

「高性能・高信頼性太陽光発電の
発電コスト低減技術開発」

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	iv
プロジェクト用語集	viii
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. 評価に関する事項	II-4 [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) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の技術開発	
.....	III-2-(イ) [1]
A 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発(株式会社カネカ、 産業技術総合研究所(再)、京都大学(再)、東京工業大学(再))	III-2-(イ)-A [1]
B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発(シャープ株式会社)	
.....	III-2-(イ)-B [1]
C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発(京セラ株式会社)	
.....	III-2-(イ)-C [1]
D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発(ナミックス株式会社)	
.....	III-2-(イ)-D [1]
E 赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発(株式会社クリスタルシステム)	
.....	III-2-(イ)-E [1]
F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築(コマツ NTC 株式会社)	
.....	III-2-(イ)-F [1]

- G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御(株式会社トクヤマ)
 III-2-(イ)-G [1]
- H CIS太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発(ソーラーフロンティア株式会社)
 III-2-(イ)-H [1]
- (ロ)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
 (東京大学、タカノ株式会社(再)、埼玉大学(再)、シャープ株式会社、
 パナソニック株式会社、産業技術総合研究所、豊田工業大学、大阪市立大学(再)、
 九州大学(再)、大陽日酸株式会社、電気通信大学、神戸大学、名古屋大学、
 名城大学、宮崎大学、東京農工大学) III-2-(ロ)[1]
- (ハ)革新的新構造太陽電池の研究開発／ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発
 III-2-(ハ)[1]
- A 塗布製造技術の開発(パナソニック株式会社)
 III-2-(ハ)-A [1]
- B 超軽量太陽電池モジュール技術の開発(株式会社東芝)
 III-2-(ハ)-B [1]
- C 低コストR2R太陽電池製造技術の開発(積水化学工業株式会社)
 III-2-(ハ)-C [1]
- D 高性能・高信頼性確保製造技術の開発(アイシン精機株式会社、
 株式会社アイシン・コスモス研究所(再)) III-2-(ハ)-D [1]
- E 高性能材料合成技術の開発(富士フイルム株式会社)
 III-2-(ハ)-E [1]
- F 基盤材料技術と性能評価技術の開発(早稲田大学、物質・材料研究開発機構(再)、
 神奈川県立産業技術総合研究所(再)) III-2-(ハ)-F [1]
- G 新素材と新構造による高性能化技術の開発(東京大学、産業技術総合研究所(再)、
 九州工業大学(再)、東京工業大学(再)、京都大学(再)、兵庫県立大学(再)、
 熊本大学(再)) III-2-(ハ)-G [1]
- (二)太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発
 III-2-(二)[1]
- A 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発
 (豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学)
 III-2-(二)-A [1]
- B 薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発(産業技術総合研究所)
 III-2-(二)-B [1]
- C Cat-CVD など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発
 (北陸先端科学技術大学院大学) III-2-(二)-C [1]
- D CIS 太陽電池高性能化技術の研究開発(産業技術総合研究所、東京工業大学、
 立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学) III-2-(二)-D [1]

(ホ) 共通基盤技術の開発(太陽光発電システムの信頼性評価技術等)	.....	Ⅲ-2-(ホ)[1]
A 太陽電池性能高度評価技術の開発(産業技術総合研究所、電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、東京理科大学、立命館)	.....	Ⅲ-2-(ホ)-A [1]
B 太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発(産業技術総合研究所、デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社、東レ株式会社、石川県工業試験場、岐阜大学、東京農工大学、北陸先端科学技術大学院大学、東京理科大学)	.....	Ⅲ-2-(ホ)-B [1]
C 太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発(産業技術総合研究所、電力中央研究所、日本気象協会、佐賀大学)	.....	Ⅲ-2-(ホ)-C [1]
D ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発(株式会社カネカ)	.....	Ⅲ-2-(ホ)-D [1]
E レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発(日清紡メカトロニクス株式会社、奈良先端科学技術大学院大学)	.....	Ⅲ-2-(ホ)-E [1]
(ヘ) 動向調査等	.....	Ⅲ-2-(ヘ)[1]
A 太陽光発電開発戦略に関する動向調査(みずほ情報総研株式会社)	.....	Ⅲ-2-(ヘ)-A [1]
B 発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査(株式会社資源総合システム)	.....	Ⅲ-2-(ヘ)-B [1]
C IEA PVPS 国際協力事業(株式会社資源総合システム)	.....	Ⅲ-2-(ヘ)-C [1]

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価関連資料(事前評価書)

概要

最終更新日

平成 29 年 10 月 13 日

プロジェクト名	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	プロジェクト番号	P15003				
担当推進部	PM 新エネルギー部 山田 宏之(2017年9月現在) SPM 新エネルギー部 佐藤 剛彦(2017年9月現在) PT 新エネルギー部 三宅 良英(2017年9月現在) PT 新エネルギー部 加藤 研一(2017年9月現在) PT 新エネルギー部 保田 淑晴(2017年9月現在) PT 新エネルギー部 竿本 仁志(2015年4月～2017年3月) PT 新エネルギー部 小田 和彦(2015年4月～2016年6月) PT 新エネルギー部 豊田 富美穂(2015年4月～2017年3月) PT 新エネルギー部 佐々木 崇水(2015年4月～2017年6月)						
0. 事業の概要	本プロジェクトでは、太陽光発電開発戦略(以下「開発戦略」と言う)で掲げる発電コスト低減目標達成(2030年までに7円/kWhの実現)に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を行う。具体的には結晶シリコン太陽電池、CIS太陽電池、Ⅲ-V化合物太陽電池、ペロブスカイト太陽電池などの開発に加え、太陽電池の共通基盤技術や開発動向調査を行う。						
I. 事業の位置付け・必要性について	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。そのためには引き続き発電コストの低減を進め、太陽光発電産業の発展につなげることが必要である。一方で、発電コストが高い等の課題も指摘され、更なる技術革新が必要とされている。また、固定価格買取制度の効果で国内市場は急拡大しているが、今後、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に進めば、賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれるとの指摘もある。将来の国民負担を軽減するためには、発電コストの低減は重要な課題である。こうした状況を踏まえ、NEDOは2014年9月に「太陽光発電開発戦略」を策定し、発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh(グリッドパリティ)、2030年に従来型火力発電の発電コスト並みあるいはそれ以下に相当する7円/kWh(ジェネレーションパリティ)を掲げた。また、開発戦略では、その目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。NEDOは開発戦略の柱となる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指し、2015年から5年間のプロジェクトとして本プロジェクトをスタートさせた。						
II. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	本プロジェクトでは、太陽光発電開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用するとともに、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術の開発と、国内外の開発動向等を把握するための動向調査を行う。						
事業の計画内容	研究開発項目	H27fy	H28fy	H29fy	H30fy	H31fy	
	①、③結晶シリコン、CIS	←					→
	② 革新的高効率(Ⅲ-V)	←					→
	② 革新的低コスト(ペロブスカイト)	←					→
	④ 共通基盤技術	←					→
⑤ 調査	←						→
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)	会計・勘定	H27fy	H28fy	H29fy	H30fy	H31fy	総額
	一般会計	—	—	—	—	—	—
	特別会計(需給勘定)	4,567	4,850	3,929	—	—	13,346
	増額予算	—	—	—	—	—	—
	総予算額	4,567	4,850	3,929	—	—	13,346
	(委託)	3,575	3,663	3,030	—	—	10,268
契約種類: 委託(100%)、共同研究(2/3)							

	(共同研究):負担率 2/3	992	1,187	899	—	—	3,077
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、技術検討委員会におけるコメントをもとに NEDO がマネージメントを行った。					
	プロジェクトマネージャー	新エネルギー部 山田 宏之					
	委託先・共同研究先	(株)カネカ、シャープ(株)、ナミックス(株)、(株)クリスタルシステム、コマツ NTC(株)、(株)トクヤマ、京セラ(株)、ソーラーフロンティア(株)、東京大学、パナソニック(株)、(国研)産業技術総合研究所、豊田工業大学、大陽日酸(株)、電気通信大学、神戸大学、名古屋大学、名城大学、宮崎大学、東京農工大学、(株)東芝、積水化学工業(株)、アイシン精機(株)、富士フイルム(株)、早稲田大学、北陸先端科学技術大学院大学、明治大学、九州大学、東京工業大学、兵庫県立大学、立命館、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学、(一財)電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、(一財)電力中央研究所、(一財)日本気象協会、佐賀大学、日清紡メカトロニクス(株)、奈良先端科学技術大学院大学、デュボン・スペシャルティ・プロダクツ(株)、東レ(株)、石川県工業試験場、東京農工大学、みずほ情報総研(株)、(株)資源総合システム					
情勢変化への対応	発電コスト 14 円/kWh、7 円/kWh は調達価格等算定委員会でも価格目標として設定され、太陽光発電の固定価格買取制度からの自立が明確に求められるようになった。これまで開発してきた高効率セルの小規模設備製造実証や、実用化を加速するための新たな市場の創出に向けて、BIPV(ZEB)や、車載などの FS を開始。プロジェクトへの発展を計画中。						
評価に関する事項	事前評価	事前評価 平成 26 年度 担当部 新エネルギー部					
	中間評価	中間評価 平成 29 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先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の開発</p> <p>1)先端複合技術型シリコン太陽電池の開発 「高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶 Si 太陽電池の開発」では高品質アモルファスシリコンを用いたヘテロ接合技術や、電極の直列抵抗を低減させる技術、太陽光をより効率的に利用できるバックコンタクト技術を組み合わせたヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池を開発し、結晶シリコン太陽電池セルとして世界最高のセル変換効率 26.6%を実用サイズ(セル面積 180cm²)で達成した。また、モジュールにおいても、結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高の変換効率 24.37%を達成した。「高効率バックコンタクト型太陽電池の高効率化技術開発」ではフォトリソグラフィ技術を使用しない安価プロセスでセル変換効率 24.5%を実証した。「低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発」において、セル効率は 20.49%であるが、プロセスコスト低減化により発電コスト 14.9 円/kWh を実現し、コスト目標を達成した。</p> <p>2)高性能 CIS 太陽電池の開発 「CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発」では、光吸収層表面および光吸収層・バッファ層界面のパッシベーションとバッファ層最適化による再結合抑制技術の開発を行い、セル変換効率 22.3%を達成した。また、薄膜系太陽電池の 30cm 角サブモジュールでは世界最高となる変換効率 19.2%を達成した。</p> <p>研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」</p> <p>1)革新的高効率太陽電池の研究開発(Ⅲ-V化合物) 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発(光閉じ込め)では、ミドルセルーボトムセル間のバッファ層厚さ低減検討を実施。従来の膜厚の1/2までは従来と同等の特性が維持できる構造を得た。また、裏面テクスチャをウエットエッチングのみで形成する手法を確立。光路長増大5倍を実証した(世界初)。低コスト化プロセス技術開発ではH-VPE装置を設計、導入し、約40μm/hの高速成長下でGaAsホモエピ、約16μm/hの高速成長下で格子整合系InGaPヘテロエピを実証し、InGaPを窓層としたGaAs太陽電池において変換効率20.29%を達成した。MOCVDでは90 μm/hの高速成膜でGaAs単セルを形成し、効率25%を達成した(世界初)。低コストモジュール開発としては実用セルサイズでの逆積み3接合型モジュール(非集光、31cm角)の試作を実施。産業技術総合研究所で変換効率測定を実施し、31.2%の効率を得た。超高効率セル開発では70層の量子井戸により、800 nmのフィルタ下で開放電圧0.77V、短絡電流10 mA/cm²、曲線因子0.69を得た(世界初)。</p>						

