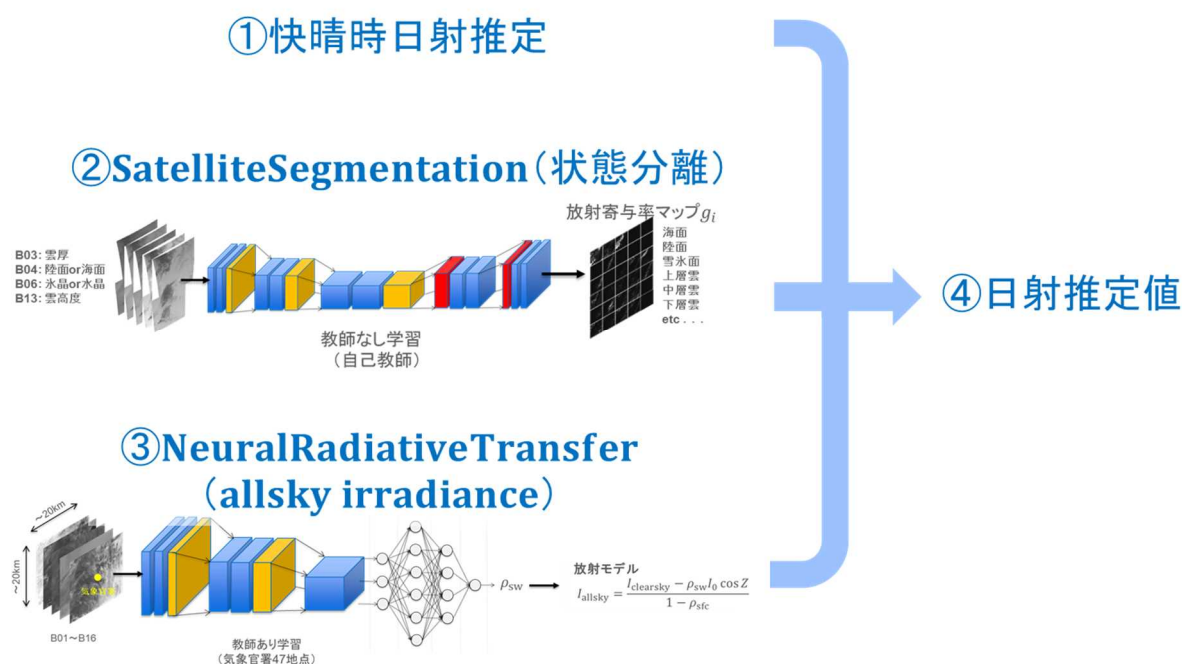
全国 5 地点（長沼、鳥栖、つくば、岐阜、沖永良部）の観測データについては日々のデータチェック、週 1 回の点検作業を実施しデータの品質管理に努めた。2021 年度は、各地点の精密点検を行い、測定機器に異常がないか等の確認を行った。必要に応じて、湿度センサーチップ等の機器の交換を行った。



図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-1 岐阜地点の精密点検作業

発電量予測の精度検証を行うために、つくば市内及び近郊における 30 地点分の発電実績データを収集した。30 地点のうち 10 地点は 10 分毎のデータ、20 地点は 30 分毎のデータである。連携して実施している東京理科大学にデータを共有し、発電量予測の検証作業を進めた。

衛星データから推定した日射量データに関しては、ひまわり 8 号の複数バンド情報を活用した AI モデル（日射量推定モデル）により作成した。日射量推定モデルのアーキテクチャを図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-2 に示す。



図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-2 日射量推定モデルのアーキテクチャ



①快晴時日射量は、大気外日射量、太陽天頂角、エアマス及び水蒸気量から計算している。水蒸気量は、緯度帯、地域性、季節変動などを表現できるモデルを用いている。②Satellite segmentationは、ひまわり8号の各バンドの特性に応じ、陸面、海面、雪氷面、上層雲（氷雲）、中層雲（氷雲）、中層雲（水雲）、下層雲（水雲）の状態を分離し、天候判別を行う手法である。③Neural Radiative Transferモデルは、放射モデルにおいて、短波放射の反射率 $\rho_{sw}$ を計算するために用いている。ひまわり8号の各バンドのデータより、対象地点の周辺領域を畳み込むことで、散乱過程を模擬したネットワークを作成している。④日射量推定値は、①、③から得られる快晴時日射量と全天候の日射量と、②で得られる放射寄与率を掛け合わせることで計算している。

以上の日射量推定モデルを用いることにより、積雪時や薄雲の事例、雲構造が複雑な事例などを精度よく推定できていることを確認した。

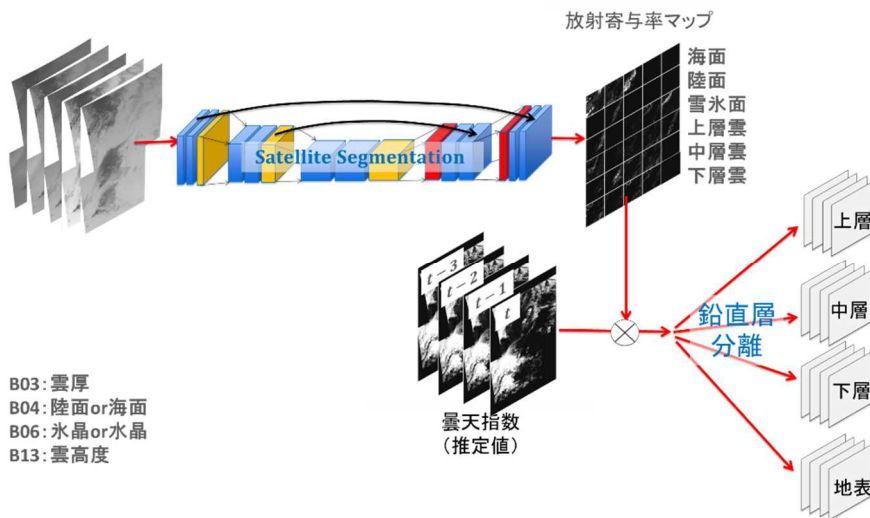
## (2) 日射量予測モデルの開発

数時間先の日射量を予測する手法として物理AIモデルの改良を行った。

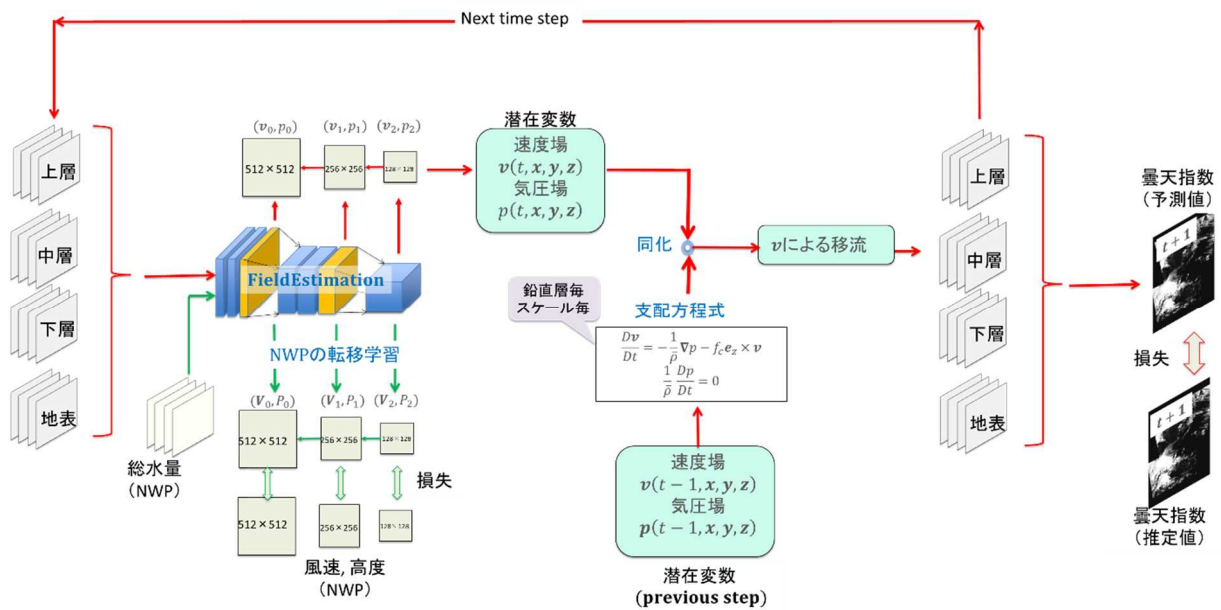
図III-2-(ハ)-(ii)-A-3は、ひまわり8号の複数のバンドデータから、上層、中層、下層の雲や、地表面の状態を表現（鉛直層分離）するモデルのアーキテクチャである。図III-2-(ハ)-(ii)-A-4は、過去から初期時刻までの上層、中層、下層の雲や、地表面の状態から、将来の日射量を予測するモデルのアーキテクチャである。まず、各層の雲分布からEncoder-Decoder（Flow Netなど）により、潜在的な物理変数（速度や気圧など）を推定する。初期時刻の雲分布と速度場から、次の時刻の雲分布（曇天指数の予測値）を計算することができる。このように、時間発展させることで、数時間先までの雲分布（日射量）の予測結果が得られる。

さらに、構築したモデルにおいては、Encoder-Decoderから算出される潜在変数と、一つ前の時刻の潜在変数から、既知の雲力学・雲物理の方程式より計算した潜在変数を同化することにより精度向上を図った。

また、Encoder-Decoderから、より実際に近い潜在変数を得るために、気象モデルの結果の転移学習を行った。転移学習には、気象モデルから得られる水蒸気（総水量）と風速、高度分布を用いた。水蒸気分布を雲分布と類似のものとみなして、風速との関係性を学習しEncoder-Decoderに反映させることで、より精度が高い予測結果を得ることができた。



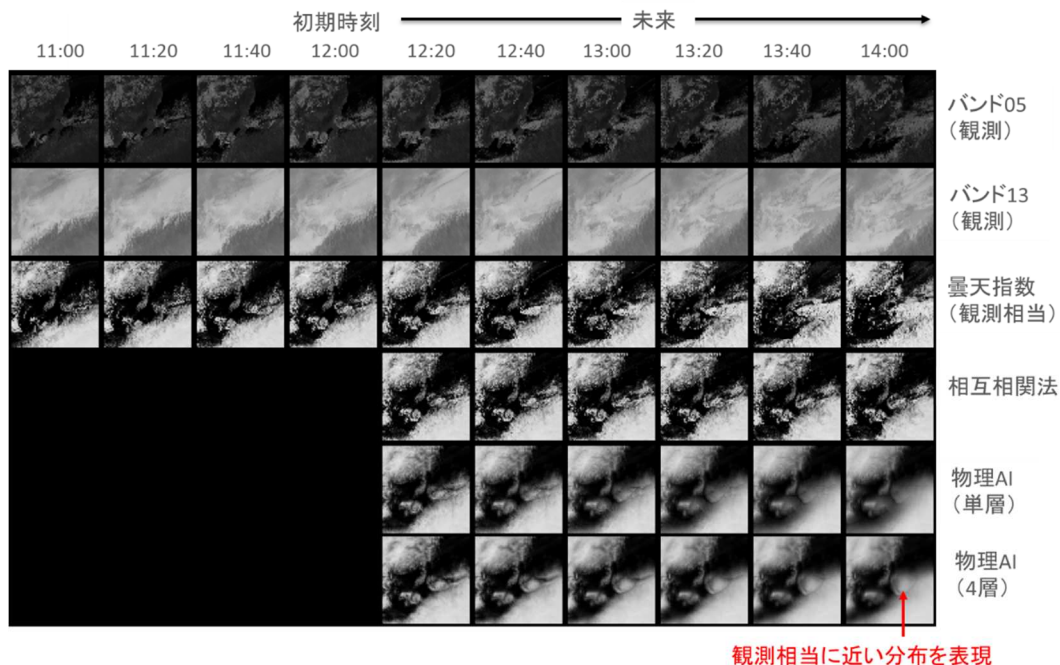
図III-2-(ハ)-(ii)-A-3 日射量予測モデルのアーキテクチャ（鉛直層の分離）



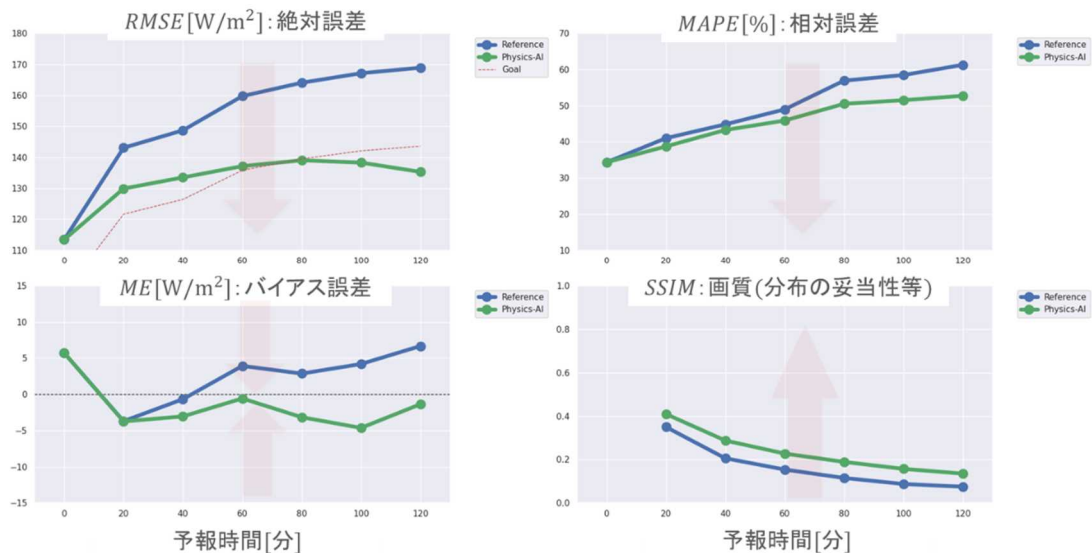
図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-4 日射量予測モデルのアーキテクチャ (予測計算)

上記した予測モデルにより計算した2018年1月29日の雲分布(曇天指数分布)の例を図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-5に示す。図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-5において、予測の初期時刻は12時である。物理AI(単層)と物理AI(4層)を比較すると、物理AI(4層)の方が観測相当の曇天指数の分布に近くなっていることが確認できる。図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-3に示した鉛直層の分離を行うことで、異なる高さの雲が混在している条件下において速度場の表現力が向上している可能性が示唆される。

予測精度の検証をつくば、新潟の2地点に対して実施した。新潟の予測精度の検証結果を図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-6に示す。Referenceモデルは相互相関法による予測である。RMSEに関しては、約60分後以降の予測において15%以上の精度向上がみられた。また、相対誤差、分布の妥当性についても改善が確認された。



図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-5 雲分布の計算結果の例(2018年1月29日、初期時刻12時)



図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-A-6 予測精度の検証結果の例（新潟地点）

## 2. 実用化・事業化見通し

本技術開発では、数時間先の日射量を予測する手法として、衛星による雲分布と物理学的予測を組み合わせた物理 AI モデルの開発を行っている。開発中の手法は、実際の情報提供での有用性を考慮して、数十分以内で計算可能な手法となっており、プロジェクト終了後の実運用に適したものになっている。

また、日本気象協会では、数時間先を対象とした日射量予測サービスを商品化し、日々運用しているが、顧客からは予測精度向上に関する要望が多く寄せられている。予測精度の高い日射量予測サービスのニーズは高く、実用化されることで多くの利用が見込まれる。

## 3. 波及効果

FIT インバランス特例制度下において、これまでの日射量予測は、主に一般送配電事業者向けの予測であり、電力エリア全体の広域的な日射量予測の精度向上に重点が置かれてきた。一方で、FIT 終了電源や FIT 制度からの自立化を見据えると、今後はバランスグループ(BG)自らが発電量予測を実施するようになるため、広いエリアだけでなく、BG が所有する発電所地点ピンポイント等での日射量・発電量予測を実施する必要がある。BG 側が発電量予測を行う場合、インバランスの低減を目的にゲートクローズ直前まで発電量予測の誤差を調整するため、短時間先(1、2時間程度先)の予測精度も重要となる。本技術開発の成果を社会実装することで、インバランスの低減につなげることができる。

日射量予測サービスの提供・販売先としては、日本全国の一般送配電事業者、バランスグループ、アグリゲーター、小売電気事業者、太陽光発電事業者ならびにそれらのプレーヤーのシステム構築・運用を行うベンダー等を想定している。これらの多岐にわたるプレーヤーが高精度な日射量予測情報を利用できるようになることで、インバランスの低減以外にも、効率的な太陽光発電システムの運用にも寄与する。

## 4. 今後の展開

事業終了後、現在開発中の予測技術を実用化し、高精度な数時間先の日射量予測情報の提供を行う。具体的には、プロジェクト期間終了後、早期にサービス仕様の検討、必要な計算機資源の確保、導入のためのシステム構築を進め、2023年度中の本格的なサービス開始を予定している。

また、本技術開発で構築した予測モデルをベースに、予測時間の延長や、予測情報に対する付加情報の追加などに関する研究開発を行うことで、より利便性や社会的意義の高い予測情報の提供が可能になると期待される。

5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	0	0	0
研究発表・講演	1	3	1	5
(国内・審査有)	(0)	(0)	(1)	(1)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(1)	(3)	(0)	(4)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月22日現在)

## B 発電量予測評価技術の研究開発(学校法人東京理科大学)

### 1. 成果詳細

#### (1) 傾斜面日射量の算出

予測対象となる太陽光発電所の太陽電池アレイは傾斜面に設置される事が一般的であるが、発電量予測に用いる日射量の予測値は水平面全天日射量として得られることが一般的であるため、はじめに、水平面全天日射量を用いて太陽電池アレイへの入力エネルギーとなる傾斜面日射量  $H_{Ag}$  を算出する。その際、水平面全天日射量の直散分離には、その簡易性から Erbs モデルを用いた。その後、太陽高度角  $h$  を用いて水平面直達成分を  $h$  の正弦で除することにより法線面直達日射量を算出するが、太陽が地平線付近にある(太陽高度がゼロに近い)場合には算出誤差が極端に大きくなる可能性がある。そこで、太陽高度が 3 度以下の場合は 3 度を用いることとした。一般に太陽が地平線付近にある場合には日射量は弱いため、予測評価の観点からは、このことが発電量予測に与える影響はわずかである。

#### (2) 発電量予測における物理モデルの開発

発電量予測における物理モデルでは、JIS C 8907 の考え方にもとづき、太陽光から電力へのエネルギー変換過程で生じる様々なエネルギー損失要因の影響を損失係数で表現した。この際、これまで発電特性の詳細な解析に用いていた SV 法における各種損失係数の算出モデルを応用し、簡易性を維持しつつ高精度化を図った。

#### (3) VI-SVR を用いた手法の開発

物理モデルでは考慮できていないその他の損失として、温度損失、入射角損失、最大出力低下損失を分離した後に残ったインバータや日陰などによる損失を補正するための係数を以下のよう決定する手法を開発した。

- ① 予測対象日の過去 30 日間において、PV 発電量の実測値  $E_{mea}$  と、温度損失係数  $K_T$ 、入射角損失係数  $K_I$ 、最大出力低下損失係数  $K_{SPL}$  を考慮した PV 発電量  $E_{est\_P}$  (式 III-2-(ハ)-(ii)-B-(1)) との比  $\alpha_{oth}$  (式 III-2-(ハ)-(ii)-B-(2)) を算出し、目的変数とする。また、その説明変数を晴天指数 CI、太陽高度角 [rad]、太陽方位角 [rad]、気温 [°C]、風速 [m/s] の 5 つとする。目的変数と説明変数を結合したものを 1 つのデータとし、不変標準偏差を用いて各説明変数の標準化を行う。

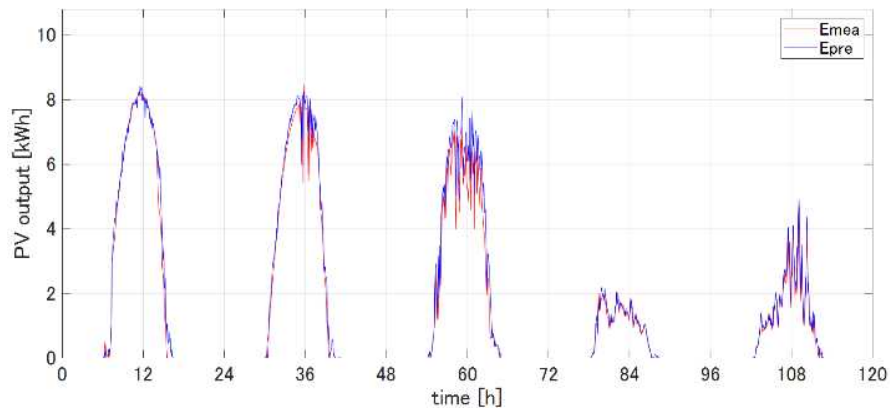
$$E_{est\_P} = P_{ACap} \cdot \frac{H_{Ag}}{G_S} K_T \cdot K_I \cdot K_{SPL} \quad \text{式 III-2-(ハ)-(ii)-B-(1)}$$

$$\alpha_{oth} = \frac{E_{mea}}{E_{est\_P}} \quad \text{式 III-2-(ハ)-(ii)-B-(2)}$$

ここで  $P_{ACap}$  は定格出力、 $G_S$  は基準太陽光の日射強度である。

- ② 予測対象時刻における説明変数を算出し、晴天指数を用いた K 近傍法により予測対象時刻の晴天指数に近いデータを 30 個抽出する。
- ③ 抽出したデータにランダムフォレストを用いて各説明変数の重要度を計算し、学習データに重みづけをする。
- ④ 重みづけをしたデータを用いて SVR のハイパーパラメータを最適化し、SVR による非線形回帰によりその他の損失係数  $K_{oth}$  の値を算出する。

開発したモデルの有効性の検証結果の例として、実証試験サイトとして用いている山梨県北杜市の北杜メガソーラーの発電量を、実測日射量等を用いて推定した結果を図 III-2-(ハ)-(ii)-B-1 に示す。対象システムは午前中に周辺樹木等の影響により日陰の影響を受けているが、開発したモデルの適用により、概ね正しく発電量が推定できていることが確認できた。



図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-B-1 北杜サイト (2017年10月1日～5日)の発電量推定結果

(4) 勾配ブースティング決定木を用いた手法の開発

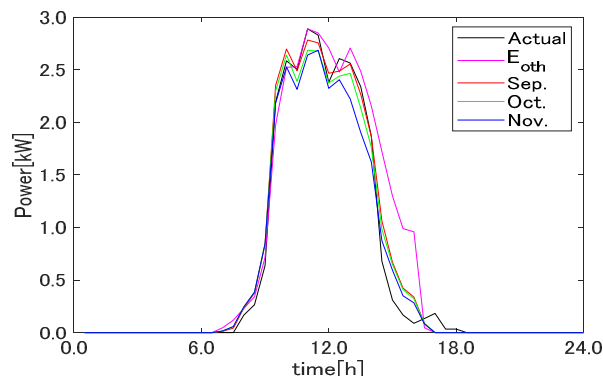
VI-SVR を用いた手法と同様に物理モデルにて算出した値を補正する係数をその他の損失係数  $K_{\text{oth}}$  とし、以下のように決定した。

- ①推定対象日に対する過去30日のデータにおいて、目的変数を  $\alpha_{\text{oth}}$  (式(2))、説明変数を晴天指数 CI、太陽高度角 [rad]、太陽方位角 [rad]、気温 [°C] の4つとする。
- ②目的変数と説明変数の関係を一般化するために、全てのデータにおける推定値と実際値との誤差を平均した「損失関数」を定める。損失関数には平均二乗誤差を用いる。
- ③次に勾配降下を行う。データ点のそれぞれの位置で勾配を計算し、他のデータ点と比較して値が最も大きい向きに移動していき、反復の差が収束もしくは最大反復回数に達した時に終了する。そこで算出された、最も損失関数が小さいものを最適関数として、推定モデルを作成する。

(5) LSTM用いた住宅用 PV 向け手法の開発

住宅用 PV では、アレイ構成が多方位であったり、またその方位角情報が数度レベルでの正確性を有していなかったりと、設備構成情報において不確実性がある事が想定される。そこで、より多くの過去データから機械学習によりその他損失係数を算出することを目的として、LSTMを用いた手法の開発を行った。目的変数は他の手法と同様であり、説明変数は散乱比、太陽の高度角 [rad]、太陽の方位角 [rad]、気温 [°C]、風速 [m/s] とした。

図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-B-2 に、南、西、東の3方位アレイを持つ、つくば市内の住宅用 PV の発電量の推定結果を示す。推定対象日12月1日に対して、学習の開始時期を同年の9月、10月、11月と変更して検証した結果、3ヶ月の学習期間となる9月開始において最も高い推定精度となった。



図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-B-2 つくば市内の住宅用 PV の12月1日の推定結果

(6) 実施試験サイトのデータ取得

予測評価技術開発に用いるデータ取得については、山梨県北杜市の協力を得て、開発する発電量予測評価技術の実証試験サイトとして用いる北杜メガソーラー(図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-B-3)の発電データ取得を2021年度も継続的に実施した。



図Ⅲ-2-(ハ)-(ii)-B-3 北杜メガソーラー発電所

## 2. 実用化・事業化見通し

本研究で開発する発電量予測評価技術は、電力事業者、中でもアグリゲーターや小売電気事業者、太陽光発電事業者などに向けた日射予測サービスと組み合わせた太陽光発電の発電量予測サービスにおいて用いられることを想定する。実施者である東京理科大学の開発する技術をベースとして、共同実施者である一般財団法人日本気象協会との連携と技術移転による実用化を想定している。

## 3. 波及効果

太陽光発電の予測を活用した導入量拡大と電力系統の安定運用は、電力事業者にとっても系統運用者にとっても、また電力需要家にとっても経済性、環境性、安定性の面で有益であり、その基盤技術の一つとなる日射予測、および発電量予測の評価技術は広く社会の電力エネルギーの脱炭素化に資する技術となることが期待できる。

## 4. 今後の展開

技術開発の成果を学会発表、学術論文、報告書等で報告するとともに、研究開発期間中も専門家らとの意見交換を通じて事業化に向けたニーズを把握し、電力システムの脱炭素化において重要な役割を果たす太陽光発電のさらなる大量導入に資する予測評価技術を開発していく。

## 5. 特許・論文・対外発表

該当なし

(2022年6月20日現在)

(iii) 翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発

【A 翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発】

(一般財団法人日本気象協会、国立研究開発法人産業技術総合研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発	現在から翌日および翌々日程度先の日射量予測において、従来の予測手法に比べて最大誤差を10%以上低減する技術を開発する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・日射量予測に特化した気象モデルの計算条件を検討するとともに、過去の予測を試行した。</li> <li>・複数機関翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発ののりりのみ翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発れの気象モデル予測値の統合について、統合に用いる気象モデル予測値の統計補正および統合比率の高度化を検討した。</li> <li>・日射量予測が大きく外れる可能性を予測するため、日射量の予測傾向とアンサンブル予報の気象要素の予測傾向を比較分析した。</li> <li>・気象庁メソアンサンブル予報の日射量の予測精度を検証するとともに、大外し事象の誤差低減のための気象庁 GPV の活用を検討した。</li> </ul>	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>・既に従来手法より数%～10%程度の最大誤差低減を達成済。</li> <li>・今後、複数モデル統合における統合比率の層別化等の高度化により、最大誤差10%以上低減を達成見込み</li> </ul>

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、 ○：達成、 △：達成見込み、 ×：未達



## A 翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発 (一般財団法人日本気象協会、国立研究開発法人産業技術総合研究所)

### 1. 成果詳細

①日射量予測に特化した気象モデルに係る技術開発、②複数機関の気象モデル予測値の統合に係る技術開発、③アンサンブル予報に基づく信頼度予測に係る技術開発、④大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する各種気象庁 GPV を利用した日射量予測の特性分析の 4 項目を実施した。以下に各項目の研究開発の概要を示す。

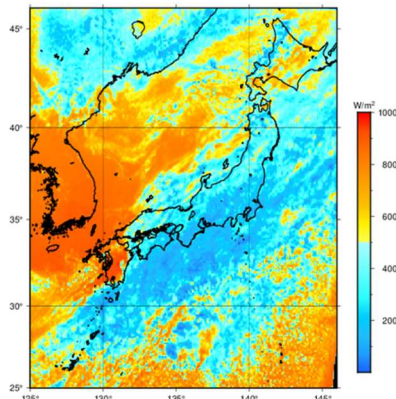
#### ①日射量予測に特化した気象モデルに係る技術開発

##### (a) 計算環境の整備・維持

日射量予測に特化した気象モデルの開発および気象モデルによる過去予測計算（過去のある時点を起点とした予測値を作成するための計算）の試行を実施するために必要な高速並列計算機を整備した。

##### (b) 予測検証条件の設定および既往モデルの精度検証

日射量予測に特化した気象モデルの技術開発に係る日射量予測の検証条件として、親モデルで日射量予測誤差が大きい事例のうち、総観場の誤差は比較的小さかった事例を検証対象とすることとした。また、ベースとなる予測精度を検証するため、既往の気象モデルを用いた過去予測計算を開始した。過去予測計算結果の例を図Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-1 に示す。



図Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-1 過去予測計算結果の例(2020年9月20日12時の全天日射量予測分布)

##### (c) モデル内でより正確に雲が発生することを目的とした物理過程の改良

雲や日射量の予測精度向上が期待される WRF-solar を活用した計算条件について調査し、今後実施する過去予測計算での感度実験内容を検討した。WRF-solar の活用においては、雲の発生や日射量に影響するエアロゾルを予測において考慮する計算条件も調査した。

##### (d) 初期値・境界値として入力するデータおよびそれに適した計算条件の検討

開発する領域気象モデルで初期値・境界値として入力する気象データ（親モデル）および海面水温データを調査し、候補となるデータを整理した。例えば、ある親モデルの予測誤差が大きい場合でも、他の親モデルを初期値・境界値に用いた領域気象モデルの予測結果では予測誤差が小さい可能性がある。そこで、気象庁 GSM と ECMWF の 2 つの気象データをそれぞれ入力するモデルを検討することとした。

#### ②複数機関の気象モデル予測値の統合に係る技術開発

##### (a) 予測検証条件の設定およびベンチマークの精度検証

複数機関の気象モデル予測値の統合に係る日射量予測の検証条件を設定した。主な検証条件を表Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-1 に示す。また、ベンチマークとしてフィージビリティスタディで取り扱った簡易的な統合手法について精度検証を実施した。

表Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-1 日射量予測精度の主な検証条件

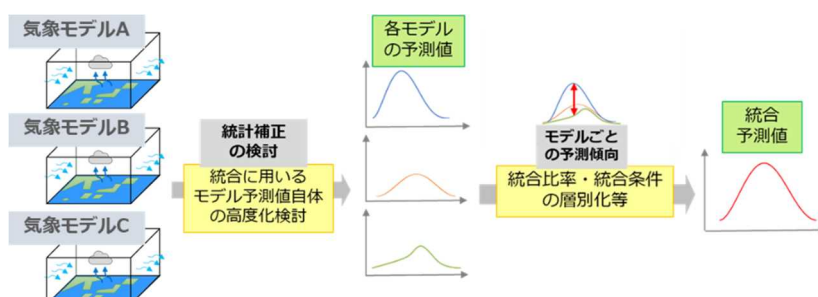
項目	内容
予測値	各日3時ごろ発表想定の翌日予測(30分値)
実測値	気象官署日射量実測値(30分値、日射量を観測していない地点は推定値を使用)
対象地点	電力エリア平均日射量(2021年6月末時点の太陽光発電設備認定・導入量に基づく気象官署加重平均値)
評価指標	日射量予測の±3σ誤差

(b) 計算環境の整備・維持

統合に用いるモデル予測値自体の高度化等を実施するため、GPUを利用可能な計算環境を整備した。

(c) 気象モデルごとの予測傾向を踏まえた統合手法の高度化

統合に用いる気象モデル予測値の統計補正および統合比率の高度化を検討した。複数機関の気象モデル予測値の統合フローと統計補正と統合比率の高度化の適用イメージを図Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-2に示す。



図Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-2 複数機関の気象モデル予測値の統合フローと統計補正・統合比率の高度化の適用イメージ

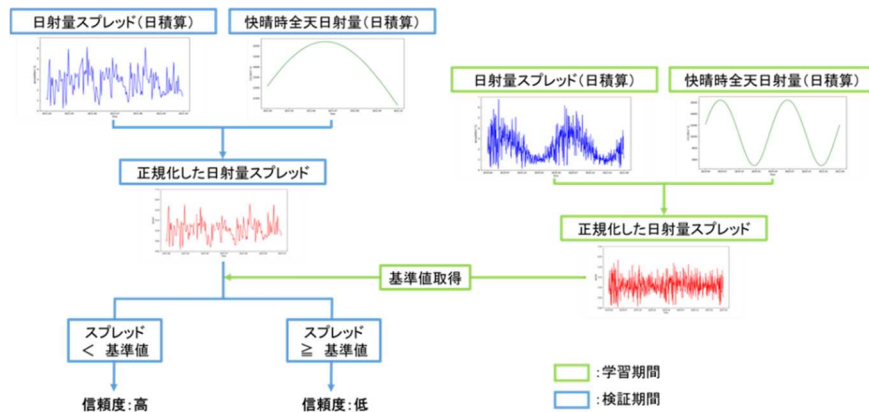
③アンサンブル予報に基づく信頼度予測に係る技術開発

(a) 予測検証条件の設定およびベンチマークの精度検証

信頼度予測の検証条件を設定した。主な検証条件を表Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-2に示す。また、ベンチマークとして、アンサンブル予報の日射量スプレッドに基づく信頼度階級予測を試行した。試行した信頼度予測の信頼度算出フローを図Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-3に示す。

表Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-2 信頼度予測の主な検証条件

項目	内容
予測値	各日3時ごろ発表想定の翌日予測(30分値)
実測値	気象官署日射量実測値(30分値、日射量を観測していない地点は推定値を使用)
対象地点	電力エリア平均日射量(2021年6月末時点の太陽光発電設備認定・導入量に基づく気象官署加重平均値)
評価指標	信頼度階級ごとの日射量予測の±3σ誤差など



図Ⅲ-2-(ハ)-(iii)-A-3 ベンチマークとして試行した信頼度予測の信頼度算出フロー

(b) 信頼度の算定に用いる気象要素の選定

日射量予測が大きく外れる可能性を予測するため、日射量の予測傾向とアンサンブル予報の気象要素（雲量など）の予測傾向を比較分析し、日射量予測の信頼度を算定するにあたって最適な気象要素の検討を開始した。

④大外し事象の誤差低減のための領域モデルを補間する各種気象庁 GPV を利用した日射量予測の特性分析

(a) 計算環境の整備・運用

海外でも広く利用されている The Weather Research and Forecasting (WRF)の最新モデルを導入し、事例分析とアンサンブル計算を行う環境を構築した。ストレージサーバの導入を進めていたが、半導体不足の影響により調達が遅れたものの、2022年6月1日に導入された。

(b) 気象庁予報データの特性分析

i. 気象庁メソアンサンブル予報の精度

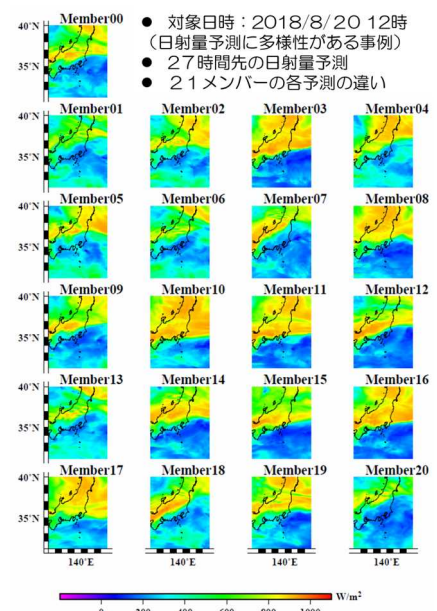
気象庁メソアンサンブル予報 (MEPS) の日射量の予測精度の検証を気象官署で日射量が計測されている地点をベースに評価を行っている。2020年3月以降に気象庁メソモデル (MSM) の初期値データ作成、物理過程の改良が行われており、日射量予測の精度にも改善が見られることが確認された。

ii. MEPS の事例の分析

MEPS で翌日の日射量予測が大外れする事例の抽出とその事例解析を進めた。初期解析として2018年6月～10月までの4か月間のデータの中では、アンサンブルメンバーがばらつき、予測に多様性がある事例のほか（右図参照）、全アンサンブルメンバーが予測を大きく外してしまうケースも確認された。後者のケースにおいて、雲量の予測結果について、上層、中層、下層毎に分けて雲量の状態を確認している。また、日本気象協会がフィジビリティスタディ時に抽出した日射量予測を大きく外している事例にも着目し、MEPSの予測結果との比較を行い、日射量予測に特化した気象モデル改良のための指針を与える知見の収集と、そのフィードバックを進めている。

iii. 予測誤差低減に向けた開発

日射量予測の大外れの軽減に向けた取り組みの中では、複数の分位点サポートベクター回帰モデルを構成し、最大予測誤差の低減に注目した分析を進めた。この中で正規化パラメータが最大予測誤差に与える影響について調べた。その結果、正規化の効果が大き



いと日射量の過大予測を抑える効果がある一方で、正則化を抑えすぎることによって精度が悪化してしまうことも知見として得ることができた。また、MSM 単体よりも MEPS を入力としたモデル計算、及び分位点パラメータと正則化パラメータの調整により、予測大外しの  $3\sigma$  誤差の低減を確認した。この結果については、Takamatsu et al. (2022) によって海外誌に掲載済みである。

## 2. 実用化・事業化見通し

日本気象協会は、翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の事業化見通しについて、以下のよう

に考えている。現時点において翌日および翌々日程度先を対象とした日射量予測サービスを商品化し、日々運用しているが、顧客からは精度向上に関する要望が多く寄せられている。そこで、本技術開発の成果を反映した高精度な日射量予測サービスを実用化し、順次販売する計画である。具体的には、プロジェクト期間終了後、早期にサービス仕様検討、計算機の導入を進め、2026 年度の本格的なサービス開始を予定している。また、上記より先に導入可能な要素技術がある場合は、早期にサービス実装を進める。本技術開発で検討・開発する日射量に特化した気象モデル、複数機関の気象モデル予測値の統合およびアンサンブル予報に基づく信頼度予測により、翌日および翌々日程度先の日射量予測の最大誤差を低減する技術を応用し、新たな日射量予測サービス提供事業を行う。

産業技術総合研究所は、翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の実用化見通しについて、以下のよう

に考えている。本技術開発の成果により、気象庁モデル（全球モデル、メソモデル等）の改善に向けたフィードバックを行うことで、将来的な気象庁モデルの改善を想定する。その他、一般送配電事業者や新電力に提供する発電予測サービスへの実用化が想定される。

本技術開発の成果として、気象庁モデルの改良に資する評価結果を得ることにより、将来の気象庁モデルの改善による日射量予測の大外し低減を想定する。ただし、気象庁モデルの改善は長期的な技術開発が必要なため、事業終了後 5~6 年程度に結果が反映されることを想定する。その間は、気象庁との継続的な研究が必要となる。また、研究成果のうち機械学習を利用した方法などは、民間への技術移転も想定される。産業技術総合研究所だけでは事業化が難しいため、共同実施者である日本気象協会を始めとした、気象サービスプロバイダーなどへの技術移転も想定している。

## 3. 波及効果

翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発が成功すれば、太陽光発電に関わる様々な事業者（発電 BG や再エネ発電事業者、地域新電力など小売電気事業者、自己託送実施者、アグリゲーター、TSO、気象会社、研究者）が、高精度な日射量及び太陽光発電出力予測を利用可能となる。これにより、太陽光発電量予測誤差により生じる電力系統への影響の緩和やインバランスの低減といった効果が期待される。

本技術開発により、再生可能エネルギーの中でも重要な立ち位置の太陽光発電出力に対するインバランス低減が期待されるため、今後、各事業者による FIT 制度に頼らない発電及び小売事業の事業性が向上すると考えられる。また、現在急速に再生可能エネルギーの導入拡大が進む中で、再生可能エネルギーの出力変動を調整するための調整力の確保も含め、再生可能エネルギーを電力系統へ受け入れるコストが増大している。調整力は、過去の出力変動に対する予測誤差に応じて確保されることから、係るコストの削減にあたっては、予測情報の高精度化が必要となる。これらの観点から、再生可能エネルギーの主力電源化にあたっては、本技術開発の成果が重要な役割を果たすと考えられる。

本技術開発を実施することにより、太陽光発電に関連する事業者の競争力の強化や事業進出の機運向上、各種経済政策の実現への寄与といった多角的な観点から、日本経済への貢献が可能と考えている。さらに、こうした取組の中で太陽光発電を中心とした再エネの導入拡大が進むことにより、発電設備メーカーおよび運用保守事業、電力トレーディング事業等の関連分野においても成長が大きく促進される。これにより、雇用創出への貢献が期待されるほか、国際競争力の向上により、関連企業の海外への事業展開も期待される。

## 4. 今後の展開

中間評価後、「①日射量予測に特化した気象モデルに係る技術開発」、「②複数機関の気象モデル予測値の統合に係る技術開発」、「③アンサンブル予報に基づく信頼度予測に係る技術開発」の 3 つの要素技術の開発を引き続き実施し、日射量予測が大きく外れる事象の改善を図る。また、これらの技術開発を実施するにあたり、気象モデル予測値の特性を把握する必要がある。そこで、「④大外し事象の

誤差低減のための領域モデルを補間する各種気象庁 GPV を利用した日射量予測の特性分析」を行い、この分析の成果を 3 つの要素技術の開発に反映することで、技術開発を効果的に実施する。さらに、3 つの要素技術は相互に影響することから、「⑤大外し低減予測技術の開発と評価」として、これらの要素技術を適切に組み合わせる技術を開発し、翌日および翌々日程度先の日射量予測の大外しを最大限低減可能な技術を確立することで、本技術開発の最終目標を達成する。

また、プロジェクト期間終了後、早期にサービス仕様検討および開発技術の活用に必要な計算機の導入等を進め、2026 年度の本格的なサービス開始を予定している。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)	0 (0/0)
論文	0	1	0	1
研究発表・講演 (国内・審査有)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)



(二) 動向調査等

(i) 移動体用太陽電池の動向調査

【A 海外を中心とした調査】(みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1
(1) 太陽光発電の移動体利用に関する動向調査	IEA PVPS Task17 や 太陽光発電国際会議等への参加を通じ、自動車等への太陽電池搭載を目指した研究開発や市場の動向を把握するとともに、日本の先進的な取り組みに関する国際的な情報発信を行う。	IEA PVPS Task17 等への参加、文献調査等により、自動車等への太陽電池搭載を指した研究開発や市場の動向を調査するとともに、欧州等における自動車の CO2 排出に関連する規制、制度等に動向に関する情報を収集した。 日本の取り組みを世界に向けて発信していくため、NEDO が実施してきた太陽光発電搭載自動車実証車の走行動画を撮影した。 また、IEA PVPS Task17 の議長を担当し、活動の総括的な管理・運営を行うとともに、日本の取り組みや本事業の成果も含む、太陽光発電システム搭載自動車に関する技術レポートを取りまとめ、公表した。	○
(2) 太陽光発電搭載自動車に関する効果分析	自動車(乗用車)への太陽光発電の搭載を想定し、CO <sub>2</sub> 排出量削減、充電回数低減などの期待される効果を定量的に分析する。	電気自動車等への太陽光発電搭載により期待される効果として、CO <sub>2</sub> 排出量の削減効果、外部からの充電頻度低減に着目し、走行パターンに応じた効果を定量的に分析した。また、中長期的な低炭素化電力の普及に伴う効果の分析も行った。	○
(3) 移動体用太陽電池技術開発の方向性に関する検討	移動体用太陽電池技術開発の方向性に関する検討を行う。	太陽光発電搭載自動車等の太陽電池の移動体利用を巡る動向や期待される効果、IEA PVPS Task17 における国際的な議論などに基づき、移動体用太陽電池技術開発の方向性の検討を行った。検討に際し、有識者による「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」を設置し、議論を実施した。 これまでの議論を踏まえ、太陽光発電システム搭載自動車検討委員会としての報告書(中間報告書第3版)を作成、公開することとした。	○

\* 1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、○ : 達成、△ : 達成見込み、×未達

【B 国内を中心とした調査】（太陽光発電技術研究組合）

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1
①国内における PV 搭載移動体の研究機関、企業、利用者等を対象にした調査、分析	コミュニティを拡大し、調査対象範囲を広げることにより認識される新たな価値を明確にする	クルマユーザー層やトラック PV、PV 交通インフラなど、さらに海外に裾野を広げた研究会を合計 7 回実施するなど、移動体 PV コミュニティの拡大を行った。	○
②国内における PV 搭載移動体の普及に資するレジリエンスの定量評価、事例調査	レジリエンスの定量評価により PV 搭載移動体の利点を纏める	災害時に車載太陽電池を活用することにより生じるメリットを定量評価するためのシミュレーションを開始し、災害時に必要な太陽電池搭載車台数の導出などの定量評価を行った。	○
③車載太陽電池の信頼性評価に資する技術検討	評価手法、基準案を提言する	車載部品の評価規格の調査を行うとともに、車載用曲面 PV モジュールの試作ならびに応力解析（実験と計算）などの信頼性に関わる技術開発を行った。	○

\* 1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×未達



## A 海外を中心とした調査（みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社）

### 1. 成果詳細

#### (1) 太陽光発電の移動体利用に関する動向調査

##### ①太陽光発電の移動体利用に関する動向調査

自動車からの CO<sub>2</sub> 排出量の削減に向け、内燃自動車から電動自動車への転換を図る取り組みや議論が世界各国で実施されている。また、太陽電池を電動自動車に搭載する太陽光発電搭載自動車への取り組みも、欧州をはじめ、各国で活発化してきている。

世界各国で、燃費規制や CO<sub>2</sub> 排出基準、電動自動車やゼロエミッション車の販売台数や販売比率の目標設定などにより、自動車からの CO<sub>2</sub> 排出削減に向けた方針が示されている。米国では、エネルギー効率を高める技術の採用を促すためにオフサイクルクレジット制度（高効率機器の導入を CO<sub>2</sub> 排出量の低減分（クレジット）としてカウントする制度）が導入されている。その対象技術の一つとして、太陽光発電の搭載が含まれており、電動自動車の走行用動力として利用する太陽光発電に対し、太陽光発電出力 1W あたり 0.04385g-CO<sub>2</sub>/mile（100W に換算すると 4.385g-CO<sub>2</sub>/mile）のクレジットが付与される<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-1</sup>。欧州においても、エコイノベーション技術に対してクレジットを付与する制度があり、内燃自動車への搭載を前提としているものの、太陽光発電が対象技術に含まれている。バッテリー容量や、太陽光発電搭載によって生じる重量増加などを加味する必要はあるが、太陽光発電出力 100W、バッテリー容量 480Wh、荷重増分 10kg の場合、2.323g-CO<sub>2</sub>/km（3.72g-CO<sub>2</sub>/mile）が付与される<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-2</sup>。

太陽光発電搭載自動車として、トヨタ自動車の Prius PHV や Hyundai の Sonata など太陽光発電を搭載したモデルが市販されていたが、2021 年以降、Hyundai の IONIQ 5、Fisker の EV Ocean、メルセデス・ベンツの EQXX などが発表された。また、トヨタ自動車も 2030 年までに販売を開始する電気自動車に対し、太陽光発電搭載オプションを用意することを発表した。

現在実用化されている範囲では、太陽光発電の搭載は屋根上面に限られ、その出力は 200W 程度が上限となっているが、近年、これまでに市販されている数倍の太陽光発電を搭載した電動車への取り組みが活発化している。欧州では、ドイツの Sono Motors が電気自動車の屋根に加えて前後左右にも太陽光発電を搭載し、走行用電力の大部分を太陽光発電から供給できる車両を販売する計画である（図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-1）<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-3</sup>。オランダの Lightyear も同様に、太陽光発電をフードと屋根面に搭載し（図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-2）<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-4</sup>、徹底した空気抵抗の低減および軽量化を実現した電気自動車の販売を計画しており、フィンランドの Valmet Automotive 社と製造委託契約を締結した<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-5</sup>。



図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-1 Sion from Sono Motors<sup>3)</sup>



図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-2 Lightyear One<sup>4)</sup>

小型商用車や大型トレーラーへの太陽光発電の搭載も見られ始めており、Sono Motors は ARI Motors と共同で、電動軽トラックへの太陽光発電搭載を発表した<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-6</sup>。Sono Motors はこのほか、大型トラック・トレーラーへの太陽光発電搭載にも取り組んでいる。オランダの IM efficiency もトレー

ラーへの太陽光発電搭載に取り組んでおり<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-7</sup>、ドイツのFraunhofer ISEが主導するLade-PVプロジェクトでは太陽光発電を搭載した電動貨物輸送トラックの走行実証試験を実施している<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-8</sup>。米国でも、冷蔵トレーラー電源としての太陽光発電搭載が実用化しており<sup>9)</sup>、欧米を中心に多様な自動車への太陽光発電搭載が進み始めている。

なお、乗用車への太陽光発電の搭載は、日本においてもNEDOにより1kW前後(860Wおよび1,150W)の太陽光発電を搭載した実証車が開発され、実証走行が行われている(図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-3および図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-4)。このような、太陽光発電搭載自動車の実用化に向けた日本の取り組みを世界に向けて発信していくため、NEDOが実施してきた太陽光発電搭載自動車実証車の走行動画を撮影した。撮影した動画はNEDOによる編集を経て、NEDOホームページ(NEDO Channel)にて公開されている。



図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-3 太陽光発電搭載プラグインハイブリッド自動車<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-10</sup>



図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-4 太陽光発電搭載電気自動車<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-11</sup>

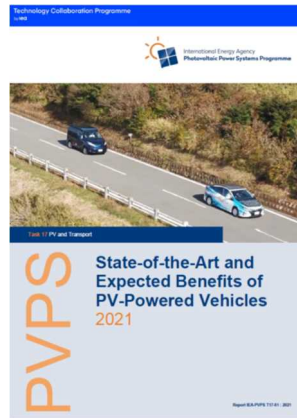
## ②太陽光発電搭載自動車に関する国際的な展開

太陽光発電搭載自動車の実用化、導入拡大に向けた取組みを、日本のリードにより、国際的な活動として展開していくことを目的とし、IEA PVPS Task17: PV and Transportを推進している。Task17への参加国は2022年3月時点で日本、オーストラリア、オーストリア、中国、フランス、ドイツ、モロッコ、オランダ、スペイン、スイスの10ヶ国で、大学や研究機関、企業等からの約40名の専門家が集い、議論を行っている。

日本は、Task17の議長(Task Manager)として、活動の総括的な管理・運営を行い、PVPS執行委員会に活動報告する責務がある。参加国・参加メンバーによる活動を的確にコーディネートし、タスク全体としての効率的な運営および成果創出に努めるとともに、活動成果の広範な普及も積極的に行っていくことが重要である。

2021年度において、太陽光発電搭載自動車の動向と期待される効果に関するレポート「State-of-the-Art and Expected Benefits of PV-Powered Vehicles」<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-12</sup>(図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-5)、および太陽光発電を利用する充電インフラに関するレポート「PV-Powered Electric Vehicle Charging Stations: Preliminary Requirements and Feasibility Conditions」<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-13</sup>を作成し、IEA PVPS websiteにて公表した。特に前者は、日本が中心となり執筆、編集を行い、太陽光発電搭載自動車に関する効果分析(次項に記載)のほか、「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書(2) 太陽光発電システム搭載自動車の取得日射量に関する予備的検討」(2019年4月)<sup>Ⅲ-2-(二)-(i)-A-14</sup>の成果も含め、日本の取り組みも活用し、世界に向けて発信した。

また、年2回のTask17専門家会議を開催し、これらのレポートや2022年以降の活動計画の議論を行った。このほか、PVPS執行委員会における進捗報告を行うとともに、太陽光発電国際会議等の機会を活用した情報発信を実施した。



図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-5 太陽光発電システム搭載自動車に関する IEA PVPS Task17 の技術レポート  
Ⅲ-2-(二)-(i)-A-12)

## (2) 太陽光発電搭載自動車に関する効果分析

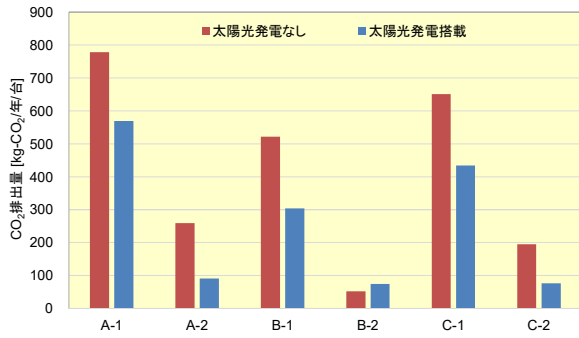
### ① 走行パターンに応じた太陽光発電システム搭載自動車による CO<sub>2</sub> 排出削減効果と充電頻度低減効果

電気自動車等への太陽光発電搭載により期待される効果として、充電電力を系統電力から代替することによる CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果、外部からの充電頻度の低減効果を試算した。

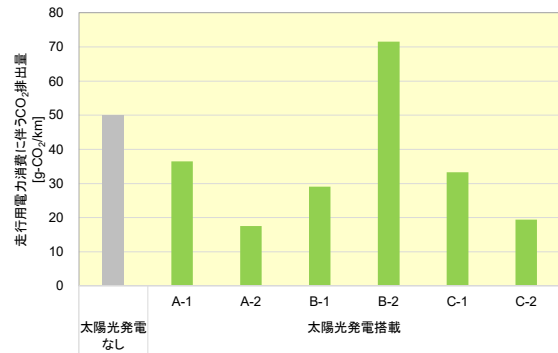
電気自動車に搭載する太陽光発電容量を 1kW とし、時間帯別の日射量として METPV-11 による東京の値を用い、Performance ratio を 0.805、周辺建物等の影による日射損失を補正する係数として 0.70 を想定した。また、蓄電池容量は 40kWh、走行用電力消費原単位は 8.33km/kWh とし、AC/DC 変換効率として 90% を想定した。太陽光発電搭載自動車の使用年数は 12 年とし、走行パターンは 1 週間あたりの走行パターンとして「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書」(2018 年 1 月) Ⅲ-2-(二)-(i)-A-15) と同様の 6 パターンを想定したうえで、それぞれ時間帯別の走行パターンを想定した。

走行距離の長い A-1 (土曜日・日曜日：150km/日、年間走行距離：15,600km/年)、B-1 (週 4 日：50km/日、年間走行距離：10,450km/年) および C-1 (平日：50km/日、年間走行距離：13,050km/年) では、太陽光発電電力はほぼ 100% が走行に利用されるが、太陽光発電の電力のみによる走行は難しく、系統からの充電が必要となる。一方、相対的に走行距離が短い A-2 (土曜日・日曜日：50km/日、年間走行距離：5,200km/年)、B-2 (週 4 日：5km/日、年間走行距離：1,045km/年) および C-2 (平日：15km/日、年間走行距離：3,915km/年) では、太陽光発電電力のみでの走行が可能となるが、太陽光発電電力の余剰が発生する。

これらのパターンにおける CO<sub>2</sub> 排出削減効果は、太陽光発電の製造等に起因する CO<sub>2</sub> 排出量を考慮すると、太陽光発電電力の利用率 (太陽光発電による発電電力のうち、走行に使用される電力の比率) が 20% と低い B-2 では CO<sub>2</sub> 排出量が増加するが、他の走行パターンではいずれも CO<sub>2</sub> 排出量が減少し、太陽光発電電力がほぼ 100% 利用される A-1、B-1 および C-1 では年間約 220kg-CO<sub>2</sub> の排出量削減が可能という結果が得られた (図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-6)。走行距離 1km あたりの CO<sub>2</sub> 排出量にすると、太陽光発電を搭載しない場合の CO<sub>2</sub> 排出量が 50g-CO<sub>2</sub>/km 程度となるのに対し、走行パターン A-1、B-1 および C-1 では、30~40g-CO<sub>2</sub>/km、太陽光発電電力の利用率が低い B-2 では約 70g-CO<sub>2</sub>/km と大きくなるが、A-2 および C-2 では 20g-CO<sub>2</sub>/km を下回るという結果が得られた (図Ⅲ-2-(二)-(i)-A-7)。

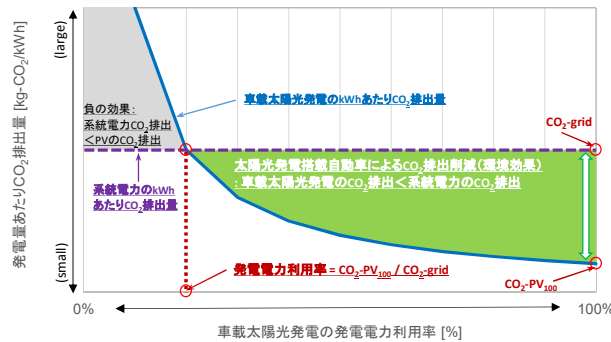


図III-2-(二)-(i)-A-6 各走行パターンにおける太陽光発電搭載有無によるCO<sub>2</sub>排出量の試算結果



図III-2-(二)-(i)-A-7 各走行パターンにおける太陽光発電搭載自動車走行距離1kmあたりのCO<sub>2</sub>排出量

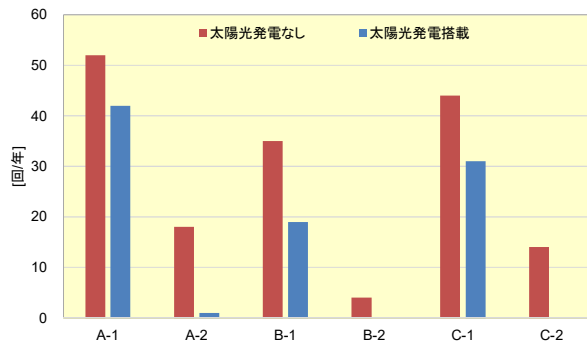
太陽光発電の製造等に起因するCO<sub>2</sub>排出量を考慮する場合、CO<sub>2</sub>排出削減効果を得るためには、太陽光発電電力利用率が「太陽光発電電力利用率100%の場合のCO<sub>2</sub>排出原単位」/「太陽光発電により代替する外部充電電力のCO<sub>2</sub>排出原単位」の比を上回っている必要がある(図III-2-(二)-(i)-A-8)。太陽光発電電力利用率を向上させるためには、現実的な車両の利用・走行パターン、日射量をはじめとする利用・走行環境を把握・想定したうえで、車両の電力消費量に応じた適切な太陽光発電容量を導いていく必要がある。



図III-2-(二)-(i)-A-8 太陽光発電電力の利用率と太陽光発電・系統電力のCO<sub>2</sub>排出量比率の関係

再生可能エネルギー起源の電力は「排出量をゼロ」とみなす場合もあることから、太陽光発電に起因するCO<sub>2</sub>排出量を含まない場合について試算を行ったところ、太陽光発電電力がほぼ100%利用されるA-1、B-1およびC-1では年間約300kg-CO<sub>2</sub>のCO<sub>2</sub>排出量が削減されることになり、走行距離1kmあたりのCO<sub>2</sub>排出量も20~30g-CO<sub>2</sub>/kmに低下する。そして、太陽光発電電力のみでの走行がほぼ可能となるA-2、B-2およびC-2では、走行に伴うCO<sub>2</sub>排出量はゼロとなる。

また、太陽光発電搭載により外部からの充電頻度は大きく低下し、走行距離が短いA-2、B-2およびC-2では年間を通じて外部充電がほぼ不要となる(図III-2-(二)-(i)-A-9)。このことは、電気自動車ユーザーにとって、太陽光発電搭載による大きなメリットと言える。また、充電ステーション等における系統電力の充電は系統への負荷を高める可能性があるが、太陽光発電の搭載により、そのような負荷の低減にも貢献できる可能性がある。

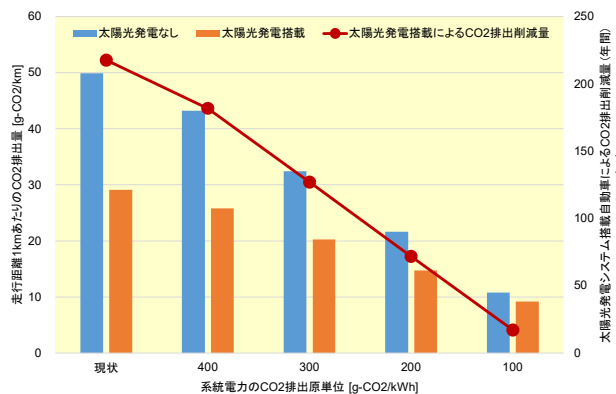


図III-2-(二)-(i)-A-9 各走行パターンにおける外部からの充電頻度

②系統電力からのCO<sub>2</sub>排出原単位と太陽光発電システム搭載自動車によるCO<sub>2</sub>排出削減効果

系統電力からのCO<sub>2</sub>排出原単位（系統電力1kWhあたりのCO<sub>2</sub>排出量）は、低炭素化の進展により低減していくことが期待されており、系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位の低下は太陽光発電製造に伴うCO<sub>2</sub>排出量の低減にもつながる。ここでは、系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位が現状レベルから100g-CO<sub>2</sub>/kWhまで低減していくことを仮定し、太陽光発電起源のCO<sub>2</sub>排出量も低減していくものとした。走行パターンはB-1（週4日：50km/日、年間走行距離：10,450km/年）とした。走行パターンB-1では、太陽光発電電力は全量が走行に利用される一方、太陽光発電電力のみによる走行は難しく、走行に必要な電力の40%程度を系統から充電することとなる。

系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位の低下に伴い、走行に伴うCO<sub>2</sub>排出量は、太陽光発電搭載の有無によらず低減する。太陽光発電の搭載により、現状レベルにおいて、車両一台当たり年間約220kg-CO<sub>2</sub>削減することが可能となるが、系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位が300g-CO<sub>2</sub>/kWhの場合に約127kg-CO<sub>2</sub>、200g-CO<sub>2</sub>/kWhの場合に約72kg-CO<sub>2</sub>、100g-CO<sub>2</sub>/kWhの場合に約17kg-CO<sub>2</sub>という結果となった（図III-2-(二)-(i)-A-10）。系統電力の低炭素化が期待される中、太陽光発電搭載によるCO<sub>2</sub>排出削減効果を高めるためには、太陽光発電製造の省エネ化によるCO<sub>2</sub>排出削減のほか、使用年数長期化が挙げられる。太陽光発電搭載自動車の本格普及に向け、太陽光発電を車体に組み込むための構造や材料の開発も進められるが、省エネ・省CO<sub>2</sub>、長期耐久性の実現が期待される。



図III-2-(二)-(i)-A-10 系統電力低炭素化に伴う太陽光発電システム搭載自動車によるCO<sub>2</sub>排出削減量の変化

また、再生可能エネルギー起源の電力は「排出量ゼロ」とみなす場合もあることから、太陽光発電に起因するCO<sub>2</sub>排出量を含まない場合について試算を行ったところ、系統電力のCO<sub>2</sub>排出原単位が現状レベルの場合のCO<sub>2</sub>排出削減量は車両一台当たり年間約300kg-CO<sub>2</sub>、300g-CO<sub>2</sub>/kWhの場合に約210kg-CO<sub>2</sub>、100g-CO<sub>2</sub>/kWhの場合に約100kg-CO<sub>2</sub>となった。

系統電力の低炭素化により、太陽光発電搭載によるCO<sub>2</sub>排出削減効果が特筆すべきものではない時代の到来も予測されるが、そのような場合においても、太陽光発電の搭載による充電頻度の低減、災害時等における非常用電源としての価値向上などの効果が期待される。また、充電ステーション等における系統電力からの充電は系統への負荷を高める可能性があり、太陽光発電の搭載により、そのような負荷の低減にも貢献できる可能性がある。太陽光発電搭載自動車と太陽光発電利用充電ステーションの共存によって、より強靱なインフラを構築していくことができる。

### (3) 移動体用太陽電池技術開発の方向性に関する検討

太陽光発電搭載自動車等の太陽電池の移動体利用を巡る動向や期待される効果、IEA PVPS Task17における国際的な議論などに基づき、移動体用太陽電池技術開発の方向性の検討を行った。また、有識者による「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」を設置し、議論を実施した。

主要な論点として、太陽光発電ならびに太陽光発電を搭載する移動体としての性能向上やコスト低減に加え、自動車業界や消費者にとっての魅力の向上、将来社会を見据えた価値・役割の訴求などが挙げられた。また、太陽光発電搭載自動車実証車両の走行結果や期待される効果を用い、自動車に関連する業界や消費者に対して、太陽光発電搭載自動車の魅力や可能性を発信していくことの必要性が指摘された。

これらの議論を踏まえ、2022年には、太陽光発電システム搭載自動車検討委員会としての報告書（中間報告書第3版）を作成、公開することを予定している。

## 2. 実用化・事業化見通し

本調査は、IEA PVPS Task17 (PV and Transport) 等の活動に参画し、電動自動車等の移動体への太陽電池搭載を目指した国内外における研究開発、市場動向を調査、分析するとともに、今後の方向性を議論し、その結果をプロジェクト参画機関等、国内の関係事業者に広く展開することにより、移動体分野における太陽電池利用の研究開発の加速化に資することを目的としている。

本調査による成果を基に、海外における動向等について NEDO や「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」を通じて国内関係事業者に展開することができたほか、太陽光発電システム搭載自動車実証車両の走行動画の撮影や、IEA PVPS Task17 への参加を通じ、日本における取り組みを広く世界に向けて発信することができた。

今後も本調査の成果を広く周知することで、自動車をはじめとする移動体への太陽光発電利用に関する技術開発の推進、日本の取り組みに関する国際的な情報発信に貢献することが見込まれる。

## 3. 波及効果

太陽光発電の多用途化が加速する中、自動車をはじめとする移動体への太陽光発電利用に向けた取り組みが世界的に活発化している。日本においても、NEDO による技術開発が積極的に実施されているところであるが、移動体への太陽光発電利用は、運輸部門におけるCO<sub>2</sub>排出削減に貢献でき、また、日本における太陽光発電利用の導入拡大、激しさを増す国際競争を勝ち抜くための活路の一つになり得る。

本調査は、移動体用太陽電池に関する海外動向の把握、期待される効果等の評価を通じて、今後の取り組みの方向性等を明確にし、当該分野における日本の関連産業の発展と国際競争力確保に貢献することができる。また、日本の取り組みを広く世界に向けて発信していくことにより、同分野における日本のプレゼンスを高めていくことができる。

## 4. 今後の展開

移動体への太陽光発電利用の実用化、導入拡大のためには、太陽光発電の性能向上やコスト低減に加え、自動車に関連する業界や消費者にとっての魅力の向上、将来社会を見据えた価値・役割の訴求

も重要である。

移動体用太陽電池の研究開発の加速化に資するため、今後も、定点観測的な調査を継続し、海外における最新の状況を把握し、NEDO および関係者に周知するとともに、急激に進展している政策・市場動向や技術動向に応じ、技術開発の方向性に関する検討を実施する予定である。また、「太陽光発電システム搭載自動車検討委員会」による議論の成果の発信や、IEA PVPS Task17 等への参加を通じて、日本の取り組みを、広く国内外に発信していく。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0	0	0	0
論文	0	1	0	1
研究発表・講演	1	5	0	6
(国内・審査有)	(0)	(1)	(0)	(1)
(国際・審査有)	(1)	(3)	(0)	(4)
(国内・審査無)	(0)	(1)	(0)	(1)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

### 【参考文献】

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-1 : EPA, Joint Technical Support Document: Final Rulemaking for 2017-2025 Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards, 2012

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-2 : EU, Technical Guidelines for the preparation of applications for the approval of innovative technologies pursuant to Regulation (EC) No 443/2009 and Regulation (EU) No 510/2011, Revision: October 2015

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-3 : <https://sonomotors.com/en/sion/>

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-4 : <https://lightyear.one/>

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-5 : The Verge, Lightyear finds a manufacturer to build its solar-powered EV, July 2021

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-6 : <https://sonomotors.com/en/press/press-releases/sono-motors-at-intersolar-2021-in-munich/>

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-7 : <https://imefficiency.com/>

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-8 : <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/lade-pv.html>

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-9 : [https://www.mizuho-ls.co.jp/ja/news/news2021020501/main/0/link/Delivery%20of%20Zero-](https://www.mizuho-ls.co.jp/ja/news/news2021020501/main/0/link/Delivery%20of%20Zero-Emission%20Refrigerated%20Trailers%20for%20Leasing%20by%20PLM%20Fleet,%20LLC.pdf)

[Emission%20Refrigerated%20Trailers%20for%20Leasing%20by%20PLM%20Fleet,%20LLC.pdf](https://www.mizuho-ls.co.jp/ja/news/news2021020501/main/0/link/Delivery%20of%20Zero-Emission%20Refrigerated%20Trailers%20for%20Leasing%20by%20PLM%20Fleet,%20LLC.pdf)

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-10 : NEDO, 世界最高水準の高効率太陽電池を搭載した電動車の公道走行実証を開始, NEDO ニュースリリース 2019 年 7 月 4 日. [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101150.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101150.html).

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-11 : NEDO, 世界最高水準の高効率な太陽電池セルを活用し、電気自動車用太陽電池

パネルを製作, NEDO ニュースリリース 2020 年 7 月 6 日.