2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発(ペロブスカイト)

「塗布製造技術の開発」では、20cm角ガラス基板上35直列の集積型モジュールを試作し、モジュール変換効率12.6%を達成した。「超軽量太陽電池モジュール技術の開発」では、超軽量基板としてPENを用いた8直列の5cm角モジュールで変換効率13.7%を達成した。「低コストR2R太陽電池製造技術の開発」ではダイレクトバリアによる高耐久化を検討し、1cm角金属箔基板で変換効率12%のセルについてJIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目を達成した。また、「高性能・高信頼性確保製造技術の開発」では、新規な傾斜接合した逆型セル構造を開発し1cm角で効率18.2%。さらに欠陥を低減した同1cm²セルで世界最高効率19.2%(AIST認証)を達成した。また、85° C、500時間の耐熱、1 Sun下1000時間連続照射試験も満足した。「新素材と新構造の開発」ではアモルファスTiO_x緻密層、ブルッカイトTiO₂高結晶多孔膜を用いたMAPbI₃ペロブスカイト太陽電池でVoc 1.16~1.18 V、効率21.6%を得た。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

「Cat—CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発」においては、ヘテロ接合バックコンタクト太陽電池の作製プロセスとして、結晶シリコンウエハのキャリアライフタイムを数msと良好な値を維持しながら、p型アモルファスシリコンをn型アモルファスシリコンに変換できるプラズマイオン注入技術を開発した。「薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発」では、従来の熱拡散に代わり、イオン注入を用いて表面側ボロン、裏面側リンを注入、熱処理をしたn型両面受光セルを作製し、変換効率20.0%を達成した。「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」の結晶育成技術においては、従来CZ育成技術に比べ、抵抗率が一桁高い極低濃度不純物のCZ結晶育成技術の開発に成功した。

2) 高性能CIS太陽電池の開発

「界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化」では、3段階法における2段階目にSeインターバルを設けることにより同構造が作製することを新たに見出しVoc × Jsc積0.672 × 38.6 = 25.9 (mA/cm² × V)を達成した。「バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発」では、バンド制御した透明電極である (Zn,Mg)O:Al[Mg/(Zn+Mg)=0.12]をスパッタ法で成膜し、ソーラーフロンティア社製のCIS基板を用いて太陽電池を作製することで、従来よりも21mV高いVoc、Voc × Jsc値で27.48mW/cm²を達成した。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発(太陽光発電システムの信頼性評価技術等)」

「新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発」ではペロブスカイト、新型CIGS時定数、新型結晶Siを含む各種新型太陽電池で高精度性能測定技術の開発・実施・実証を行った。また、屋外測定再現性±1%以内の目処を得た。各種モジュールで連続検証中。ストリング評価への応用検討を開始した。「新型太陽電池評価・屋外高精度評価技術の開発」では結晶シリコン太陽電池の経年劣化を、屋外データと室内データを用いて検証した。劣化の主要因は、ヘテロ接合系では開放電圧の減少、バックコンタクト系では高電位のモジュールにおける電圧誘起劣化であることを見出した。「太陽電池モジュールの劣化現象の解明、加速試験法の開発」では長期屋外曝露モジュールでの酢酸による劣化機構が、加速試験同様、電極腐食にともなう電極直下のギャップ形成と、電極直下に残留した銀ピラーの整流性への特性変化の二段階で進行することを見出した。

「ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発」では新規に開発した温度サイクルに関する加速負荷試験(ATC試験)によって半田接続部の剥がれやタブ配線断線といった長期信頼性上リスクのある劣化モードも加速され、試験時間として8分の1以下に短縮可能である事を見出した。

研究開発項目⑤「動向調査等」

「太陽光発電開発戦略に関する動向調査」では「太陽光発電開発戦略」を推進するべく、市場動向や発電コストに関連する各種情報を収集し、最新の発電コストの分析を行った。また、制度動向、技術動向、経済性評価(グリッドパリティ等)の情報を調査し、太陽光発電の将来導入量に関する定量的な分析を行った。その他、今後市場の発展が見込めるアプリケーションとして検討を開始した「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出を行った。

「発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査」では太陽光発電システム設置価格とその内訳について調査・分析を行うとともに、世界における代表的な太陽電池製造企業の事業内容の整理および比較を行った。また、海外主要国における太陽電池の研究開発動向を調査し、各国の太陽電池技術開発戦略の枠組み、予算配分、目標等の比較を行った。

「IEA PVPS国際協力事業」ではタスク1専門家会議、ワークショップ等への参画を通じて、各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。また、各種ワークショップにおいて日本の動向について講演を行い、加盟国間の情報交換に貢献した。また、日本のタスク1に関わる調査を実施し、報告書をIEA PVPSに提出するとともに、IEA PVPS Trends Report及び主要国の国内調査報告書等の日本語版を作製した。

	投稿論文	309 件
	特許	「出願済」118 件(うち海外出願 20 件)
	研究発表・講演	1591 件
IV. 実用化の見通しについて	<p>本事業で確立した要素技術は、漸次担当企業で実用化されていく。結晶シリコン太陽電池、CIS 太陽電池など、2020 年における発電コスト 14 円/kWh を目標とする技術は小規模設備でのプロセス実証を行い、量産プロセスに展開する。また、2030 年における発電コスト 7 円/kWh の目標達成を目指した技術についてもテーマごとにプロジェクト終了までに量産化に向けたストーリーを構築し、実用化を目指す。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 27 年 3 月制定
	変更履歴	現在のところ変更なし

プロジェクト用語集

用語(日本語)	用語(英語)	説明
1sun	1sun	AM1.5 の太陽光スペクトルにて入射光強度が 1000 W/m ² の条件を指す
1σ	1σ	測定値ばらつきの評価で標準偏差σ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
3 段階法	Three-stage process	第1段階で In、Ga、Se、第2段階で Cu、Se、第3段階で In、Ga、Se を蒸着する Cu(In,Ga)Se ₂ 製膜法で、2重傾斜禁制帯の形成が可能
Ⅲ-V 化合物太陽電池	Ⅲ-V compound solar cells	= Ⅲ-V 族化合物半導体太陽電池
Ⅲ-V 族化合物半導体太陽電池	Ⅲ-V compound semiconductor multi-junction solar cells	Ⅲ-V 族化合物半導体の組成比を制御してバンドギャップの異なる複数の太陽電池層を重ねた多接合太陽電池
Akima 法	Akima interpolation	Akima 氏によって考案された 3 次多項式補間法
ALD	Atomic layer deposition	= 原子層堆積法
AI 法	AI 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 AI 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	APE	Average Photon Energy の略で、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、AM1.5G 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。
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。
Cat-CVD	Catalytic Chemical Vapor Deposition	触媒化学気相堆積
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
CIGS	CIGS	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 Cu(In,Ga)(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
CSC	Carrier-Selective Contacts	結晶シリコン太陽電池においてキャリア選択制のある電極接続構造

用語(日本語)	用語(英語)	説明
CZTS	CZTS	Cu ₂ ZnSnS ₄ という化合物半導体
CZ 法	Czochralski method	結晶の素材を石英製などのるつぼに入れ、抵抗加熱などによって材料を溶かして融点よりも少し高い温度に保っておき、それに単結晶の種子結晶をひたして十分になじませたのち、ゆっくり引き上げて種子結晶の方位配列をもった大きな円柱状の単結晶を成長する方法。
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。
DLTS	DLTS (deep level transient spectroscopy)	過渡容量分光法。半導体における深い準位(捕獲中心や再結合中心)を測定する方法。電気容量の過渡応答を利用して、トラップのエネルギー、密度、捕獲断面積を推測することができる。
DLCP	Drive Level Capacitance Profiling	容量測定中に AC 電圧をスイープし、DC 電圧を変化させることにより、太陽電池セルの深さの関数として欠陥密度を求める手法。
DMF	dimethylformamide	ジメチルホルムアミド。ペロブスカイト層を塗布する際の溶媒として用いられる。
DMSO	dimethyl sulfoxide	ジメチルスルホキシド。ペロブスカイト層を塗布する際の溶媒として用いられる。
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectrometry	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
Eg	Eg	バンドギャップエネルギー、禁制帯幅。
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言われている。
ELO	epitaxial lift-off technique	=エピタキシャルリフトオフ
ESTI	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	ETFE	エチレン-4 フッ化エチレン共重合体。
ETL	electron transport layer	電子輸送層
ETM	electron transport material	電子輸送材料
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。
FTO		フッ素ドーパ 酸化スズの透明導電膜。
FF	fill factor	=フィルファクター