[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101326.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101326.html)

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-12 : Keiichi Komoto, Toshio Hirota, Kenji Araki, et al., State-of-the-Art and Expected Benefits of PV-Powered Vehicles, Report IEA-PVPS T17-1: 2021

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-13 : Manuela Sechilariu, et al., PV-Powered Electric Vehicle Charging Stations -Preliminary Requirements and Feasibility Conditions, Report IEA-PVPS T17-2: 2021

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-14 : NEDO, 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書 (2)「太陽光発電システム搭載自動車の取得日射量に関する予備的検討」, 2019 年 4 月

Ⅲ-2-(二)-(i)-A-15 : NEDO, 太陽光発電システム搭載自動車検討委員会 中間報告書, 2018 年 1 月



## B 国内を中心とした調査（太陽光発電技術研究組合）

### 1. 成果詳細

本調査事業では、IEA PVPS Task17（PV and Transport）等の活動に参画し、電動自動車等の移動体への搭載を目指した太陽電池の国内外における研究開発、市場動向を調査、分析すると共に、今後の方向性を議論し、その結果をプロジェクト参画機関等、国内の関係事業者に広く展開する事により、移動体分野の研究開発を加速する。

具体的には、表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-1に示す3項目について重点的に調査を行い、車載・運輸分野への太陽光発電導入加速に貢献する。

表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-1 調査の概要

車載・運輸分野への太陽光発電導入加速に向けた調査研究		
提案概要	推進体制	目標
<b>①コミュニティ拡大を主眼とした調査、分析</b> コミュニティを拡大した公開研究会の定期開催などの調査を行い、新たな価値を明確にする。さらに提言につなげる。	PVTEC 委員会 主体（PV メーカー、クルマメーカーなど）	公開研究会：3回/年実施 レジリエンスの定量評価 ⇒ 創造価値の明確化。 新規開発・新規実証の提言
<b>②PV 搭載移動体のレジリエンスの定量評価、事例調査</b> レジリエンスに着目し、PV 搭載移動体の普及に資するレジリエンス定量評価や事例調査を行う。		
<b>③車載太陽電池の信頼性評価に資する技術検討</b> 車載太陽電池に固有の技術課題を調査し、ハード面でのレジリエンス確立に向けた支援データとする。具体的には、車載太陽電池に生じる機械的負荷特性（応力・振動など）を解析と実験により調査する。	PVTEC 委員会 がとりまとめ。技術開発は長岡技大に再委託	車載太陽電池モジュールの信頼性評価方法と評価基準案の策定とそのガイドライン化

#### ①国内における PV 搭載移動体の研究機関、企業、利用者等を対象にした調査、分析

～コミュニティ拡大を主軸に調査、分析の範囲を拡大する

従来は PV に関わりの薄かった方々とのコミュニティ拡大を主眼に、研究会（ウェビナー）を実施した。メーカーサイドに加え、クルマユーザー層やトラック PV、さらに海外企業や交通インフラなどに裾野を広げた研究会を7回実施し、移動体 PV コミュニティの拡大を行った（表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-2）。

第2回研究会以降は、海外講演者を交えるとともに同時通訳を導入してコミュニティ拡大を図っている。徐々に講演者の海外比率を高め、「海外に学ぶこと」についての議論も行った。「自動車メーカーの意向に合わせるのではなく、ビジョンを持つことが重要」、「クルマ（VIPV）の哲学に始まり、部分最適に陥らずに最後まで全体を見ることが大切」などの考え方が示されるなど、今後につながる議論ができた。

今後さらなるコミュニティ拡大を進め、移動体太陽光発電の普及に貢献する提言をめざす。

表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-2 実施した移動体太陽光発電講演討論会（研究会）

研究会	開催日時	主なテーマ、講演	パネルディスカッション	研究会の Scope
第1回	2020年 10月2日	車載PV、クルマメーカーサイドとクルマユーザーサイドの両面から	車載PVって本当に良いの？	クルマのユーザー企業からの視点を交えて移動体PVを討議
第2回	2021年 2月1日	車載PV、乗用車VIPVとトラックPV	車載PVって本当に良いの？(2)	本命である乗用車VIPVとともにトラックPVにもフォーカス。EVの動向も踏まえつつ討議。初めて同時通訳を導入。
第3回	2021年 4月6日	海外企業のVIPV	海外から学ぶべきものは？	海外のVIPV企業に講演いただき、海外に学ぶべきものについて討議
第4回	2021年 4月23日	VIPVモジュール技術	車載モジュールはどうなる？	VIPV用モジュール技術を中心に討議。
第5回	2021年 10月20日	世界のVIPV、欧州企業のVIPV	世界の移動体PVから学ぶことは？	欧州のVIPVならびにIEA Task17に関する講演。世界の移動体PVから学ぶことについて討議
第6回	2022年 2月24日	交通インフラのPV電源化	VIPVとPV交通インフラの融合に向けて	交通インフラへのPV導入への取り組みに関する講演。VIPVとPVインフラとの融合について討議
第7回	2022年 5月19日	交通インフラのPV電源化(2)	VIPVとPV交通インフラの融合に向けて(2)	前回の続編。走行中ワイヤレス給電や地域受容性などの講演と討議。

また、研究会実施に加え、移動体PVに関する情報発信を目的としたウェブサイト（図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-1）を立ち上げた（<https://www.pvtec.or.jp/mobile.html>）。今年度は主に移動体PVに関するニュースを中心に掲載した。表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-3に掲載したニュース例を示す。



図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-1 移動体PVに関する情報発信ウェブサイト

表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-3 移動体 PV に関する情報発信実績 (VIPV 抜粋 ; 2021.10 以降)

2022/6/12	生産準備完了、ソーラーカーLightYear 0 のプレミア	Lightyear
2022/6/11	Aptera、4,000億円調達。今年後半に生産開始	Aptera
2022/5/17	ソーラーシティカー “Squad”、2023年に発売	Squad
2022/4/26	アウディがフレキシブルソーラーフィルムとFRPのシームレス一体成形で受賞	Audi
2022/4/12	トヨタ、新型バッテリーEV「bZ4X」5月12日発売	トヨタ
2022/3/29	ヒョンデの新型ハイブリッド車に装備されたソーラールーフにはどれほど価値があるか？	Hyundai
2022/3/17	Sono Motors、Sionの検証車(Series-Validation Vehicles)の製造開始	Sono
2022/2/28	Fisker Ocean、2023年にオーストリアで生産開始	Fisker
2022/1/29	【高性能太陽電池で走る車】世界最高水準の高効率な太陽電池パネルを搭載した自動車(VIPV)の走行実証を紹介します	NEDO
2022/1/20	ソーラーカーがやってくる	Aptera, Lightyear, Sono
2022/1/11	<社説>太陽光電池車 究極のエコカー目指せ	
2022/1/4	メルセデス、EVにソーラールーフ	Mercedez
2021/12/16	Lightyear、LeasPlanへ5,000台の供給契約に署名	Lightyear
2021/12/16	2023年 Lightyear One お目見え	Lightyear
2021/12/7	独Sono Motorsが上場、ソーラー電気自動車Sionを2023年までに市場へ投入	Sono
2021/11/18	(Fisker Ocean)リサイクルされた漁網とソーラーパネル:このEVは世界で最も持続可能な自動車ですか？	Fisker
2021/11/7	太陽光発電の電気自動車は、ほぼ準備できています	Aptera
2021/10/29	トヨタ、新型EV「bZ4X」異形ハンドル・ルーフソーラー発電など先進機能	Toyota
2021/10/12	トヨタ、太陽光発電を電動車へ 炭素中立で共同研究	Toyota

2021年10月以降。VIPVのみ抽出

## ②国内における PV 搭載移動体の普及に資するレジリエンスの定量評価、事例調査

～PV 搭載移動体のレジリエンスの定量評価、事例調査

PV 搭載移動体の普及に資するレジリエンスについては、通常の固定設置 PV を用いたレジリエンスや電動車単独によるレジリエンスと比べ、下記のメリット、デメリットがある（表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-4）。

表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-4 PV 搭載移動体と固定設置型 PV、電動車によるレジリエンスにおける得失

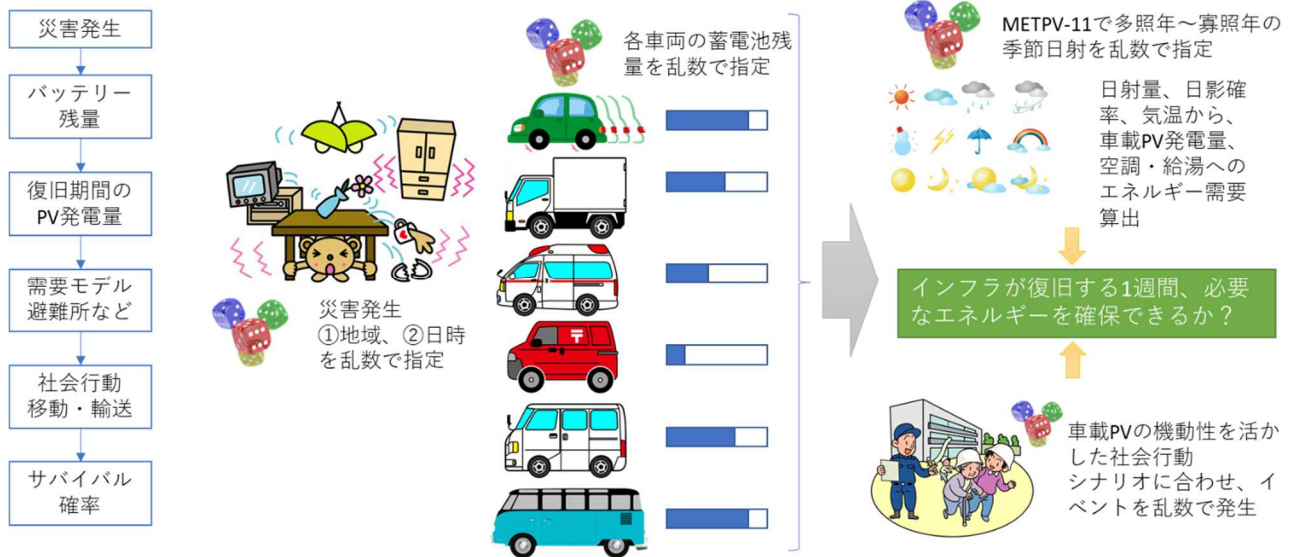
固定設置 PV に対するメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 災害時のインフラ損傷のリスクが分散される。</li> <li>◆ オール or ナッシング（固定設置 PV そのものが被災）ではない。</li> <li>◆ エネルギーと同時に物資も輸送できる。</li> <li>◆ PV 搭載移動体を救護拠点に駐車することにより、臨時エネルギー源（蓄電池）として利用。</li> <li>◆ 複数の救護拠点間で、エネルギーの融通ができる。</li> </ul>
電動車ユーザに対するメリット	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ バッテリー空になるリスク少。</li> <li>◆ PV なしだと、バッテリーが空になったらお終い → 自発的な公共財供給を期待できない。</li> <li>◆ 救護ポイントまでのエネルギー輸送が、自己エネルギーで可能</li> </ul>

まず、PV 搭載移動体のレジリエンスの評価を定量化するため、従来タイプの防災救護インフラの設計指針および近年の災害の状況および各自治体が地域住民のどのような要望を取り入れているが調査を行い、図Ⅲ-2 のように、必要な防災拠点と要求されるエネルギー量を設定した。



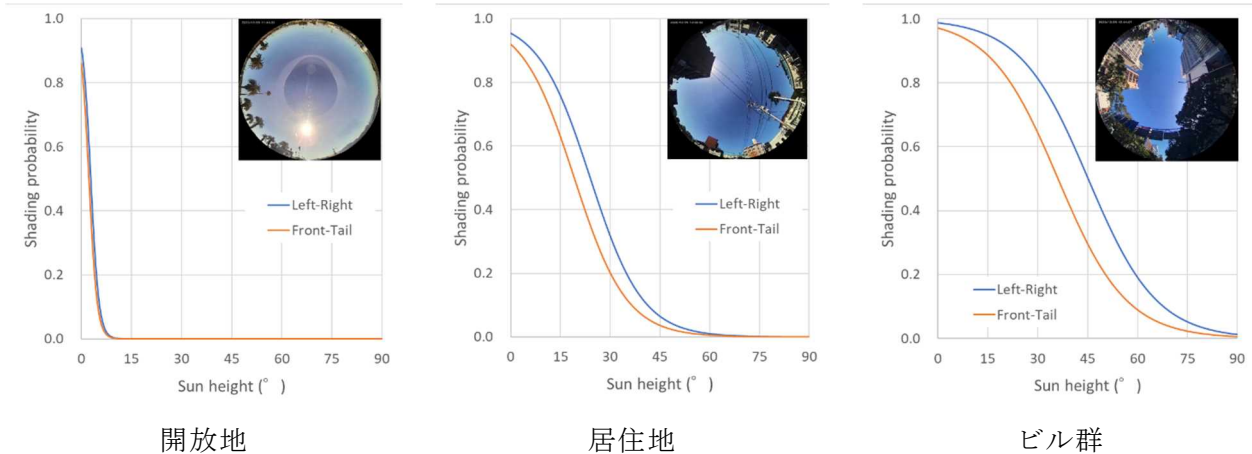
図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-2 レジリエンスのために必要とされるエネルギー

図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-2 のエネルギー需要パターンから車載 PV との需給をシミュレーションし、インフラが回復する 1w、生存率を確保する 72hr でのエネルギーストックをシミュレーションし、生存確率、各拠点を維持するための必要な PV 搭載車台数を、地域毎に算出することにした。モンテカルトシミュレーションを用いて、地域単位面積あたりどの程度の車載太陽電池搭載車が必要となるか見積もった（図Ⅲ-3）。



図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-3 車載太陽電池搭載車の必要台数を算定するためのモンテカルロシミュレーション概要

図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-3 のフローに従って、エネルギー供給とレジリエンス拠点での需給バランスを調べるに当たって、移動体に搭載したPVの発電量を正確に算定する必要がある。特に大きな影響を及ぼすのは周辺建物が作る日影である。本調査に於いては、ビル群、住宅地、開放地の3区分で、太陽高度を関数とする日影確率をモデル化し、これに基づき、日々および各時刻でのPV搭載面での日射強度を算定した(図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-4)。



図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-4 車載太陽電池発電量算定に用いた日影確率

また、被災時の社会行動の数理モデル化として、地域住民の自発的な公共財への提供を前提として、下記のモデルを適用した。

某日某時にP市V地区で災害発生。最初の数時間で従来の防災インフラに加え、下記開設。

臨時救護所 1箇所

モバイル機器臨時充電所 25箇所

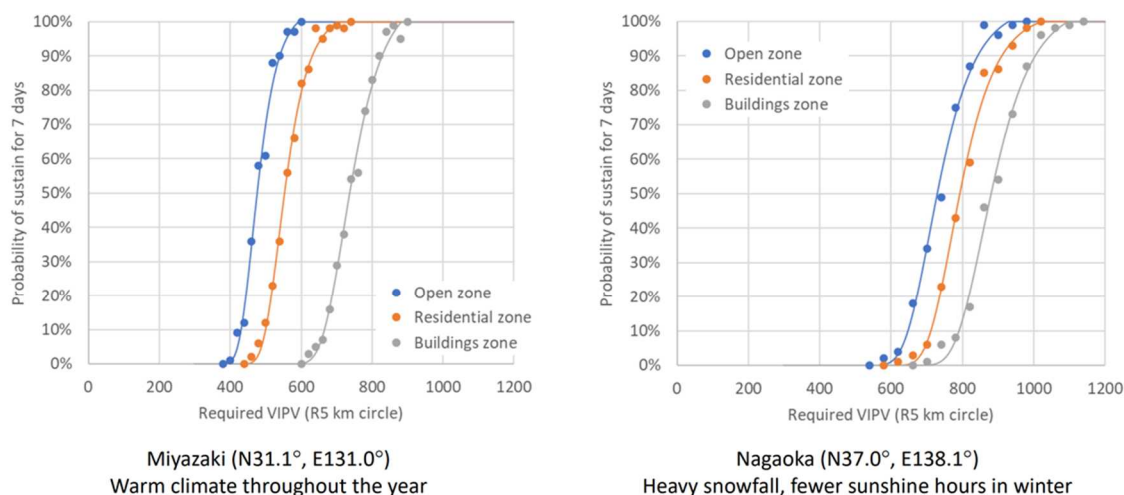
公民館などのへの空調電力供給 6箇所(各4馬力)

臨時施設へ移動したEVの一部が自発的に蓄電池化。必要に応じて臨時施設間を移動し、電力融通  
地域住民が保有するVIPV搭載車の内

車載蓄電池残量が90%以上の内、5%のドライバーが上記施設に電力融通、供給地点まで自前の

電力で運転し、蓄電池残量 50%になるまで電力融通。

計算結果を図Ⅲ-5に示す。半径 5 km 圏内に必要な車載太陽電池搭載車の必要台数は数百台～1500 台程度とみられ、国内の人口密度分布から考え、妥当な量と推定される。



	宮崎			長岡			
	開放地	居住地	ビル群	開放地	居住地	ビル群	
kWh-DC/kW (各種発電損失含む)	1101.1	931.4	674.4	1021.1	869.9	647.5	
年間走行km (変換損失含む、屋根のみ)	2917	2468	1787	2705	2305	1716	
水平面日射比 (曲面考慮)	0.898	0.726	0.519	0.905	0.738	0.539	
VIPV必要台数 半径5 km圏内	生存確率 50%	464	539	721	708	770	857
	生存確率 95%	559	657	851	875	948	1039

台数は端数切り上げ

図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-5 市販乗用車屋根への PV 搭載可能面積のヒストグラム

### ③車載太陽電池の信頼性評価に資する技術検討

車体に合わせた曲面モジュール開発など、車載 PV に向けた開発が進められてきたが、次に信頼性試験、耐久性試験の試験方法の開発やその評価基準の策定が求められている。現在はクルマメーカーと PV メーカー間で個別に試作品の納入条件を設定していたが、さらなる普及及び海外 PV メーカーとの差別化にはこれらの信頼性試験の条件や基準が明確になっている必要がある。

#### ③-1. 車載太陽電池に求められる信頼性の調査

自動車メーカー等へのヒアリングを行い、車載太陽電池がクリアしなければならない信頼性評価項目を調査した。これらを従来太陽電池の評価項目と対比させ、車載太陽電池に固有の評価項目を明確化した。また、試験方法などの技術課題を明らかにした。

車載太陽電池に関係する規格として ISO、IEC、JIS、JASO (日本自動車技術会規格) を対象に、自動車用電気部品、自動車用ガラス、地上用 PV モジュールに対する機械負荷、気候・環境負荷、科学負荷、その他の負荷に関する信頼評価規格を整理・比較した。その一部を表Ⅲ-5 および表Ⅲ-6に示す。赤字は自動車用電気部品に対してのみ規定されている項目、緑字は地上用 PV モジュールに対してのみ規定されている項目、青字は両方で規定されている項目である。赤字の項目のうち振動試験、機械的衝撃試験、温度変化衝撃 (熱衝撃) 試験は車載固有の負荷条件を想定したものであり、負荷の時間変化率が大きい試験である。振動試験、機械的衝撃試験、耐衝撃性試験 (自

自動車用安全ガラス) は搭載部位によって試験条件が異なる点に留意する必要がある。青字の項目について試験内容を比較した結果、類似性が見られた。すべての項目について試験を実施することはメーカーにとって負担となるため、合理的なガイドラインが必要だと考えられる。また、自動車においては衝突安全に関する対応も求められる。衝突安全試験は主に各国の法規と自動車アセスメントで規定されていることを確認した。

表Ⅲ-2-(二)-(i)-B-5 機械負荷に関する信頼性評価試験

(赤：自動車用電気部品のみで規定、緑：地上用PVモジュールのみで規定、青：両方で規定)

評価項目 Assessment items	自動車用部品 Automobile parts	自動車用ガラス Vehicle glass	地上用PVモジュール Terrestrial PV module
振動, Vibration	JASO D 014-3 ISO 16750-3 JASO D902 (振動, vibration) JIS D 1601 JIS C 60068-2-64		
機械的衝撃, Mechanical shock			
自由落下, Free fall			
表面強度, Surface strength / scratch and abrasion resistance	JASO D 014-3 ISO 16750-3 (試験方法の規定なし, No regulations for test procedure and conditions)		
砂利, Gravel bombardment			
耐衝撃性, Shock resistance		JIS R 3212 (5.4)	JIS C 61730-2 (MST 32) IEC 61730-2
耐貫通性, Penetration resistance		JIS R 3212 (5.5)	
ヘッドフォーム (人頭模型) 衝撃, Head-form (human-head model) shock		JIS R 3212 (5.6)	
耐摩耗性, wear resistance		JIS R 3212 (5.7)	
静的機械荷重, Static mechanical load			JIS C 61215-2 (MQT 16) IEC 61215-2 JIS C 61730-2 (MST 34) IEC 61730-2
動的機械荷重, Cyclic (dynamic) mechanical load			IEC TS 62782
剥離 or せん断強度, Peel or shear strength			JIS C 61730-2 (MST 35, 36) IEC 61730-2

表Ⅲ-6 気候・環境負荷に関する信頼性評価試験（抜粋）

（赤：自動車用電気部品のみで規定、緑：地上用 PV モジュールのみで規定、青：両方で規定）

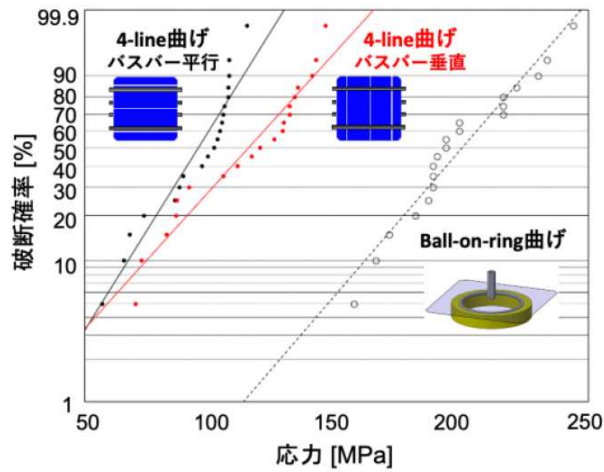
評価項目 Assessment items	自動車用部品 Automobile parts	自動車用ガラス Vehicle glass	地上用PVモジュール Terrestrial PV module
一定温度 低温, Steady state – Low temperature	JASO D 014-4 ISO 16750-4 JASO D902 (熱衝撃, thermal shock)		JIS C 61730-2 (MST 55) IEC 61730-2
一定温度 高温, Steady state – High temperature		JIS R 3212 (5.8)	JIS C 61730-2 (MST 37, 56) IEC 61730-2
ステップ温度変化, Temperature step			
温度サイクル, Temperature cycling		JIS R 3212 (5.19)	JIS C 61215-2 (MQT 11) IEC 61215-2 JIS C 61730-2 (MST 51) IEC 61730-2
温度変化衝撃, Rapid change of temperature			
氷水衝撃, Ice water shock			
塩水噴霧 腐食, Salt spray - Corrosion			JIS C 8930 IEC 61701
塩水噴霧 漏電および機能, Salt spray - Leakage and function			IEC 60068-2-52 JIS C 60068-2-52
温湿度サイクル 高温高湿サイクル, Humid heat cycle - High temperature and high humidity			
温湿度サイクル 温湿度組合せサイクル, Humid heat cycle - Composite temperature / humidity cycle			

### ③-2. 車載太陽電池に作用する機械的負荷特性の解析

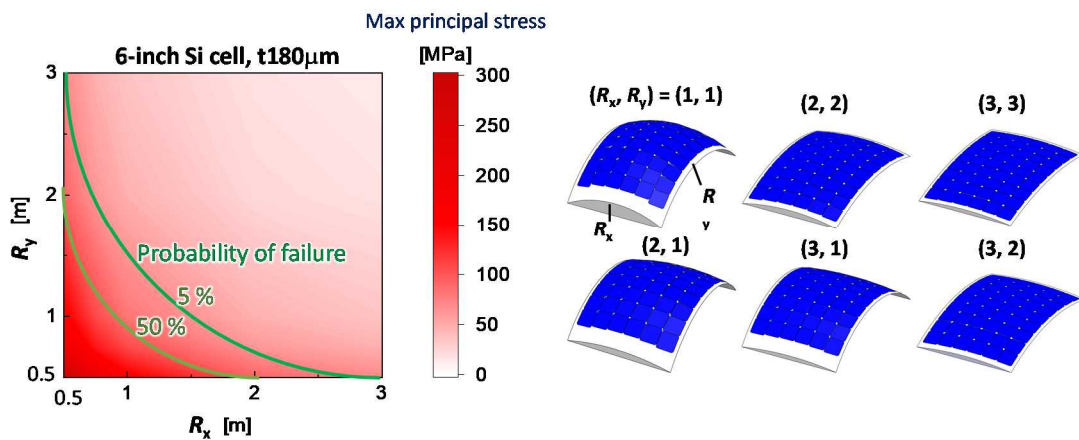
車載太陽電池は、従来太陽電池とは異なる機械的負荷（応力、振動、温度など）を受けることが想定される。また、車体にフィットさせるためにモジュールが曲面状である場合も想定される。車載太陽電池の耐久性の評価方法・基準を検討する上で、これらの影響を把握する必要がある。そこで、車載太陽電池の解析モデルを構築し、MBD (Model Based Development) 手法による解析調査を行った。

まず、典型的な単結晶 Si 太陽電池セルを対象として曲げ試験を実施し、曲げ強度を定量的に調査した。図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-6 に実験装置と結果の一部を示す。1 軸方向の曲げである 4-line 曲げ試験と多軸方向の曲げである Ball-on-ring 試験を実施し、セル応力と破壊確率との関係を明らかにした。次いで、曲面モジュールの応力解析を実施し、曲面状のモジュールにおいてセルに作用する応力（セル応力）を調査した。図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-7 に応力解析結果の一部を示す。これにより、任意サイズの単結晶 Si 太陽電池セルを曲面に適用した際のセル応力と曲率との関係を把握できた（図Ⅲ-7 は 6 インチセルの場合の結果を示す）。このように、使用するセルの曲げ試験と応力解析から、任意の曲面に対して破壊確率の低いセルサイズを決定できることを明らかにした。この手法の妥当性を検証するために実際に曲面モジュールを製作した。曲率半径 1m および 1.5m の 3次元曲面モジュール（約 50cm 角）を製作した。3 インチセルを用いれば破壊確率を低減できることが曲げ試験と応力解析により示唆されたため、3 インチセルを使用して曲面モジュールを試みた。ここでは解析の妥当性検証を目的としてガラス等の耐候性カバーの無い構成のモジュールを試作した。成型時の温度条件によってセルが割れた場合もあったが、条件出しの結果、セル割れが無い曲面モジュールを製作することができた（図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-8）。これにより曲面モジュールのセルサイズ決定手法の妥当性を実証できた。

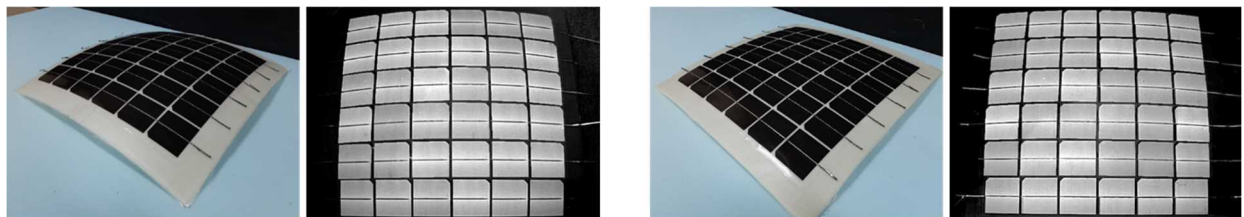




図III-2-(二)-(i)-B-6 曲げ試験の実験装置と結果の一部



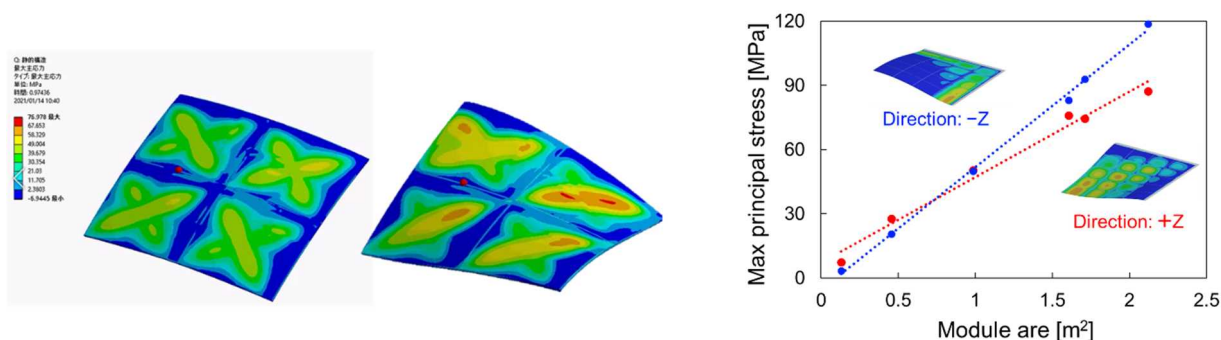
図III-2-(二)-(i)-B-7 単結晶 Si 太陽電池セルを用いた曲面モジュールの応力解析結果



図III-2-(二)-(i)-B-8 試作した3次元曲面モジュールおよびEL画像  
(左：曲率半径1m、右：1.5m)

セルを組み込んだモジュールのモデルを構築し、各種評価試験条件における応力解析を実施した。図III-2-(二)-(i)-B-9 にモジュールの応力解析の例を示す。この例は曲面モジュールにねじれが加わった際のセル応力分布を示している(左側の図)。曲面モジュールのセル応力は平板モジュールとは特性が異なり、曲面追従時、ラミネート時、温度変化時、等分布荷重時、ねじり等の条件下において曲面の方がセル応力が高めであることが示された。また、振動試験および機械的衝撃試験時の応力解析を実施し、モジュールサイズとセル応力との関係性を把握した(右側の図)。モジュールサイズが大きくなると評価試験装置の規模、治具等を含めた試験コストが増大

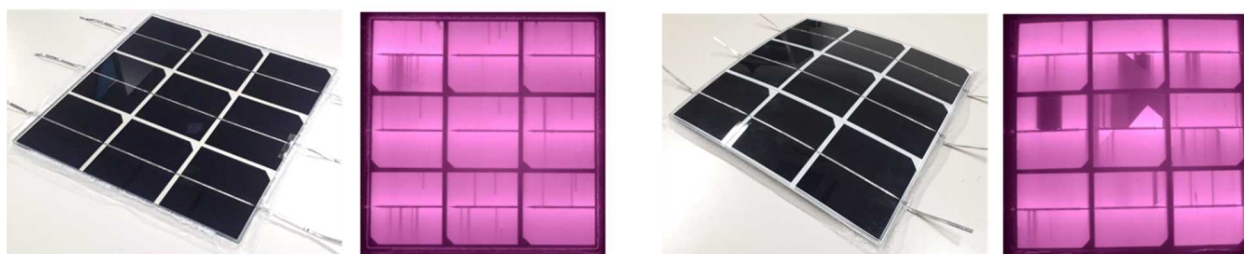
することから、研究開発段階などでは小面積モジュールで条件を調節することにより、実サイズモジュールと等価な試験を実施できる可能性が示された。さらに同様のモデルを用いて搭載部位（振動や衝撃の方向）の影響についても調査し、モジュール面に対して垂直方向の振動・衝撃に対するセル応力が高いことが示された。以上のように、モジュールの曲率、構造、セル仕様（形状等）に応じたモデリングが可能となり、各条件下のセル応力特性を定量評価できるモデルベースを構築できた。



図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-9 曲面モジュールの応力解析結果例  
(左：曲面追従+ねじれ、右：機械的衝撃試験におけるモジュールサイズ依存性)

車載部品に固有の信頼性評価規格のうち、とくに重要と考えられる熱衝撃試験、鉄球落下試験、振動・機械衝撃試験について実験と応力解析(一部)による調査を実施した。熱衝撃試験では、図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-10に示すように曲面と平面の試作モジュール（表面ガラスあり）に急激な温度サイクルを負荷し、セル割れや発電性能への影響を検証した。サンプル数が各2枚の結果ではあるが、曲面の方が劣化が大きいことを確認した。応力解析より曲面ではリボン線の接合部での応力が増加する傾向などの差異が確認された。鉄球落下試験では、モジュールの最表面材料がガラスの場合と樹脂の場合との差異などを確認した。さらに振動・機械衝撃試験では、前述のようにモジュールサイズや取付部位の違いによる評価結果への影響を調査した。

今後はモジュールの試作と実験をさらに積み重ねて、モデル解析の精度向上に繋げるとともに、セル・モジュール構成材料の種類、各層の厚さなど各種条件の影響を調査し、合理的な信頼性試験の条件や基準を検討する。



図Ⅲ-2-(二)-(i)-B-10 曲面モジュール（曲率半径 1m）の熱衝撃試験結果  
(左：試験前、右：試験後)

### ③-3. 合理的な試験方法・基準の検討

上記1と2の成果を踏まえて、車載太陽電池に固有の信頼性評価項目であり、且つ重要性の高い項目について、合理的な試験方法・基準を検討している。前記の MBD 手法により試験方法を検

討し、適宜、実験による妥当性検証を行っている。これまで5回の車載太陽電池検討委員会において逐次成果を報告し、自動車メーカー、太陽電池メーカー、大学等の研究開発担当者と意見交換を実施している。これにより移動体用太陽電池の研究開発プロジェクト等への展開と連携を推進し、さらに自動車メーカー、太陽電池メーカー、評価機関（自動車技術会、日本電機工業会、電気安全環境研究所）などの関係者との個別協議を実施している。

## 2. 実用化・事業化見通し

調査事業は記載不要。

## 3. 波及効果

調査事業は記載不要。

## 4. 今後の展開

### ①国内における PV 搭載移動体の研究機関、企業、利用者等を対象にした調査、分析 ～コミュニティ拡大を軸に調査、分析の範囲を拡大する

海外やトラック PV などに裾野を広げた研究会を実施するなど、移動体 PV コミュニティの拡大を行ってきた。今後もさらに鉄道や UAV などへも裾野を広げた研究会の継続開催などを行い、移動体 PV コミュニティのさらなる拡大を図りつつ、これらにより新たな価値を明確にする（中間目標）。

さらに「新たな価値」に基づき、新たな普及策を策定し、実証提案などを行う

### ②国内における PV 搭載移動体の普及に資するレジリエンスの定量評価、事例調査 ～PV 搭載移動体のレジリエンスの定量評価、事例調査

災害時に車載太陽電池を活用することにより生じるメリットを定量評価するためのシミュレーションを開始し、災害時に必要な太陽電池搭載車台数の導出などの定量評価を行ってきた。今後、災害時における移動体 PV によるメリットの定量評価を国際的視点でも進めるとともに新たな価値創造の検討を行い、PV 搭載移動体の利点を纏める（中間目標）。

さらにこれらの結果を踏まえ、新たな技術開発、実証の提案を行う。特に、具体的な地域をベースとして地域の実情に合わせたレジリエンス像の具体化、および、地方行政関係者や「道の駅」などの防災救護拠点での、地域実情を反映した計画策定に有用なツール作成を目指す。

### ③車載太陽電池の信頼性評価に資する技術検討

車載部品の評価規格の調査を行うとともに、車載用曲面 PV モジュールの応力解析（実験と計算）などの信頼性に関わる技術開発を行った。今後、モジュール形状、モジュール搭載部位や各種条件の影響解析を進め、車載 PV に固有の負荷特性と課題を明確化する。これにより、評価手法、基準案を提言する（中間目標）。

さらにこれらの結果を踏まえ、より実車搭載に近いモジュール構造に関する調査と機械的特性の解析を実施する。また、業界におけるガイドライン化の必要性と方向性を関係各位と協議し、必要に応じて評価手法、基準のガイドラインを策定する。可能であれば各種プロジェクトによる開発品等への試行を行い、課題抽出と解決を図るとともに、車載 PV 開発の加速に資するデータを提供する。

5. 特許・論文・対外発表

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
特許出願 (国内／国際)	0	0	0	0
論文	0	0	0	0
研究発表・講演	0	6	2	8
(国内・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査有)	(0)	(3)	(1)	(4)
(国内・審査無)	(0)	(3)	(1)	(4)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	1	1
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022 年 6 月 20 日現在)

(ii) リサイクル関連の動向調査

【A 太陽電池モジュールのリサイクルに関わる調査】(株式会社三菱総合研究所)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
① 太陽電池モジュールのガラスの再利用の状況調査	ガラスのマテリアルフローの更新、グラスウールを採りあげ、その受入条件・ポテンシャルについて、中間処理業者、グラスウールメーカー等と連携して整理・把握する。	太陽電池由来のガラスに関するグラスウールの受入条件・ポテンシャルについて硝子繊維協会と連携してWGを立ち上げ、検討を実施。これまでにWGを5回実施。 2年間の成果を取りまとめるとともに課題を整理し、次年度の計画を検討。	○	
② 太陽電池モジュールのリサイクルに関する国内の技術開発動向、政策動向、実施事例等の調査	リサイクル技術開発動向、政策動向、実施事例等について基礎情報を整理・把握する。	太陽電池モジュールのリサイクルに関する国内の技術開発動向、実施状況として最新情報を整理。	○	
③ 太陽電池モジュールの災害時のリサイクル状況調査	災害に伴う太陽光発電設備への被害状況やリサイクルの実施状況について基礎情報を整理・把握する。	公表情報をベースに、太陽電池モジュールの災害時の排出量に関する定量的な整理を実施。 各種ヒアリング調査を実施したが、これ以上の情報を得ることは困難であり、調査完了。	◎	
④ 使用済太陽光発電設備の排出量の精緻化	使用済太陽光発電設備の排出量予測について更新を行うとともに、太陽光発電システムの導入・排出実態により即した予測手法への改善を検討する。	2050CN等の動向を踏まえた導入量・排出量予測の更新を実施。 太陽光発電システムの導入・排出実態に即した予測手法への改善検討を実施。	◎	

\*1 達成度

◎: 大きく上回って達成、○: 達成、△: 達成見込み、×未達

【B 太陽電池モジュールの適正処理に関わる調査】

(みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社、一般社団法人太陽光発電協会)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
(1) 国内における太陽電池モジュールの適正処理に関する調査	日本国内における現状を調査し、解決すべき課題や制約要因を把握する。	使用済み太陽電池モジュールの排出、収集・運搬および中間処理等に関する現状を把握するため、発電事業者・所有者、撤去・解体事業者、収集運搬事業者、および中間処理事業者向けのアンケート調査を実施した。	○	
(2) 海外における太陽電池モジュールの適正処理に関する調査	海外における動向を調査し、先行事例から得られる課題や論点を把握する。	国際機関である IEA PVPS Task12 (PV Sustainability) への参加等を通じ、海外における使用済み太陽電池モジュールの使用後処理に関する情報を収集した。	○	
(3) 太陽電池モジュールの適正処理の円滑化に向けた検討	太陽電池モジュールの適正処理の効率化、円滑化に向けた手法を検討し、実証できる企画を提案する。	実証企画の提案に向けた使用済み太陽電池モジュールの効率的な収集運搬方法(モデル)の検討(考えられる回収・運搬パターンの抽出)を行った。 抽出したパターンについて、廃棄物処理法上必要となる許認可や、モデル・実証に向けた課題の検討を行った。	○	

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×未達

A 太陽電池モジュールのリサイクルに関わる調査(株式会社三菱総合研究所)

1. 成果詳細

①太陽電池モジュールのガラスの再利用の状況調査

a. ガラスリサイクル技術の調査

太陽電池モジュール由来のガラスカレットの受入条件・ポテンシャルを把握するために、ガラスリサイクル業者等(板ガラスメーカー、発泡ガラスメーカー等)8者に対しヒアリング調査を実施した。ヒアリング調査の結果、各種使用済ガラスの受入条件等について、表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-1 に示す通り情報が得られた。

表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-1：太陽電池モジュール由来ガラスの受入条件及び受入可能量