用語(日本語)	用語(英語)	説明
FZ 法	Flating zone melting method	単結晶の材料となる多結晶棒を垂直に置いて、上下をクランプし、途中を高周波や電子ビームなどで部分的に加熱溶融し、その溶融ゾーンを下から上または上から下に移動させることによって単結晶を成長する方法。
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
HAST 試験	highly accelerated stress test	加圧により、100°C以上、かつ高密度な水蒸気雰囲気気を再現した加速試験方法。
HBC	Hetero-junction Back Contact	アモルファス・シリコン(a-Si)と結晶シリコン(c-Si)のヘテロ接合裏面電極型太陽電池
HTL	hole transport layer	正孔輸送層
HTM	hole transport material	正孔輸送材料
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital	基底状態において電子をみたされている軌道(占有軌道)の内、エネルギーの最も高い電子軌道。
HVPE	Hydride Vapor Phase Epitaxy	水素ガス中に、原料ガスとしてⅢ属元素の塩化物ガスとⅤ属元素の水素化物ガスを流し、基板上で反応させて半導体薄膜を成膜する方法。Ⅲ-Ⅴ化合物を形成する他の方法に比べ成長速度が速い。
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry	誘導結合プラズマ(ICP)によってイオン化された原子を質量分析計に導入することで、元素の同定・定量を行う方法
IBC	interdigitated back contact (IBC)	=バックコンタクト型太陽電池
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である。
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。
IPCE	Incident photons to current conversion efficiency	ある波長において、入射したうちの電子へ変換された光子数の割合を百分率(%)で表したものの。外部量子効率。
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。
Isc	Isc	=短絡電流。太陽電池が短絡状態にある時の出力電流
ISE	ISE	ドイツフラウンホーファ研究所の太陽エネルギー研究所 Institute of Solar Energy
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 規格 C8938 の環境試験、耐久性試験	Environmental and endurance test methods for amorphous solar cell modules	アモルファス太陽電池モジュールの環境、耐久性試験に関する JIS 規格。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
Jsc	Short circuit current density	=短絡電流密度
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	LAN 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。
LIA 援用反応性スパッタ	Reactive Sputtering Assisted with low-inductance antenna	低インダクタンスアンテナ(LIA)プラズマを用いた反応性スパッタ法
MBE	molecular beam epitaxy	=分子線エピタキシー
MOCVD 法	Metal Organic Chemical Vapor Deposition	有機金属を原料とした化学的気相製膜法である。主に窓層製膜に用いるが、プラズマを用いないため pn 接合界面にダメージを与えることなく製膜できるものである。
N 型 Si 太陽電池/ n 型結晶シリコン太陽電池	N-type Silicon solar cell	基板に N 型 Si ウエハを利用した太陽電池。光劣化が無い、キャリア寿命が長いなどの特徴があり、一般に P 型 Si 太陽電池より効率が高い。
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	NREL	National Renewable Energy Laboratory 米国の再生可能エネルギー研究所
Passivated Contact	Passivated Contact	結晶シリコン太陽電池において、通常電極界面近傍で起こるキャリア再結合を抑制できるよう、何らかのパッシベーション処理を施した電極接続構造
PCBM	[6,6]-Phenyl-C61-Butyric Acid Methyl Ester	フラーレン誘導体の1種類で、フェニル酪酸メチルエステル体のことである。フラーレンの炭素数により、PC60BM、PC70BMと表記する。
PEDOT	polyethylene-dioxythiophene	PEDOTは、含硫黄複素環化合物の一種であるチオフェン誘導体のポリマーである。導電性をコントロールすることが可能であることから、正孔輸送層や透明導電層に用いられる。
PEN	polyethylene naphthalate	ポリエチレンナフタレート。耐熱性や表面平滑性に優れ、PET フィルムに比べて高剛性であることからフレキシブル基板として用いられる
PERC	Passivated Emitter and Rear Cell	結晶シリコン太陽電池において、裏面の電極のコンタクト部を除く全面にパッシベーション膜を形成することにより裏面の再結合を抑制した構造。主として p 型 Si 太陽電池に用いられる。
PERT	Passivated Emitter, Rear Totally diffused	結晶シリコン太陽電池の裏面にパッシベーション膜を形成する PERC 型と類似の構造であるが、裏面全体に高濃度ドーパ層を拡散させた構造。主として n 型 Si 太陽電池に用いられる。
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。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
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。
PIC	Plastic lens integrated III-V compound semiconductor cell	プラスチックレンズ一体型のⅢ-V化合物セル
PID	Potential Induced Degradation	= 電圧誘起劣化。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
PLD	Pulsed Laser Deposition	パルスレーザー堆積法。
Pmax	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
PTB	PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt ドイツの計量研究所
PV モジュール日射センサ	PVMS: PV Module Irradiance Sensor	太陽電池モジュールと同等の部材、構造を用いた日射センサ
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。
PVK(層)	perovskite (layer)	=ペロブスカイト(層)
PVMS	Photovoltaic Module 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。
PV モジュール日射センサ	PVMS: PV Module Irradiance Sensor	太陽電池モジュールと同等の部材、構造を用いた日射センサ
RPD	RPD	薄膜堆積技術の一種。反応性プラズマ堆積法 (reactive plasma deposition) と呼ばれる。TCO 薄膜の成膜に利用される。
SHJ	silicon heterojunction	=Si ヘテロ接合太陽電池
Si ヘテロ接合太陽電池	silicon heterojunction 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。
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 _x BS	SiO _x BS	シリカ蒸着を行った PET フィルムを用いた裏面材。
SLG	SLG	青板ガラス、ソーダ石灰ガラス
spiro-MeOTAD	2,2',7,7'-Tetrakis(N,N-di-p-methoxyphenylamino)-9,9'-spirobifluorene	ペロブスカイト太陽電池で標準的な正孔輸送層として多く用いられている材料。高効率を得られるが、高価なため、安価な代替材料の探索が行われている。
SRH	Schockley-Read-Hall	半導体のバンドギャップ中で欠陥や不純物により形成されるエネルギー準位にキャリアが捕獲、あるいはエネルギー準位から励起してキャリア数を変動させる過程
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

用語(日本語)	用語(英語)	説明
SV 法 (Level 5)	SV 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。
TAS 法	Transient Absorption Spectrometer	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
TCO	Transparent Conductive Oxide	=透明導電膜
TEM	transmission electron microscope	透過電子顕微鏡。薄膜状の試料に電子線を照射し、試料を透過した電子線を結合レンズ系で拡大する電子顕微鏡。薄膜試料内部の結晶構造、組成、電子状態などの情報が得られる。
U95	U95	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	Ultraviolet light soak	紫外線を照射すること。
Voc	open circuit voltage	=開放電圧
WPVS	World Photovoltaic Scale	World Photovoltaic Scale 一次基準太陽電池セルの国際根幹比較
WRR	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。
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。
μPCD 法	Microwave Photocundctance 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
π	π	π共役部位

用語(日本語)	用語(英語)	説明
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。
アメダス	AMeDAS	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	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
イオンクロマトグラフィー法	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。
インターコネクタ	Interconnector	太陽電池のセルとセルを繋ぐ配線
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
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。
エッチピット	etch pit	結晶中の転位がある部分を選択的にエッチングする溶液を使って現れる凹み(ピット)
エピタキシャルリフトオフ	epitaxial lift-off technique	Ⅲ-V 族化合物の基板の上にエピタキシャル成長で太陽電池を形成した後、剥離層太陽電池を引き剥がすプロセス。太陽電池は低コスト基板に転写し、高価な基板は再利用することで低コスト化できるとともに、セルの裏面で反射した光が厚い基板によって吸収されることによるロスの低減が可能となる。
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
エレクトロルミネセンス	electroluminescence (EL)	太陽電池の分野では、太陽電池セルに電流を注入したときの発光を指し、セルの正常部に比べて劣化部では一般に発光強度が低い、あるいは発光しないことから、劣化解析の手法として用いられる。
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
カーフ	kerf	一般的には切り口、あるいは切り口の幅、として使われているが、ここでは、シリコンのインゴットを板状(ウエハー状)にスライスする際に発生する切削屑(シリコンの微粉末)を指す。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
カバーガラス	cover glass	太陽電池モジュールの受光面側に用いる厚さ数 mm 程度のガラス。
クラスタ	cluster	セルの直列接続で、それ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
グリッド・パリティ	Grid Parity	太陽光発電システムの発電コストが、既存の電力システムの電気料金と同等になること。
コンパクト(TiO ₂)層	compact (TiO ₂) Layer	緻密層ともいう。ペロブスカイト太陽電池において、透明導電膜と発電層の間に形成することにより正孔の n 側電極への到達をブロックする役割を果たす。
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
シードキャスト	Seed cast	結晶シリコン太陽電池用高品質インゴットの製造方法の一つ。通常は多結晶インゴットの製造に用いられるキャスト法において、るつぼ底辺に種結晶(シード)を敷き、そこから単結晶成長させることによって、多結晶並みの低コストで単結晶並みの高品質インゴットを製造する方法。
シーメンス法	Siemens process	高純度ポリシリコンを生産する製法の一つで、現在主流の生産方法である。半導体に用いるポリシリコンの生産も可能な製法。
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	ダイオードの整流性を示すために必要な漏れ抵抗のことであり、大きいほど太陽電池特性は良好となる
シリカ	Silica	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。
スクリーン印刷	screen printing	スクリーン版(印刷製版)にコーティングされた乳剤の必要な部分に孔をあけて、その孔を通過してインクを被印刷物に転写する印刷方式のこと。
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
ストリークカメラ	streak camera	一瞬の光強度変化とその経過時間を測定するカメラ。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
istring	string	複数の太陽電池モジュールを直列に接続したもの
spincote	Spin coating	塗布プロセスの1種類であり、平滑な基材を高速回転させる事により遠心力で薄膜を製膜する方式を言う。用いる装置は、spincoterと呼ぶ。
spectral mismatch correction	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
spectral mismatch correction factor	Spectrum mismatch correction factor	スペクトルミスマッチを補正するための係数
cell	cell	一枚の太陽電池
selenization	Selenization method	プリカーサーをセレン (Se) 含有雰囲気中で熱処理することにより CIS 系光吸収層を作製する方法
selenization sulfuration	Selenization / Sulfurization	セレン化法の後に硫黄 (S) 含有雰囲気中で熱処理することにより表面を硫化して CIS 系光吸収層を作製する方法、本研究では SAS 法 (Sulfurization after Selenization) と呼んでいる
solar simulator method	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
die coater	die coater	ダイヘッドと呼ばれる塗工装置から塗工液を押しだしながら基板にコーティングする方式
tab line	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。
double-glass module	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。
tandem cell	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
texturing	Texturing	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。 結晶 Si 太陽電池では表面に形成されたピラミッド状表面のこと
CdTe module	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。
traceability	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」)
tunnel junction	tunnel junction	非常に薄い絶縁体を二つの導体(或いは半導体)で挟み込むことによって形成する接合。キャリアは絶縁体の障壁を、トンネルを抜けたかのように通過する。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
ナノ粒子	nanoparticle	ここでは a-Si 成膜に用いるシラン CVD プラズマ中で発生する直径が 10nm 程度以下のナノ粒子。膜に取り込まれ光安定性を悪くする。100nm 以上のいわゆるダストと区別するためにクラスターと呼ばれることもある。
ネックング	necking	種子結晶に存在していた転位が伝播しないように、結晶を細く長く成長させ、転位を結晶表面に逃がすこと、成長方向に伝播する転位を必然的に切断することにより無転位化する方法。
バイパスダイオード	bypass diode	発電電流を迂回させるためのダイオード
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。
バックコンタクト型太陽電池	Interdigitated back contact solar cells (IBC)	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。
パッシベーション	Passivation	不活性化 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	下の層と上の層を緩衝するための層。エピタキシャル成長においては、成長する薄膜と基板の格子定数が異なる場合に、薄膜に転位が生じないように薄膜と基板の間に挿入する。
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
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。
バンドオフセット	band offset	異種間半導体材料の接界面で形成されるポテンシャル障壁(エネルギー差)の総称。
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
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
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。
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

用語(日本語)	用語(英語)	説明
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
フィルファクター	fill factor	$=P_{max}/I_{sc}/V_{oc}$ 。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。
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
フラレン	Fullerene	最小の構造が多数の炭素原子で構成されるクラスターの総称。
プラナー型セル	planar type cell	ペロブスカイト太陽電池において、コンパクト TiO ₂ 上に直接ペロブスカイト層を形成する(メソポーラス層をもたない)型のセル
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
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
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
ペースト(電極ペースト)	Paste	電極材料。銀などの導電性微粒子とガラス微粒子、有機樹脂および有機溶媒などを混合した高粘度の液状物で、これをスクリーン印刷によりシリコン基板上に印刷し、焼成することによって電極を形成する。
ヘテロ接合型太陽電池モジュール	Heterojunction photovoltaic module	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。
ペロブスカイト(層)	Perovskite	結晶構造の一種。ここではペロブスカイト構造をもつ発電層を示す。
ペロブスカイト太陽電池	Perovskite solar cells	ペロブスカイト構造を発電層に用いた太陽電池
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。
マンソーラ 11	MONSOLA-11	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。MONSOLA は MONTHly mean SOLAR radiation data throughout Japan の呼称である。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
ミニバンド	mini-band	量子ドット超格子のドット間隔が数ナノメートル程度になると、ドット中電子の波動関数が重なりを生じ、電子が取り得るエネルギーが幅を持つようになる。それにより形成される新しいエネルギーバンドのこと。
メニスカス塗布	meniscus coating	アプリケーションと基板との間のギャップに形成される塗布液のメニスカス(円弧上の曲面)の特性を活用して成膜する方法である。
メカニカルスクライブ /メカスクライブ	mechanical scribe	薄膜系太陽電池のモジュール形成のため、機械的に発電層などの膜を引っ掻き、除去することで素子を分離する方法。
メカニカルスタック	mechanical stack	一般的には、半導体素子等を機械的接合を介して直列に積層する技術のこと。太陽電池への応用としては、複数セルを直列接続し、多接合太陽電池構造を形成する技術として期待されている。
メソポーラス構造	mesoporous structure	ペロブスカイト太陽電池において順型構造ともいい、発電層とガラス基板の間のコンパクト TiO ₂ 層上に多孔質の TiO ₂ 層(メソポーラス層)を形成する構造。
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。
メットピーヴィ 11	METPV-11	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。METPV は MEteorological Test data for PhotoVoltaic system の呼称である。
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。
モノリシック型(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
ライフタイム	Lifetime	半導体内に生成した過剰少数キャリア(電子または正孔)が再結合して消滅するまでの寿命。太陽電池セルにおいてはライフタイムが高いほど、少数キャリアを電流として取り出しやすくなるため変換効率が向上する。
ラマン蛍光強度比	Raman ratio of fluorescence intensity	ラマン光を当てた際に SP 構造を有する結合をもったものは蛍光を発生する。これの強度の比較。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
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。
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。
ルミネッセンスカップリング	Luminescence coupling	発光再結合により放射された光の隣接セルによる再吸収
ロールツーロールプロセス (ロール to ロール、 ロールトゥロール、 R2R)	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
ワイドギャップ半導体	wide-gap semiconductors	ワイドギャップ半導体は、Si や GaAs などと比較して光吸収端が短波長領域に位置し、可視光領域での透過率が比較的高い半導体である。
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。
温度サイクル試験	Thermal cycle test	太陽電池モジュールの信頼性試験のひとつ。85°Cと-40°Cの温度変化を一定周期で一定回数与える試験。
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。
開放電圧	open circuit voltage	=Voc。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。
化学パッシベーション	chemical passivation	半導体材料において表面欠陥等に起因する少数キャリアの表面再結合を抑制する目的でなされる表面終端化(安定化)技術の一つで、主に化学薬品への浸漬処理でなされる。一般的な酸化やプラズマ処理、その他薄膜材料形成(堆積)によるパッシベーションと対比される。
拡散長	diffusion length	励起子または光キャリアがその寿命の間に広がることのできる距離。
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。
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。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
規格値	Normalized value	一定のルールに基づき変形した値で、本文では初期値を1とした値に変換した。
基準太陽電池	reference PV device	定められた照度での出力電流が校正された太陽電池。太陽電池測定の際の照度測定、調整にもちいる
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。
逆流防止ダイオード	blocking diode	太陽電池ストリングに直列に取り付けられて、ストリングに電流が逆流することを防止するダイオード
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
原子層堆積法	Atomic layer deposition	原料ガスとパーズ用ガスを交互に加熱基板面に照射し、薄膜を形成する方法
結晶シリコンライトスルー太陽電池モジュール	Silicon lightthorough photovoltaic module	半導体材料として結晶シリコンを用いた透光性の太陽電池である。
高温高湿試験/湿熱試験/DH 試験	damp heat (DH) test	太陽電池モジュールの信頼性試験の一つ。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。
格子不整合	lattice mismatch	格子定数が基板結晶と成長層の間で整合しない材料系。太陽電池材料のバンドギャップエネルギーを自由に制御できるため、熱損失の少ない高効率の太陽電池構造を設計できる。一方、結晶には歪がかかるため、転位などの格子欠陥が発生する。対義語は格子整合系 (lattice match) である。
固液界面	interface between solid and melt	融液から結晶を成長するときの液相と固相の境界面。
固化率	solodification ratio	融液から結晶を成長したとき、最初の融液の重量と結晶になった質量の比。
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。
固定砥粒ワイヤースライス	fixed diamond abrasive method	Ni メッキにより鋼線に固定されたダイヤモンド砥粒によるスライス方式
再結合	Recombination	表面や欠陥によって電子・正孔が消失する現象
最大出力(Pmax)	Pmax	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
三段階法	three stage evaporation method	多元蒸着法の一つ。CIS 系太陽電池の薄膜形成で幅広く使われている。
集光倍率	Condensing magnification	太陽光強度を1 (SUN)とした時に集光装置で太陽電池に集められた太陽光強度 (SUN)

用語(日本語)	用語(英語)	説明
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。
色素増感太陽電池	DSC	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
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
集光型太陽光発電	concentrating photovoltaics	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 ²) / 屋外測定日射強度 (W/m ²) 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。
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。
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 ² day が用いられる。
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
積分球	integrating sphere	散乱光の照度を計測する際等に用いる
絶縁体	Insulator	電気を通し難い材料
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
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
設置角	tilt angle	地面と太陽電池モジュールがなす角度。
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)
双晶	twins	同一の材料に2つ以上の単結晶のドメインが存在し、それぞれのドメインの結晶方位に、幾何学的な特定の規則性があるものを示す。
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
体積抵抗率	Volume resistivity	材料内部の電気抵抗
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。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
太陽電池モジュール	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
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。
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。
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。
短絡電流	Short circuit current	= I_{sc} 。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	Short circuit current density	= J_{sc} 。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(I_{sc})の密度。
中間バンド	intermediate-band	量子ドットのミニバンドが、周りの半導体のバンドギャップの中間付近に形成された場合のこと。それらが形成する3つのバンドで太陽光を吸収するのが中間バンド太陽電池である。
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
超格子	superlattice	複数の種類の結晶格子の重ね合わせにより、その周期構造が基本単位格子より長くなった結晶格子
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。
低倍集光/低倍率集光	low concentration	数倍から 50 倍程度までの範囲で集光すること。
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	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。
転位密度	dislocation density	結晶中の線状の結晶欠陥の面密度。
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

用語(日本語)	用語(英語)	説明
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流量
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。
導電体	Conductor	金属など電気を通し易い材料
透明導電膜	Transparent Conductive Oxide	=TCO。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。
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
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。
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。
薄膜系太陽電池	thin-film solar cell	数 μm 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。
薄膜シリコンシースルー太陽電池モジュール	Thin-film Si seethrough 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。
反応性スパッタ	reactive sputtering	スパッタで薄膜を形成する際に、酸素や窒素などの反応性のガスを導入してターゲット材料の成分とガスの反応物質を製膜する技術
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、その両方で原因は異なる。
光閉じ込め	optical confinement	太陽電池において透明電極や裏面電極で光を乱反射させ、発電層に光を閉じ込めること
被測定モジュール	MUT: Module under Test	被測定(測定対象の)モジュール
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 ² 、AM1.5 を指す。

用語(日本語)	用語(英語)	説明
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においてセルを封止し保護する役割を持つ樹脂材料。
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。
分光感度	Spectral response	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。
分光放射照度	Spectral irradiance	放射照度農地の特定の波長成分だけを分離して示す波長幅当たりの放射照度
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	=MBE。超高真空の成長室内に結晶の構成元素をそれぞれ納めた容器を設置し、複数の金属蒸発源から発生させた分子線により、構成元素を加熱、気化させて基板に体積させる方法。
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。
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
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。
床材	flooring material	地表面を覆う材料。
遊離砥粒方式	SiC loose abrasive method	SiC 遊離砥粒によるスライス方式
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ため、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。
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

用語(日本語)	用語(英語)	説明
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)	=バックコンタクト型太陽電池
粒界	Grain boundary	面欠陥／多結晶における結晶粒同士の境界面
量子ドット	quantum dot	主に半導体において、大きさ数～20 ナノメートル程度の粒状の構造を作り、周りをバンドギャップの大きな半導体で覆うと、電子はその領域に閉じこめられ状態密度が離散化する。3次元全ての方向から電子を閉じ込めたものを量子ドットと称する。
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
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。

I. 事業の位置づけ・必要性について

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

近年、太陽光発電市場太陽電池モジュール価格の大幅下落や、価格競争力を有する中国等の新興国の太陽電池メーカーのシェア拡大等、市場の状況は大きくかつ急速に変化した。国内の導入量も、技術開発の進展や生産規模拡大による太陽光発電システムの価格低下、導入補助金の効果により、国内の住宅用システム設置が累計 100 万件を突破する（太陽光発電協会プレスリリース 2012 年 5 月 17 日）等、着実に進展してきたが、2012 年 7 月の固定価格買取制度が開始によって、太陽光発電の導入はさらに加速（制度前の 2012 年 6 月末国内導入量は 5.6GW であったが、2013 年度末には 14.3GW まで拡大（資源エネルギー庁 HP）した。固定価格買取制度の効果で大量導入社会の実現は目前となり、従来の「普及させるための戦略」から、「普及後の社会を支える戦略」の検討が必要となってきた。

2014 年 4 月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。太陽光発電は、「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である」と期待されている。

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。しかしながら、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に進めば、賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれる。

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) 産業基盤の強化、3) 新たな価値創造の実現の3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、2014 年 9 月に「太陽光発電開発戦略（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】国民負担の増大

【課題2】長期・安定な発電能力維持の必要性

【課題3】立地制約の顕在化

【課題4】廃棄物大量発生への対応

【課題5】グローバル競争の激化

この中で【課題1】国民負担の増大に対する最大の解決策は発電コストの低減であるが、開発戦略では発電コスト低減目標として、2020 年に業務用電力価格並となる 14 円/kWh（グリッドパリティ）、2030 年に従来型火力発電の発電コスト並みあるいはそれ以下に相当する 7 円/kWh（ジェネレーションパリティ）を掲げた。また、それらの目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。