調査対象用途	各種使用済ガラスの受入ポテンシャルと受入可能性	検討課題
板ガラス	<p><b>受入ポテンシャル：5,000t程度</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● フロートガラスの原料としては、Sbが0.2%程度含有しているPVパネルカバーガラス由来のガラスカレットは使用不可。</li> <li>● 型板ガラスであれば、品質が少し緩和できるため可能性がある。</li> <li>● Sbの品質への影響は、30t以上のサンプル評価を実施しなければ製品ガラスの品質評価ができない。</li> <li>● PV由来カレットの投入割合を徐々に増やしての評価が必要のため、評価に1年程度の期間が必要。</li> <li>● Sb：0.2%程度あれば、机上の推定になるが工場では、数百t/月くらいの可能性がある。原料中のカレット比率で10～20%。このくらいの規模になってくるとSbの影響も見る必要がある。</li> <li>● 一次原料(珪砂)ではなくカレットを用いるメリットとして、熱効率が良い(低CO<sub>2</sub>となる)ことが挙げられる。</li> </ul>	<p>&lt;使用済ガラスの受入先に関する課題&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 太陽光パネルのカバーガラスは、光の透過性を上げるために、Sb、Asを添加している。</li> <li>● 透過性を上げるためには、Sbを添加すれば十分である。</li> <li>● Sbに加え鉍物由来のAsの含有濃度より多いものは、透過性を上げるために意図的に加えていると思われる。恐らく中国製。</li> <li>● Sb、Asも添加がなく、Ceが検出されているものがあるが、これも透明性を上げるために(Sbの代替として)Ceを添加したものと推測する。Ceは着色しやすい特性がある。尚、Ceは高価なためあまり使用されていないと思われる。</li> </ul>
発泡ガラス	<p><b>受入ポテンシャル：3万t程度</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 使用済ガラスについて、盛土材用途での使用が考えられる。</li> <li>● 砂漠の緑化用土壌改良等の用途があり、モロッコ、チベット、南アフリカ等へ輸出されている。</li> <li>● 防犯用途、水質浄化用途(鉍山廃水処理等)の需要は僅かである。</li> </ul>	<p>&lt;使用済ガラスの受入先に関する課題&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 原料調達に関する懸念は現在のところない。</li> </ul>
ガラスびん	<p><b>受入ポテンシャル：一(不明)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● びん由来のガラスカレットが原料とされている。板ガラス(ソーダガラス)のカレットは現時点では使用され</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PVメーカーや型式などに基づき、受入可能な品質のガラスの識別が可能であれば、ガラスびん用途として継続的な受入の可</li> </ul>

調査対象 用途	各種使用済ガラスの 受入ポテンシャルと受入可能性	検討課題
	<p>ていない。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 今後、PV 由来ガラスの大量発生が課題となることを受け、ガラスびんが受入先の一つとなる可能性について検討が必要であるとの意見があった。</li> <li>● 他方、業界としては、ソーダ石灰ガラスに含まれるマグネシウムの影響（容器中への剥離）、Sb 等の取扱いの観点から、現状では受入困難との見通し。</li> </ul>	<p>能性がある。</p>
舗装材	<p><b>受入ポテンシャル：0t</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 原料調達ルートが確立されており、新たに PV 由来ガラスの調達を検討する可能性は低い。</li> </ul>	<p>—</p>
人口珪砂 (リサイクル ガラス 造粒砂)	<p><b>受入ポテンシャル：—(不明)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 人工珪砂として、ガラスの一次原料を置き換えることができるようになれば、受入ポテンシャルは大きいと思われる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 強化ガラスの水平リサイクルを含む、より高度な循環での人口珪砂活用に向け実証を進めていく必要がある。</li> </ul>

#### b. ガラスの受入条件の調査

多様なガラス用途先の中でも市場規模や受入ポテンシャルが大きく、太陽電池モジュール由来ガラスの受入可能性のあるガラスウールの受入条件・ポテンシャルについて、中間処理業者、ガラスウールメーカー等と連携して調査を実施した。具体的には、中間処理業者によって太陽電池モジュールから回収されたガラスカレットをガラスウールメーカーに引渡し、ガラスウールメーカーが太陽電池モジュールガラスの組成分析及びガラスカレットの粒径、成分、異物混入等を確認の上受け入れ可能性の評価を行った。加えて、太陽電池モジュールから回収されたガラスカレットからガラスウールを試作し、性能評価や溶出試験を行い、ガラスウール製品の評価を行った。

なお、ガラスカレット評価の結果を受け、アンチモン揮発による人体・設備等への影響の可能性が示唆されたため、アンチモン揮発試験も実施した。検討にあたっては、硝子繊維協会内に「環境委員会(短繊維)リサイクルワーキンググループ」を設置し、ガラスウールメーカー5社・有識者と協議の上、検討を進めた。ガラスカレットの調達にあたっては、中間処理業者3社より提供を受けた。

太陽電池モジュール由来ガラスカレットの評価の結果、表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-2 に示す方向性が整理された。特に受入可能性に関しては、ガラスウール製品の品質、揮発量、炉内電極に及ぼす影響の観点では太陽電池モジュール由来ガラスカレットの使用に問題ないことが示唆された。



表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-2：太陽電池モジュール由来ガラスカレットの評価の結果

受入基準項目		検討の結果得られた方向性	受入可能性調査項目	調査結果
カレットの大きさ		粒度2mm未満が多くなると、搬送・計量及び溶解時などで悪影響の懸念あり	ガラスウール製品としての性能試験	十分に製品化可能
成分	ヒ素	ヒ素は含まれないケースもあるため、基本的には「含まない」ことが受入基準か	溶出試験(方向性①)	屋外で留置されるガラスカレットについて、手法を検討の上追加試験が必要
	アンチモン	アンチモンは含むケースが多いため、以下の3点を確認のうえ、適切な基準を設定する必要。 ①アンチモンがガラスウール製品およびガラスカレットから溶出するか ②アンチモンがガラスウールの溶解時にどれだけ揮発するか ③アンチモンのモリブデンや白金に対する腐食に関する情報	揮発試験(方向性②)	人体・設備等に影響を与えるレベルではなく、問題なし
			炉内電極に及ぼす影響(腐食に関する議論)(方向性③)	腐食の影響は大きくなく、一般的な対策により対応可能
異物			有機物	有機物(フィルム)の残存状況に懸念
	鉄片	金属球の混入に懸念		

ガラスウールメーカーとして受入可能なガラスカレットの基準についての情報共有のため、リサイクラーへ向けた受入基準についても第1版を作成した(表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-3)。第1版は、ガラスウールメーカー各社の納入仕様をもとに、それらを包含する方向で作成された。なお、アンチモンの取扱については、これまでの検討内容を踏まえて、これから硝子繊維協会としての考え方の統一等を検討していくため、現段階では基準に含めていない。

表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-3：ガラスウール用ガラスカレット受入基準(第1版)

区 分		大きさ	許容量
種 類	ガラス (含む強化ガラス)	カレットの大きさ	2 mm 未満 30 % 以下
		水分率	2~40 mm 70 % 以上
結晶化ガラス(耐熱ガラス)		2%以下 無いこと	
成分	鉛		1000 ppm 以下
異 物	砂利、セラミックス、セメント等		1mm未満 50ppm未満 1mm以上 無いこと
	陶磁器類		1mm未満 50ppm未満 1mm以上 無いこと
	有機物	フィルム、紙、ゴム、木片等	10mm未満 500ppm未満 10mm以上 無いこと
	鉄片	ステンレスを除く	1mm未満 50ppm未満 1mm以上 無いこと
	非鉄金属	アルミ、ステンレス、鉛、銅、金属シリコン等	1mm未満 50ppm未満 1mm以上 無いこと

ガラスウールメーカーのガラスカレット受入基準について

※ 本「受入基準」は目安であり、詳細はガラスウールメーカーの納入仕様書による。

※ 本「受入基準」はガラスウールメーカーの受入基準であり、ガラスカレットメーカーの調達基準とは異なる。

## ②太陽電池モジュールのリサイクルに関わる国内の技術開発動向、政策動向、実施事例等の調査

### a. リサイクル技術開発動向調査おける課題の検討

太陽光発電システムのリサイクル技術開発を行っている企業等(太陽光発電メーカー、ガラスメーカー、リサイクル業者、研究機関等)を対象に、文献調査やヒアリング調査を行い、研究開発の概要や技術の特徴(適用可能なモジュール、リサイクル技術、処理能力、開発状況等)を整理した(Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-4、Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-5)。

表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-4：技術開発動向(概要)

技術類型	技術開発動向
モジュールの撤去・分別・回収技術	リサイクル業者が、太陽電池モジュールの破碎・選別処理(産業廃棄物中間処理施設)の運用に加え、自然災害等による被災太陽光発電所の対応をワンストップで実施できるサービス体制を、関係企業と共同で構築。 保険会社が、自然災害で被害を受けた太陽光パネルの保険金支払い時に、リユース・リサイクルできる業者を紹介し、廃棄パネルを有効活用するための取り組みを開始。
モジュール・素材の分離・解体技術	多様な技術の開発及び導入が進められている。 取組が見られた技術類型として、加熱処理、圧縮破碎、プラスト方式等が挙げられる。
その他	国内太陽光発電システム関連企業が独企業と合弁会社を設立し、使用済太陽電池モジュールのリファーマービッシュ事業が開始される予定。 太陽光パネルメーカーが廃棄物の広域認定を取得し、太陽光パネル、パワーコンディショナー(PCS)、リチウムイオン蓄電池の3種類について、全国にリサイクルネットワークを構築。

表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-5：技術開発動向(詳細)

No	対象	内容
1	JFE エンジニアリング株式会社 (J&T 環境株式会社)	株式会社チヨダマシナリーの装置「PV リサイクルハンマー」(市販1号機)を導入。 群馬県伊勢崎市の自社保有地に導入、2020年10月末～2021年1月末で実証試験を実施後、それを踏まえた運用条件の設定・装置の調整を予定。事業としての運用開始時期は調整中。
2	株式会社新見ソーラーカンパニー(岡山県)	太陽光発電事業に加え、リサイクル事業を検討。 太陽電池モジュールを熱で熱し、金属・ガラス・セルに分解する技術。 処理後の金属は売却、セルは製錬業者へ引き渡し、ガラスも引渡し先を検討中。
3	東京パワーテクノロジー株式会社(神奈川県)	川崎市より太陽電池モジュール廃棄物に係る産業廃棄物処分業許可を取得し、神奈川県川崎市扇島の川崎リサイクルセンターにて、廃太陽電池モジュール処理・リサイクル事業を開始。
4	共栄九州株式会社(大分県)	鉄スクラップ専業商社大手の共栄グループで総合リサイクル事業を展開する共栄九州は県内ではじめて廃棄ソーラーパネルのリサイクルを開始。 処理装置を独自に製作することで貴金属を回収できる発電セルをはじめ、従来は埋め立てや路盤材としての利用が多かったガラスの再利用も可能にした。
5	山本商事グループ 奈良マテリアル株式会社(奈良県)	太陽電池モジュールを100%リサイクルする奈良マテリアル第二工場を取得して整備を終え、稼働開始。モジュールは年間9万枚の処理、最大27万枚まで対応が可能。ReSolaを導入。
6	株式会社WQ(東京都)	太陽光発電システムの販売、事業開発・運営を手掛けるWQは、独りノバソル(Rinovasol)と使用済太陽電池モジュールのリファーマービッシュ事業を手掛ける新会社リノバソルジャパンを合弁で設立。 事業検討中であり、詳細なヒアリングに今後対応いただける

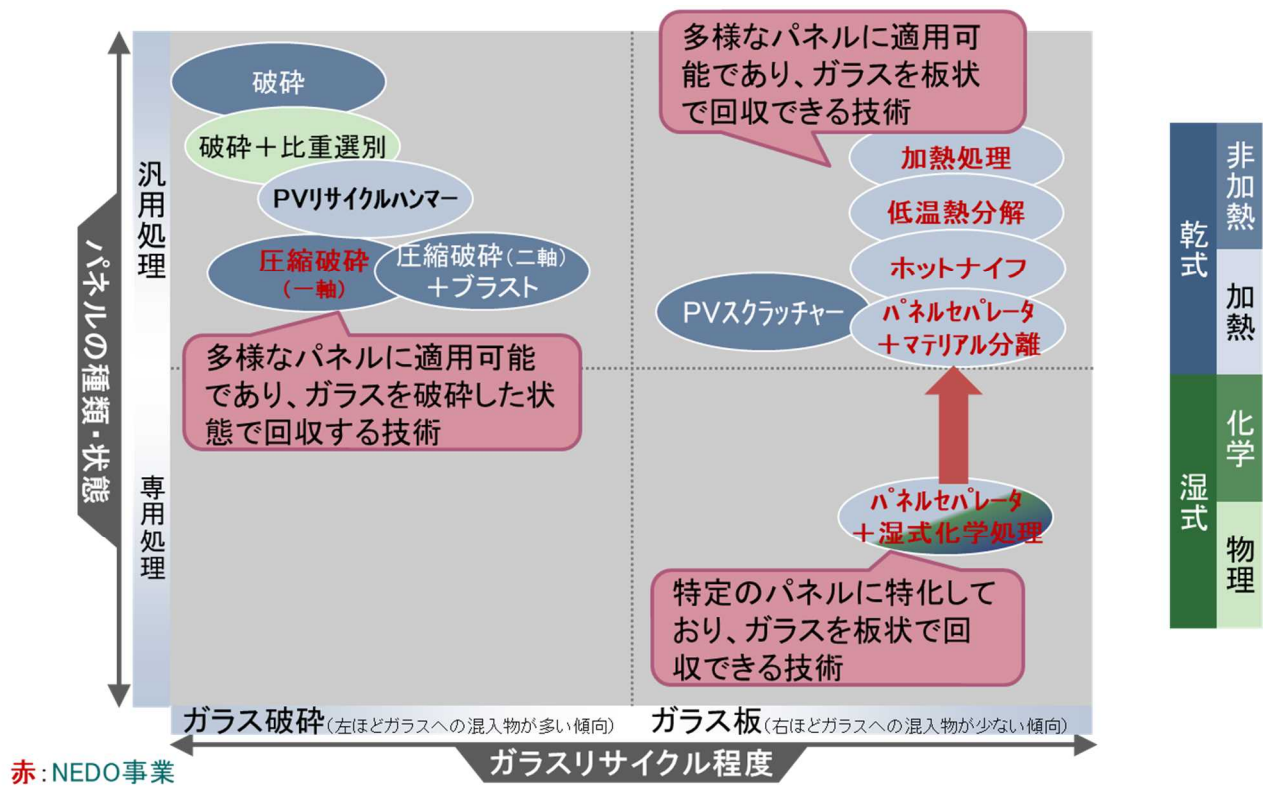
No	対象	内容
		予定。
7	株式会社高良(福島県)	令和3年7月8日付けで福島県より産業廃棄物処分業の事業範囲変更について許可されたことから、南相馬市原町区深野の本部エコプラザにおいて太陽電池モジュールの破碎・選別処理(産業廃棄物中間処理施設)の運用を開始。 さらに、自然災害等による被災太陽光発電所の対応をワンストップで実施できるサービス体制を、関係企業と共同で構築。
8	加山興行株式会社(愛知県)	使用済太陽電池モジュールのリサイクル事業に参入。粒状の材料をパネルに吹き付けてガラスをはがす装置(ブラスト装置)を導入し、2022年4月に稼働させる。処理後、ガラスやパネルに使われていた金属や樹脂は再資源化。
9	PV Repower 株式会社(東京都)	再生可能エネルギーの総合カンパニーであるエーバランスグループが、2021年3月22日に新設した子会社PV Repowerを通じて太陽光パネルのリユース・リサイクル事業に着手。
10	TRE ホールディングス(東京都)	TRE ホールディングス(リバーホールディングスとタケエイの経営統合により10月1日付で設立された共同持ち株会社)が、中期経営計画の成長戦略なかで、太陽光パネルリサイクルの事業化についても推進すると公表。
11	信州タケエイ(長野県)	タケエイ(東京都芝区)のグループ会社である信州タケエイ(長野県諏訪市)は1月より、廃太陽光パネルのリサイクル事業を開始。手動式ブラスト剥離装置を導入。
12	損害保険ジャパン株式会社、SOMPO リスクマネジメント株式会社	自然災害で被害を受けた太陽光パネルの保険金支払い時に、リユース・リサイクルできる業者を紹介し、廃棄パネルを有効活用するための取り組みを開始。 損保ジャパンは、SOMPO リスクが持つ専門的な知見から太陽光パネルの損傷の程度・規模に応じてリユース・リサイクルの可能性を判断し、提携業者を紹介するサービスと、リユース・リサイクルの活用を推奨する新特約を用意。2021年10月から販売を開始。
13	ネクストエナジー・アンド・リソース(長野県)	太陽光パネルメーカーではじめて廃棄物の広域認定を取得(2021年9月)。太陽光パネル、パワーコンディショナー(PCS)、リチウムイオン蓄電池の3種類について、全国にリサイクルネットワークを構築。

#### b. リサイクル関連政策動向調査

国内における太陽光発電システムのリサイクル等に係る政策動向として、注目すべき動向を取り上げ、文献調査によって、その概況(政策の概要、政策の影響を受ける対象者、スケジュール、課題等)を整理した。環境省のリユース促進ガイドラインや、資源エネルギー庁のエネルギー供給強靱化法の概要や、埼玉県、長野県等の地方自治体における関連取組動向を整理した。

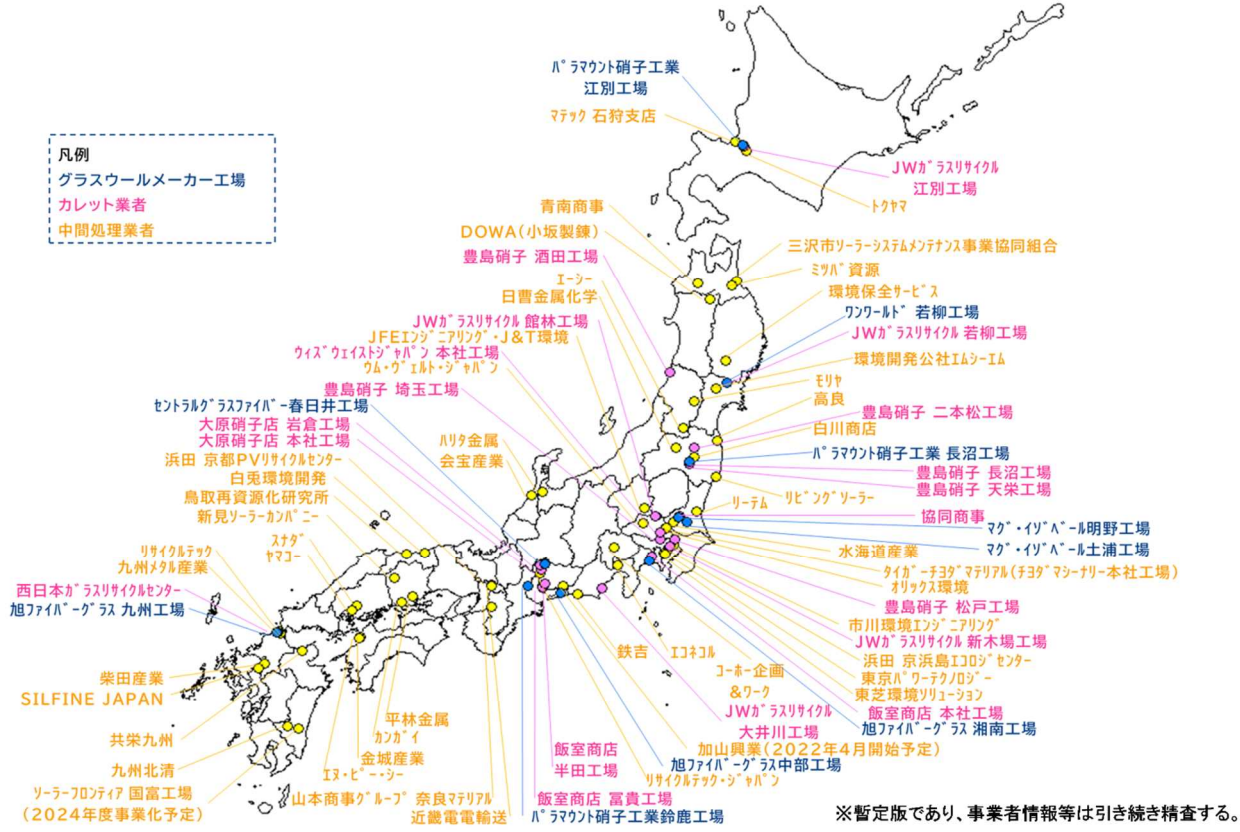
#### c. リサイクル実施事例等調査

太陽光発電システムの回収・リサイクル・リユース実施事例について、文献調査やヒアリング調査に基づき、その概要や太陽光発電システムの回収方法、リサイクル技術、処理能力、処理実績、処理コスト、リサイクル率、今後の課題等について情報収集・整理を行った。パネルの種類・状態、ガラスリサイクルの程度に応じて各技術の特徴を整理した結果を図III-2-(二)-(ii)-A-1に示す。引き続き技術の特長を示すマップの精緻化、技術の追加を検討する。



図Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-1: パネルの種類・状態、ガラスリサイクルの程度に応じた各技術の特徴 (2022年6月版)

また、これまで情報収集してきた PV リサイクルに関する中間処理業者と、カレット業者、ガラスウールメーカー工場をマップ化した結果を図Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-2 に示す。引き続き、中間処理の技術別の整理、地域別の状況整理等を実施していく。



図Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-2: PV リサイクル関係者マップ (2022年6月版)

### ③太陽電池モジュールの災害時のリサイクル状況調査

#### a. 災害に伴う太陽光発電設備への被害状況等の整理

国内の災害に伴う太陽光発電設備への被害状況等について、文献調査及びヒアリング調査に基づき、発生時期、発生場所、災害種類、太陽光発電設備への被害状況等について情報収集・整理を行った。また、電気事業法に基づき情報収集された太陽光発電設備に関する事故のうち、災害に伴う被害状況等について文献調査を実施した。

結果として、災害に伴う太陽光発電設備への被害状況については情報が整理されているが、災害時の太陽光発電設備の廃棄・リサイクルの状況については把握されていないことがわかった。

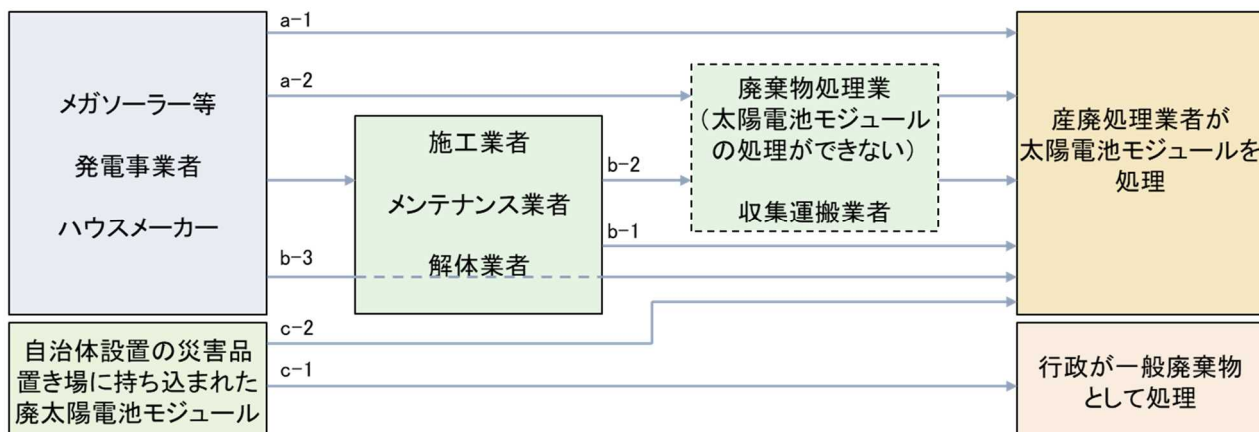
#### b. 太陽電池モジュールの災害時のリサイクル状況の整理

##### <発電事業者・施工業者・メンテナンス業者等へのヒアリング調査>

太陽電池モジュールの災害時のリサイクル状況などの詳細な情報収集を目的に、発電事業者、施工・メンテナンス業者、自治体等を対象にヒアリング調査を行い、太陽光発電設備への被害状況、災害後の具体的な対応について情報収集・整理を行った。ヒアリング結果をもとに太陽電池モジュールの処分決定までの流れを図Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-3の通り整理した。

一般的には、発電事業者が施工業者及びメンテナンス業者へ修繕工事を依頼し、交換で発生した廃棄太陽電池モジュールの処分を廃棄物処理業者へ依頼する。なお、産廃処理業者と産廃廃棄物処分委託契約を結ぶ排出事業者が、発電事業者の場合と施工業者となる場合がある。

災害品については、自治体が環境省の災害等廃棄物処理等補助金を申請し、災害品置き場を設置した場合を除き産廃処理と同じ流れになる。施工業者やメンテナンス業者は、太陽電池モジュール交換等の復旧工事を請け負う。ほとんどの場合、工事内容には交換した破損パネルの廃棄処理が含まれ、この場合太陽電池モジュールの排出者は施工業者となる。まれに交換した廃棄太陽電池モジュールを発電事業者自ら産廃処理するケースがある(表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-6)。



図Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-3：廃太陽電池モジュールの廃棄処分決定までの流れ

表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-6：廃太陽電池モジュールの廃棄処分決定までの流れの補足

流れの補足	
a-1	発電事業者が処理業者を自ら探し、排出元として廃太陽電池モジュールを産廃処理できる産廃処理業者と産業廃棄物処分委託契約を結び、処理依頼する。
a-2	産廃契約は a-1 と同じ。発電事業者が既知の産廃処理業者又は収集運搬業者へ廃棄処理を依頼。依頼された産廃業者が太陽電池モジュールの処理ができない場合、処理できる産廃処理業者を探すケースとなる。なお、太陽電池モジュールの処理ができない産廃業者は、地元の建設廃材や電気工事廃材の処理を行っていることが多い。
b-1	修繕工事を委託された施工業者やメンテナンス業者が、廃太陽電池モジュールの処理も含め受注するケース。排出事業者が施工業者及びメンテナンス業者になる。
b-2	a-2 のケースと類似、排出元事業者が施工業者やメンテナンス業者となる。
b-3	施工業者やメンテナンス業者が、処理先を探して産廃処理費の見積りを発電事業者へ提案し、排出事業者が発電事業者になるケース。保険契約等と関係あると推察。
c-1	災害品置き場に持ち込まれたものは、一般廃棄物として行政が処分。
c-2	行政の処理設備で対応できない場合は、行政が排出事業者となり産廃処理業者へ依頼し処理。

＜太陽電池モジュールの災害時のリサイクル状況の整理＞

太陽電池モジュールの災害時のリサイクル状況について、公表情報をもとに整理を行った(Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-7)。太陽電池発電所の事故件数に関して、経済産業省の電気保安統計によれば、太陽電池発電所は、事故件数(電気工作物の損壊による事故)、事故率(発電出力 100 万 kW あたりの事故件数)ともに増加傾向にある。自然災害、パワーコンディショナーの設備不備に起因する事故の多発が一因となっている。また、太陽電池モジュールの事故被害件数は 24 件で全体の 1 割程度となっている。公表情報をベースとして、太陽電池モジュールの被害を受けたものを拾うことでおおよその定量的な数値を推定することはできるが、全体に占めるカバー率を確認することができない状況であった。令和元年度の災害による太陽電池モジュールへの被害状況は、公表情報ベースで、全てのモジュールが被害を受けたと仮定すると 166,023kW、0.1t/kW とすると約 16,600t であった。

表Ⅲ-2-(二)-(ii)-A-7 災害による太陽電池モジュールへの被害状況  
(令和元年度：詳細が公表されていた情報のみを整理)

名称	発生時期	種類	所在地	規模	概要	被害状況	
						パネル	破損の程度、規模
1 風雨	2019年7月1日		鹿児島県		風雨	破損	大雨による地盤陥没のため、太陽電池モジュール・逆変換装置が破損
2 梅雨前線による豪雨	2019年7月18日～21日	豪雨	福岡県		土砂崩れ	破損	大雨による山崩れのため、太陽電池モジュール・逆変換装置が破損
3			鹿児島県霧島市	34000kW	土砂崩れ	崩落	架台基礎地盤が陥没し、PCS、パネルが崩落
4 令和元年台風8号	2019年8月6日～7日	台風	宮城県都農町	50kW	強風	飛散	樹脂製架台の一部が台風の影響により破損し、太陽電池モジュール4枚が構外へ飛散
5 令和元年台風13号	2019年9月6日～8日	台風	沖縄県宮古島市	4000kW		飛散	パネル30枚が飛散、うち1枚が構外へ飛散
6			沖縄県宮古島市	1980kW		飛散	パネル30枚が飛散、うち2枚が構外へ飛散
7 令和元年台風15号	2019年9月9日～10日	台風	千葉県富津市	30600kW	強風	太陽光モジュールの脱落	太陽光モジュールの脱落及び架台の傾倒
8			千葉県市原市	11500kW	強風	水上型太陽電池の転倒、破損、発火	太陽電池50,904枚のうち77%程度が風に流され破損し、一部が発火、焼損
9			静岡県河津町	1980kW	強風	脱落	パネル約200枚が脱落、架台の損壊
10			千葉県四街道市	1200kW	強風	軽落	パネル6枚が構外の雑草地に転落
11			千葉県八街市	666kW	強風	脱落	架台の損壊、パネルの脱落(飛散はなし)
12			千葉県成田市	250kW	強風	破損	架台の転倒による太陽光パネル40枚破損
13 令和元年台風17号	2019年9月20日～23日	台風	佐賀県白石町	1980kW	強風	水上型太陽電池の転倒、破損	太陽電池モジュール及びフロート架台が破損
14 令和元年台風19号	2019年10月6日～13日	台風	群馬県高崎市	1980kW	河川氾濫	浸水	PCS、パネル、受変電設備が浸水
15			群馬県高崎市	1750kW	河川氾濫	浸水	PCS、パネル、受変電設備が浸水
16			群馬県太田市	509kW	河川氾濫	浸水	PCS、パネル、受変電設備が浸水
17			福島県伊達市	1238kW	河川氾濫	浸水	PCS、パネルが浸水
18			福島県国見町	1500kW	河川氾濫	浸水	パネル、受変電設備が浸水
19			福島県南相馬市	45500kW	河川氾濫	浸水	パネル、受変電設備が浸水
20			福島県南相馬市	583kW	河川氾濫	浸水	PCS、パネル、受変電設備が浸水
21			宮城県南三陸町	1480kW	河川氾濫	浸水	PCS、パネル、受変電設備が浸水
22			埼玉県朝霞市	977kW	河川氾濫	浸水	パネル、受変電設備が浸水
23			福島県須賀川市	21000kW	土砂崩れ	埋没	市道が崩落し、土砂が発電所内に流入。パネル埋没
24			新潟県新潟市	1300kW	強風	脱落(構外への飛散無し)	パネルが架台から脱落(構外への飛散はなし)

166,023kW

出所)各種公表情報に基づき三菱総合研究所作成

#### ④使用済太陽光発電設備の排出量予測の精緻化

##### <事業内容>

##### a. 2050年カーボン・ニュートラルの実現に向けた動向を踏まえた導入量・排出量予測の更新

2050年カーボン・ニュートラルの実現に向け、太陽光発電設備導入の見通しが上方修正されたことを受け、最新の導入量予測を用いて排出量予測の更新を検討した。具体的には、2030年までの導入量について、再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会において公表された新たな導入量予測に基づき、導入量の推計を精緻化した。

## 2. 実用化・事業化見通し

本調査は、太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発等の取組の参考となるよう、リサイクルに関わる国内の技術開発動向、普及動向、政策動向、実施事例などの調査に加え、ガラスの再利用の状況調査、災害時のリサイクル状況を把握するための調査、使用済太陽光発電設備の排出量予測の精緻化を実施したものである。本調査を通じて得られた成果は、本事業内で実施されているマテリアルリサイクル技術開発等において、目指すべき技術開発の水準や方向性等の検討に資することが期待される。

## 3. 波及効果

今後、大量に廃棄される太陽電池モジュールのリサイクルを円滑に行うためには、使用済太陽光発電設備の排出量予測、災害時の太陽光モジュールのリサイクル状況、太陽電池モジュール由来のガラスの用途開拓、ガラスの再利用の状況を把握することが必要となる。

このような環境の中で本調査は、国内の太陽光発電システムのリサイクル技術開発・政策・事業化の動向について調査・分析することを通じて、我が国の今後の技術研究開発の方向性等を明確にするとともに、将来的な排出見込量を提示することで、我が国の太陽光発電システムのリサイクル技術開発及び社会実装に貢献することが期待できる。

## 4. 今後の展開

NEDO 技術開発機構を通じて本調査の成果を一般に周知することで、我が国の太陽光発電システムのリサイクルシステムの構築に貢献することが見込まれる。

## 5. 特許・論文・対外発表

該当なし。

(2022年6月20日時点)

## B 太陽電池モジュールの適正処理に関わる調査】

(みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社、一般社団法人太陽光発電協会)

### 1. 成果詳細

#### (1) 国内における太陽電池モジュールの適正処理に関する調査

国内における使用済み太陽電池モジュールの排出、収集運搬、中間処理等に関する現状を把握するため、発電事業者・所有者、撤去・解体事業者、収集運搬事業者、および中間処理事業者向けのアンケート調査を実施した。その結果に基づき、それぞれの事業者の観点による、太陽電池モジュール適正処理円滑化のための課題を抽出した結果を表Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-1に示す。

表Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-1 太陽電池モジュール適正処理の円滑化に向けた課題

	発電事業者・所有者	撤去・解体事業者
リサイクル主流化に重要な点	コスト（埋立並）>事業者増>義務化	コスト（埋立並）=事業者増>義務化
処理依頼のタイミング	大規模事業者： 「ある程度量がまとまってから依頼」が多数 理由：コスト削減  中小規模事業者： 「都度の処理依頼」が多数 理由：保管場所確保が困難、保管コスト削減	「都度の処理依頼」が多数 理由：保管場所確保が困難  「ある程度量がまとまってから依頼」少数 理由：収集運搬コストの削減
要望（必要な情報）	処理事業者の一覧、受入可能量、対応エリア、実績、概算費用、処理工程などの情報	処理事業者の処理方法、受入能力、費用などの情報、情報の一元管理化
	収集運搬事業者	中間処理事業者
リサイクル主流化に重要な点	義務化>事業者増>コスト（埋立並）	材料利用技術>義務化>事業者あたりの処理量増
収集運搬の実態	使用車両：2t車や4t車 理由：量が少ない、現場に大型車が入らない 50%以上が都道府県境を越えたもの	—
コスト低減施策（量/収集運搬）	<ul style="list-style-type: none"> <li>量が集まってからの収集運搬</li> <li>処理拠点数の増加（距離の短縮）</li> <li>一時保管場所や積替保管場所の確保</li> <li>排出事業者と連携した物流・保管スキームの構築</li> <li>他県の収集運搬における手続きの簡素化</li> <li>収集箱等の標準化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>受入量の安定化（エリアごとに集約施設等）</li> <li>リサイクルへの補助・支援策</li> <li>収集運搬効率化に向けた回収の仕組み、国の政策・補助</li> <li>県外搬入手続きの簡素化</li> </ul>
コスト低減施策（処理後材料の資源価値）	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>受入先の確保（受入先確保の共同事業）</li> <li>受入価格や品質条件の適正化</li> <li>利用技術・市場形成への公的補助</li> </ul>

使用済み太陽電池モジュールの適正処理としてリサイクルを主流としていくための重要な点として、



発電事業者・所有者や撤去・解体事業者がコスト低減を重視しているのに対し、収集運搬事業者や中間処理事業者は義務化を比較的重視するという違いが見られた。発電事業者・所有者は自らが負担する使用後処理費用の低減を望むものであり、依頼・委託を受けて対応する撤去・解体事業者にとっても所有者に示す費用を抑制したいという意向によるものと考えられる。一方、収集運搬事業者や中間処理事業者においては、既存の事業範囲の中で対応するものであり、リサイクルを推進する制度が整備されることによって、太陽電池モジュールについても適正な費用で適正なリサイクル処理を行うことができるということと考えられる。

発電事業者・所有者や撤去・解体事業者が処理を依頼するタイミングは、保管場所の確保が困難な場合には保管コストの削減のために都度依頼、保管場所がある程度確保できる場合には収集運搬コスト削減のためにまとめてから依頼となっている。また、収集運搬事業者が挙げるコスト低減に向けた必要施策として、量が集まってからの収集運搬や保管場所の確保が挙げられ、保管場所の確保と収集運搬コストの低減が課題と感じている事業者が多いと言える。中間処理事業者が指摘するコスト低減に向けた必要施策としては、受入量の安定化、受入先の確保、価格や条件の適正化などが挙げられ、効率的かつ安定的な搬入に依存するところが大きいと考えられる。

このほか、太陽電池モジュール適正処理の円滑化を図るためには、発電事業者・所有者や撤去・解体事業者には、処理事業者の処理能力や費用等に関する情報の提供、収集運搬事業者および中間処理事業者には、収集運搬効率化に向けたスキームの構築や各種手続きの簡素化、リサイクルに向けた支援策などが有効と考えられる。

## (2) 海外における太陽電池モジュールの適正処理に関する調査

IEA PVPS Task12(PV Sustainability)への参加等を通じ、欧州をはじめとする海外主要国における太陽電池モジュールの使用後処理に関する情報を収集した。

欧州では、WEEE 指令のもと、使用済み太陽電池モジュールの回収、回収廃棄物からの資源回収・リサイクル率等の達成義務が課せられており<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-1</sup>、欧州連合の統計局が公表している統計値<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-2</sup>によれば、12ヶ国における使用済み太陽電池モジュールの回収量、処理量などが示されており、2018年の回収量は12ヶ国合計で13,951トンであった。しかしながら、太陽電池モジュールに限らず、市場で発生しているはずの廃棄物の回収が十分ではないという課題などが指摘されており<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-3</sup>、適正処理推進に向けた取り組み強化に関する議論が行われている。

ドイツでは、2019年には2018年を大きく上回る13,400トンの使用済み太陽電池モジュールが回収されている<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-4</sup>。主に公共機関のstiftung elektro-altgeräte registerが担っているが、モジュールメーカーやPV CYCLEなどによる回収も行われている。回収されたモジュールの処理を行っている企業として、ガラスリサイクル事業者であるReiling、太陽電池メーカーでもあるFirst Solarなどがある。ドイツにおいても、現在の回収・処理システムは適正処理が行われていることを保証できていないとの指摘があり、太陽電池モジュールのCircularityの強化に向けた議論が行われている<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-5</sup>。

フランスでは、Soren(旧PV CYCLE France)が使用済み太陽電池モジュールの回収、リサイクルを手配しており、2020年には約4,100トンの太陽電池モジュールが回収された<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-6</sup>。中長期的な使用済み太陽電池モジュールの発生量の増加に備え、太陽電池モジュール処理拠点の整備が進められている。

また、2010年より欧州における太陽電池モジュール回収・リサイクルスキームを構築、運営しているPV CYCLEでは、2019年に約10,000トン、2020年には約8,000トンの使用済み太陽電池モジュールを回収している<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-7,8</sup>。

米国では、一部の州において、使用済み太陽電池モジュールの回収・リサイクルを求める法案などが成立している。ワシントン州では太陽光発電を供給・販売する事業者に対し、使用済み太陽電池モジュールの回収・リサイクルを求める法案が成立し、2022年1月1日より強制力を持つ<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-9,10</sup>。カリフォルニア州では、使用済み太陽電池モジュールがUniversal wasteに指定され、2021年1月1日より効力を有することとなった<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-10</sup>。このほか、ニューヨーク州、ノースカロライナ州、ニュージャージー州、オレゴン州、イリノイ州、ハワイ州、アリゾナ州、ミネソタ州などにおいても使用済み太陽電池モジュールのリサイクルや適正処理に関する議論が実施されている<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-10,11,12,13</sup>。

韓国では、太陽電池モジュールがEPR対象製品に加えられることとなり、使用済み太陽電池モジュールの回収の仕組みやリサイクル処理技術が確立されることを前提とし、2023年1月より効力を有する<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-14</sup>。また、太陽電池モジュールリサイクルセンターの設立に向けたプロジェクトが実施され

た。2021年12月に処理能力3,600トン/年のリサイクル工場が竣工され、今後、試験運転を経て、実用運転を開始することが予定されている<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-14</sup>。このほかにも様々な技術開発プロジェクトが実施されている。

中国では、太陽電池モジュールの使用後処理に関する特別な法規制等はないが、2020年1月に太陽光発電の製造から使用後処理に至るライフサイクルを全て「Green」とすることを目指す「PV Committee of China Green Supply Chain Alliance」が設立され、2022年には「China PV Recycling Center」と称されるAllianceが設立された<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-15</sup>。また、2019年より技術開発プロジェクトが開始されており、リサイクル技術の開発のみならず、リサイクルが容易なモジュール構造や環境に優しいモジュール構成材料の選択、必要となる標準化や政策提言までを目指している。

オーストラリアにおいても、現時点において太陽電池モジュールの使用後処理に関する特別な法規制等はなく、リサイクルに向けた課題として、適切な仕組みが構築されていないこと、必要な情報が普及していないことなどが挙げられる。使用済み太陽電池モジュール発生量も現時点では少ないが、太陽電池モジュールのリサイクルを手掛けようとする事業者が複数出現してきており、また、オーストラリア再生可能エネルギー機関主導による研究開発プロジェクトも開始されている<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-16</sup>。

### (3) 太陽電池モジュール適正処理の円滑化に向けた検討

使用済み太陽電池モジュールのリサイクル等による適正処理を円滑に実施するためには、リサイクル技術そのものの高度化や効率化に加え、撤去された太陽電池モジュールを効率的に回収し、リサイクル処理を行う中間処理場に運搬する必要がある。現在、普及している太陽光発電設備を導入件数で見ると、住宅用をはじめとする小規模設備が圧倒的に多く、それらは広く分散している。そこで、太陽電池モジュール適正処理の円滑化に向けた検討として、少量かつ分散して発生する使用済み太陽電池モジュールの効率的な収集運搬方法(モデル)の検討を行った。

現状、使用済み太陽電池モジュールは発生場所から処理施設に直接運ばれることがほとんどと考えられる。高圧や特別高圧(特高)に分類されるような規模の大きい太陽光発電設備を撤去する場合、まとまった量の太陽電池モジュールが使用済みとなって排出されることから、大型のトラックで、かつ、高い積載率で収集運搬できるため、現状の流れが効率的と考えられる。

一方、低圧に分類される住宅用や規模の小さい発電所から数十枚から百枚程度の太陽電池モジュールを撤去する場合、小型や中型のトラックを使用せざるを得ず、積載率も低く、収集運搬の効率が悪いことが想定される。そして、このように設置されている太陽光発電設備の件数<sup>Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-17</sup>は2021年9月末時点で住宅が約290万件、低圧が約64万件で、高圧の約3.4万件、特高の約800件と比べて、非常に多い。また、一か所あたりの枚数は少ないものの、同時期に複数の場所から使用済み太陽電池モジュールが発生する可能性も、大規模な太陽光発電設備と比較して大きいと考えられる。したがって、少量であっても複数の場所から発生する使用済み太陽電池モジュールを集約して運ぶことにより、効率的な収集運搬を実現できる可能性が高くなる。

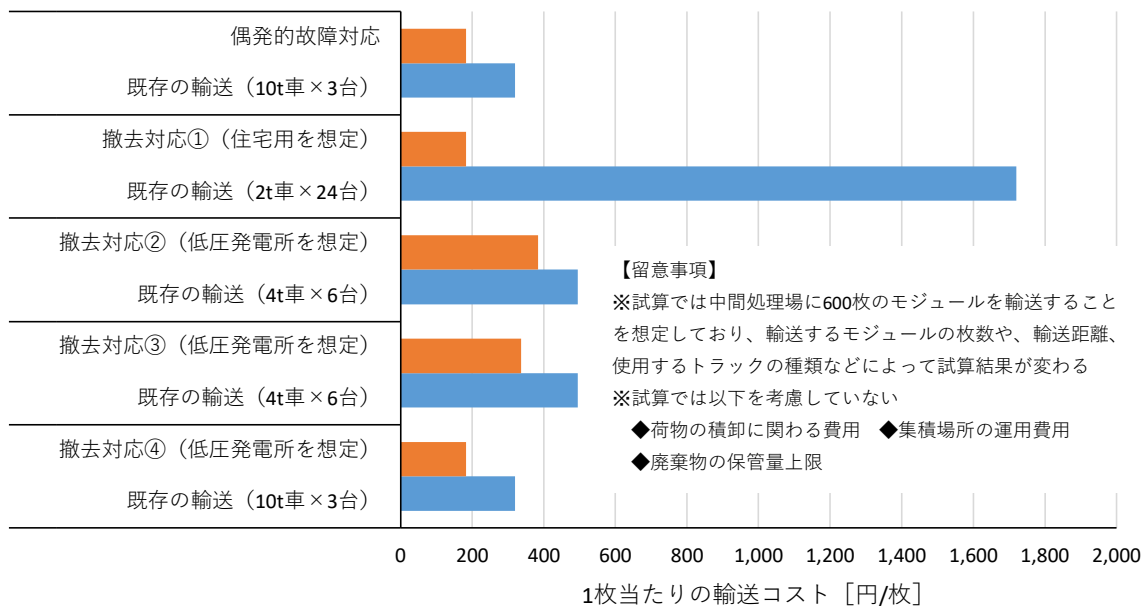
使用済み太陽電池モジュールの収集運搬モデルを検討するにあたり、太陽光発電設備の規模と、使用済み太陽電池モジュールの発生事由に応じた1回あたりの排出枚数を想定した。そして、その結果にもとづき、収集運搬モデルの検討対象を、定期点検時の使用済み太陽電池モジュールの排出(偶発的故障対応)と、事業用の低圧発電設備および住宅用発電設備の撤去時の排出(撤去対応)とした。

集積と巡回回収を組み合わせることにより既存の輸送方法よりも効率化が図れる、との報告事例を参考に、収集運搬モデルは、集積と巡回回収の組み合わせとした。そして、まず、使用済み太陽電池モジュールのリサイクルを想定した物流モデルを検討し、表Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-2に示す、偶発的故障対応の1モデルと撤去対応の4モデルを提案した。

表Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-2 検討したモデルの概要

モデル名	想定モデル	モデル内の物流
偶発的故障対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・取り外したモジュールを作業者が自家輸送できる数枚から数十枚の偶発的故障への対応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業者(主に保守管理事業者を想定)が、モジュールを撤去後に、発電所から作業者拠点に自家輸送</li> <li>・収集運搬事業者が作業者拠点より巡回回収して中間処理事業者に引き渡す</li> </ul>
撤去対応①	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1ヶ所あたり数枚から数十枚程度のモジュールが発生する住宅からの撤去やリプレイス</li> <li>・取り外したモジュールを作業者が自家輸送することで輸送を効率化</li> <li>・複数の住宅から発生するモジュールを集積し、中型以上の車両で中間処理場へ輸送</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業者(主に撤去・解体事業者を想定)が撤去したモジュールを作業者が自家輸送で集積場所に輸送</li> <li>・集積場所に保管されているモジュールを収集運搬事業者が巡回回収</li> </ul>
撤去対応②	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1ヶ所あたり数十枚から数百枚程度のモジュールが発生する低圧発電所からの撤去やリプレイス</li> <li>・発電所から集積場所へは中型車で輸送</li> <li>・複数の発電所から発生するモジュールを集積して大型車で中間処理場へ輸送</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業者(主に撤去・解体事業者を想定)が撤去したモジュールを収集運搬事業者が集積場所に輸送</li> <li>・集積場所に保管されているモジュールを収集運搬事業者が巡回回収</li> </ul>
撤去対応③	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1ヶ所あたり数十枚から数百枚程度のモジュールが発生する低圧発電所からの撤去やリプレイス</li> <li>・複数の発電所から発生するモジュールを中型車による巡回回収で集積場所に輸送</li> <li>・集積から中間処理場へは大型車で輸送</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業者(主に撤去・解体事業者を想定)が撤去したモジュールを発電所内に保管</li> <li>・発電所内に保管されているモジュールを収集運搬事業者が巡回回収で集積場所に輸送</li> <li>・集積場所に保管されているモジュールを収集運搬事業者が巡回回収</li> </ul>
撤去対応④	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1ヶ所あたり数十枚から数百枚程度のモジュールが発生する低圧発電所からの撤去やリプレイス</li> <li>・複数の発電所から発生するモジュールを中型以上の車両で巡回回収して中間処理場へ輸送</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業者(主に撤去・解体事業者を想定)が撤去したモジュールを発電所内に保管</li> <li>・発電所内に保管されているモジュールを収集運搬事業者が巡回回収し、中間処理場に輸送</li> </ul>

これらのモデルについて輸送コストを試算した(図Ⅲ-2-(二)-(ii)-B-1)。輸送コストの試算は、運賃のみを考慮した限定的なものであるが、程度の強弱はあるものの、巡回回収のモデルを用いることにより、既存の輸送形態と比較して、輸送コストの低減効果が期待できることが示唆された。次に、これらのモデルを実装する上で必要な廃棄物処理法上の許可等をステークホルダーごとに整理した。さらに、撤去対応の4モデルについては、使用済み太陽電池モジュールのリユースも想定した選別過程を追加したモデルを提案するとともに、その選別に必要な廃棄物処理法上の許認可等を整理した。



図III-2-(二)-(ii)-B-1 輸送コストの試算結果

これらの検討を通じ、使用済み太陽電池モジュールの収集、運搬の効率化に向けた課題として、以下が挙げられた。

- ・ モデルを成立させるために必要な情報の流れと、それを担保する仕組みの検討
- ・ 県境を跨ぐ広域移動に関わる検討
- ・ モデルを運用するためのコストの検討

また、使用済み太陽電池モジュール適正処理の円滑化に向けて、本調査で検討・提案した収集運搬モデルを含め、適正処理の円滑化に資すると考えられる収集運搬モデルを実フィールドで実証し、妥当性の検証、実現・構築に向けた課題を明確にすることも必要と考えられる。そして、モデルの実証に際して検討が必要と考えられる事項として、以下が挙げられた。

- ・ 実証をおこなう上で十分なモジュールを確保するための積替え保管、事業場外保管の上限への対応
- ・ 集積場所における使用済み太陽電池モジュール保管可能量の確保等
- ・ 廃棄物処理法上の許認可や解釈に関する所轄する都道府県等への確認と調整

## 2. 実用化・事業化見通し

本調査では、太陽電池モジュールの適正処理を実証できる企画を提案することを目的とし、国内における使用済み太陽電池モジュールの排出、収集運搬および中間処理等に関する現状を把握するとともに、海外主要国における太陽電池モジュールの使用後処理に関する情報を収集し、それらに基づき、使用済み太陽電池モジュールの効率的な収集運搬に向けた複数のモデルを抽出し、実装・運用するために解決すべき課題、実フィールドにおける実証に向けた課題を検討した。

今回の調査結果を踏まえ、効率的な収集運搬システムの構築、ならびに社会システムの構築に向けて、様々な機会を活用して働きかけをしていく。

## 3. 波及効果

優れた処理技術を活用し、社会システムとして運用していくためには、使用済み太陽電池モジュールの効率的な収集運搬が重要である。収集運搬システムを構築するためには数量、地域(空間)、頻度(時間)など様々な要因を考慮する必要があるが、普遍的な解を導くことは困難ではあるが、本調査の成果が、円滑な太陽電池モジュール適正処理に向けた今後の取組の一助となることが期待される。

また、海外における動向等について NEDO 技術開発機構を通じて太陽電池モジュール適正処理に関する議論の基礎資料として提示することができたほか、IEA PVPS タスク 12 等への参加を通じて、日本における太陽光発電リサイクルへの取り組みを周知することができた。

## 4. 今後の展開

太陽光発電の健全な普及拡大には使用済みのシステムを適正に処分することが可能な手段を確保す

ることが重要であり、リサイクル処理技術の実用化を着実に進めるとともに、それら技術を最大限有効に活用する社会システムの構築が必要である。

本調査の成果を広く周知することで、太陽光発電リサイクルに関する技術開発の推進、社会システムの構築、わが国の取り組みに関する国際的な情報発信に貢献することが見込まれる。

#### 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	合計
特許出願 (国内／国際)	0	0	0
論文	0	1	1
研究発表・講演	0	2	2
(国内・審査有)	(0)	(1)	(1)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(1)	(1)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0
展示会への出展	0	0	0
受賞実績	0	0	0

(2022年6月20日現在)

【参考文献】

- III-2-(二)-(ii)-B-1 : European Parliament and Council, Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), EU, Brussels.
- III-2-(二)-(ii)-B-2 : Eurostat “Waste electrical and electronic equipment (WEEE) by waste management operations” .
- III-2-(二)-(ii)-B-3 : WEEE Forum, An enhanced definition of EPR and the role of all actors, November 2020.
- III-2-(二)-(ii)-B-4 : Statistisches Bundesamt, Waste electrical and electronic equipment received for primary treatment
- III-2-(二)-(ii)-B-5 : Deutsche Umwelthilfe, Strengthening circularity in photovoltaics, Challenges and opportunities along the lifecycle, 2021
- III-2-(二)-(ii)-B-6 : N. Defrenne, The Challenges of PV Waste Collection, INES ECO-PV Workshop, Photovoltaics: towards a sustainable industry, 11 March 2021
- III-2-(二)-(ii)-B-7 : PV CYCLE Annual Report 2019, 2020
- III-2-(二)-(ii)-B-8 : PV CYCLE Annual Report 2020, 2021
- III-2-(二)-(ii)-B-9 : Washington State Legislature Wash. Rev. Code § 70A.510.010 - Photovoltaic Module Stewardship and Takeback Program
- III-2-(二)-(ii)-B-10 : J. Clyncke, PV recycling legislation around the world, INES ECO-PV Workshop, Photovoltaics: towards a sustainable industry, 10 March 2021
- III-2-(二)-(ii)-B-11 : T. L. Curtis, et al., A Circular Economy for Solar Photovoltaic System Materials: Policy Considerations and Case Studies; NREL/TP-6A20-74550; National Renewable Energy Laboratory: 2021
- III-2-(二)-(ii)-B-12 : T. L. Curtis, et al., Solar Photovoltaic Recycling: A Survey of U.S. Policies and Initiatives; NREL/TP-6A20-74124. Golden, CO; National Renewable Energy Laboratory: 2021
- III-2-(二)-(ii)-B-13 : CSA Group, Photovoltaic (PV) Recycling, Reusing, and Decommissioning - Current Landscape and Opportunities for standardization. 2020
- III-2-(二)-(ii)-B-14 : Korea Institute of Energy Research ヒアリング
- III-2-(二)-(ii)-B-15 : Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science ヒアリング
- III-2-(二)-(ii)-B-16 : ARENA プレスリリース: <https://arena.gov.au/news/research-boost-for-solar-panel-efficiency-and-cost-reduction/>
- III-2-(二)-(ii)-B-17 : 資源エネルギー庁, 固定価格買取制度情報公表用ウェブサイト

(iii) 太陽光発電の動向調査

【A 太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査】(株式会社資源総合システム)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査	技術開発の方向性や普及の方策の分析、検討に資する太陽光発電セル、モジュール、システムおよび太陽光発電が導入される分野に関する国内外の技術や産業・市場動向や今後の太陽光発電の可能性の調査を行い、その結果を的確に本プロジェクトへフィードバックする。	<p>太陽光発電の市場環境は大きく変化しており、国内では責任4省庁による導入支援が加速し、再エネ電力の需要高揚、PPA等の非FITでの導入といった導入拡大要因と、部材供給不足、コロナ禍や国際紛争といった停滞要因があったが年間導入量は6.5GWDCとなった。一方、世界全体では欧米での普及加速があり前年比31%増の145.2GWとなった。</p> <p>技術開発・産業動向については軽量、壁面設置、安全性、信頼性、系統影響、予測、性能向上、O&amp;M、蓄電、未利用場所への展開、他について調査した。コロナ禍等の影響があるものの各分野においてデジタル化による自動化と、AIの活用、太陽光発電利用の統合化等をキーワードに進展がみられた。</p> <p>欧州連合、ドイツ、米国、中国を対象に積極的に進められつつある研究開発プログラム、普及促進施策についても調査し、最新動向を把握した。</p>	○	

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×未達

【B 国際技術協力プログラムへ参画】(株式会社資源総合システム)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
太陽光発電の動向調査 国際技術協力プログラムへ参画	タスク1 専門家会議、サブタスク活動であるワークショップ等の国際協力活動への参加	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 協力活動の方針や具体的な活動計画を決定するタスク 1 専門家会議に参加。2018 年から継続して副代表を務めた</li> <li>・ IEA PVPS 戦略会議への参加を要請され、タスク活動WG 及びコミュニケーションWG に参加し、今後の活動に日本としての意見を反映することができた</li> <li>・ タスク 1 が開催するワークショップで招待講演を実施したほか、国際会議でのプレナリー講演をタスク 1 副代表として実施し、タスク 1 の成果の普及に努めた。このほか、国内外の会議での招待講演を実施した</li> <li>・ タスク 1 成果物である加盟国の動向をまとめた Trends Report 及び Snapshot Report の作成に参画した</li> </ul>	◎	
	タスク1の年次報告書である動向分析報告書 (Trends Report) 及び速報報告書 (Snapshot Report) の日本語版の作成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ タスク 1 成果物である、Snapshot Report 及び Trends Report について、2020 年度及び 2021 年度に日本語版を作成した</li> </ul>	○	
	National Survey Report をはじめとした日本の太陽光発電の現状と将来展望に関する報告書を作成し、提出する	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 日本の太陽光発電動向を調査・分析した英文報告書 (National Survey Report、NSR) を作成し、IEA PVPS タスク 1 に提出した</li> <li>・ 日本の太陽光発電の年間概況を調査・分析した英文報告書 Annual Report を作成し、IEA PVPS に提出した</li> <li>・ 前年の世界の導入動向をまとめる Snapshot Report に向けて導入量速報値等を報告する Country Report を提出した</li> </ul>	○	

\* 1 達成度

◎ : 大きく上回って達成、○ : 達成、△ : 達成見込み、× 未達



【C 新市場の動向調査】(株式会社資源総合システム、みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	今後の課題と解決方針
次世代型太陽電池の新市場への導入・実装に向けての動向調査	重量制約のある屋根・建物壁面等への太陽光発電の社会実装に向けた現状把握と課題整理	<ul style="list-style-type: none"> <li>重量制約のある屋根・建物壁面等に関する国内外の導入事例調査を行うとともに、業界ヒアリング調査方法の検討を行った。</li> <li>次世代型太陽電池（ペロブスカイト太陽電池等）の国内外の企業や研究機関等の開発・技術・事業化動向を調査した。</li> <li>従来型太陽電池サプライチェーンの実態調査と分析を実施した。</li> <li>次世代太陽電池が対象とする新市場と導入見通しの方法を検討した。</li> <li>「建物の壁面・窓」「構造物」各分野における「設置可能面積」について各種統計から整理を実施した。</li> </ul>	○	
	次世代型太陽電池（ペロブスカイト太陽電池等）に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>ペロブスカイトおよびタンデム型太陽電池における最先端の技術開発トレンドを調査した。</li> <li>発電コストとその前提条件に関する情報を海外文献から調査した。また発電コスト試算・感度分析のためのツールを更新した。</li> <li>エネルギー・ペイバック・タイムとその前提条件、インベントリデータについて各種文献から調査した。</li> </ul>	○	

\*1 達成度

◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×未達

## A 太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査（株式会社資源総合システム）

### 1. 成果詳細

太陽光発電の主力電源化を推進するため、需要地に近接しているが従来技術では太陽光発電の導入が進んでいなかった場所を利用可能にするための太陽光発電システム開発や長期安定的な事業運営確保として現在顕在化している課題解決を目指した太陽光発電主力電源化推進技術開発プロジェクトの推進に資することを目的とし、本調査では太陽電池セル、モジュール、システムおよび太陽光発電が導入される分野に関する国内外の技術や産業・市場動向や今後の太陽光発電の可能性について調査を行う。今年度は主として、国内外の太陽光発電に関する市場・産業・技術・研究開発プログラム・普及促進施策等の現状を把握するために、分野毎の最新動向について調査を実施した。

#### (1) 太陽光発電市場の主力電源化に向けた市場動向調査

太陽光発電の市場環境は大きく変化している。責任4省庁による導入支援が加速し、再エネ電力の需要高揚、PPA等の非FITでの導入が拡大といった導入増加要因があった一方で、太陽電池モジュールやパワコンの供給不足、コロナ禍やウクライナ・ロシア情勢による経済の停滞といった減少要因もあり、年間導入量は6.5GWDCにとどまった。またシステム価格の低下も停滞した。世界全体の導入量は前年比31%増の145.2GWとなり、累積では767.2GWとなった。モジュール価格は24.6米セント/Wへと上昇し輸入価格にも影響。欧州では高い環境目標が設定され太陽光発電市場が成長に転じており19.8GWを導入した。欧州域内での太陽電池生産復活の動きがある。ドイツは再エネ普及加速の方針となり、2022年は前年比1.3倍の導入目標を掲げている。米国は23.6GWと過去最高の導入量となり堅調であるが、今後、人権問題等による輸入禁止措置により太陽電池不足が懸念される状況にある。

#### (2) 太陽光発電市場の主力電源化に向けた産業動向調査

軽量太陽電池、壁面設置、安全性・信頼性、結晶Si太陽電池、パワーコンディショナ・MLPE、O&M、蓄電池、水上設置・営農型等について、実用化に向けて開発が進んでいる製品・市場の動向について調査した。また電力取引とPPAビジネスモデル等について調査した。

#### (3) 太陽光発電の主力電源化に向けた最先端の技術開発動向の調査

国際会議において、主に研究レベルでの最新技術動向を調査した。軽量太陽電池、壁面設置、安全性、信頼性、系統影響、発電量予測、Si結晶太陽電池、O&M、蓄電池、水上設置、営農型太陽光発電について。

#### (4) 海外の研究開発プログラムの調査

欧州連合（EU）、ドイツ、米国、中国を対象に太陽光発電システムに関する研究開発プログラムについての枠組み、目標や予算に関する調査を行った。

#### (5) 国内外の普及促進施策に関する調査

太陽光発電の主要市場である、欧州連合（EU）、ドイツ、米国、中国及び日本国内の普及促進施策の動向に関し調査した。

## 2. 実用化・事業化見通し

本調査による成果は、NEDO 成果報告会での報告、弊社の各種の調査レポート、コンサルティング、国内外での講演等にも活用していく。日本を中心とした国内外の最新動向を示す情報として、日本国内、世界に向けて幅広く情報発信していく。

## 3. 波及効果

太陽光発電セル、モジュール、システムおよび太陽光発電が導入される分野に関する国内外の技術や産業・市場動向や今後の太陽光発電の可能性について調査を行うとともに、世界の太陽光発電に関する技術および研究開発動向のトレンドを体系的にまとめ、我が国の将来の技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する情報としてまとめ、上記開発プロジェクトの支援に寄与することを目標とする。

## 4. 今後の展開

世界的な脱炭素に向けた流れの中、再生可能エネルギーの利用拡大は必須であり、再生可能エネルギーの中でも、もっとも安価な電源となっている太陽光発電の重要性、必要性、また担うべき責任は大きい。一方で、変動性の低減、電力系統への統合、信頼性の向上、持続可能性の向上等といった課題の顕在化、技術開発の進展はこれから本格化していく。技術・市場等について定点観測的な調査を実施することはトレンドを的確に把握し、将来の技術開発戦略を醸成するためにも重要であり、今後も継続的な調査が有効だと考えられる。

## 5. 特許・論文・対外発表

該当なし。

(2020年6月20日時点)

## B 国際技術協力プログラムへ参画（株式会社資源総合システム）

### 1. 成果詳細

#### 1.1 2020年度

- (1) 第55回タスク1専門家会議（2020年11月～12月、オンライン会議）

第55回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。①今後の活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の報告と計画（欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2020）及び第30回太陽光発電国際会議におけるワークショップの報告及び、2021年に開催するIEA PVPSワークショップ）、③タスク1成果物であるSnapshotレポート及び動向報告書（Trends Report）の計画、④国内調査報告書（National Survey Report）における調査事項、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニューズレター等）、⑥今後のタスク1活動（自家消費に関する報告書の更新）等について審議した。同会議においては、今後の太陽光発電の普及に係る重要トピックとして、太陽光発電による水素生成をはじめとしたSolar Fuels、電力システムにおける太陽光発電の貢献、持続可能な市場と産業、自家消費、再エネにおける太陽光発電の価値等を考慮して活動を実施していく方針が決定された。加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。
- (2) 2020年欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2020）におけるIEA PVPSワークショップ（2020年9月）

オンライン開催されたEUPVSEC 2020においてIEA PVPSタスク1が企画・開催するワークショップに参加し、アジアにおける需要家向けの電力供給契約（コーポレートPPA）に関する招待講演を実施した。同ワークショップ及びEUPVSEC本会議、その他の関連ワークショップを聴講し、IEA PVPSに係る動向について調査した。
- (3) 第30回太陽光発電国際会議（PVSEC-30）におけるIEA PVPSワークショップ（2020年11月）

韓国・済州島でオフラインとオンラインによりハイブリッド開催されたPVSEC-30に参加し、IEA PVPSタスク1が企画・開催するワークショップ及びPVSEC Special Forumに参加し、Trends Reportの産業動向に関する招待講演を実施した。このほかPVSEC-30におけるIEA PVPS活動に関わるトピックを調査した。
- (4) その他の関連会議  
IEA PVPSの今後の活動計画を策定する戦略ワーキンググループに参加した。タスクの創設、広報及びメンバーシップに関わるサブグループ会議にも参加し、国際協力活動に貢献した。
- (5) タスク1に係る報告書の作成  
我が国における太陽光発電の動向の調査を実施し、日本のタスク1に関わる報告書である「国内調査報告書2019年（National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2019）」、「年次報告書2020年（Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2020）」、及び「国別報告2021年（2020年の統計速報値）（Country Page of Japan, 2021）」に取りまとめた。また、「動向報告書（Trends Report）」の作成に各国の専門家とともに参画した。さらに本調査の一環として、日本語版「太陽光発電応用の動向報告書2020（Trends Report）」及び各国からの2019年の市場速報値を報告した「速報報告書」Snapshot Report 2020の日本語版を作成した。
- (6) IEA PVPS の過去の統計情報及び各国施策の概要  
上述の専門家会議等において調査した情報、IEA PVPS 及び加盟国のタスク 1 に係る報告書に基づいて IEA PVPS の統計情報及び各国施策の概要について調査を行った。

## 1.2 2021年度

- (1) 第56回タスク1専門家会議（2021年6月、オンライン会議及びハイブリッド会議にオンライン参加）  
第56回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。①今後のタスク1活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2021）におけるワークショップの計画）、③タスク1成果物であるSnapshotレポート及び動向報告書（Trends Report）の進捗報告と計画、④国内調査報告書（National Survey Report）における調査事項、⑤広報活動（ウェブサイト、ワークショップ及びニュースレター等）、⑥IEA PVPS議長交代による新体制での今後のタスク1の活動等について審議した。会議においては、加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向等の情報を収集・調査した。
- (2) 第57回タスク1専門家会議（2021年11月、オンライン会議及びハイブリッド会議にオンライン参加）  
第57回タスク1専門家会議に日本の代表として参加した。①今後のタスク1のPVPSにおける役割に関する議論と計画の策定、②成果別のコミュニケーション（オンラインデータベース化及び事務局長との役割分担）、③タスク1成果物であるSnapshotレポート及び動向報告書（Trends Report）の進捗報告と計画、④国内調査報告書（National Survey Report）における調査事項等について審議した。会議においては、加盟国における太陽光発電の動向についての情報交換を通じて、加盟国の国家プログラム、実証試験、普及状況、市場動向、普及障壁等の情報を収集・調査した。
- (3) 2021年欧州太陽光発電国際会議（EUPVSEC 2021）におけるIEA PVPSワークショップ（2021年9月）  
オンライン開催されたEUPVSEC 2021においてIEA PVPSタスク1が企画・開催するワークショップに参加し、太陽光発電産業の動向について招待講演を実施した。同ワークショップ及びEUPVSEC本会議、その他の関連ワークショップを聴講し、IEA PVPSに係る動向について調査した。
- (4) その他の関連会議  
IEA PVPS執行委員会（EXCO）会議にタスク1副0Aとして参加した。このほか、シンガポール太陽エネルギー研究所（SERIS）との水上設置型太陽光発電（FPV）システムに関するミーティング、非加盟国の導入量の分析に関する会議、国際エネルギー機関（IEA）とのSupply Chainに関する意見交換会議等に参加した。
- (5) タスク1に係る報告書の作成  
我が国における太陽光発電の動向の調査を実施し、日本のタスク1に関わる報告書である「国内調査報告書2020年（National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2020）」、「年次報告書2021年（Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2021）」、及び「国別報告2022年（2021年の統計速報値）（Country Page of Japan, 2022）」に取りまとめた。また、「動向報告書（Trends Report）」の作成に各国の専門家とともに参画した。さらに本調査の一環として、日本語版「太陽光発電応用の動向報告書2021（Trends Report）」及び各国からの2020年の市場速報値を報告した「速報報告書」Snapshot Report 2021の日本語版を作成した（本報告書に収載）。
- (6) IEA PVPS の過去の統計情報及び各国施策の概要  
上述の専門家会議等において調査した情報、IEA PVPS 及び加盟国のタスク 1 に係る報告書に基づいて IEA PVPS の統計情報及び各国施策の概要について調査を行った。

## 2. 実用化・事業化見通し

「動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications – Survey Report of Selected IEA Countries, Trends Report)」をはじめとしたタスク 1 の成果物は、NEDO の太陽光発電開発戦略 2020 (NEDO PV Challenges 2020) の策定に利用されている。また、タスク 1 の成果物は、経済産業省 (METI) や米国エネルギー省 (DOE)、欧州委員会 (EC)・共同開発センター (JRC) 等の国内外の政府機関、太陽光発電協会 (JPEA) や欧州太陽光発電産業会 (SolarPower Europe) 等の産業団体、民間企業、金融機関等が利用しており、太陽光発電の研究開発、市場開拓等に貢献している。

## 3. 波及効果

「動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications – Survey Report of Selected IEA Countries, Trends Report)」をはじめとしたタスク 1 の成果物は、経済産業省 (METI) の審議会資料や米国エネルギー省 (DOE)、欧州委員会 (EC)・共同開発センター (JRC) 等の国内外の政府機関、太陽光発電協会 (JPEA) や欧州太陽光発電産業会 (SolarPower Europe) 等の産業団体、民間企業、金融機関等が利用しており、太陽光発電の研究開発、市場開拓等に貢献している。さらに、IEA PVPS に対する日本の貢献はタスク 1 及び執行委員会でも評価されている。日本の専門家は、2018 年度からタスク 1 の副 OA (副代表) に選ばれ、タスク 1 の広範な活動に貢献しており、日本及び NEDO のプレゼンスの強化につながっていると考えられる。なお、タスク 1 活動を通して調査した課題先進市場であるドイツやフランス等の欧州の加盟国の状況や固定価格買取制度を実施せず、再生可能エネルギーポートフォリオ基準 (RPS 制度) やコーポレート PPA などのビジネスモデルにより導入が進んでいる米国の状況は、今後の我が国における政策及び研究開発指針の策定に資すると考えられる。さらに、太陽電池主要生産国である中国、韓国及びマレーシア等の動向の調査は、太陽電池サプライチェーンの動向分析に役立つと考えられる。

## 4. 今後の展開

継続して下記の国際協力活動を実施する計画である。

- ① タスク 1 の国際協力活動への参加による情報収集
- ② IEA PVPS 等の成果物の日本語版作成
- ③ 国内での IEA PVPS ワークショップの開催 (2022 年度)
- ④ 国内での IEA PVPS タスク 1 専門家会議の開催 (2022 年度)
- ⑤ IEA PVPS 活動に関わる日本の太陽光発電に関する調査報告書の作成

2022 年度は、下記の専門家会議及びワークショップ (オンライン開催) に参加する予定である (一部は既に参加)

- ・2022 年 5 月：第 58 回 IEA PVPS タスク 1 専門家会議 (スペイン・トレド)
- ・2022 年 9 月：欧州太陽光発電国際会議 (EUPVSEC-2019) における IEA PVPS タスク 1 ワークショップ
- ・2022 年 11 月：第 33 回太陽光発電国際会議 (PVSEC-31) におけるワークショップ (名古屋)
- ・2022 年 11 月：第 59 回 IEA PVPS タスク 1 専門家会議 (名古屋)
- ・2023 年春季：第 60 回タスク 1 専門家会議 (米国もしくは欧州)

このほか、IEA PVPS からの要請に NEDO と相談のうえ対応する。例えば、2021 年度下期及び 2022 年度上期には、IEA の太陽電池の Supply Chain Report への協力を要請されており、提供データの取りまとめや補完情報の提供を行っている。

5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0	0	0	0
論文	0	1	0	1
研究発表・講演	7	4	0	11
(国内・審査有)	(1)	(1)	(0)	(2)
(国際・審査有)	(6)	(3)	(0)	(9)
(国内・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	1	1	0	2
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