NEDOは開発戦略の柱となる発電コスト低減目標達成のため、2030 年までに 7 円/kWh の実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指し、2015 年から 5 年間のプロジェクトとして本プロジェクト「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」を開始した。

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。平成26年度までNEDOが「革新的太陽光発電技術研究開発」と「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」で進めてきた発電コスト低減に資する技術の開発は、多くの成果をあげた。例えば、結晶シリコン太陽電池ではヘテロ接合バックコンタクト太陽電池で25%を超える要素技術を開発し、CIS系薄膜太陽電池でも30cm角サブモジュールで変換効率17.8%（世界最高）を達

成する等の成果をあげてきた。また、Ⅲ－Ⅴ族化合物の薄膜多接合型太陽電池で世界最高効率のセル変換効率を達成、量子ドット等の新概念の太陽電池で世界最高水準の技術を開発、ペロブスカイト太陽電池等の革新的な技術を開発する等、新分野の開拓でも大きな成果をあげた。

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。

欧州では、戦略的研究計画（Strategic Research Agenda：SRA）を策定し、発電コスト低減に取り組んでいた。欧州フレームワーク計画FP7（2007～2013）では、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おり、その後はFP7の後継プログラムHorizon 2020（2014～2020）を策定し、更なる研究開発に取り組んでいる。

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12次5ヵ年計画（2011～2015年）で、変換効率単結晶シリコン太陽電池で21%、多結晶シリコン太陽電池19%、太陽電池のモジュール製造コスト2020年7元/W等の目標を設定し、研究開発を推進していた。2013年時点で、中国メーカーが太陽電池の販売量として出力ベースで6割のシェアを占めるに至ったが、研究開発推進の結果、中国製モジュールの効率、品質とも大きく改善し、さらなるシェアの拡大を実現している。

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「革新的太陽光発電技術研究開発」と「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果を踏まえ、開発戦略で掲げた発電コスト低減目標を達成するべく、開発する太陽電池種についても絞り込みを行った。具体的には現在市場に出ている結晶シリコン太陽電池、CIS太陽電池、Ⅲ－Ⅴ化合物太陽電池、ペロブスカイト太陽電池の4種の太陽電池に絞った。市場の主力製品である結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWh達成の技術的見通しを得たことから、2020年に14円/kWhを達成するべく、当該技術を着実に実用化するための技術を継続して開発することとした。また、2030年までに発電コスト7円/kWh実現に資する要素技術開発も合わせて進めることとした。加えて、実用化まで時間を要するものの、これまでの開発成果から発電コスト低減に有効な太陽電池の実現に有望と考えられるⅢ－Ⅴ化合物太陽電池とペロブスカイト太陽電池については、2030年発電コスト7円/kWh達成に資する高性能太陽電池を開発することとした。さらに、上記開発に必要な測定、評価、分析技術等の開発等を共通基盤技術として開発することとした。

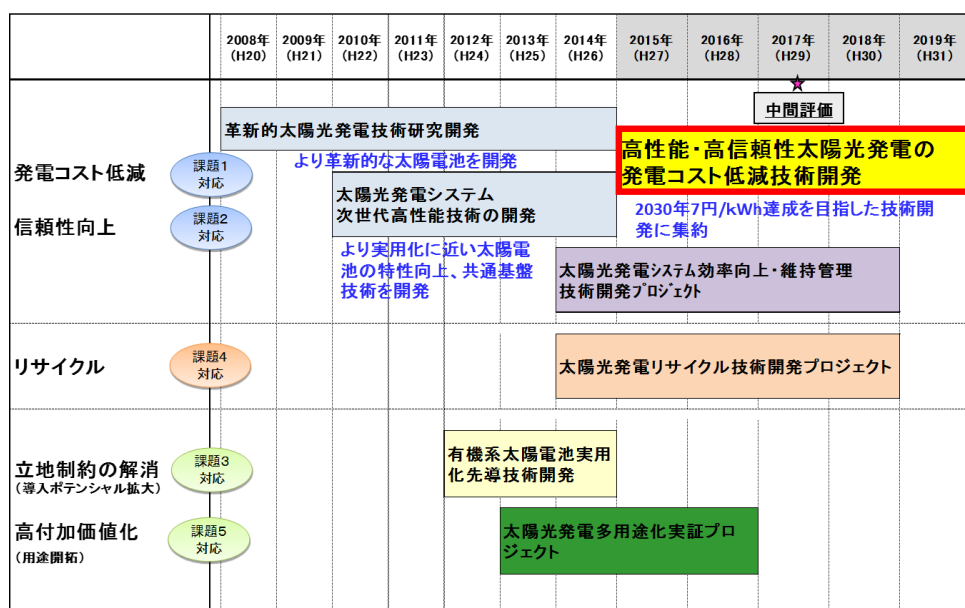


図 I-1. NEDOにおける太陽光発電研究開発プロジェクト

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。

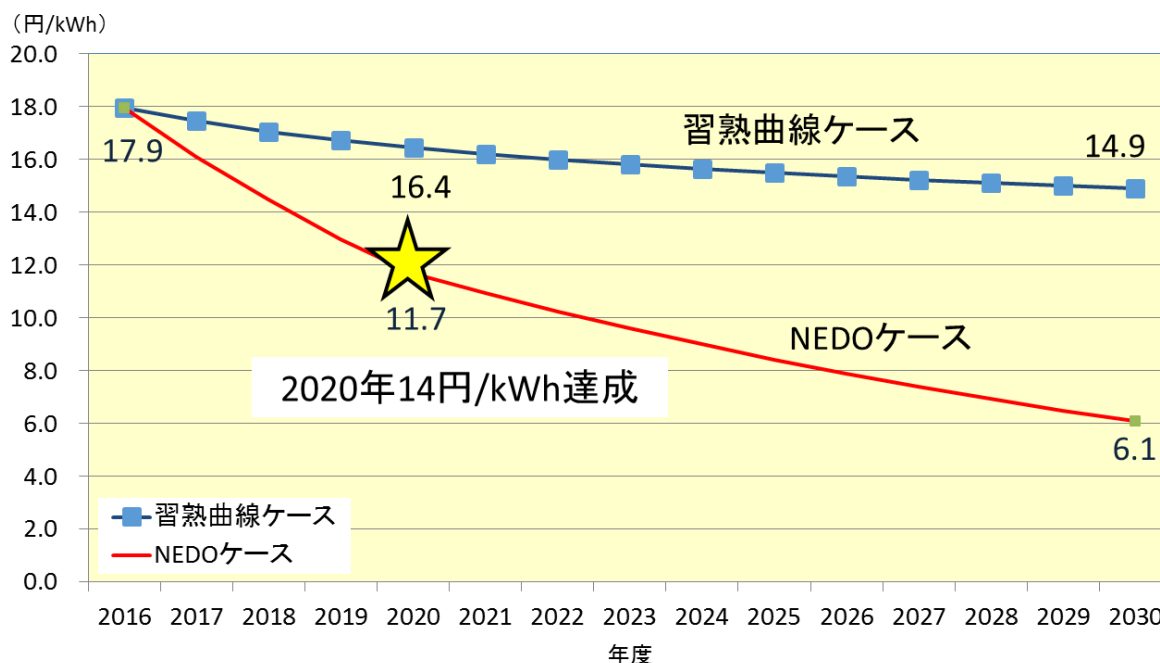
NEDOは企画、立案段階においては産学官を取りまとめてロードマップを策定するとともに、事業環境の変化に即して改訂を行い、国策を盛り込んだ企画を行う。また、業界全体のニーズを把握するために産学官のヒアリング等を実施し、開発戦略を踏まえた目標を設定することができる。

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することができ、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)

本プロジェクトで開発した太陽電池モジュールが実用化、販売され、当該モジュールが採用される2030年には発電コスト7円/kWhを実現する。また、本研究開発は2020年14円/kWhの達成も目標としているが、仮に本プロジェクトの研究開発成果が2020年の発電コスト低減に反映されないと仮定すると固定価格買取制度の「卒業」は2030年以降になると想定され、その間の賦課金の負担額は毎年2兆円を超え、2021年～2030年の10年間の総額は、10兆円を上回るという試算もある。



習熟曲線ケース：技術開発の進展がなく、機器類の価格低下は導入量見通しと習熟率（80%）で算出。工事費等は人件費の低下も見込めないことから一定。（所謂BAUケース）

NEDOケース：NEDOの2020年、2030年目標を達成した場合の発電コスト。間は内挿値。

図 I -2. 将来の発電コスト試算

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、太陽光発電開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池と CIS 太陽電池については、14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとともに、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。また、結晶シリコン太陽電池や CIS 太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術の開発と、国内外の開発動向等を把握するための動向調査を行う。

(2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

2014年度までに実施した「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果から、結晶シリコン太陽電池と CIS 太陽電池については、14円/kWh達成の技術的見通しを得たことから、当該技術を着実に実用化するための技術を開発することとする。

また、2030年までに発電コスト7円/kWh実現に資する要素技術開発を進める。加えて、実用化まで時間を要するものの、これまでの開発成果から発電コスト低減に有効な太陽電池の実現に有望と考えられる技術を対象に、2030年発電コスト7円/kWh達成に資する高性能太陽電池を開発する。なお、これまでは主として高性能化に取り組んできたが、実用化を加速するべく、低コスト化や信頼性も重視する。

さらに、上記開発に必要な測定、評価、分析技術等の開発等を共通基盤技術として開発する。

【最終目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト(円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト14円/kWhを満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25年で20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境(条件)によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2030年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 30%
- ・モジュール製造コスト : 想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するコスト

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 20%

・モジュール製造コスト : 15 円/W を実現するコスト

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p 型、n 型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の 3 倍以上にする。

材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

b) 高性能 C I S 太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm 角程度）で変換効率 23% 以上

② 欠陥密度の低減化技術の開発

③ C I S 太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

a) 出力測定技術の開発

・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ （ 1σ ）以内を目指す。

・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ （ 1σ ）以内を目指す。

b) 発電量評価技術

・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し、NEDO ホームページ等の Web サイトに掲載する。

c) 信頼性・寿命評価技術の開発

・低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。

・太陽電池モジュールの性能 30 年を予測できる加速試験方法を開発する。

5) 動向調査等

a) 動向調査

・発電コスト 7 円/kWh 実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

b) I E A 国際協力事業

PVPS の動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

【中間目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 C I S 太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト 17 円/kWh 相当の性能を確認する。

・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率（%）、モジュール製造コスト（円/W）、想定する使用環境におけるシステムコスト（円/W）、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 17 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%
- ・モジュールの出力劣化 20 年で 20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境（条件）によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2020 年までの実用化計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率 30%以上、且つ、結晶シリコン並の製造コストを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率 20%の達成。

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウェハスライス技術に関する研究開発

p 型、n 型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の 2 倍以上にする。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

b) 高性能 C I S 太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm 角程度）で変換効率 22%以上

② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化

③ C I S 太陽電池の電子構造の明確化

4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

a) 出力測定技術の開発

・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

・市販されている結晶 Si 系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

b) 発電量評価技術

・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。

c) 信頼性・寿命評価技術の開発

・PID 現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。

・太陽電池モジュールの性能 25 年を予測できる加速試験方法を開発する。

5) 動向調査等

a) 動向調査

- ① 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
- ② 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

b) I E A国際協力事業

NEDOが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。

② アウトカム目標

本プロジェクトで開発した太陽電池モジュールが実用化、販売され、当該モジュールが採用される太陽光発電システムの2020年には発電コスト14円/kWh、2030年には発電コスト7円/kWhを実現する。これにより、固定価格買取制度の早期卒業が実現すれば、年間数千億円の費用負担削減効果が見込まれる。

③ アウトカム目標達成に向けての取組

NEDOは、2020年の発電コスト14円/kWh実現に向け、参画企業の事業戦略を確認する仕組みを構築する。

また、2030年の発電コスト7円/kWh実現に向け、開発技術の実用化を進めるための産学連携体制を構築する。

さらに、開発技術の信頼性評価技術を開発、公表し、発電コスト低減技術の普及拡大に努める。

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「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発」

1. 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。

2. 高性能C I S太陽電池の開発

C I S太陽電池では、実用化規模の大面积モジュールの高効率化及び低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

・事業形態：研究開発 課題設定型事業

・契約等種別：共同研究（N E D O負担率：2 / 3）

本研究開発項目は、大学等の関与が必要となる基盤的な研究要素を含むが、すでに実用化が進んでいる太陽電池を対象として主として企業が実施する開発項目であり、共同研究（N E D O負担率：2 / 3）で実施する。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1. 革新的高効率太陽電池の研究開発

一般には普及していないⅢ-V族太陽電池等の超高効率太陽電池において、将来の普及を目指し、現在普及している太陽電池並みのコストで製造するための低コスト化の要素技術開発並びに、太陽電池の効率向上により発電コスト低減を実現する要素技術開発を合わせて行うことで、2030年に7円/kWhを達成する手段を明らかにする。具体的には、変換効率30%以上の薄膜化合物の超高効率太陽電池で発電コスト7円/kWhを達成するために、Ⅲ-V族の太陽電池の製造装置、製造プロセス、多接合化の為の剥離・接合などの製造コスト低減のための要素技術開発や、モジュール化の要素技術開発を行い、その実現性を見極める。

2. 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

太陽電池に新材料、新構造を用いることで製造コストを革新的に低減させ2030年に発電コスト7円/kWhを目指す。モジュール変換効率は20%程度ながら、新材料、新構造を用いることでモジュール製造コストを15円/Wまで革新的に低減することができる技術を実現する。具体的には、新構造のペロブスカイト系太陽電池等の研究開発を行う。

・事業形態：研究開発 課題設定型事業

・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（N E D O負担率：2 / 3））

本研究開発項目は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業（N E D O負担率：100%）として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（N E D O負担率：2 / 3）として実施する。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1. 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

太陽電池セル・モジュールの各製造プロセスにおいて、評価解析を行い、得られた知見をもとに、原料、結晶、装置、セル、モジュールメーカーの高効率化、低コスト化、高信頼性化に貢献する。

2. 高性能C I S太陽電池の開発

発電コスト7円/kWh達成のために、C I S太陽電池モジュールの高効率化および発電コスト低減を可能とする界面制御技術、再結合パッシベーション、バンドプロファイル評価技術等、要素技術の研究開発を行う。また、実デバイスでの評価検証を行う。

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（NEDO負担率：2／3））
本研究開発項目は、大学等が研究開発項目①に取り組む企業と産学官で連携して取り組む基盤的技術の開発に係る事業であり、原則委託事業（NEDO負担率：100％）として実施する。ただし、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

1. 出力等測定技術の開発

本プロジェクトで開発する太陽電池等、標準化や規格化が進んでいない太陽電池の出力等を正しく評価するための測定技術を開発する。

2. 発電量評価技術

NEDO日射量データベースについて、データの更新、高精度化等、拡充を進め、ユーザーの利便性向上を図る。

3. 信頼性・寿命評価技術の開発

実際の太陽光発電システムから発電データを取得、分析評価し、発電システムの劣化要因の抽出、劣化メカニズムの解明、および劣化予防対策技術を開発する。太陽電池モジュールが設置される環境を考慮した、長期信頼性を評価するための試験方法を開発する。

- ・事業形態：研究開発 課題設定型事業
- ・契約等種別：委託（但し、単独のものは共同研究（NEDO負担率：2／3））
本研究開発項目は、試験・評価方法の提案等、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：100％）として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

研究開発項目⑤「動向調査等」

1. 動向調査

開発戦略の発電コスト低減目標の達成に向け、必要な情報を収集、整理、分析する。

2. IEA国際協力事業

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。

- ・事業形態：調査委託
- ・契約等種別：委託
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IEA国際協力事業等を実施するもので、委託事業（NEDO負担率：100％）として実施する。

2.1.2 研究開発テーマ

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、NEDO内の契約・助成審査委員会を経て最終決定した。

(1) 平成27年度「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術の研究開発」に関する公募

公募の結果、30件の提案があったが、各研究開発項目より目標とする発電コスト（2020年に14円/kWh、或いは2030年7円/kWh）を達成するに資する取り組みとなる22件を採択した。

- ・公募期間：平成 27 年 3 月 10 日～平成 27 年 4 月 8 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) 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。
 - IV) 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)
 - 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) 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。
 - VII) 目標とする発電コスト計算の内訳や、その根拠等が具体的に示されているか。
(研究開発項目①～③)
目標とする開発成果(評価技術、試験方法等)が具体的に示されているか。
(研究開発項目④)
 - 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)：
 - 小長井 誠(東京都市大学教授)、田中 良(NTT ファシリティーズ)、片桐 裕則(長岡工業高等専門学校教授)、工藤 一浩(千葉大学教授)、高倉 秀行(立命館大学教授)

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	H27	H28	H29	総額
研究開発項目①(結晶 Si)	7.5	8.7	5.7	21.8
〃 (CIS)	2.0	2.4	2.7	7.2
研究開発項目②(高効率)	9.7	11.4	9.6	30.6
〃 (低製造コスト)	9.0	8.4	8.9	26.2
研究開発項目③(結晶 Si)	8.9	8.7	5.3	22.9
〃 (CIS)	3.3	2.4	1.8	7.6
研究開発項目④	4.8	6.1	4.8	15.7
研究開発項目⑤	0.4	0.5	0.6	1.5
計 特別会計(需給勘定)	45.7	48.5	39.3	133.5

2.1.4 研究開発内容(分野毎)

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発」

1. 研究開発の必要性

現在普及している結晶シリコン太陽電池やC I S太陽電池は、技術開発の進展、市場拡大による量産効果によって性能向上と価格低減が進んでいる。NEDOの「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」プロジェクトでも、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合とバックコンタクトの統合技術によってセル効率25.1%を達成。C I S太陽電池でも高品質光吸収層とCdフリーバッファ層を開発し、小面積セルで変換効率20.9%(2014年4月)、30cm角サブモジュールで変換効率17.8%(世界最

高)を達成する等、大きな成果をあげた。しかしながら、2030年までにこれらの成果を実用化し、発電コスト7円/kWhを実現するためには、性能を維持しつつ、大面積化や低製造コストプロセスの開発等を進めるため、更なる技術革新が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

- (1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発
ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。
- (2) 高性能C I S太陽電池の開発
C I S太陽電池では、実用化規模の大面積モジュールの高効率化及び低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

3. 達成目標

【中間目標】

- ①試作モジュールで、発電コスト17円/kWh相当の性能を確認する。
 - ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。
 - <発電コスト17円/kWhを満たす性能の目安>
 - ・モジュール変換効率20%
 - ・モジュールの出力劣化20年で20%相当
 - (加速評価試験の方法については、試験条件(例えばJISC8917の温湿度サイクル試験の試験時間等)を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)
 - なお、発電コスト目標を達成する使用環境(条件)によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。
- ②2020年までの実用化計画を提示すること。

【最終目標】

- ①試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。
 - ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。
 - <発電コスト14円/kWhを満たす性能の目安>
 - ・モジュール変換効率22%
 - ・モジュールの出力劣化25年で20%相当
 - (加速評価試験の方法については、試験条件(例えばJISC8917の温湿度サイクル試験の試験時間等)を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)
 - なお、発電コスト目標を達成する使用環境(条件)によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。
- ②2030年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示すること。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1. 研究開発の必要性

従来の延長線上にはないⅢ-V族等の革新的高効率太陽電池や、コスト構造を革新する太陽電池は、2020年の実用化は困難であるが、変換効率の高さや製造コストの低さから、2030年に7円/kWhの達成が見込める有力な太陽電池である。しかしながら、革新的高効率太陽電池は、現在は一般に

普及する価格での製造はきわめて困難であり、事業目標達成のためには太陽電池の製造装置及び製造プロセスの開発や、多接合化のための太陽電池層の剥離、接合技術の開発が必要である。

また、近年短時間で発電効率を大幅に伸ばしている、ペロブスカイト太陽電池など、コスト構造を革新する太陽電池の実現が期待される技術も見いだされているが、実用化には原理検証や、信頼性の確認、新しいコンセプトの製造装置の実現が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

一般には普及していないⅢ-V族太陽電池等の超高効率太陽電池において、将来の普及を目指し、現在普及している太陽電池並みのコストで製造するための低コスト化の要素技術開発並びに、太陽電池の効率向上により発電コスト低減を実現する要素技術開発を合わせて行うことで、2030年に7円/kWhを達成する手段を明らかにする。

具体的には、変換効率30%以上の薄膜化合物の超高効率太陽電池で発電コスト7円/kWhを達成するために、Ⅲ-V族の太陽電池の製造装置、製造プロセス、多接合化の為の剥離・接合などの製造コスト低減のための要素技術開発や、モジュール化の要素技術開発を行い、その実現性を見極める。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

太陽電池に新材料、新構造を用いることで製造コストを革新的に低減させ2030年に発電コスト7円/kWhを目指す。モジュール変換効率は20%程度ながら、新材料、新構造を用いることでモジュール製造コストを15円/Wまで革新的に低減することができる技術を実現する。具体的には、新構造のペロブスカイト系太陽電池等の研究開発を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率20%の達成。

【最終目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現する要素技術を確立する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術の開発。

実験室レベルの小型太陽電池モジュールでの変換効率20%の達成。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1. 研究開発の必要性

発電コスト7円/kWh、14円/kWhを実現するためには、従来の太陽電池モジュールを超える性能を、低コストで実現しなければならない。そのためには、材料や構造の設計において、基礎的、科学的知見を踏まえた検討を行う必要がある。