## C 新市場の動向調査（株式会社資源総合システム、みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社）

### 1. 成果詳細

(1) 重量制約のある屋根・建物壁面等への太陽光発電の社会実装に向けた現状把握と課題整理

#### ① 重量制約のある屋根・建物壁面に関する業界ヒアリングによる社会実装に向けた課題の整理

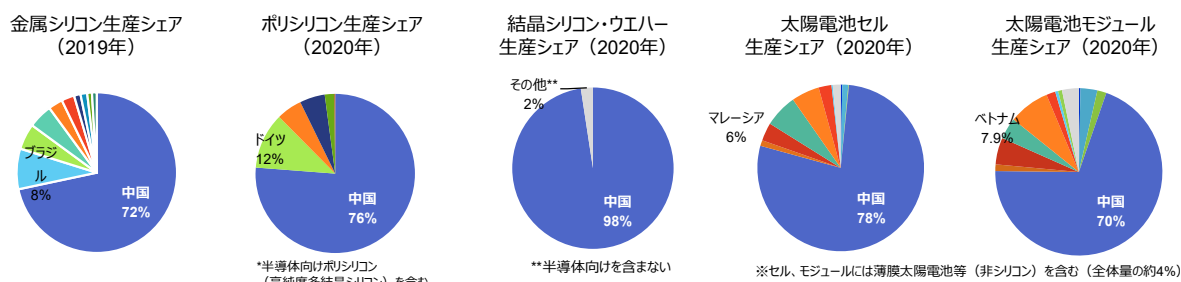
業界関係者へのヒアリングを行うため、まず国内外における重量制約のある屋根や建物壁面、窓等への太陽光発電システムの導入事例を調査した。これら事例より、ヒアリング候補となる施工事業者やユーザー等を特定した。また、重量制約のある屋根・建物壁面等への太陽光発電システムの設置形態、施工手法、運用・保守（O&M）手法について考察した。これらを踏まえ、課題とニーズ、普及への機会の想定事項を整理した。建物分野以外では、カーボンニュートラル達成に向けて、各省庁が道路交通分野や農業用分野へ次世代型太陽電池を新技術として採用することを検討し始めている。

#### ② 次世代型太陽電池に関連する国内外の開発動向、新市場導入に向けての先行事例や支援策等に関する調査

次世代型太陽電池の国内外の開発動向に関して、企業や研究機関、研究開発コンソーシアムの動向を調査した。ペロブスカイトおよびタンデム型太陽電池の製造事業化を目指し、国内外で各々30社以上が開発を進めている。複数の海外企業でパイロット生産プロジェクトが開始され、2022年中の商業生産開始が計画されている。また、海外の主要各国における次世代型太陽電池の研究開発政策も調査した。次世代型太陽電池の導入実証プロジェクトは、海外諸国の研究開発プログラムの中でもまだ目立ったものは無いが、太陽電池開発メーカーにおいて、屋外実証試験や試験的導入が進められている。欧州各国や米国・カリフォルニア州、京都府などでは、CO2排出削減のため建物・建築物の省エネ規制や一定条件下での太陽光発電設備の導入義務化を含む先行的な普及促進施策が実施されている。建物への導入促進のため、BIPV製品でのフィードイン・タリフ上乗せや補助金を設けている国や自治体もある。

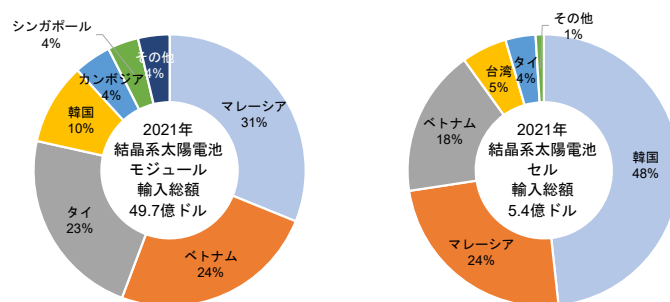
#### ③ 次世代型太陽電池と新市場におけるサプライチェーンの分析と課題整理

次世代型太陽電池と新市場におけるサプライチェーンの分析と課題整理を行うため、まず従来型太陽電池（結晶シリコン）のサプライチェーン実態調査を実施した。結晶シリコン太陽電池製造の各工程の製品は、主に中国で生産されている（図Ⅲ-2-(二)-(iii)-C-1）。太陽電池モジュール以外の大部分は中国国内で販売され、最終製品となる太陽電池モジュールの半数以上が中国から世界各地へと輸出されている。また、太陽電池関連製品の貿易統計により主要各国・地域の輸出入動向を調査した。米国では、韓・Hanwha Solutionsや韓・LG Electronicsなどが米国内に太陽電池モジュール工場を保有しているため、太陽電池セルは韓国からの輸入が約半分を占めている。また太陽電池モジュールは、マレーシア、ベトナム、タイからの輸入が全体の78%を占めている（図Ⅲ-2-(二)-(iii)-C-2）。米国政府は、太陽電池製品について輸入関税や禁輸措置等を講じており、米国の太陽電池製品の輸入動向は今後大きく変化する可能性がある。主要市場である欧州、米国、インドでは、太陽電池の生産回帰やサプライチェーン構築に関する取組が進められている。東南アジア諸国では、2021年もGW/年レベルの太陽電池工場新設計画が複数実施され、今後生産量が増加していくことが予見される。ペロブスカイト太陽電池の製造に必要な構成材料・部材についても調査し、供給可能な国・地域、企業等の状況を整理した。



図Ⅲ-2-(二)-(iii)-C-1 結晶シリコン太陽電池関連製品の生産および供給状況Ⅲ-2-(二)-(iii)-C-1





図Ⅲ-2-(二)-(iii)-C-2 米国が輸入した結晶系太陽電池セル・モジュールの主な輸出元 (2021年) Ⅲ-2-(二)-(iii)-C-2

#### ④ 重量制約のある屋根・建物壁面等の対象件数の分析および2030年～2050年の導入見通しの検討

ペロブスカイトの主要市場を「建物の壁面・窓」「構造物」と想定し、2021年度は、主に現在の各分野における「設置可能面積」について各種統計から整理を実施した。構造物として、遮音壁、ビニールハウス・ガラス室、畜舎、SA/PA道の駅、駐車場（大型平面駐車場）、空港施設、鉄道駅舎を想定し、合計844km<sup>2</sup>と試算されその導入見通しについて検討した。2022年度はヒアリング等で精査を行っていく。

### (2) 次世代型太陽電池（ペロブスカイト太陽電池等）に関する調査

#### ① 次世代型太陽電池の国内外の技術動向

ペロブスカイトおよびタンデム型太陽電池における最先端の技術開発トレンドを調査した。高効率化技術の研究が一層進んでおり、ペロブスカイト単接合ではセル変換効率25.7%、モジュール変換効率21.7%が達成されている。ペロブスカイト/結晶シリコンタンデム型太陽電池セルでは28～29%超の変換効率記録が発表された。タンデム型のモジュール変換効率は、ボトムセルが結晶シリコンで26.6%、オールペロブスカイトで21.7%が記録された。製造に向けて、溶液塗布（印刷）や蒸着などの様々な製膜製法やプロセス最適化の研究、装置開発も行われている。長期信頼性向上については、1年間以上の屋外実証試験データが報告されるようになった。先行製造企業2社では、IEC規格の加速劣化試験に合格している。

#### ② 次世代型太陽電池のコスト分析

我が国の足元の従来太陽電池の発電コスト（LCOE）の試算と、次世代型太陽電池（ペロブスカイト、ペロブスカイトオンシリコンタンデム）の発電コスト分析事例を調査した。

2030年に向けて、ペロブスカイトが従来太陽電池と同レベルの発電コストを目指すためには、従来太陽電池と同程度までの劣化率の大幅な低減と、従来太陽電池と同レベルのモジュール価格、システムコストにしていく想定が必要となる。特に劣化率、寿命については、複数の分析事例の中で、従来太陽電池と同程度を想定した前提で、競争力を保有するという結果となっている。また、ペロブスカイトオンシリコンタンデムとペロブスカイトの比較では、特に住宅用ではkWあたりの面積比例するBOSコストが発電用よりも大きいため、住宅用においては、変換効率が大きくなるペロブスカイトオンシリコンタンデムのほうがペロブスカイト単体よりも明らかに発電コストが低くなる結果を示す結果もみられた。

また、自家消費型太陽光発電と蓄電池（エネルギー貯蔵）併用時における電源システム価値の考え方の調査および計算手法について検討した。

#### ③ 次世代型太陽光発電のエネルギー・ペイバック・タイムの分析

ペロブスカイトのエネルギー・ペイバック・タイム（以下、EPTとする）の試算検討の参考とするため、海外文献における分析事例と、算出あたって必要なライフサイクルにおけるインベントリデータの収集・調査をした。

EPTはライフサイクル投入エネルギー量を年間発電量で除すことで求められる。ライフサイクル投入エネルギー量については、廃棄段階について含めていない事例も存在した。算定にあたっては原材料調達から使用までの精緻なデータの取得を目指すと共に、現時点で想定が難しい廃棄について原単位が入手可能な情報の中で、最も適切なものを検討する必要がある。年間発電量については、日射量などの評価地点によって値が異なるパラメータについて、論文執筆者の在籍地に関係なく類似の値を用い

ている。本事業においても中央ヨーロッパの値等、他の事例と比較可能な値でも併せて算出することが望ましい。EPT の算出結果は 1 年前後であった。耐用年数の間に投入エネルギーが回収できるか把握するため、EPT の算出自体には必要ないものの耐用年数についても情報収集する必要がある。EPT 算出にあたっては、ライフサイクルにおけるインベントリデータが必要なため、LCA を実施した事例も含めインベントリデータに関する調査も行った。報告されているインベントリデータは、原料調達からモジュール製造までが範囲となっており、また機能単位は発電量あたりやモジュール m<sup>2</sup> あたりとなっている。しかし、EPT の算定にあたっては、原料調達から廃棄・リサイクルまでのライフサイクル全体を範囲とし、機能単位は kW あたりが望ましい。なお、電力消費量については、モジュール製造プロセス別に比率が示されており、いずれもペロブスカイトの積層プロセスにおいて最も電力消費量が大きくなっている。

## 2. 実用化・事業化見通し

本調査研究は、NEDO が実施する次世代型太陽光発電/太陽電池の社会実装に向けた関連プロジェクト推進に資するため実施している。本調査研究を通じて得られた成果は、社会実装に向けての従来の太陽電池とは異なった要素のさらなる検討および実証プロジェクトの推進に資することが期待される。

## 3. 波及効果

本調査研究は、再生可能エネルギーの主力電源化の中で太陽光発電のさらなる導入が必要になる中、従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいない重量制約のある屋根、建物壁面等の新市場への発展に必要な課題を克服すべく推進されている技術開発プロジェクトを推進する取り組みに貢献していくことができる。

## 4. 今後の展開

今後も、次世代型太陽電池の開発・技術動向調査および導入見通し、発電コスト、エネルギー・ペイバック・タイムに関する文献調査を進める。定点観測的な調査を継続し、常に最新の状況を把握し、NEDO 及びその関係者に周知するとともに、急激に進展している市場動向や研究開発動向に応じた調査を実施する。

重量制約のある屋根・建物壁面に関して業界ヒアリング/アンケート調査を実施し、次世代型太陽光発電の社会実装に向けた課題やニーズを整理するとともに、目指す実証イメージを明確にする。

導入見通しは、導入シナリオを検討して定量化を行う。また、発電コストの試算・感度分析を行い、発電コスト目標達成のためのシナリオ検討を行う。またエネルギー・ペイバック・タイム (EPT) の算定と算定にあつての課題検討を行う。

## 5. 特許・論文・対外発表

	2020年度	2021年度	2022年度	合計
特許出願 (国内/国際)	0	0	0	0
論文	0	0	0	0
研究発表・講演	0	2	0	2
(国内・審査有)	(0)	(1)	(0)	(1)
(国際・審査有)	(0)	(0)	(0)	(0)
(国内・審査無)	(0)	(1)	(0)	(1)
(国際・審査無)	(0)	(0)	(0)	(0)
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0
自機関からのニュース リリース、プレス発表	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0
受賞実績	0	0	0	0

(2022年6月20日現在)

### 【参考文献】

- Ⅲ-2-(二)-(iii)-C-1 中国有色金属工業協会シリコン分会資料（金属シリコン）、(株)資源総合システム調べ（ポリシリコン～太陽電池モジュール）
- Ⅲ-2-(二)-(iii)-C-2 米国情勢調査局公開資料



## 添付資料 1 プロジェクト基本計画



## 1. 研究開発の目的・目標・内容

### (1) 研究開発の目的

#### ①政策的な重要性

2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画では、「2030年に向けた基本的な方針と政策対応」として、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた取組は、「他の電源と比較して競争力ある水準までのコスト低減と固定価格買取制度（FIT）からの自立化を図り、日本のエネルギー供給の一翼を担う長期安定的な主力電源として持続可能なものとなるよう、円滑な大量導入に向けた取組を引き続き積極的に推進していく」ことが必要とされている。

また、「2050年に向けたエネルギー転換・脱炭素化の挑戦」としては、変動するエネルギー需要を単独で満たす完璧なエネルギー技術は実現していないことから「全方位の複線シナリオ」が必要とされている。この中で太陽光発電などの再生可能エネルギーは主力電源化に向け、「面積的な制約の克服のための発電効率の抜本的向上」などの技術革新によるブレークスルーを要する課題に取り組む事が必要とされている。

さらに、2021年10月に閣議決定された第6次エネルギー基本計画では、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、電化の促進、電源の脱炭素化が鍵となる中で、再生可能エネルギーに関しては、S+3Eを大前提に、2050年における主力電源として最優先の原則の下で最大限の導入に取り組むとされており、太陽光発電の更なる導入が必要不可欠となる。

#### ②我が国の状況

我が国における太陽光発電の導入は、FIT開始後に導入が急拡大したが、規模や属性も異なる様々な事業者による参入する中で、安全面、防災面、景観や環境への影響、将来の設備廃棄等に対する地域の懸念や、FIT事業認定者が、20年間等の買い取り期間終了後も、事業を継続するのか、更に発電事業終了後に再投資が行われて持続的な導入・拡大が図れるのかといった懸念が高まっている。

また、導入拡大により従来の系統運用の下で系統制約が顕在化しており、一部地域では出力抑制等が生じている。再生可能エネルギーの出力変動を調整するための調整力の確保を含め、電力系統へ受け入れるコストは増大している。そのため、再生可能エネルギーの適地遍在性への対応や、大量導入を支えるネットワーク整備・運用が求められており、太陽光発電としての適切な調整力を確保するために出力制御量の低減に向けた方策や系統接続要件の整備が必要とされている。

さらに、再生可能エネルギーは主力電源化に向け電源特性に応じた電源となる事が求められており、太陽光発電は他の電源と比較して発電コストの低い「競争電源」のみではなく、「地域活用電源」として需要地に近接して柔軟に設置できる電源としても期待されている。

#### ③世界の取組状況

太陽光発電システムの発電コストはグリッドパリティを迎えており、過去と比較しても世界で最も低い水準になりつつある。そのため、各国政府が国家計画、戦略として再生可能エネルギーの導入を進めるなかで、太陽光発電の導入量は今後も継続的に増加していくことが予想されている。IEAの「World Energy Outlook 2019」に示されているパリ協定の「2℃目標」を想定したシナリオでは、世界全体での太陽光発電の累積導入量は現在の約400GWから2040年までに3,000GWを超える導入量になると見込まれている。

太陽光発電システムの導入が進む欧州においても、立地制約や系統制約が課題となっており、需要地に近接した発電としてゼロエネルギー建物への取り組みが進んでいる。

その中で建材一体型太陽光発電システムの技術開発が進められており、意匠性の追及や製造プロセス、製造コストなどの課題に対する取り組みや市街地で周辺建造物があるなかでの発電量予測などの研究も進められている。

また、企業にとっては環境規制が厳しくなり環境リスクに対応し、ESG評価を懸念する投資家からの投資引上げを回避する方法として、再生可能エネルギーを調達する動きが出てきている。これには国際ルールに則った再生可能エネルギー調達が必須であり、このイニシアチブの一つとして、例えば、RE100へ参加する企業が増えてきている。RE100を目指す企業は再生可能エネルギー由来の電力を100%調達する必要がある、外部からの調達だけでなく自らの工場で発電する動きは加速しつつある。

これら新たな市場を求める動きはIEAの技術協力プログラムのひとつであるPVPS (Photovoltaics Power System Programs) においても注目が高く、運輸部門における太陽光発電の活用策をテーマとした活動も始まっている。

#### ④本事業のねらい

シリコン系の太陽光発電の導入が進む中で更なる太陽光発電の導入を進めるために、従来の技術では太陽光発電の導入が難しかった場所への導入を目指し、発電効率の向上、軽量化、曲面追従化等とコスト低減などの技術開発を行い、将来の太陽光発電の導入量拡大とともに新たなセル、モジュール、システム技術に関連した産業競争力の強化を図る。例えば、移動体を含め、より高効率かつ高耐久性を求められる条件下への太陽光発電の導入を見据えた技術開発の実施や、重量制約の有る屋根、建物壁面などへの太陽光発電の導入に向け研究開発を行う。

さらに、太陽光発電の主力電源化を推進するため、太陽光発電設備の長期安定電源化に向けた事業運営確保として現在顕在化している課題である安全の確保に資するガイドライン策定や小規模な事業用太陽光発電設備の適切なメンテナンスの確保や再投資を促すため必要となる信頼性に係る技術開発を行う。また、2030年代以降に急増が懸念される太陽光発電設備の廃棄物を回避するためのリサイクル技術や現在、出力抑制等の系統制約の克服に向けた太陽光発電側での対応方法の検討・実証等を行う。

上記と並行し、これらの技術を支える測定評価技術、日射量予測技術等、先進的共通基盤技術の開発や国内外の開発動向を把握し、開発を支援する動向調査等も実施する。

### (2) 研究開発の目標

#### ① アウトプット目標

従来の技術では太陽光発電の導入が進んでいない場所で必要とされる性能を満たし、各市場の創出・拡大に資する要素技術を開発することで、太陽光発電の新市場の創出につなげる。具体的には移動体や、重量制約のある屋根、建物壁面など、従来技術での導入では課題がある場所での基盤技術について、研究開発を促進し上記の目標を加速する。

併せて既に導入されている太陽光発電の長期安定的な事業の運営確保として、安全性信頼性の確保、系統制約の克服等の現在顕在化している課題解決や発電設備の廃棄対策等の適切な事業環境整備に資する技術を開発する。更に上記の分野に資する共通基盤技術を開発する。詳細な目標については別紙に記載。

#### ② アウトカム目標

新市場創出に向けた太陽光発電の技術開発によって、2050年時点での国内累積導入量として、約320GW（うち新市場 約170GW※）、太陽光発電によるCO<sub>2</sub>排出量削減（系統電源との比較）として、約110百万t/年（うち新市場 約60百万t/年）を推計した。※重量制約のある屋根、建物壁面、移動体（車載）、営農、水上の合計

また、太陽光発電の長期安定的な技術開発により、2030年時点で導入が予想



される小規模発電設備（50kW以下）を中心とした発電設備20GWの導入量維持（2018年12月時点の50kW以下発電設備のFIT認定容量）が期待される。

さらに、太陽光発電設備のリサイクル技術開発によって、約510万tの埋立処理量の削減（2030年までに導入される設備64GWを対象として試算）が期待される。

### ③ アウトカム目標達成に向けての取り組み

開発した技術については、太陽光発電分野だけでなく、新市場に関連する分野とも情報共有が図れる様にNEDOの報告会や展示会で積極的に宣伝し、成果普及に努める。また、IEAPVPSを活用し、IEC TC82（太陽光発電）との連携を図り、技術の促進を図る。

また、安全ガイドライン、リサイクル技術、太陽光発電による調整力技術については、経済産業省や環境省が実施する法規制や社会システムの検討・整備において、成果を共有し、実用化・事業化を促進させる。

## （3）研究開発の内容

上記目標を達成するために、別紙1の研究開発計画に研究開発を実施する。契約形態に関する負担率の考え方は以下に記載する。

- ・異業種との連携や新たな技術開発が必要な「基盤技術開発」については、大学・研究機関においては委託事業で実施する。ただし、大学・研究機関の単独実施については共同研究事業（NEDO負担率：2/3）で実施する。企業については、実用化を見据えた開発とするため、研究開発の内容によって、応分の負担を設け共同研究（NEDO負担率2/3、もしくは1/2）で実施する。
- ・実証事業については、助成事業（NEDO負担率1/2）とする。
- ・リサイクル技術開発においては、現時点で廃棄量は少なく2030年までは市場性と結びつけることが困難であるが、実用化を見据えた開発とするため、応分の負担を設け共同研究（NEDO負担率2/3）で実施する。
- ・今後整備される需給調整力市場の運用に幅広く活用されるような短時間の日射量予測に関しては公共性の高い事業であるため、委託事業として実施する。
- ・同じく需給調整力市場の運用に幅広く活用される太陽光発電の調整力創出については、2020年度に実施するフィージビリティスタディ（FS）では委託事業とし、その後の2021年度以降の実証フェーズにおいては、大学・研究機関は委託事業とするが、企業については前項同様に応分の負担を設け共同研究事業（NEDO負担率2/3、もしくは1/2）で実施する。
- ・安全性等のガイドラインや太陽電池の国際標準化に資する試験・評価方法においては、公益性が高いものの、研究開発成果が直接的に市場性を結びつかない公共性の高い事業であるため、委託事業として実施する。
- ・また、動向調査は国内外の技術開発動向、政策動向や導入に向けた課題等を把握し、技術開発の方向性や分析評価手法等の判断に活用するため、委託事業として実施する。

## 2. 研究開発の実施方法

### （1）研究開発の実施体制

- ・プロジェクトマネージャーにNEDO 新エネルギー部 山崎 光浩主任研究員を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。
- ・NEDOは、公募によって研究開発実施者を選定する。
- ・研究開発実施者は、企業や大学、研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外団体の特別な研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

## (2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理・執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な対策を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

### ① 研究開発の進捗把握・管理

NEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。また、各種太陽電池セルに関する学識経験者に加え、建築、建材、自動車等の各分野の外部有識者で構成する技術検討委員会等を組織し、知財管理や標準化等の重要事項や中間目標、最終目標に向けた進捗状況、目標を達成するための解決すべき課題、目標達成に向けたアクション、目標達成見通しについて検討する。さらに、事業価値や政策効果を踏まえた事業の進捗管理のために必要な指標や事業中止基準を設定し、定期的に事業を評価する。

これにより、中間評価以外でも目標達成の見通しを常に把握するとともに、抜本見直しや事業の中止の判断を行う。

### ② 技術分野における動向の把握・分析

NEDOは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を効率化に実施する観点から、研究開発項目（Ⅳ）や適宜実施する調査については、委託事業として実施する。

## 3. 研究開発の実施期間

①研究開発項目（Ⅱ）の実施期間は、2020年～2023年までの4年間とする。

ただし、

「(Ⅱ)－(i)－①安全ガイドラインの策定」については、2020年～2022年の3年間、「(Ⅱ)－(iii)系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証」については、2020年度1年間を技術課題の検討期間とし、その後3年間を検討結果に基づいた技術開発および実証期間とする。

②研究開発項目（Ⅰ）、(Ⅲ)、(Ⅳ)の実施期間は、2020年～2024年までの5年間とする。ただし、「(Ⅲ)－②発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発」については、2020年～2022年の3年間とする。

ただし、事象の変化によっては期間変更を行う可能性がある。

## 4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。

評価に関し、外部有識者で構成する委員会で研究開発の中間評価〔2022年度〕、事後評価〔2025年度〕等を実施する。また、中間目標を満たせない事業や事業・製品化計画が示せないものについては中間評価年度で中止とし、中間評価結果を踏まえ必要に応じ研究開発の加速・縮小・見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

## 5. その他重要事項

### (1) 研究開発成果の取り扱い

#### ① 成果の普及

本研究開発で得られた研究成果についてNEDOは、委託先、共同研究先、助成先とともに普及に努めるものとする。

#### ② 標準化等との連携

得られた研究開発成果については、標準化等との連携を図るためデータベースへのデータ提供、標準規格への提案やガイドライン作成等を行う。

③知的財産権の帰属、管理等取扱い

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、研究開発開始段階から、事業化を見据えた知財戦略を構築し、適切な知財管理を実施する。

④知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

⑤データマネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針（委託者指定データを指定しない場合）」を適用する。

(2) 基本計画の変更

NEDOは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応をおこなう。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法」第15条第1号イ及び第3号に基づき実施する。

(4) その他

なお、本事業の実施内容についてはグリーンイノベーション基金事業の実施内容と重複がないよう実施することとする。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 2020年3月、制定
- (2) 2021年3月、改訂
- (3) 2022年3月、改訂
- (4) 2022年8月、改訂

(別紙 1)

## 研究開発項目 (I) 太陽光発電の新市場創造技術開発

2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、従来型シリコン太陽電池の変換効率を大幅に上回り、高付加価値等分野として移動体(人工衛星、航空機、自動車など)への活用を想定したタンデム型等の太陽電池セル・モジュール開発を行い、以下のような、従来の技術では設置できなかった場所への太陽光発電システムの導入も含めた開発を行う。

### (i) フィルム型超軽量太陽電池の開発(重量制約のある屋根向け)

#### 1. 研究開発の必要性

FITの効果もあって、産業用太陽光発電だけでなく一般家庭にも太陽光発電の普及が進みつつあるが、エネルギー消費の多い工場、事業所、店舗等への設置実績は少ない。これら産業部門においては、CO<sub>2</sub>排出量削減による大気汚染対策へ寄与やRE100加盟等による企業イメージの向上を目的として、再生可能エネルギーの需要が高まっている。

工場、事業所、店舗の屋根はその施行の容易さから、金属製屋根が多く使用されている(屋根の比率で70%)。金属製の屋根は比較的厚みのない金属鋼板を使用していることから新設においてもコンクリート製屋根と比較して強度に制約がある上、既設においては屋根に重量物が設置されているケースがあり、新設よりも重量制限を受け従来の太陽光パネルを設置出来ないことが課題となっている。

そのため、従来の太陽光パネル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太陽電池の開発が求められている。

#### 2. 研究開発の具体的内容

太陽光パネルの軽量化(フィルム)としては、例えば、既に上市されているCIS太陽電池、基礎技術開発中のペロブスカイト太陽電池が候補として挙げられるが、強度が十分確保されている屋根市場の一部で採用されている結晶シリコン太陽電池と比較して、前者ではコスト、変換効率、後者では変換効率、耐久性の点で、競争力が十分でない上、CIS太陽電池ではフィルム基板化が実現出来ていない現状を鑑みて性能向上面、コスト課題両面からのセル、モジュール技術開発を行う。

さらに、現在重量面で課題のある結晶シリコン太陽電池についても、シリコン基板の薄型化、薄型化による発電効率低下抑制技術、金属屋根・スレート屋根等不定形状への追従性等のセル、モジュール構造の技術開発を行う。

上記を踏まえ本事業では以下の開発を実施する。

##### ①超軽量薄膜系太陽電池の開発

[企業：共同研究事業 NEDO負担率2/3、大学、国研等：委託事業]

高効率化技術、高耐久性化(高耐光性化)、低コスト技術等を構築し、低コスト超薄型でフィルム形状のセル、モジュール生産可能な太陽電池を開発する。

大学、国研においては企業と連携し、超軽量薄膜系太陽電池の開発において必要になる高効率、耐光性等の実用化に耐える要素技術およびタンデム太陽電池等を開発する。

##### ②軽量フレキシブル結晶系太陽電池の開発

[企業：共同研究事業 NEDO負担率1/2、大学、国研等：委託事業]

結晶シリコン太陽電池を基盤とした軽量化、高効率化(タンデム化)、低コスト化技術等を構築し、軽量フレキシブルなフィルム型太陽電池を開発する。

大学、国研においては企業と連携し、軽量フレキシブル結晶系太陽電池の開発において必要になる超軽量、高効率等の実用化に耐える要素技術を開発する。

### 3. 達成目標

#### 【中間目標（2022年度）】

##### ①超軽量薄膜系太陽電池の開発

- ・ 架台を含めたモジュール重量  $5 \text{ kg/m}^2$  以下。
- ・  $30 \text{ cm}$ 角以上の大面積モジュール変換効率  $18\%$ 以上。
- ・ 製造コスト  $35 \text{ 円/W}$ 以下の見通しを得る。
- ・ 屋外曝露  $10$ 年時点での初期変換効率に対する低下率  $10\%$ 以下。

##### ②軽量フレキシブル結晶系太陽電池の開発

- ・ 架台を含めたフィルムモジュール重量  $8 \text{ kg/m}^2$  以下。
- ・ モジュール変換効率  $25\%$ 以上。

#### 【最終目標（2024年度）】

##### ①超軽量薄膜系太陽電池の開発

- ・ 架台を含めたモジュール重量  $3 \text{ kg/m}^2$  以下。
- ・  $30 \text{ cm}$ 角以上の大面積フィルムモジュールで変換効率  $23\%$ 以上。
- ・ 製造コスト  $15 \text{ 円/W}$ 以下の見通しを得る。
- ・ 屋外曝露  $15$ 年時点での初期変換効率に対する低下率  $10\%$ 以下。

##### ②軽量フレキシブル結晶系太陽電池の開発

- ・ 架台を含めたモジュール重量  $5 \text{ kg/m}^2$  以下。
- ・ モジュール変換効率  $28\%$ 以上。
- ・ 製造コスト  $40 \text{ 円/W}$ の見通しを得る。

## (ii) 壁面設置太陽光発電システム技術開発

### 1. 研究開発の必要性

第6次エネルギー基本計画においては住宅・建築物分野を家庭・業務部門のカーボンニュートラルに向けて鍵となる分野と位置づけており、ZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）ZEB（ネット・ゼロ・エネルギー・ビル）の普及拡大へ向け「太陽光発電や蓄電池の導入を促進するとともに、創エネポテンシャルの最大化に向け、太陽光発電等の再生可能エネルギー導入を促す制度整備や、ビル壁面等への次世代型太陽電池の導入による住宅・建築物での創エネ拡大に向けた支援措置を講じる。」とあり、太陽光発電で創エネルギー量を拡大するには、変換効率を向上させるだけでなく壁面等を活用し設置面積を広げることも重要となるが、地上設置に比べ日射量が少ない事での経済性確保が困難、建築物の寿命に対し太陽光発電設備の寿命が短い、周辺の構造物と親和性が図れる外観を満たさない等から適用事例は限られる。そのため、建築物壁面へ太陽光発電を設置するにはこれら課題の解決が必要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

本事業では、上記課題を解決する壁面設置太陽光発電システムの開発を行う。また、普及促進に必要となる規格・標準等に資する基盤技術の開発、建築物として受け入れられる外観を持つ太陽光発電システムを建築物壁面へ大量設置する実証を行う。

#### ①壁面設置太陽光発電システムの技術開発（非開口部、開口部）

〔企業：共同研究事業 NEDO負担率2/3、大学、国研等：委託事業〕

建築物として受け入れられる外観、経済性を加味した（商用電力価格以下の）発電コスト、建築材料として要求される性能を満たす「非開口部向け」、「開口部向け」の壁面設置太陽光発電システムの開発を行う。

大学、国研においては企業と連携し、壁面設置太陽光発電システムの目標達成に必要な要素技術や評価技術等を開発する。

なお、これら開発は建築物設置で求められる様々なサイズに大幅なコスト増加無く対応できる工法となることを考慮すること。

#### ②壁面設置基盤技術開発〔委託事業〕

建築物壁面へ太陽光発電を普及促進させるために必要となる壁面設置特有の測定・評価技術等の開発を行い、評価・技術基準等の提案を行う。また、IEA PVPS task15（Enabling Framework for the Development of BIPV）へ参画し、その情報を広く展開する。

#### ③太陽光発電システム壁面大量設置実証〔助成事業（NEDO負担率1/2）〕

5階建て相当以上の高さをもつ建築物で太陽光発電システムの壁面大量設置実証を行う。壁面に適用する太陽電池は、モジュール内の色調が均一で取り付け後の建物外観がアピールできるもの、かつ今後のコスト低減等で投資対効果が見込めるものを用いることとする。前記太陽電池を壁面へ大量設置する際の技術課題を解決し、設置前後でのエネルギー収支、経済性を評価する。

### 3. 達成目標

#### 【中間目標（2022年度）】

##### ①壁面設置太陽光発電システムの技術開発（非開口部、開口部）

（非開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合）

- ・建築物としての寿命35年相当の性能を確認する。
- ・モジュール内の色調均一性と変換効率を両立させる要素技術を開発する。

（開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合）

- ・半透明モジュールで可視光透過率20%以上、変換効率10%以上の性能を達成する要素技術を開発する。
- ・窓の代替として用いる際の性能について、10年相当の寿命を確認する。

##### ②壁面設置基盤技術開発

評価・技術基準等に資する測定・評価技術等を開発する。

##### ③太陽光発電システム壁面大量設置実証

壁面へ太陽電池を大量設置する際の課題を解決し、外観をアピールできる太陽光発電システムを建築物壁面へ適用する。

#### 【最終目標（2024年度）】

##### ①壁面設置太陽光発電システムの技術開発（非開口部、開口部）

（非開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合）

- ・壁面を想定した設置形態（東南西面への設置）で発電コスト14円/kWh以下を達成する要素技術を確認する。
- ・建築物としての寿命40年以上を達成する要素技術を開発する。
- ・面内の色調が均一なモジュールで変換効率20%以上を達成する。

（開口部向け壁面設置太陽光発電システムの場合）

- ・壁面を想定した設置形態（東南西面への設置）で発電コスト16円/kWh以下を達成する要素技術を確認する。
- ・半透明モジュールで可視光透過率20%以上、変換効率13%以上の性能を達成する要素技術を開発する。
- ・窓の代替として用いる際の性能について、20年相当の寿命を確認する。

##### ②壁面設置基盤技術開発

評価・技術基準案等を3件以上作成する。

##### ③太陽光発電システム壁面大量設置実証

建築物の壁面へ太陽光発電システム設置前後での環境性能、発電性能を評価し、その効果を広く公開する。

### (iii) 移動体用太陽電池の研究開発

#### 1. 研究開発の必要性

現在、エネルギー需要の大部分を化石燃料に頼っている運輸部門ではCO<sub>2</sub>排出量削減や大気汚染対策の取り組みの一つとして電動化の動きが加速し、その効果を最大限に引き出すために再生可能エネルギーからの電力供給が期待されている。そうした背景の中で、高効率・高耐久性の太陽光モジュールを開発することによりシリコン太陽光発電では導入が難しかった、面積制限のある移動体の自動車や電車、船舶、ドローン、航空機その他、5G（第5世代移動通信システム）への適用をめざした通信用人工衛星の安価な代替手段として、UAV（高高度長時間滞空型無人機）などへの展開が期待されている。

また、次世代自動車の急速な増加により充電ステーションなど社会インフラの整備が追いつかない地域におけるスムーズなEV系自動車への転換や系統への負荷低減等にも貢献すると予想されなど、移動体に搭載する太陽電池でCO<sub>2</sub>削減やユーザーメリット拡大の実現が求められている。

#### 2. 研究開発の具体的内容

面積制約のある移動体では、限られた面積で多くの発電量をもつ高効率なモジュールが必要となる。また、普通乗用車等ではデザイン性も求められるため、曲面追従性も必要となる。さらに、製造コストにおいては、太陽電池搭載に伴う購入費用の増加に対し燃料代（充電電気代）の節約費で賄うことができるような価格設定が必要である。

本事業では2050年に広く一般の電動自動車に搭載されるための技術開発として、自動車形状に追従可能で、高効率、低コストを実現できる太陽電池モジュールを開発する。具体的には、より高効率なIII-V化合物を大幅に低コスト化、モジュール化する技術開発（超高効率モジュール化技術開発）と、より低コストな結晶シリコンをベースとして高効率化、モジュール化を目指す技術開発（次世代モジュール化技術）として、以下の技術を開発する。

##### ① 超高効率モジュール技術開発

〔企業：共同研究事業 NEDO負担率2/3、大学、国研等：委託事業〕

太陽の照射方向に対し追尾が不要で、且つAM1.5でモジュール効率35%以上を達成可能な太陽電池（多接合III-V化合物太陽電池、III-V/Si、III-V/CISなどのタンデム型太陽電池など）の高効率化技術、低コスト化技術、新型セル、モジュール構造、自動車搭載モジュール化技術などを開発する。大学、国研等は参画企業と連携し、超高効率モジュール技術開発の目標達成に貢献できる技術を開発する。

##### ② 次世代モジュール技術開発

〔企業：共同研究事業 NEDO負担率1/2、大学、国研等：委託事業〕

結晶シリコンを基盤とした低コストで変換効率30%以上かつ曲面追従性を持つモジュールを開発する。例えば、ペロブスカイト/Si等のタンデム化技術や3D曲面モジュール化技術などを開発する。大学、国研等は参画企業と連携し、次世代モジュール技術開発の目標達成に貢献できる技術を開発する。