本研究開発項目は、研究開発項目①の実施者と産学官連携で進める。

2. 研究開発の具体的内容

以下の研究開発項目を実施する。

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

太陽電池セル・モジュールの各製造プロセスにおいて、評価解析を行い、得られた知見をもとに、原料、結晶、装置、セル、モジュールメーカーの高効率化、低コスト化、高信頼性化に貢献する。

①高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

転位密度が低くライフタイムの長い高品質で低コストな材料の開発を行う。また、ウエハスライス技術については、低コスト化、低ダメージ化のための知見を得るための研究開発を行う。さらに、材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響の研究を行う。

②高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

受光面構造、受光面成膜、裏面成膜、裏面パターン形成、裏面電極構造、高品質透明導電膜、高品質パッシベーション膜、高性能エミッタ、細線低抵抗電極、銀代替電極、ヘテロ接合等の研究開発を行い、技術開発指針を確立する。

(2) 高性能C I S太陽電池の開発

発電コスト7円/kWh達成のために、C I S太陽電池モジュールの高効率化および発電コスト低減を可能とする界面制御技術、再結合パッシベーション、バンドプロファイル評価技術等、要素技術の研究開発を行う。また、実デバイスでの評価検証を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

①高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の2倍以上にする。

②高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

(2) 高性能C I S太陽電池の開発

①小面積セル（1cm角程度）で変換効率22%以上

②欠陥検出のためのデバイス構造の明確化

③C I S太陽電池の電子構造の明確化

【最終目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

①高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。

材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

②高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

(2) 高性能C I S太陽電池の開発

①小面積セル（1cm角程度）で変換効率23%以上

②欠陥密度低減化の技術開発指針の構築

③C I S太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

1. 研究開発の必要性

太陽光発電の発電コスト低減を実現するためには、長期に亘り安定した発電量を得られることが必要であることから、太陽電池モジュールに対しても、長期信頼性の確保が求められている。

これまでNEDOでは、太陽光発電システム次世代高性能技術の開発において、太陽電池モジュールの評価技術の開発に取り組んできており、出力測定精度の向上や劣化要因について知見が得られつつあるものの、その寿命（耐久性等）を効率的に評価出来る試験技術の確立には至っていない。

発電システムとして信頼性を向上するためには、太陽電池モジュールの耐久性向上に資する技術開発と同時に、実際に設置する環境下での出力測定や寿命を予測できる試験方法といった評価技術の開発と、PID等の太陽電池モジュールの劣化原因の解明が必要である。

更に、これら評価技術の向上や技術開発と併せて、ガイドライン等の作成、認証機関への技術移転や、標準化・国際規格化を進めるための取り組みも実施することで、信頼性の高い太陽電池が適正に評価される環境を作り、日本の太陽光発電産業の国際競争力の向上に貢献する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 出力等測定技術の開発

本プロジェクトで開発する太陽電池等、標準化や規格化が進んでいない太陽電池の出力等を正しく評価するための測定技術を開発する。

(2) 発電量評価技術

NEDO日射量データベースについて、データの更新、高精度化等、拡充を進め、ユーザーの利便性向上を図る。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

①実際の太陽光発電システムから発電データを取得、分析評価し、発電システムの劣化要因の抽出、劣化メカニズムの解明、および劣化予防対策技術を開発する。

②太陽電池モジュールが設置される環境を考慮した、長期信頼性を評価するための試験方法を開発する。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。
- ・市販されている結晶Si系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

- ・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。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ①PID現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。
- ②太陽電池モジュールの性能25年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数100倍以上等）を開発する。

【最終目標】

(1) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ (1σ) 以内を目指す。
- ・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

- ・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し、NEDOホームページ等のWebサイトに掲載する。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ① 低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。
- ② 太陽電池モジュールの性能30年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度±5%、加速係数100倍以上等）を開発する。

研究開発項目⑤「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) 動向調査

開発戦略の発電コスト低減目標の達成に向け、必要な情報を収集、整理、分析する。

(2) I E A国際協力事業

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) 動向調査

- ① 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
- ② 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

(2) I E A国際協力事業

N E D Oが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。

【最終目標】

(1) 動向調査

発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの可否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

(2) I E A国際協力事業

PVPSの動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

2.1.5 研究開発内容（実施機関毎）

研究開発テーマ、開発目標、研究内容は以下のとおり。

表. 2 研究開発項目①

「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発」

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

No.	開発期間	テーマ名	共同研究先	テーマ概要	目標	その他
1	H27 ～ H31	結晶 Si 太陽電池をベースとした複合型太陽電池モジュールの開発	カネカ	①集電極をセル裏面側に集約し光入射面側の遮光損を低減させること等で高出力化した高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶 Si 太陽電池の開発を開発する。 ②結晶 Si 太陽電池と非結晶 Si 太陽電池を組み合わせた複合型太陽電池を開発する。	【中間目標】 ①セル変換効率：26%、モジュール変換効率：23%、発電コスト：17 円/kWh ②結晶 Si 太陽電池単セルより変換効率が向上することを確認する。 【最終目標】 ①モジュール変換効率：24%、発電コスト：14 円/kWh ②セル変換効率：30%、モジュール変換効率：27%	
2	H27 ～ H31	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	シャープ	「太陽光発電開発戦略」で掲げる発電コスト低減目標達成のため、高性能と高信頼性を両立したヘテロ接合型バックコンタクト太陽電池の開発をする。ヘテロ接合型バックコンタクト太陽電池の持つ高いセル変換効率を確保のうえ、上記コスト目標を達成可能となる製造技術を構築する。	【中間目標】 ・モジュール変換効率 21%とし、試作モジュールで確認する。 ・「太陽光発電開発戦略」2030 年発電コスト目標 7 円/kWh への定量的なシナリオを提示する。 【最終目標】 ・モジュール変換効率 22%とし、試作モジュールで確認する。	
3	H27 ～ H31	基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発	ナミックス	モノジャンクションセル用の電極開発において SiNx を取り除かずに電流経路を形成できる複合酸化物の探索を行い、電極と Si 基板界面で Passivated Contact 構造を作り出す。これにより再結合電流を小さく抑え開放電圧増加による高効率化が可能な電極を開発する。	【中間目標】 ・低表面濃度の n ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (1×10 ²⁰ cm ⁻³) ・p ⁺ 層に対する接触抵抗 5 mΩ cm ² 以下 ・電極形成による再結合 (j _{0-met}) 500 fA cm ⁻² 以下 【最終目標】 ・低表面濃度の n ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (6×10 ¹⁹ cm ⁻³) ・p ⁺ 層に対する接触抵抗 2 mΩ cm ² 以下 (6×10 ¹⁹ cm ⁻³) ・電極形成による再結合 (j _{0-met}) 400 fA cm ⁻² 以下	
4	H27 ～ H29	赤外線 FZ 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	クリスタルシステム	低い発電コスト実現のため、高い発電効率を有し且つ長期間の効率劣化を抑制可能な高品質単結晶を安価に製造する方法が必要となり、具体的には下記を赤外線 FZ 法で実現することを目標とする。 (a) 高い発電効率を達成するため最適キャリア濃度（リン濃度）で均質組成の単結晶育成 (b) 性能劣化を誘発する酸化励起積層欠陥、COP、転位などの欠陥の無い高品質単結晶の	【最終目標】 ・インゴット製造経費 ¥1,700/kg ・直径 220mm ・長さ 300mm 以上 ・リンを均質添加した N 型単結晶であること ・ライフタイム 5msec 以上 ・結晶欠陥 大きさ 100nm 以上が 0.1 個/cm ³ 以下 ・転位がないこと（無転位） ・結晶抵抗面内分布 12% 以下 (100Ωcm, N 型結晶において) ・酸素成分および炭素成分濃度 2	

				育成 (c) 安価な製造コストの実現	$\times 10^{16} \text{atoms/cm}^3$ 以下	
5	H27 ～ H31	高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築	コマツ NTC	1. 結晶系太陽電池の発電効率向上 スライスプロセスでの結晶欠陥や不純物汚染等の、影響明確化及び改善加工技術を構築する。 2. 結晶系太陽電池の製造コスト低減 -1. ウェーハ薄板化 -2. カーフロスの削減 による、製造コスト低減加工技術を構築する。	【中間目標】 1. 試作セル発電効率 23%以上達成 2-1. ウェーハ厚さ $75 \mu\text{m}$ 加工技術確立 2-2. カーフロス $75 \mu\text{m}$ 加工技術確立 【最終目標】 1. 試作セル発電効率 25%以上達成 2-1. ウェーハ厚さ $50 \mu\text{m}$ 加工技術確立 2-2. カーフロス $60 \mu\text{m}$ 加工技術確立	
6	H27 ～ H28	太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御	トクヤマ	・原料ポリシリコン等に含まれる金属不純物のライフタイム及び変換効率に及ぼす影響を把握する。 ・原料ポリシリコン等から結晶インゴットに取り込まれる炭素等の影響などにより生成するキラ欠陥の実体を解明し、キラ欠陥の分布や状態を把握可能な最適な測定手法の開発を行う。さらに、キラ欠陥の制御方法を開発する。	【中間目標】 ・不純物および欠陥の影響把握および制御化を行う。 ・ライフタイム目標値は $1000 \mu\text{sec}$ とし、ライフタイム下限値は $300 \mu\text{sec}$ 以上とする。 【最終目標】 ・最適ポリシリコンの製品化、および高性能結晶シリコンの規格化を行う。 ・ライフタイム目標値は $1300 \mu\text{sec}$ とし、ライフタイム下限値は $500 \mu\text{sec}$ 以上とする。	
7	H27 ～ H31	低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発	京セラ	①低コスト量産プロセスでの高効率シリコン太陽電池の開発（セル効率 22%、モジュール効率 20%） 生産性が高く工程数の少ないシンプルな構造で高効率結晶シリコン太陽電池の量産化を実現する。 ②高品質量産プロセスでの高信頼性シリコン太陽電池の開発（寿命 35 年） 各種加速試験の破壊モードと実フィールドの破壊モードを紐付けすることで劣化メカニズムを把握し、劣化要因に対応したセル構造・材料、モジュール構造・材料にすることで高信頼性化を実現する。	【中間目標】 結晶 Si 太陽電池セルでセル変換効率 21%を達成する結晶成長技術、高効率セル化技術の開発および高信頼性モジュールの信頼性評価技術を確立する。 【最終目標】 結晶 Si 太陽電池セルでセル変換効率 22%、モジュール効率 20%を達成する結晶成長技術、高効率セル化技術の開発および寿命 35 年以上の結晶シリコン太陽電池セル、モジュール化技術を確立する。	

(2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	H27 ～ H31	CIS 太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発	ソーラーフロンティア	CIS 太陽電池のモジュール変換効率向上のために、光吸収層の高性能化、界面の高性能化、モジュール構造の高性能化を実施するとともに、モジュールコスト削減技術の開発を実施することで発電コスト目標を達成する。	【中間目標】 発電コスト：17 円/kWh 30cm 角サブモジュール変換効率：19% 【最終目標】 発電コスト：14 円/kWh 30cm 角サブモジュール変換効率：20%	