#### 3. 達成目標

【中間目標（2022年度）】

##### ① 超高効率モジュール技術開発

・モジュール効率33%以上（30cm x 30cm）



- ・上記モジュールと同等の効率をもつセルを使った3D曲面モジュール（曲率半径1mを含む）
- ・実用サイズの複数枚処理装置（4インチ以上）において、モジュールコスト200円/W（量産時GWレベル）を達成するための基板再生装置及び高速成膜装置の試作および要素技術構築

② 次世代モジュール技術開発

- ・モジュール効率25%以上、3D曲面（球面曲率半径1mを含む）。

【最終目標（2024年度）】

① 超高効率モジュール技術開発

- ・モジュール効率35%以上（30cm x 30cm）
- ・上記モジュールと同等の効率をもつセルを使った3D曲面モジュール（曲率半径1mを含む）
- ・実用サイズの複数枚処理装置（4インチ以上）においてモジュールコスト200円/W（量産時GWレベル）を達成するための基板再生装置及び高速成膜装置の実証。

② 次世代モジュール技術開発

- ・モジュール効率30%以上、3D曲面（球面曲率半径1mを含む）。
- ・モジュール価格：70円/W。

## 研究開発項目（Ⅱ）太陽光発電の長期安定電源化技術開発

### （ⅰ）安全性・信頼性確保技術開発

#### 1. 研究開発の必要性

太陽光発電はFITにより急速に拡大したが、発電施設の設置・運営の不備による安全面での不安が顕在化しつつある。NEDOでは地上設置のための設計ガイドラインを策定しているが、昨今設置環境、設置形態は多様化しており、それらの安全性を確保する基盤整備は喫緊の課題である。

また、FITによる買取期間が終了した後も再生可能エネルギー発電事業が適正に継続され、将来的な再投資が行われる事業環境の整備が必要とされている。FIT終了後の発電設備において、安全確保を前提としたうえで健全に維持するには、小規模発電設備（50kW未満）へ展開可能な評価・回復技術が必要である。これらの技術は太陽光モジュールのリユース等の他用途への展開も期待される。

#### 2. 研究開発の具体的内容

##### ①安全性に係る基盤整備

###### 【委託事業（NEDO負担率100%）】

発電設備の安全性を確保するため、ガイドラインの作成等の基盤整備を行う。知見の不足する項目については、必要に応じて実証実験等を実施する。

##### ①-1）安全ガイドラインの策定（傾斜地設置型、営農型、水上設置型）

\* 多様化が進む設置環境における、設計・施工の安全確保のためのガイドライン策定を行う。

##### ①-2）機器設置に関する基準類、ガイドライン等の策定

\* リスクを低減する手法とその普及を目的とした技術や情報の基盤整備を行う。例えば、発電設備の評価回復方法ガイドラインの作成、モジュール安全基準の作成、既存技術の応用可能性評価、不具合事例データベース作成等を行う。

##### ②信頼性評価技術、信頼性回復技術の開発

###### 【助成事業（NEDO負担率1/2）】

太陽光発電設備の長期安定運用に資する、信頼性評価技術、信頼性回復技術または両者を併せ持った技術の開発を行う。なお当該技術は既存の小規模発電設備（50kW未満）に採算性を含めて適用可能な技術であり、多様化が進む設置環境においても適用が期待できるものとする。

##### ②-1）信頼性評価技術（構造・電気）

対象技術は例えば、

\* 小規模発電設備の総合的な評価を視野に入れた技術。（設計図面作成支援、構造診断技術、発電所余寿命評価等）

\* モジュールとシステム全般の劣化や不具合の検出を行う技術。（遠隔の監視や診断および操作の高度化、現地診断の合理化等）

##### ②-2）信頼性回復技術（構造・電気）

対象技術は例えば、

\* 小規模発電設備の構造信頼性を回復する技術。（モジュール、架台、柱、接合部、杭・基礎、地盤の損傷等の防止を目的とした構造補強関連技術等）

\* 発電量や安全性を含む電気的な信頼性を回復する技術。（パネル洗浄、防草等の維持管理高度化等を含む。）

#### 3. 達成目標

##### 【中間目標（2021年度）】

##### ① 安全性に係る基盤整備（2021年度）

###### ①-1）安全ガイドラインの策定（傾斜地設置型、営農型、水上設置型等）

・ 暫定版として2021年9月までに2020年版を取りまとめる。

###### ①-2）機器設置に関する基準類、ガイドライン等の策定

・ 調査や実験等の結果をもとに利用の見通しを示す。または暫定版を公開、発行す

る。

②信頼性評価技術、信頼性回復技術の開発（2021年度）

- ・開発した技術の有効性を評価するとともに、その実証方法を具体化する。

【最終目標】

① 安全性に係る基盤整備

① -1) 安全ガイドラインの策定（傾斜地設置型、営農型、水上設置型等）（2023年度）

実証試験と調査、シミュレーションの結果に基づき、設置環境の多様化に必要な新たな裏付けを加えて、2022年版を発行する。

①-2) 機器設置に関する基準類、ガイドラインの策定（2023年度）

発行、公開とセミナー等の実施を通じて、発電事業者の利用を促進する。

② 信頼性評価技術、信頼性回復技術の開発（2023年度）

②-1) 信頼性評価技術（構造・電気）

②-2) 信頼性回復技術（構造・電気）

開発した技術の実証を行い、その結果を受けた改良により実用性と採算性を確立する。小規模発電設備（50kW未満）における評価結果をもとに普及計画を立案する。

(ii) 太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発

1. 研究開発の必要性

太陽光発電設備は、発電事業終了後の太陽電池モジュールの放置や不法投棄などの懸念が生じている。廃棄処理には設備の撤去・回収・分離処理の費用が必要となり、廃棄費用はシステム価格の5%が割り当てられている。NEDOでは太陽電池モジュールのリサイクル技術開発を進め、分離処理コスト低減としては大きな成果を上げている。しかし太陽光発電設備のシステム価格低減が進む中、撤去・回収費用を同レベルで削減することは困難となっており、今後正しくリサイクル処理を行うためには分離処理の更なる低コスト化が必要になる。

また、NEDOの試算によると太陽電池モジュールの大量廃棄は2034年以降、年間約20万トンに及ぶため、産業廃棄物の最終処分場はひっ迫される。これを解消するためには、最終処分となる埋立廃棄物量を最小限にとどめる必要があり、太陽電池モジュールの分離物を有効活用するマテリアルリサイクル技術の開発が重要になる。

2. 研究開発の具体的内容

[共同研究事業 NEDO負担率2/3]

本事業では、低コストかつマテリアルリサイクルに資する高い資源回収率を両立する分離処理技術を開発、実証プラントを構築し、実モジュールサイズで検証を行う。

- ・低コスト・高資源回収率を両立する分離処理技術開発。
- ・太陽電池モジュール由来の回収物のマテリアルリサイクル技術開発。
- ・上記技術を両立する実証プラントの構築。

3. 達成目標

【中間目標（2021年度）】

実モジュールにおいて、以下の技術を確立する。

- ・分解処理コスト3円/W以下。
- ・部材として再利用可能な状態で資源回収率80%以上。
- ・太陽電池モジュール由来の回収物のマテリアルリサイクル技術を開発する。

【最終目標（2023年度）】

実モジュールサイズの実証プラントを構築し、連続運転で以下の性能を満たすこと。

- ・分離処理コスト3円/W以下の分離技術であること。
- ・資源回収率80%以上の分離技術であること。
- ・太陽電池モジュール由来の回収物がマテリアルリサイクルに資する性能であること。

(iii) 系統影響緩和に資する技術課題の検討および実証

1. 研究開発の必要性

太陽光発電はFITにより急速に拡大したが、出力不安定性などの安定供給上の問題があることから、既存の系統へ与える影響が懸念されている。しかし、太陽光発電の導入拡大とその長期安定電源化の実現には、上記影響を緩和して系統の安定化を図らねばならない。

そのためには、太陽光発電の出力制御や発電量・需要予測の高度化、需給一体型システムの構築等によって、変動電源である太陽光発電と需要側との需給バランスの実現に資する技術を開発する必要がある。加えて、今後の総発電量に占める太陽光発電の割合のさらなる増加によって、需給変動に対する調整力が不足し、系統運用への支障をきたすことも懸念されており、太陽光発電を用いた調整力創出に関する技術開発も必要である。

2. 研究開発の具体的内容

本事業では、太陽光発電による電力系統への影響を緩和するため、下記①②を行う。2020年度は①については基本設計を、②についてはフィージビリティスタディ (FS) を行い、それぞれ次年度以降の技術検討や実証実験等に繋げる。なお、委託事業においては、民間企業以外の組織が主体で実施することを原則とし、その結果は開示とする。

① 太陽光発電による需給一体型システム構築上の課題抽出と対応方法の検討および実証  
[助成事業 負担率 1/2]

- ・ 2020年度は需給予測の高度化等による経済性に優れた需給一体型システムを構築するための課題を抽出し、技術的な対応方法を多面的に検討することで基本設計を行い、その実証プランを企画策定する。なお、実証プランにおいては、実証期間2年間を想定した、具体的な作業項目とスケジュールを明示する。
- ・ 2021年度以降は実証プランに基づいて、経済合理性と需給予測による同時同量の有効性を確認するためのシステムを構築して実証を行う。

② 系統連系における影響緩和のための技術開発課題の抽出とその対応方法の検討および実証

[委託事業] または [共同研究事業 負担率 2/3、もしくは 1/2]

- ・ 2020年度は以下の検討および策定を行う。
  - 系統連系における太陽光発電の技術開発課題を抽出したうえで技術的な対応方法を検討し策定する。若しくは、
  - 太陽光発電を調整力として活用するための技術開発に向けた課題を抽出したうえで技術的な対応方法を検討し公開するとともに、併せて費用対効果等の経済合理性を含め、その有効性確認のための手法を策定する。
- ・ 2021年度以降は、費用対効果として発電コスト相当の便益を得られることを前提とした調整力の創出能力について、評価するための実証実験を行う。

3. 達成目標

【2020年度目標】

- ① 経済合理性が評価された需給一体型システムの実証プランを企画策定する。
- ② 系統連系における影響緩和の技術的な対応方法の検討や、有効性確認のための手法を策定する。

【2023年度目標】

- ① 経済合理性を前提とした需給乖離率3%以下のシステムの構築
- ② 経済合理性を前提として、需給調整市場の応動・継続時間の要件（一次から三次）に適合しうる計画技術・制御技術を備えたシステムの構築

## 研究開発項目（Ⅲ）先進的共通基盤技術開発

### 1. 研究開発の必要性

太陽電池の高効率化・低コストに資する技術開発が進められる中、新型太陽電池（ペロブスカイト型、多接合型等）も実用化に向けた開発が活発化しつつある。しかし、これらの新型太陽電池を研究開発レベルから産業化まで進めるには、その性能評価試験を実施するプラットホームの整備・確立も欠かせない。公平な性能評価を行うには、自然太陽光を用いた屋外でのモジュール入射角依存性・設置角依存性、日射スペクトル変化によるスペクトル補正および温度補正を考慮する必要がある。また、基準太陽電池や校正技術、得られた発電性能を基に発電性能の安定性・信頼性の評価およびこれらの評価技術を標準化する取組みも重要である。

また、太陽光発電を取り巻く市場環境変化に伴い、需給運用の複雑化や電力の安定供給等の観点から発電量予測技術の高度化が求められている。太陽光発電は気象条件に左右される変動型電源であり、発電した電気を有効活用するには、その発電量を正確に予測することが重要であるが、時々刻々と日射量は変化しているため、過去の実測発電量の値から未来の発電量を予測することは難しい。そのため、発電量を高精度に予測するには、日射量予測について空間軸的および時間軸的に高精度化を行う必要がある。空間軸的な高精度化は、従来の広い範囲の地域における電力の需給調整ではなく分散型電源として扱われる個人宅や発電所レベルの狭い範囲の地域における電力の需給調整を円滑に行うことにつながり、時間軸的には数時間先から翌日および翌々日程度における日射量予測技術を高精度化することで、蓄電池の活用や系統への影響緩和などの需給調整の可能性が広がることが期待される。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### ① 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発（委託事業）

標準化や規格化が進んでいない新型太陽電池等の出力等の性能を正しく評価するための測定技術を開発するとともに、開発に資する基準太陽電池および校正技術を開発し、性能・信頼性・安定性を評価する。

#### ② 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発（委託事業）

発電量の短期的な予測に向け、現在を起点に数時間先の1km四方程度のエリアの日射量を予測する技術を開発するとともに本技術の評価を行う。加えて、現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発への可能性についても検討する。さらに、現在から翌日および翌々日程度先の日射量予測が大きく外れる課題を改善する技術開発を行う。

#### ③ 翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発（委託事業）

2020年度に実施したFSの成果に基づいて、翌日および翌々日程度先の日射量予測の日射量予測の最大誤差低減に向けた技術開発を行う。

### 3. 達成目標

#### 【中間目標】

#### ① 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発（2022年度）

新型太陽電池等について、その設置形態環境・形状を考慮した測定技術を開発し、海外主要研究機関の測定技術との国際整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ （ $1\sigma$ ）以内を目指す。

#### ③ 翌日および翌々日程度先の日射量予測技術の開発（2022年度）

現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発において、日射量予測の最大誤差を10%以上低減することを目指す。

#### 【最終目標】

- ① 新型太陽電池の高精度性能評価技術の開発（2024年度）  
新型太陽電池等について、その設置形態環境・形状を考慮した屋内屋外測定技術を確立し、海外主要研究機関の測定技術との国際整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ （ $1\sigma$ ）以内を目指す。屋外環境下においては精度 $\pm 1.0\%$ （ $1\sigma$ ）以内を目指す。性能評価技術の標準化に取り組む。
- ② 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発（2022年度）  
1km四方程度のエリアを想定した数時間先の発電量の予測に向け、想定エリアの日射量予測情報を提供する技術を開発する。
- ③ 発電量の短期予測に向けた日射量予測技術の開発（2024年度）  
現在から翌日および翌々日程度先の日射量を予測する技術開発において、日射量予測の最大誤差を20%以上低減することを目指す。

## 研究開発項目（Ⅳ）動向調査等

### 1. 研究開発の必要性

太陽光発電の導入量を拡大し主力電源化していくには、太陽光発電システムに関する技術や市場の動向および普及に関わる国内外の動向などの最新データを常に把握し、それらを的確に技術開発へフィードバックしていくことが求められる。最新データを把握するためには、国際エネルギー機関（IEA）の太陽光発電システム研究協力実施協定（PVPS）等の国際協力プログラムに参画し、情報交換を行うことも有効であり、得られた情報や議論した結果については、併せて国内の省庁を含めて、広く研究開発者、発電事業者等に展開する。

また、今後大量に廃棄される太陽電池モジュールのリサイクルを円滑に行うためには、使用済み太陽光発電設備の排出量予測、災害時の太陽光モジュールのリサイクル状況、太陽電池モジュール由来のガラスの用途開拓のために、ガラスの再利用の状況等を把握するための調査が必要となる。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### ①移動体用太陽電池の動向調査

IEA PVPS Task 17 (PV and Transport) 等の活動に参画し、電動自動車等の移動体への搭載を目指した太陽電池の国内外における研究開発、市場動向を調査、分析すると共に、今後の方向性を議論し、その結果をプロジェクト参画機関等、国内の関係事業者に広く展開する事により、移動体分野の研究開発を加速する。

#### ②リサイクル関連の動向調査

##### ②-1 太陽電池モジュールのリサイクルに関わる調査

太陽電池モジュールのリサイクルに関わる国内の技術開発動向、普及動向、政策動向、実施事例などの調査に加え、ガラスの再利用の状況調査、災害時のリサイクル状況を把握するための調査、使用済み太陽光発電設備の排出量予測の精緻化を実施する。

これらはⅡ-（ii）の研究開発プロジェクトに反映を行う。

##### ① -2 太陽電池モジュールの適正処理に関わる調査

廃棄太陽電池モジュールのリサイクルを円滑に実用化するためには、リサイクルの適正処理のプロセスにおけるモジュール回収の現状について調査を行うと共に、海外の太陽電池モジュールの回収システムを初めとしたリサイクル動向を国際技術協力プログラム(TCP) PVPS Task 12 (PV Sustainability) 等から調査することにより、太陽電池モジュールの適正処理を実証できる企画を提案する。

##### ② -3 太陽光発電リサイクルに関する評価手法の検討

太陽光発電システムのリサイクル関連技術の横断的評価のための指標および評価手法を確立し、研究開発技術の評価（LCA等）を実施する。そして、環境面などの側面から研究開発技術の優位性・有効性を評価・検証し、フィードバックを行う。

#### ③太陽光発電の動向調査

##### ③-1 太陽光発電の技術および産業・市場動向の調査

技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する太陽光発電セル、モジュール、システムおよび太陽光発電が導入される分野に関する国内外の有望な先端技術や産業・市場動向や今後の太陽光発電の可能性（社会実装に向けた課題）の調査を行い、その結果を的確に本プロジェクトへフィードバックする。（調査範囲は①、②を含まない領域とする）。

##### ② -2 国際技術協力プログラムへ参画

PVPS Task 1 (Strategic PV Analysis & Outreach) に関連する活動に参画し、国際協力活動を通じて太陽光発電



の普及・促進に向けた諸外国の技術開発動向や政策動向、市場動向等を調査・分析し、結果をタイムリーに発信する。

③-3 次世代型太陽電池の新市場への導入・実装に向けての動向調査

次世代型太陽光発電の社会実装を支援する取り組みとして、重量制約のある屋根・建物壁面等の対象件数の分析および2030年～2050年の導入見通しの検討、次世代型太陽電池のコスト分析、次世代型太陽電池と新市場におけるサプライチェーンの分析と課題整理を行う。これらの情報を元に、目指す実証イメージを明確にする。

3. 達成目標

【中間目標（2022年度）】

①移動体用太陽電池の動向調査

移動体用太陽電池の調査結果を中間報告書としてまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックする。

③太陽光発電の動向調査

③-1 技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する調査結果を中間報告書としてまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックする。

③-2 PVP Sの活動に参画し、その内容を産業界に発信する。

【最終目標】

①移動体用太陽電池の動向調査（2024年度）

今後の移動体用太陽電池の技術開発に資する分析、検討をまとめる。

②リサイクル関連の動向調査

② -1 リサイクルに関わる調査結果（ガラスの再利用の状況、使用済太陽光発電設備の排出量予測、経済的有効性等）を、太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発へフィードバックする（2023年度）。

② -2 太陽電池モジュールの適正処理を実証できる企画を提案する（2021年度）。

② -3 各研究開発テーマからの評価に必要なデータを収集し、LCA等の評価を行うとともに評価結果を太陽電池モジュールの分離・マテリアルリサイクル技術開発へフィードバックする（2023年度）。

③太陽光発電の動向調査（2024年度）

③-1 今後の技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する情報をまとめる。

③-2 PVP Sでの活動を踏まえ、定期的な情報発信を行うと共に分析、検討をまとめる。

③-3 技術開発の方向性や普及方策の分析、検討に資する調査結果をまとめ、関連するプロジェクトへフィードバックを行う（2022年度）。

(別紙2) 研究開発スケジュール

	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度
(Ⅰ) 太陽光発電 の新市場創造技術 開発	各市場で要求される性能を満たす要素技術開発・実証					
(Ⅱ) 太陽光発電 の長期安定電源化 技術開発	ガイドライン策定					
	信頼性評価・回復技術の開発					
	マテリアルリサイクル技術開発、実証					
	系統影響軽減2020年度FS、 2021年度以降実証					
(Ⅲ) 先進的共通 基盤技術の開発等	日射量予測技術の開発					
	新型太陽電池の高精度性能評価					
(Ⅳ) 動向調査	動向調査					
評価			★ 中間評価			★ 事後評価

## 添付資料 2 事前評価関連資料（事前評価書）



## 事前評価結果概要（2019年7月）

### 1. 案件名 「太陽光発電主力電源化推進技術開発」

### 2. 推進部署 新エネルギー部

### 3. 実施概要

#### 1) 背景

「第5次エネルギー基本計画」（2018年7月閣議決定）において、再生可能エネルギーについては、「他の電源と比較して競争力ある水準までのコスト低減と固定価格買取制度からの自立化を図り、日本のエネルギー供給の一翼を担う長期安定的な主力電源として持続可能なものとなるよう、円滑な大量導入に向けた取組を引き続き積極的に推進していく。」、また、「さらなる大量導入と経済的に自立し脱炭素化した主力電源化に向け、技術革新によるブレークスルーを要する課題に正面から取り組まなければならない。」としている。

また、「我が国は既に、面積当たりの再生可能エネルギー導入量は世界トップレベルにある。再生可能エネルギーにも立地の適地があり、大量導入を進めれば、いずれ面積制約に直面する。その制約を克服するためには、非連続なイノベーションによる発電効率の抜本的向上が不可欠となる。」としている。

さらに、太陽光発電は、「個人を含めた需要家に近接したところで自家消費や地産地消を行う分散型電源としても、非常用電源としても利用可能である。」と位置付け、固定価格買取制度の見直しに合わせて、自家消費や地産地消等の重要性について言及がされている。

「地球温暖化対策計画」（2016年5月閣議決定）においては、「我が国は、パリ協定を踏まえ、全ての主要国が参加する公平かつ実効性ある国際的枠組みの下、主要排出国がその能力に応じた排出削減に取り組むよう国際社会を主導し、地球温暖化対策と経済成長を両立させながら、長期的目標として2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す」と示されている。

これを受けて、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（仮称）」（2019年4月～5月）では、重点的に取り組む横断的施策（イノベーションの推進）として、「長期的に再生可能エネルギーの導入拡大を図るために、再生可能エネルギーコストを既存の電源の水準まで低減することに加え、更なる発電効率や耐久性の向上、軽量化、曲がる形態等により、従来、再生可能エネルギーを利用できなかった場所を利用可能とする。例えば、太陽光発電の場合、ビルの壁面、工場屋根、水上、自動車・ドローン等にパネルを設置可能とするための技術等、既存電源と同水準のコストで導入できる再生可能エネルギー導入可能量の大幅増大に資する技術の確立を目指す。」と示されている。

#### 2) 実施概要

本事業は、太陽光発電システムの設置に適した未開発の適地が減少する中、更なる発電効率の向上、軽量化、曲面追従化等により、従来の技術では太陽光発電を利用できなかった場所を利用可能とするための革新的な太陽光発電システムの技術開発を行い、太陽光発電の中長期的な導入可能量の大幅拡大に資することを目指す。さらに、太陽光発電の長期安定電源化に資するため、発電設備の信頼性・安全確保や資源の再利用化を可能とするリサイクル技術の開発等を行う。具体的には以下の通り。

#### ①太陽光発電の導入可能量拡大に向けた革新的太陽光発電システムの開発

更なる発電効率の向上、軽量化、曲面追従化等により、従来の技術では太陽光発電を利用できなかった場所を利用可能とするための革新的な太陽光発電システムの技術開発を行う。新市場としては、ZEB壁面、強度が弱い屋根、移動体（車載）、水上、営農を想定し、各々の分野の技術課題に対応できる太陽光発電システムの技術開発を行う。

#### ②システム化（自家消費・需給一体化モデルの開発・実証等）

上記の新市場での太陽光発電の自家消費・需給一体化を行うために必要となるエネルギーマネジメントシステムや革新的な太陽光発電をビルや移動体などに実装する上で必要となる設置用器具など、太陽光発電のシステム化を行うために必要となる技術の開発を行う。

#### ③信頼性・安全性確保技術開発

太陽光発電の信頼性・安全性確保のための技術開発や安全基準策定等を行う。

#### ④マテリアルリサイクル技術開発

太陽光発電の長期安定電源化に向け、低コスト・高回収率のリサイクル技術の開発・実証等を行う。

#### ⑤先進的共通基盤技術の開発

新型太陽光発電に係る発電量測定・評価方法の確立、発電・劣化機構の解明、発電量予測技術の高度化など、革新的太陽光発電システムの普及及び長期安定電源化に資する先進的な共通基盤技術の開発を行う。

### 3) 総事業費（需給）想定約 200 億円

（委託事業、共同研究、助成事業：NEDO 負担額 100%、2/3、1/2）

### 4) 期間 2020 年度～2024 年度（5 年間）

## 4. 外部評価委員の総合コメント

太陽光発電の技術開発は異分野展開による新市場開拓という新しい方向に向かっており、太陽光発電ルネサンスという意味でも日本の主力電源化に寄与する事業として国が推進していくことは適切である。対象が建物、車、農地といった異分野展開であり研究課題が多岐にわたるため、それぞれのつながりを明確にする必要がある。また、各省庁との連携を含めたセクターカップリング推進のためのマネジメントが必要である。さらに、再生可能エネルギー関連の他のプロジェクトとの連携や、系統とのインテグレーションを含めた出口戦略の見直しを、プロジェクト推進中も不断に実施することが望まれる。（第 59 回 NEDO 研究評価委員会）

### 添付資料 3 論文、対外発表の明細





論文、対外発表の明細

【論文】

番号	筆頭者	筆頭者の所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	発表年月
1	J. Chantana	Ritsumeikan University	Mg content impact of sputtered $Zn_{1-x}Mg_xO:Al$ transparent electrode on photovoltaic performances of flexible, Cd-free, and all-dry process $Cu(In, Ga) (S, Se)_2$ solar cell.	ACS Appl. Energy Mater. 5 (2022) 2270-2278.	2022/2
2	J. Chantana	Ritsumeikan University	Formation of Native $In_x(O, S)_y$ Buffer through Surface Oxidation of $Cu(In, Ga) (S, Se)_2$ Absorber for Significantly Enhanced Conversion Efficiency of Flexible and Cd-Free Solar Cell by All-Dry Process	Solar RRL (2022) 2200250-1-9.	2022/3
3	J. Chantana	Ritsumeikan University	Derived Conduction Band Offset by Photoelectron Yield Spectroscopy and Its Quantitative Number for Efficiency Enhancement of Flexible, Cd-Free, and All-Dry Process $Zn_{1-x}Mg_xO:Al/Zn_{1-x}Mg_xO/Cu(In, Ga) (S, Se)_2$ Solar Cells	ACS Appl. Electron. Mater. 4 (2022) 2077-2085.	2022/4
4	D. Egyua	東京工業大学	Benefits of Low Electron-Affinity Material as the N-type Layer for $Cu(In, Ga)Se_2$ Solar Cell	Energies, 4	2022年1月
5	S. Ishizuka	産業技術総合研究所	A comparative study of the effects of light and heavy alkali-halide postdeposition treatment on $CuGaSe_2$ and $Cu(In, Ga)Se_2$ thin-film solar cells	Solar Energy 211, 1092-1101 (2020)	2020.11
6	S. Ishizuka	産業技術総合研究所	Impact of Cu-deficient p-n heterointerface in $CuGaSe_2$ photovoltaic devices	Applied Physics Letters 118, 133901-1-6 (2021)	2021.4
7	S. Ishizuka	産業技術総合研究所	Role of the Cu-deficient interface in $Cu(In, Ga)Se_2$ thin film photovoltaics with alkali metal doping	Physical Review Applied 15, 054005-1-18 (2021)	2021.5

8	S. Ishizuka	産業技術総合研究所	Physical and chemical aspects at the interface and in the bulk of CuInSe <sub>2</sub> -based thin-film photovoltaics	Physical Chemistry Chemical Physics 15, 2100042-1-5 (2021)	2021.5
9	J. Nishinaga	産業技術総合研究所	Effects of alkali-metal incorporation into epitaxial Cu(In, Ga)Se <sub>2</sub> solar cells prepared by molecular beam epitaxy	Thin Solid Films 741, 139034-1-7 (2022)	2021.12
10	Tomoya Nakamura	京都大学	Materials Chemistry Approach for Efficient Lead-Free Tin Halide Perovskite Solar Cells	ACS Appl. Electron. Mater. (Spotlight) <b>2020</b> , 2, 3794	2020/12
11	Yongyoon Cho	京都大学	Elucidating Mechanisms behind Ambient Storage-Induced Efficiency Improvements in Perovskite Solar Cells	ACS Energy Lett. 2021, 6, 925.	2021/2
12	Minh Anh Truong	京都大学	Near-Ultraviolet Transparent Organic Hole-Transporting Materials Containing Partially Oxygen-Bridged Triphenylamine Skeletons for Efficient Perovskite Solar Cells	ACS Appl. Energy Mater. 2021, 4, 1484.	2021/2
13	Yongyoon Cho	京都大学	Immediate and Temporal Enhancement of Power Conversion Efficiency in Surface-Passivated Perovskite Solar Cells	ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13, 39178.	2021/8
14	Shuaifeng Hu	京都大学	Mixed lead-tin perovskite films with >7 μs charge carrier lifetimes realized by maltol post-treatment	Chem. Sci. 2021, 12, 13513	2021/9
15	Minh Anh Truong	京都大学	Starburst Carbazole Derivatives as Efficient Hole Transporting Materials for Perovskite Solar Cells	Sol. RRL, 2022, 6, 2100877.	2021/11
16	Shuaifeng Hu	京都大学	Optimized Carrier Extraction at Interfaces for 23.6% Efficient Tin-Lead Perovskite Solar Cells	Energy Environ. Sci. 202, 15, 2096.	2022/5
17	古郷敦史	産業技術総合研究所	Cesium iodide post-treatment of organic-inorganic perovskite crystals to improve photovoltaic performance	Nanoscale 21605-21609	2020 年 10 月

			and thermal stability		
18	西原佳彦	産業技術総合研究所	Effect of Passivation on the Interface between Perovskite and Donor-Acceptor Copolymer-based Hole-transport Layer in Perovskite Solar Cells	Chemistry Letters 1341-1344	2020 年 11 月
19	J. Chantana	立命館大学	Thermodynamic limit of tandem solar cells under different solar spectra and their perovskite top solar cell	Optical Materials. 113 (2021) (Elsevier). 110819	2021 年 3 月
20	宮寺哲彦	産業技術総合研究所	Insights into Microscopic Crystal Growth Dynamics of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ under a Laser Deposition Process Revealed by In Situ X-ray Diffraction	ACS Applied. Material and Interfaces, 2021, 13, 19, 22559-22566	2021 年 5 月
21	堀内宥也	京都大学大学院工学系研究科	Improved Hole-Transporting Properties in Conjugated Polymers Mixed with Polystyrene as an Insulating Polymer	J. Photopolym. Sci. Technol., Vol. 34 291-296	2021 年 6 月
22	Yongyoon Cho	京都大学大学院工学系研究科	Immediate and Temporal Enhancement of Power Conversion Efficiency in Surface-Passivated Perovskite Solar Cells	ACS Appl. Mater. Interfaces, 13 39178-39185	2021 年 8 月
23	Y. Kawano	立命館大学	Theoretical impacts of single band gap grading of perovskite and valence band offset of perovskite/hole transport layer interface on its solar cell performances	Solar Energy 231 (2022) 684-693	2022 年 1 月
24	Hiroshi Segawa	東京大学	Templated growth of $\text{FASnI}_3$ crystals for efficient tin perovskite solar cells	Energy and Environmental Science 2020, 13, 2896-2902	2020. 8
25	Shuzi Hayase	電気通信大学	Inverted $\text{CsPbI}_2\text{Br}$ perovskite solar cells with enhanced efficiency and stability in ambient atmosphere via formamidinium incorporation	Solar Energy Materials and Solar Cells 2020, 218, 110741	2020. 9

26	Ryosuke Ishikawa	東京都市大学	Layer dependency of graphene layers in perovskite /graphene solar cells	Carbon 2021, 172, 597-601	2020.10
27	Hiroshi Segawa	東京大学	Perovskite/CIGS spectral splitting double junction solar cell with 28% power conversion efficiency	iScience 2020, 23, 101817	2020.11
28	Takashi Kondo	東京大学	Ternary-source vapor-phase deposition of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ polycrystalline thin films using $\text{CH}_3\text{NH}_2$ and HI gas sources with $\text{PbI}_2$ solid source	Japanese Journal of Applied Physics 2021, 60, 15505	2020.12
29	Tsutomu Miyasaka	東京大学	Drastic change of surface morphology of cesium-formamidinium perovskite solar cells by antisolvent processing	ACS Applied Materials and Interfaces 2021, 4, 1069-1077	2021.1
30	Hiroshi Segawa	東京大学	Additive engineering toward high-performance tin perovskite solar cells	Solar RRL 2021, 5, 2100034	2021.3
31	Hiroshi Segawa	東京大学	Lead-free tin perovskite solar cells	Joule 2021, 5, 863-886	2021.3
32	Liyuan Han	東京大学	Making room for growing oriented $\text{FASnI}_3$ with large grains via cold precursor solution	Advanced Functional Materials 2021, 31, 2100931	2021.4
33	Gaurav Kapil	電気通信大学	Tin-lead perovskite fabricated via ethylenediamine interlayer guides to the solar cell efficiency of 21.74%	Advanced Energy Materials 2021, 11, 2101069	2021.5
34	Ching Chang Lin	東京大学	A sodium chloride modification of $\text{SnO}_2$ electron transport layers to enhance the performance of perovskite solar cells	ACS Omega 2021, 6, 17880-17889	2021.7
35	Liyuan Han	東京大学	The main progress of perovskite solar cells in 2020-2021	Nano-Micro Letters 2021, 13, 152	2021.7
36	Liyuan Han	東京大学	Interface energy-level management toward efficient tin perovskite solar cells with hole-transport-layer-free structure	Advanced Functional Materials 2021, 31, 2106560	2021.9

37	Liyuan Han	東京大学	Reduction of nonradiative loss in inverted perovskite solar cells by donor- $\pi$ -acceptor dipoles	ACS Applied Materials and Interfaces 2021, 13, 44321-44328	2021.9
38	Youhei Numata	東京大学	FAPbBr <sub>3</sub> perovskite solar cells with Voc over 1.5 V by controlled crystal growth using a tetramethylenesulfoxide	Journal of Materials Chemistry A 2022, 10, 672-681	2021.11
39	Shuzi Hayase	電気通信大学	Sn based and Pb free perovskite solar cells	Perovskite photovoltaics and optoelectronics (Wiley-VCH, Ed. Tsutomu Miyasaka, 2021) Chapter 10	2021.11
40	Liyuan Han	東京大学	Lead-free perovskite solar cells with over 10% efficiency and size 1cm <sup>2</sup> enabled by solvent - crystallization regulation in a two-step deposition method	ACS Energy Letters 2022, 7, 425-431	2021.12
41	Gaurav Kapil	電気通信大学	Tin-lead perovskite solar cells fabricated on hole selective monolayers	ACS Energy Letters 2022, 7, 966-974	2022.2
42	Shuzi Hayase	電気通信大学	Enhancing the electronic properties and stability of high-efficiency tin-lead mixed halide perovskite solar cells via doping engineering	Journal of Physical Chemistry Letters 2022, 13, 3130-3137	2022.3
43	Hiroshi Segawa	東京大学	Heterogeneous FASnI <sub>3</sub> absorber with enhanced electric field for high-performance lead-free perovskite solar cells	Nano-Micro Letters 2022, 14, 99	2022.4
44	Hiroshi Segawa	東京大学	In situ growth of graphene on both sides of a Cu-Ni alloy electrode for perovskite solar cells with improved stability	Nature Energy DOI:10.1038/s41560-022-01038-1	2022.5
45	Hiroshi Segawa	東京大学	The effect of chloride atoms to induce organohalide perovskite intermediate crystal phase: a simulation rationale	Applied Physics Express DOI:10.35848/1882-0786/ac7631	2022.6

46	Hiroshi Segawa	東京大学	Thermal stability of K-doped organometal halide perovskite for photovoltaic materials	ACS Applied Energy Materials DOI:10.1021/acs.aem.2c00225	2022. 6
47	Hiroshi Segawa	東京大学	Semi-transparent perovskite solar cells for four-terminal perovskite/CIGS tandem solar cells	ACS Applied Energy Materials DOI:10.1021/acs.aem.2c00620	2022. 7
48	Maxime Giteau	東京大学	Identification of surface and volume hot-carrier thermalization mechanisms in ultrathin GaAs layers	Journal of Applied Physics, vol. 128, 193102	2020 年 12 月
49	Maxime Giteau	東京大学	Optimizing the vertical position of quantum dots and wells to maximize light absorption	SPIE Proc. New Concepts in Solar & Thermal Radiation Conversion IV, 1182406	2021 年 8 月
50	岡田至崇	東京大学	Semiconductor quantum dot solar cells	Semiconductor Nanodevices, Frontiers of Nanoscience, vol. 20, 319	2021 年 10 月
51	Yun Xiao	東京大学	Emission Spectroscopy Investigation of the Enhancement of Carrier Collection Efficiency in AgBiS <sub>2</sub> -Nanocrystal/ZnO-Nanowire Heterojunction Solar Cells	ACS Applied Materials & Interfaces, vol. 14, 6994	2022 年 1 月
52	Maxime Giteau	東京大学	Resonant absorption for multilayer quantum well and quantum dot solar cells	Journal of Photonics for Energy, vol. 12, 22203	2022 年 3 月
53	曾我部東馬	電気通信大学	Experimental demonstration of energy transfer ratchet intermediate band solar cell	Communications Physics, Vol. 4 (1) pp. 1-10	2021 年 3 月
54	曾我部東馬	電気通信大学	Attention and Masking embedded Ensemble Reinforcement Learning for Smart Energy Optimization and Risk Evaluation under Uncertainties	Journal of Renewable and Sustainable Energy, doi.org/10.1063/5.0097344	2022 年 5 月
55	曾我部東馬	電気通信大学	Hydrodynamic and Energy Transport Model-Based Hot-Carrier Effect in GaAs pin Solar Cell	Electronic Materials, 3(2), 185-200	2022 年 5 月

56	大平 圭介	北陸先端科学 技術大学院大 学	Carrier lifetime measurement of perovskite films by differential microwave photoconductivity decay	Jpn. J. Appl. Phys. 61, 068001-1-5	2022 年 5 月
57	Dong Chung Nguyen	青山学院大学	Evaluation of annual performance for building- integrated photovoltaics based on 2-terminal perovskite/silicon tandem cells under realistic conditions	Energy Sci. Eng. 10 (2022) 1373-1383.	2022 年 4 月
58	Dong Chung Nguyen	青山学院大学	Annual output energy harvested by building- integrated photovoltaics based on 2-terminal perovskite/silicon tandem cells under realistic irradiation spectra	Sol. Ener. (accepted)	2022 年 6 月
59	関本健之	パナソニック (株)	Investigation of the Acceleration and Suppression of the Light- Induced Degradation of a Lead Halide Perovskite Solar Cell Using Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy	ACS Applied Energy Materials 5, 4125-4137	2022 年 3 月
60	H. Nishide	Waseda Unive rsity	Phenolic antioxidant- incorporated durable perovskite layers and their application for a solar cell	MRS Communications 10(2), 312-316	2020 年 7 月
61	Meita Asami	東京大学	Smooth Surface Morphology and Long Carrier Lifetime of InGaP Realized by Low- Temperature-Grown Cover Layer	Phys. Status Solidi B, 2100305	2021 年 11 月
62	Maui Hino	東京大学	Enhanced Radiative Efficiency of InGaAs/GaAsP Multiple Quantum Wells by Optimizing the Thickness of Interlayers	Phys. Status Solidi A, 2100426	2022 年 1 月
63	S.Suba Viveka	東京大学	Study of sub-band states formation in the optical band gap of CuGaS <sub>2</sub> thin films by electronic excitations	Journal of Physics and Chemistry of Solids, 110636	2022 年 2 月
64	Masafumi Yamaguchi	Toyota Techno logical Insti tute	Development of high- efficiency and low-cost solar cells for PV- powered	Progress in Photovoltaics, online	2020/9

			vehicles5application		
65	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Analysis for nonradiative recombination loss and radiation degradation of Si space solar cells	Progress in Photovoltaics 29:98-108	2020/9
66	Kazuhiro Gotoh	Nagoya University	Activation energy of hydrogen desorption from high-performance titanium oxide carrier-selective contacts with silicon oxide interlayers	Current Applied Physics 21 (2021) 36-42	2021/1
67	Kazuhiro Gotoh	Nagoya University	Passivation mechanism of the high-performance titanium oxide carrier-selective contacts on crystalline silicon studied by spectroscopic ellipsometry	Japanese Journal of Applied Physics 60 (2021) SBBF04	2021/1
68	Shinsuke Miyagawa	Nagoya University	Application of Bayesian optimization for improved passivation performance in TiO <sub>x</sub> /SiO <sub>y</sub> /c-Si heterostructure by hydrogen plasma treatment	Applied Physics Express 14 (2021) 025503	2021/1
69	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Defect analysis of crystalline Si solar cells by learning radiation-induced defects in Si	MRS Communications, 11, 3, 272-277	2021/5
70	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Importance of Developing Photovoltaics-Powered Vehicles	Energy and Power Engineering, 13, 5, 147-162	2021/5
71	Shinsuke Miyagawa	Nagoya University	Application of Bayesian optimization for high-performance TiO <sub>x</sub> /SiO <sub>y</sub> /c-Si passivating contact	Solar Energy Materials & Solar Cells	2021/6
72	Yuta Nakagawa	Nagoya University	Improved Performance of Titanium Oxide/Silicon Oxide Electron-Selective Contacts by Implementation of Magnesium Interlayers	Physica Status Solidi a	2021/6
73	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	(Perspective Review Paper) Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency	Journal of Applied Physics, 129, 240901	2021/6



74	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Development of High-Efficiency Solar Cell Modules for Photovoltaic-Powered Vehicles	Solar RRL, 2021, 2100429	2021/8
75	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	(Invited Paper) Analysis of temperature coefficients and their effect on efficiency of solar cell modules for photovoltaics-powered vehicles	Journal of Physics D: Applied Physics, 54, 504002	2021/9
76	Kazuhiro Gotoh	Nagoya University	Impact of chemically grown silicon oxide interlayers on the hydrogen distribution at hydrogenated amorphous silicon/crystalline silicon heterointerfaces	Applied Surface Science	2021/11
77	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Approaches for High-Efficiency III-V/Si Tandem Solar Cells	Energy and Power Engineering, 13, 413-427	2021/12
78	Ryohei Tsubata	Nagoya University	Silicon Nanocrystals Embedded in Nanolayered Silicon Oxide for Crystalline Silicon Solar Cells	ACS Applied Nano Materials	2022/1
79	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	(Progress Review Paper) Impact and recent approaches of high-efficiency solar cell modules for PV-powered vehicles	Japanese Journal of Applied Physics, 61, SC0802	2022/3
80	Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Loss Analysis of High-Efficiency Perovskite/Si Tandem Solar Cells for Large Market Applications	Energy and Power Engineering, 2022, 14, 167-180	2022/4
81	Yasuyuki Ota	University of Miyazaki	Evaluating the Output of a Car-Mounted Photovoltaic Module Under Driving Conditions	IEEE Journal of Photovoltaics, 1299-1304	2021.6
82	Yasuyuki Ota	University of Miyazaki	Curve correction of vehicle-integrated photovoltaics using statistics on commercial car bodies	Progress in Photovoltaics, 152-163	2022.2
83	太野垣健	産業技術総合研究所	Impact of Loading Topology and Current Mismatch on Current-Voltage Curves of Three-Terminal Tandem Solar	Solar Energy Materials and Solar Cells, 221, 110901	2021年3月

			Cells with Interdigitated Back Contacts		
84	庄司靖	産業技術総合研究所	Pd-mediated mechanical stack of III-V solar cells fabricated via hydride vapor phase epitaxy	Solar Energy, 224, pp. 142-148	2021年8月
85	牧田紀久夫	産業技術総合研究所	III-V// CuIn <sub>(1-y)</sub> Ga <sub>y</sub> Se <sub>2</sub> multijunction solar cells with 27.2% efficiency fabricated using modified smart stack technology with Pd nanoparticle array and adhesive material	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 29(8), pp. 887-898	2021年8月
86	庄司靖	産業技術総合研究所	InGaP/GaAs dual-junction solar cells with AlInGaP passivation layer grown by hydride vapor phase epitaxy	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 29(12), pp. 1285-1293	2021年12月
87	牧田紀久夫	産業技術総合研究所	GaAs//CuIn <sub>(1-y)</sub> Ga <sub>y</sub> Se <sub>2</sub> Three-Junction Solar Cells With 28.06% Efficiency Fabricated Using a Bonding Technique Involving Pd Nanoparticles and an Adhesive	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, 12(2), pp. 639-645	2022年3月
88	水野英範	産業技術総合研究所	Integration of Si Heterojunction Solar Cells with III-V Solar Cells by the Pd Nanoparticle Array-Mediated "Smart Stack" Approach	ACS Applied Materials & Interfaces, 14(9), pp. 11322-11329	2022年3月
89	Takeshi Tayagaki	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Comparative study of power generation in curved photovoltaic modules of series- and parallel-connected solar cells	IEEE J. Photovolt. 11, (3) 708-714	2021/3/9
90	Yoshihiro Hishikawa	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Precise performance diagnosis of photovoltaic string by operation voltage and current: Experimental verification	Solar Energy 230, 704-713	2021/10/30

91	Takeshi Tayagaki	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Simulation of diffuse irradiance impact on energy yield of curved photovoltaic modules using climatic datasets	IEEE J. Photovolt. 12, (2) 526-532	2022/1/25
92	菱川善博	産業技術総合研究所	Imp, Vmp 常時監視による PV 性能評価・動作診断技術	J. Jpn. Solar Energy Society (太陽エネルギー) 48, (3) 45-50	2022/5/31
93	T. Takamatsu	産業技術総合研究所	Support Vector Quantile Regression for the Post-Processing of Meso-Scale Ensemble Prediction System Data in the Kanto Region: Solar Power Forecast Reducing Overestimation	Energies, Vol. 15, No. 4, 1330.	2022年2月
94	河本 桂一	みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)	IEA PVPS Task17 : PV and Transport (運輸部門における太陽光発電)	Journal of Japan Solar Energy Society, Page 40-46, Vol. 47 No. 4 (通巻 264号), 2021	2021年7月
95	河本 桂一	みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社	IEA PVPS Task12 : PV Sustainability Activities (太陽光発電の持続可能性)	Journal of Japan Solar Energy Society, Page 14-19, Vol. 47 No. 4 (通巻 264号), 2021	2021年7月
96	貝塚 泉	株資源総合システム	Task1 : 太陽光発電に関する戦略的分析と普及	Vol. 47 No. 4 (Serial No. 264) 2021, Journal of Japan Solar Energy Society	2021年8月

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	掲載年月
1	産業技術総合研究所	変換効率 18.6%達成 CIS 系太陽電池 フレキシ基板上に作製 産総研・トヨタ	日刊工業新聞	2021年6月1日
2	産業技術総合研究所	CIS 系太陽電池ミニモジュール 世界最高の光電変換効率 産総研・トヨタと開発	日刊産業新聞	2021年6月1日
3	産業技術総合研究所	産総研トヨタ CIS 系太陽電池モジュール 変換効率、世界最高に	電気新聞	2021年6月2日
4	産業技術総合研究所	軽量フレキシブルな太陽電池 世界最高の光電変換効率達成 産総研とトヨタ	鉄鋼新聞	2021年6月7日
5	産業技術総合研究所	産総研トヨタ CIS 系 PV モジュール開発 曲面部でも高変換効率 自動車ボディへの適用も	化学工業日報	2021年6月3日
6	産業技術総合研究所	世界最高の変換効率 18.6%、 産総研とトヨタが「曲がる」 CIS 系太陽電池で達成	Yahoo!ニュース	2021年6月2日
7	シャープ株式会社	シャープ ペロブスカイト太陽電池開発本格化 実用サイズの製品目指す	電波新聞	2022/6/17
8	株式会社エネコテクノロジーズ	ENEOS や三菱ケミカル、スタートアップが導く脱炭素	日経ビジネスダイアリー	2020.12
9	株式会社エネコテクノロジーズ	カーテンで発電する日 「緑のエネ」新秩序の礎 第4の革命 カーボンゼロ (3)	日本経済新聞	2021.1
10	株式会社エネコテクノロジーズ	京大発「ディープテック」企業、脱炭素で頭角現す	日本経済新聞	2021.3
11	株式会社エネコテクノロジーズ	脱炭素時代、輝く英知 関西企業の技術が光る	日本経済新聞	2021.6
12	京都大学	フィルム型太陽電池 実用化へ 京大など連携体設立	日刊工業新聞	2020/11
13	京都大学	「塗って作れる」太陽電池でサステナブルな未来を拓く	AERA dot.	2021/1
14	京都大学、東	東京化成、ペロブスカイト太陽電池の安定性高めるホール	化学工業日報 Web 版, 誌面版	2021/1

	京化成工業	輸送材発売、添加剤不要		
15	京都大学	研究ハイライト「塗って作製できる、軽くて曲がるフィルム型太陽電池」	黄檗 No.54 2021年2月号	2021/2
16	京都大学	京大発「ディープテック」企業、脱炭素で頭角現す	日本経済新聞	2021/3
17	京都大学	第53回市村地球環境学術賞貢献賞	市村清新技術財団HP	2021/3
18	京都大学	第53回市村賞	日本経済新聞、30ページ(全面広告)	2021/4
19	京都大学	世界の電力変える街ナカ発電	TBSテレビ、あさチャン！ (SDGsな未来へここスゴッ! 発明コーナー)	2021/6
20	京都大学	塗って作って曲げられるペロブスカイト太陽電池	TOYRO BUSINESS 2021年7月号	2021/6
21	京都大学	坂田薫の「SCINECE NEWS」 presented by #8bitNews #2 京都大学化学研究所教授 若宮淳志博士と考える 日本発の次世代太陽電池!	8bitNews 〈Jun Hori〉 You Tube	2021/7
22	京都大学	塗って作れる太陽電池? 常識を変える「ペロブスカイト型太陽電池」とは	BUSINESS INSIDER、 <a href="https://www.businessinsider.jp/post-242493">https://www.businessinsider.jp/post-242493</a>	2021/9
23	京都大学	安い! 軽い! ペロブスカイト太陽電池はここがスゴイ!	SAKISIRU 坂田薫『コテコテ文系も楽しく学ぼう! 化学教室』第13回	2021/9
24	京都大学	期待されるのは“どこでも発電” 薄くて、軽くて、曲がる「ペロブスカイト太陽電池」	化学と工業 Vol.74-12 December 2021	2021/12
25	京都大学	塗って作る!? ペロブスカイト太陽電池『東芝が世界最高を達成、次世代太陽電池「ペロブスカイト」のエネルギー変換効率15.1%に』	「家飲みビール」はなぜ美味しくなったのか? コテコテ文系も学べる日本発の『最先端技術』(ワニブックスPLUS新書)	2021/12
26	京都大学	社会のじかん 2015年→2030年 ゴールまでの折り返しで考える、これからのSDGs。「知るから、行動へ!」	an an ASIN: B09VXWQYXG 出版社: マガジンハウス; 週刊版 (2022/3/23)	2022/3
27	京都大学	Samco-Interview	Samco NOW	2022/4
28	京都大学	塗ってつくる日本発の次世代太陽電池 ペロブスカイト太陽電池	milsil (ミルシル) 87号	2022/5
29	京都大学	環境負荷低い次世代型太陽電池を開発 24年に量産へ	日本経済新聞 Web版	2022/5
30	(株)東芝	フィルム型ペロブスカイト太陽電池の効率向上	日本経済新聞	2021年9月
31	(株)東芝	エネルギー効率15%達成	日刊工業新聞	2021年9月
32	(株)東芝	「どこでも太陽光発電」近く 東芝がフィルム型開発	毎日新聞	2021年9月

33	(株)東芝	東芝の逆襲：ペロブスカイト太陽電池	週刊エコノミスト	2021年11月
34	(株)東芝	気候変動 vs 建築	日経アーキテクチュア	2022年1月
35	(株)東芝	太陽光発電の最新動向	雑誌 JETI	2022年4月
36	(株)東芝	ペロブスカイト太陽電池の可能性	Pveye	2022年5月
37	(株)東芝	モジュール写真掲載	Newton 別冊地球温暖化の教科書	2022年5月
38	産業技術総合研究所	「宇賀なつみの そこ教えて」・起こせ！イノベーション！目指せ！CO2 排出ゼロ！	BS-TBS	2020年8月
39	産業技術総合研究所	Innovation Leading to a Green Future	官邸国際広報室, YouTube	2021年1月
40	産業技術総合研究所	CHANGE YOUR LIFE ～あなたのくらしを変えたもの～	テレビ朝日	2021年2月
41	東京大学	次世代太陽電池「ペロブスカイト」、脱炭素へ期待	日本経済新聞・11面	2020.12
42	東京大学	第4の革命 カーボンゼロ(3) カーテンで発電する日 「緑のエネ」新秩序の礎	日本経済新聞・1面	2021.1
43	東京大学	科学「再生可能エネルギーの切り札 薄型太陽電池 どこでも発電」	神戸新聞 2021年4月10日	2021.4
44	東京大学	科学「発電 ビルの壁でも 車体でも」	信濃毎日新聞 2021年4月19日 朝刊	2021.4
45	東京大学	科学「薄く軽量、再エネの切り札 次世代型の太陽電池壁や車体 どこでも発電」	中部経済新聞 2021年4月19日 朝刊	2021.4
46	東京大学	科学スコープ「次世代型の太陽電池 壁や車体どこでも発電」	山陰中央新報 2021年4月26日 朝刊	2021.4
47	東京大学	教養「次世代型の太陽電池壁や車体、どこでも発電」	福島民報 2021年4月27日 朝刊	2021.4
48	東京大学	科学「太陽電池 薄く軽くどこでも発電」	河北新報 2021年5月1日 朝刊	2021.5
49	東京大学	科学スコープ「フィルム型太陽電池開発へ」	京都新聞 2021年5月19日 夕刊	2021.5
50	東京大学	「フィルム型太陽電池 ビルの壁面や車体でも発電」	岐阜新聞 2021年5月29日 朝刊	2021.5
51	東京大学	科学「次世代型の太陽電池壁や車体 どこでも発電」	静岡新聞 2021年6月7日 朝刊	2021.6
52	東京大学	GLOBAL AGENDA「The Race to Zero Emissions: Decarbonizing the World」	NHK 国際放送 <a href="https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/ondemand/video/2047062/">https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/ondemand/video/2047062/</a>	2021.6
53	東京大学	脱炭素社会実現の切り札は“ペロブスカイト太陽電池”	Rizm 8月号	2021.8
54	東京大学	「コスト半減の太陽電池 量産」	日本経済新聞 2021年9月3日 朝刊	2021.9

55	東京大 学	コスト半減、どこでも貼れる 新太陽電池 初の量産	日経電子版 <a href="https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUF303RU0Q1A730C2000000/">https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUF303RU0Q1A730C2000000/</a>	2021.9
56	東京大 学	「街を丸ごと発電所」に	電波新聞 2021年10月15日	2021.10
57	東京大 学	先端技術「ペロブスカイト型 太陽電池でノーベル賞候補」 桐蔭横浜大学 宮坂 力 特任教授	電波新聞 2021年10月22日	2021.10
58	東京大 学	次世代ペロブスカイト太陽電池、 2023年に実用化か〜低コスト化、 発電効率向上へ	NetIB-News <a href="https://www.data-max.co.jp/article/44140">https://www.data-max.co.jp/article/44140</a>	2021.10
59	東京大 学	都市全体が発電所に!?! 超薄型・ 超軽量の太陽電池	TV朝日「スーパーJチャンネル」内 ANN NEWS <a href="https://youtu.be/uf0hLVWpThg">https://youtu.be/uf0hLVWpThg</a>	2021.10
60	東京大 学	ペロブスカイト型太陽電池 「企業の本格投資が重要」	日経産業新聞 2022年2月2日 /日経電子版 <a href="https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC24B450U2A120C2000000/">https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC24B450U2A120C2000000/</a>	2022.2
61	東京大 学	ペロブスカイト太陽電池が量産 大面積化では国内企業が リード	日経エレクトロニクス 2022年2月号 p.74-87	2022.2
62	東京大 学	“日の丸太陽電池”復活の切り札 ペロブスカイト太陽電池の可能性	PVeye 2022年5月号 p.32-34	2022.4
63	東京大 学	もう中学生が体験 未来の太陽 光電池	日本テレビ「スッキリ」2022年5月 22日放送 <a href="https://tver.jp/episodes/ep6nxw3fm5?utm_campaign=ep6nxw3fm5&amp;utm_medium=web_lp">https://tver.jp/episodes/ep6nxw3fm5?utm_campaign=ep6nxw3fm5&amp;utm_medium=web_lp</a>	2022.5
64	東京大 学	次世代太陽電池実用化へ一歩、 東大が希少金属使わない 「ペロブスカイト」で高耐久性を 実証	ニュースイッチ <a href="https://newswitch.jp/p/32664">https://newswitch.jp/p/32664</a>	2022.6
65	東京大 学	東大、変換効率 26.2%のペロブ スカイト/CIGS タンデム太陽電池 を実現	日経電子版 <a href="https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP636311_S2A710C2000000/">https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP636311_S2A710C2000000/</a>	2022.7
66	東京大 学	東大、ペロブスカイト/CIGS 太陽 電池で 26.2%達成	オプトロニクスオンライン <a href="https://optronics-media.com/news/20220712/77907/">https://optronics-media.com/news/20220712/77907/</a>	2022.7
67	東京大 学	東大、タンデム太陽電池で世界 最高の変換効率を達成	MITテクノロジーレビュー <a href="https://www.technologyreview.jp/n/2022/07/12/280583/">https://www.technologyreview.jp/n/2022/07/12/280583/</a>	2022.7
68	東京大 学	変換効率 26.2%のペロブスカ イト/CIGS タンデム太陽電池 を作製—電動航空機や EV、ド ローンなどでの実用化に寄与 東大	fabcross <a href="https://engineer.fabcross.jp/archive/220713_tokyo_u.html">https://engineer.fabcross.jp/archive/220713_tokyo_u.html</a>	2022.7
69	東京大 学	東大、ペロブスカイト/CIGS の タンデム太陽電池で変換効率 26.2%を達成	マイナビニュース <a href="https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220713-2397575/">https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220713-2397575/</a>	2022.7

70	東京大学	東大、ペロブスカイト/CIGS のタンデム太陽電池で変換効率 26.2%を達成	エキサイトニュース <a href="https://www.excite.co.jp/news/article/Cobs_2445597/">https://www.excite.co.jp/news/article/Cobs_2445597/</a>	2022.7
71	東京大学	東大が太陽電池で成果、「ペロブスカイト+CIGS」で変換効率 26.2%	日経 BP・メガソーラービジネス <a href="https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/news/00001/02677/">https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/news/00001/02677/</a>	2022.7
72	東京大学	薄く軽い太陽電池で効率 26% 東大、「タンデム型」改良	日本経済新聞・電子版 <a href="https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC139QNOT10C22A7000000/">https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC139QNOT10C22A7000000/</a>	2022.7
73	東京大学	次世代太陽電池の本命…日本発「ペロブスカイト」、激化する開発競争の現在地	ニュースイッチ <a href="https://newswitch.jp/p/32928">https://newswitch.jp/p/32928</a>	2022.7
74	電気通信大学	電通大、中間バンド太陽電池、希土類を用い2段階光吸収に成功	化学工業日報	2021年4月
75	電気通信大学	AI モデルの「過学習」抑制 量子機械学習で世界初	日刊工業新聞	2021年7月
76	電気通信大学	グリッド×電通大、量子インスパイア型開発 機械学習アルゴリズム	日刊工業新聞	2021年12月
77	パナソニック(株)	ペロブスカイト太陽電池の光劣化メカニズムの解析	公益財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) ホームページ	2022年1月
78	名古屋大学, 東京大学	名大ら、導電性の高い酸化シリコン保護膜を実現	オプトエレクトロニクスオンライン	2022/1/31
79	名古屋大学, 東京大学	ナノ結晶を電子の通り道とする酸化シリコン保護膜を実現～次世代シリコン系太陽電池の開発に期待～	日本の研究.com	2022/1/31
80	名古屋大学, 東京大学	電子通ししつつ表面保護 次世代太陽電池に提案	日刊工業新聞	2022/2/3
81	名古屋大学, 東京大学	Scientists fabricate novel electrical component to improve stability of solar cells	TecXplore	2022/3/11
82	名古屋大学, 東京大学	Novel electrical component improves stability of solar cells	nanowerk	2022/3/11
83	名古屋大学, 東京大学	Scientists fabricate novel electrical component to improve stability of solar cells	AlphaGalileo	2022/3/11
84	名古屋大学, 東京大学	Scientists fabricate novel electrical component to improve stability of solar cells	SOLAR DAILY	2022/3/13



85	名古屋大学, 東京大学	New Type of Electrical Contact can Improve Stability of Solar Cells	AZO Optics	2022/3/14
86	名古屋大学, 東京大学	Study Explores Relationship Between Passivation and Conductivity of Electrical Contact in Solar Cells	AZO Materials	2022/3/14
87	名古屋大学, 東京大学	Un composant électrique pour améliorer la stabilité des cellules solaires	Energine	2022/3/31
88	産業技術総合研究所	宇宙太陽電池を地上用に 高効率・低コストで車載化	日刊工業新聞	2020年11月
89	産業技術総合研究所	III-V 族化合物半導体太陽電池の現状と低コスト化による将来展望 - 超高効率太陽電池でゼロエミッション社会に貢献 -	応用物理学会 特別 Web コラム GX: グリーントランスフォーメーションに挑む応用物理	2021年11月
90	産業技術総合研究所	産総研ゼロエミッション国際共同研究センター (GZR) と光技術 多接合太陽電池研究チーム	Optronics 連載シリーズ	2021年11月
91	ソーラーフロンティア株式会社	ソーラーフロンティア、太陽電池リサイクル実証へ	石油通信	2020年8月
92	出光興産株式会社	フィルム型太陽電池モジュール 出光、1/3 に軽量化	日刊工業新聞	2020年8月
93	出光興産株式会社	さいたま市とゼロカーボンシティ実現に向けた共創推進の連携協定を締結	日本経済新聞電子版	2021年6月
94	ソーラーフロンティア株式会社	丸紅、中古太陽光パネルを流通 性能証明で取引しやすく	日本経済新聞	2021年8月
95	出光興産株式会社	脱炭素推進とセットで考えたい、低環境負荷の太陽光パネルリサイクル技術開発	MONOist	2021年10月
96	ソーラーフロンティア株式会社	太陽光パネル再利用 30年代見据え技術開発	日経産業新聞	2021年11月

97	ソーラードット株式会社	出光系、太陽光パネル再資源化へ	産経新聞	2021年12月
98	ソーラードット株式会社	太陽光パネルの大量廃棄、各社リサイクル目指し研究開発	産廃メディア	2022年1月
99	ソーラードット株式会社	【記者の眼】“太陽光パネル大量廃棄問題”は技術で解決可能	日経クロステック	2022年1月
100	ソーラードット株式会社	太陽光パネル、迫る大量廃棄2030年代に寿命ピーク、リサイクル態勢急務	朝日新聞 DIGITAL、朝日新聞	2022年2月
101	ソーラードット株式会社	太陽光パネル廃棄問題、技術で解決	日経産業新聞	2022年3月
102	産業技術総合研究所	研究グループ紹介：国立研究開発法人産業技術総合研究所再生可能エネルギー研究センター太陽光評価・標準チーム	電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌)	2021/8/1
103	長岡技術科学大学	曲面へ適用可能な太陽電池モジュールの開発	応用物理 91 巻 5 号 p. 285-289 (2022)	2022.5
104	(株)資源総合システム	世界における太陽光発電の動向	太陽光発電協会「光発電」	2020年6月
105	(株)資源総合システム	世界における太陽光発電の動向	太陽光発電協会「光発電」	2021年7月

【自機関からのニュースリリース・プレス発表】

番号	所属	タイトル・リンク先	発表形態	発表年月
1	産業技術総合研究所	高効率な軽量フレキシブル CIS 系太陽電池ミニモジュールを開発	プレスリリース	2021. 5. 31
2	シャープ株式会社	呉 CEO 記者懇談会・呉 CEO 記者懇談会を開催しました - SHARP for Family <a href="https://blog.sharp.co.jp/family/release/2022/04/13/5851/">https://blog.sharp.co.jp/family/release/2022/04/13/5851/</a>	メディア向け記者懇談会	2022/4/12
3	京都大学	ペロブスカイト太陽電池の常温熟成機構の解明	京都大学 HP	2021/2
4	京都大学	若宮淳志教授、金光義彦教授が第 53 回市村地球環境学術賞 貢献賞を受賞	京都大学化学研究所 HP	2021/4
5	京都大学	すぐわかる塗ってつくれる太陽電池の開発研究 ～ペロブスカイト太陽電池研究最前線～	国立大学共同利用・共同研究拠点 協議会 YouTube	2021/6
6	京都大学	Sn-Pb ペロブスカイト半導体で 7 $\mu$ s を超えるキャリア寿命を実現：光電変換効率>21%の太陽電池の作製	京都大学化学研究所 HP	2021/10
7	京都大学	スズを含むペロブスカイト太陽電池：23.6%の世界最高効率を達成—ペロブスカイト薄膜の上下表面構造修飾法を開発—	京都大学 HP	2022/5
8	(株)東芝	世界最高のエネルギー変換効率 15.1%を実現したフィルム型ペロブスカイト太陽電池を開発	ニュースリリース	2021 年 9 月
9	京都大学大学院工学系研究科	ペロブスカイト太陽電池の常温熟成機構の解明	京都大学 HP 「最新の研究成果を知る」	2021 年 2 月
10	積水化学工業株式会社	記者向けオンライン説明会	オンライン	21/11/11
11	東京大学	ペロブスカイト太陽電池用の希少金属を使わないカリウムドーピングペロブスカイトの高耐久性を実証	プレスリリース	2022. 6
12	東京大学	変換効率 26.2%のペロブスカイト/CIGS タンデム太陽電池を実現 <a href="https://www.c.u-tokyo.ac.jp/info/news/topics/20220712140000.html">https://www.c.u-tokyo.ac.jp/info/news/topics/20220712140000.html</a>	プレスリリース WEB 発表	2022. 7
13	電気通信大学	希土類添加半導体のエネルギー移動機構を利用したラチェット型中間バンド太陽電池の光制御に世界ではじめて成功！～脱炭素に向けた次世代エネルギー変換技術に新たな道～ <a href="https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2021/20210301_3151.html">https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2021/20210301_3151.html</a>	ニュースリリース	2021 年 3 月
14	電気通信大学	量子（回路 or 機械）学習の VC 次元をはじめて確立、過学習しにくいことを検証 世界的な権威である ACM 学会発刊量子コンピューティング雑誌に論文掲載 <a href="https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2021/20210726_3571.html">https://www.uec.ac.jp/news/announcement/2021/20210726_3571.html</a>	ニュースリリース	2021 年 7 月

15	シャープ(株)	実用サイズの軽量かつフレキシブルな太陽電池モジュールで世界最高の変換効率32.65%を達成	ニュースリリース (Web ページ)	2022年6月
16	名古屋大学, 東京大学	”ナノ結晶を電子の通り道とする酸化シリコン保護膜を実現 ~次世代シリコン系太陽電池の開発に期待~”	”名古屋大学 HP / 東京大学 HP プレス発表”	2022/1/28
17	出光興産株式会社	さいたま市とゼロカーボンシティ実現に向けた共創推進の連携協定を締結	Web	2021年8月
18	ソーラーフロンティア株式会社	出光興産とソーラーフロンティア、「脱炭素経営 EXPO」で ESG 経営を推進する企業様向けソリューションをご紹介	Web	2021年9月
19	ソーラーフロンティア株式会社	ソーラーフロンティア株式会社の事業構造改革について	Web	2021年10月
20	出光興産株式会社	ソーラーパネルリサイクル (出光統合レポート 2021)	Web、雑誌	2021年10月
21	出光興産株式会社	ソーラーパネルリサイクル (出光サステナビリティレポート 2021)	Web、雑誌	2021年11月

【展示会への出展】

番号	所属	タイトル	展示会名	開催年月
1	(株)東芝	東芝の新型太陽電池	CEATEC 2021	2021年10月
2	(株)東芝	東芝の新型太陽電池	COP26 ヴァーチャルパビリオン	2021年11月
3	産業技術総合研究所	2050年カーボンニュートラルの実現に向けて	第16回再生可能エネルギー世界展示会&フォーラム	2022年1月
4	産業技術総合研究所	超精密成形技術を駆使した表面機能の制御	第6回セラミックスジャパン(高機能セラミックス展)	2021年12月
5	産業技術総合研究所	超精密成形技術を駆使した表面機能の制御	第21回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議	2022年1月
6	(株)カネカ	NEDOブースで壁面設置型太陽電池モジュールの展示	第16回再生可能エネルギー世界展示会&フォーラム	2022年1月
7	パナソニック(株)	NEDOブースでのペロブスカイト太陽電池モジュールの展示	再生可能エネルギー世界展示会2022	2022年1月
8	パナソニック(株)	パナソニックブースでのオンライン展示	CES2022	2022年1月
9	早稲田大学先進理工学院	BIPV用ペロブスカイト太陽電池の開発	早稲田オープンイノベーションフォーラム WOI'21	2021年3月
10	早稲田大学先進理工学院	創エネ・省エネに向けた機能性ポリマーの開発	早稲田オープンイノベーションフォーラム WOI'22	2022年3月
11	シャープ(株)	化合物3接合太陽電池モジュール(展示)	第16回再生可能エネルギー世界展示会&フォーラム	2022年1月
12	名古屋大学	名古屋大学 宇佐美・黒川研究室	第16回再生可能エネルギー世界展示会	2022/1/26-28
13	産業技術総合研究所	3. 限られた面積で発電量を最大化する超高効率太陽電池	第16回再生可能エネルギー世界展示会&フォーラム ポスター展示	2022年1月

14	山形大学	ペロブスカイト太陽電池	スマートエネルギーWeek2022 国際太陽光発電展 (PV EXPO 2022)	2022/3/16
15	ソーラー フロンティア株式会社	太陽光パネルのリサイクル技術開発	脱炭素経営 EXPO	2021年9月
16	ソーラー フロンティア株式会社	太陽光パネルのリサイクル技術開発	たけでんソリューションフェア	2022年6月

【受賞実績】

番号	所属	受賞内容	受賞者	受賞年月
1	産業技術総合研究所	文部科学大臣表彰 科学技術賞（研究部門） 「化合物薄膜太陽電池の高効率化と軽量化に関する研究」	石塚尚吾	2022年4月
2	京都大学	第25回京大化研奨励賞	中村 智也	2020/12
3	京都大学	第38回学術賞（日本化学会）	若宮淳志	2021/3
4	京都大学	第53回 市村地球環境学術賞（市村清新技術財団）	若宮淳志	2021/4
5	京都大学	第18回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（第1回日本太陽光発電学会学術講演会）Innovative PV 奨励賞	Shuafeng Hu	2021/11
6	京都大学	第18回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（第1回日本太陽光発電学会学術講演会）Innovative PV 奨励賞	チョン ミンア ン	2021/11
7	京都大学	文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門	若宮淳志	2022/4
8	(株)東芝	CEATEC AWARD 2021 経済産業大臣賞・カーボンニュートラル部門グランプリ受賞	(株)東芝	2021年10月
9	(株)東芝	第69回 電気科学技術奨励賞	都鳥颯司、大岡青日、森茂彦	2021年10月
10	東京大学	2022 Rank Prize (for the discovery and development of all-solid-state perovskite semiconductor solar cells)	Tsutomu Miyasaka	2021.9
11	(株)カネカ 大成建設 (株)	2021年度グッドデザイン賞（太陽光発電ガラス[T-Green® Multi Solar]） 受賞番号（21G090903）	(株)カネカ 大成建設 (株)	2021年10月
12	パナソニック株式会社	日本太陽光発電学会 イノベティブPV賞	樋口洋	2020年10月
13	早稲田大学 先進理工学院	「化学酸化重合によるジチエニル共役ポリマーの合成とペロブスカイト太陽電池への適用」 第11回 CSJ 化学フェスタ, 優秀ポスター賞	福島 光悠	2021年10月
14	シャープ(株)	化合物半導体三接合型超高効率太陽電池に関する研究開発と産業への貢献	化合物三接合型太陽電池開発チーム一同 代表 高本 達也	2021年3月
15	東京大学	EU PVSEC 2020においてStudent Awardを受賞	Meita Asami	2020年9月
16	東京大学	第68回応用物理学会春季学術講演会において講演奨励賞を受賞	横田莉子	2021年3月
17	東京大学	第69回応用物理学会春季学術講演会において講演奨励賞を受賞	Gan Li	2022年3月
18	名古屋大学	永井科学技術財団賞（奨励賞）	黒川康良	2021/3/16

19	Nogoya University	PVSEC-31 Poster Award	Yuto Kimata	2021/12/15
20	産業技術総合研究所	HVPE 法による Al 系材料の成長と III-V 族化合物太陽電池への応用, 日本太陽光発電学会 Innovative PV 奨励賞	庄司 靖	2020 年 10 月
21	産業技術総合研究所	HVPE 法における AlInGaP の成膜と InGaP セルの高効率化	庄司 靖	2021 年 3 月
22	産業技術総合研究所	HVPE 法による低コスト・高効率 III-V タンデムセルの開発, 日本太陽光発電学会 Innovative PV 賞	庄司 靖	2021 年 10 月
23	産業技術総合研究所	「脱炭素社会に向けた移動体用太陽電池の低コスト製造技術の開発」エヌエフ基金研究開発奨励賞	庄司 靖	2021 年 11 月
24	国立大学法人北海道国立大学機構 北見工業大学	2022 年度資源・素材学会北海道支部において、若手優秀講演賞を受賞	三浦直己	2022/6