表. 3 研究開発項目②

「革新的新構造太陽電池の研究開発」

(1) 革新的高効率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

No.	開発期間	項目名	委託先	内容	目標	その他
I. 低コストセル技術開発						
1	H27 ～ H31	①-a 高効率 III-V薄膜セル 開発（光閉じ 込め）	東京大学 （岡田G）	1. III-V薄膜セル（非集光～高 倍集光）におけるルミネッセンス カップリング（LC）効果を考慮し た動作解析モデルの構築とセル 最適設計手法を開発する。薄膜 多接合セルの高効率化実証は シャープと連携して行う。 2. 薄膜化による光閉じ込め機構 を、量子ドットの吸収増大に適用 し、ELOによる薄膜量子ドットセル の開発と高効率化を実証する。	【29年度中間目標】 III-V薄膜セルにおいて、LC 効率の 増幅効果を実証し、光閉じ込め構造 及びセル構造を最適化することで、 変換効率30%（非集光）の実現可能 性を示す。 【31年度最終目標】 III-V薄膜セルにおいて、ELO等低 コスト化が可能なプロセスで作製す る技術を開発し、LC効果、また光閉 じ込め効果を最大活用して、変換効 率33%（非集光）を達成する。	
2	H27 ～ H31	①-a 高効率 III-V薄膜セル 開発（光閉じ 込め）	東京大学 （中野・杉 山G）	シャープと協力して、量子井戸を 含むIII-V薄膜3接合セル、及び III-V薄膜2接合＋シリコンセル に適用可能な光閉じ込めメカニ ズムを検討する。具体的には、 裏面光散乱体、表面光散乱構 造およびエピタキシャル量子構 造によるセル内光散乱体を検討 する。シミュレーションおよびテス トセルを用いた実験により各構 造の光吸収増大効果を定量化 し、薄膜多接合構造の最適設計 を提案する。	【29年度中間目標】 多接合セルに対して有効な光閉じ 込め構造を開発し、量子井戸を含む III-V薄膜3接合セルおよびIII-V薄 膜2接合＋シリコンセルの最適層 構造を提案する。これにより、変換効率 30%（非集光）の実現可能性を示 す。 【31年度最終目標】 シャープと連携して量子井戸を含む III-V薄膜3接合セルおよびIII-V薄 膜2接合＋シリコンセルに光閉じ込 め構造を実装し、光閉じ込め効果を 有効に用いることで変換効率33%の 達成に資する。	
3	H27 ～ H31	①-a 高効率 III-V薄膜セル 開発（光閉じ込め）	シャープ （株）	化合物太陽電池層の薄層化によ って材料費および生産性向上 による装置減価償却費を低減 し、低コスト化を実現することを 目的として実施する。裏面反射 の活用、セル表面での散乱制 御、ルミネッセンスカップリング （LC）の活用に関する光制御技 術開発を行う。その上で、3接 合構造における電流整合を考慮 した最適化設計を実施し、目標 を達成する。これらの内容につ いては、東京大学と連携し、同 大学で実施する光学設計や特性 シミュレーションの結果、量子構 造を利用した光制御技術を活用 する。	【29年度中間目標】 化合物太陽電池層の膜厚を従来の 1/4に低減した構造で、変換効率 30%を達成する 【31年度最終目標】 化合物太陽電池層の膜厚を従来の 1/4に低減した構造で、変換効率 33%を達成する。	

4	H27 ～ H31	①-b Si上III-V 多接合セル	シャープ (株)	InGaP/GaAs 2接合セルなどの 薄膜化合物2接合セルとSiセル とのスタックによる3接合構造の 実現を目指す。化合物太陽電池 層のSiセル表面への化合物セル の機械的接合技術の開発およ びMOCVDを用いた、Si基板 上へのIII-V層ヘテロ成長によ るセル形成技術の開発の複数の アプローチを行う。	【29年度中間目標】 III-V族2接合セルとSiセルとの接 合を行ったセルで、変換効率28%を 達成する。 【31年度最終目標】 III-V族2接合セルとSiセルとの接 合を行ったセルで、変換効率33%を 達成する。
5	H27 ～ H31	①-b Si上III-V 部分集光多 接合セル	豊田工業 大学	面積の異なるIII-VセルとSiセル をメカニカルスタックし、未集光 の光をSiセルで受光する部分集 光用III-V/Si 3接合セルの高効 率化を研究する。 また、III-V/Siタンデムセル用に 最適化したSiボトムセルを開発 する。開発したSiボトムセルは、 大阪市立大学、東京大学、 シャープにも提供して、各機関 でのセル効率の向上に寄与す る。	【29年度中間目標】 部分集光用シリコン上III-V多接合セ ルにおいて、非集光下でセル効率 28%を達成する。 【31年度最終目標】 部分集光用シリコン上III-V多接合セ ルにおいて、非集光下でセル効率 33%を達成する。
6	H27 ～ H31	①-b Si上III-V ウエハ接合セ ルp	大阪市立 大学(再 委託)	表面活性化接合法によりIII-Vセル 構造とSiボトムセル構造からな るIII-V/Si多接合セルを作製し、 高効率セル特性を実証する。	【29年度中間目標】 ウエハ接合によるシリコン上III-V多 接合セルにおいて、中間層としての 導電性酸化膜を導入しその効果を 検証する。非集光下でセル効率28% の実現可能性を示す。 【31年度最終目標】 ウエハ接合によるシリコン上III-V多 接合セルにおいて、非集光下でセ ル効率33%を実現する。
7	H27 ～ H31	プラスチックレ ンズ一体型セ ル・モジュー ル	パナソ ニック(株)	超高効率発電素子の大きさを 1mm□よりも微小化し、構成部 品のほとんどを低価格で軽量の プラスチック材料にすることで、 材料コスト、重量、および、体積 が従来型CPVよりも約1桁低い、 高効率なPIC・モジュールを実現 する。これにより、PICモジュール 製造コスト、PICを用いた太陽光 発電システムの輸送・設置コスト を低減し2030年に7円/kWhを目 指す。	【中間目標】 以下の性能を有するPICモジュール の実現 ・大きさ: 23cm□ ・発電効率: >30% ・集光倍率: ~1000倍 ・システム価格125円/Wを実現する 構造・工法を明確化 【最終目標】 以下の性能を実現するPICパネルの 実現 ・大きさ: 91cm□ ・発電効率: 38% (23cm□モ ジュール) ・システム価格: 190円/W ・PICモジュール製造コスト: ≤80円 /W ・発電コスト: ≤14円/kWh
II. 低コスト化プロセス技術開発					
1	H27 ～ H31	②-a 低コスト 実装プロセス: メカニカルス タック ①低コストハイ ブリッド多接 合技術開発	産業技術 総合研究 所	スマートスタック技術により、Siま たはCIGS等の低コストボトムセ ル上にIII-V族トップセルを接合 するハイブリッド接合技術の研究 を行う。現状接合条件の最適化 等、スマートスタック技術を高度 化し、最終的に30%以上の変換 効率を目標に、研究開発を行 う。	【29年度中間目標】 ・GaAs/Si系、GaAs/CIGS系多接合 で変換効率28%を達成する。 ・システム価格220円/Wを見込むス タック技術達成手段の明確化。 【31年度最終目標】 ・GaAs/Si系、GaAs/CIGS系多接合 で変換効率30%を達成する。 ・システム価格125円/W実現のため のスタック技術確立の指針を得る。

2	H27 ～ H31	低コスト実装プロセス:メカニカルスタック ② 実用化技術開発	産業技術総合研究所	大面積セルを接合するための実装技術を開発するとともに、発電寿命30年以上を有するスマートスタック高信頼性技術の確立を行う。	【29年度中間目標】 ・セル面積4インチ相当実装技術の明確化。 ・素子寿命30年の高信頼性化技術指針を明確化。 【31年度最終目標】 ・大面積化セルの実装技術を確立する。 ・素子寿命30年以上の高信頼性化技術指針を確立する。
3	H27 ～ H31	低コスト実装プロセス:メカニカルスタック	東京農工大学	①高度光利用技術開発 ①-1光反射ロス評価用数値解析プログラム開発 ①-2無反射透明導電膜成膜開発 ①-3透明接着剤の探査と開発 ②大面積低抵抗接合技術開発 ②-1低抵抗化検討 ②-2耐環境安定接合技術 ③高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発 ③-1非真空系無反射薄膜形成技術開発 ③-2低コスト対応高効率ソーラーセル実証	【22年度中間目標】 ①高度光利用技術開発:メカニカルスタック層の光の伝達効率92%(光反射ロス8%) ②大面積低抵抗接合技術開発:4インチレベルにおいてメカニカルスタック層の接合抵抗率0.8Ωcm ² ③高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発:効率28%セルの実現とシステムコスト220円/Wを見込むスタック技術確立。 【26年度最終目標】 ①高度光利用技術開発:メカニカルスタック層の光の伝達効率94%(光反射ロス6%) ②大面積低抵抗接合技術開発:4インチレベルにおいてメカニカルスタック層の接合抵抗率0.5Ωcm ² ③高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発:効率30%セルの実現とシステムコスト125円/Wを見込むスタック技術確立。
4	H27 ～ H31	②-a 低コスト実装プロセス:エピ層移載	東京大学(岡田G)	1. ELOによる薄膜セル剥離技術の開発と最適化を行う。 2. 化学エッチング及び再成長前の基板の表面クリーニング技術を組み合わせ、10回以上再利用可能なウエハ再生技術を開発する。 3. 再成長表面の清浄化技術として、原子状水素クリーニング法を開発する。 ELO薄膜裏面、また剥離後のウエハ表面の観察技術、及びELOプロセスの最適化は、タカノ、シャープと協力して行う。	【29年度中間目標】 (1) ELOプロセス最適化、指針検討 (2) 基板再利用に向けたELO後の基板表面清浄化手法の最適化 【31年度最終目標】 (1) 4インチウエハサイズのELOを可能とする表面清浄化技術の最適化 (2) 10回以上の再利用基板上へのIII-V化合物セル作製
5	H27 ～ H31	②-a 低コスト実装プロセス:エピ層移載	タカノ(株)(再委託)	1. 4インチウエハサイズのELOを効率良く行える自動機を開発する。 2. 基板表面の全面観察装置の開発を行う。また、短時間で全面観察を完了(4インチサイズを1時間以内)するための高速化を行う。 ELOによる薄膜セル剥離技術、及びELO後のサンプル表面観察装置開発は東大と協力して行う。	【29年度中間目標】 (1) 4インチウエハサイズのELOを再現性良く行うためのELO装置化に向けた検討 (2) 基板再利用に向けたELO後ウエハ表面の全面観察手法に関する基礎技術の開発と装置化に向けた検討 【31年度最終目標】 (1) 4インチウエハサイズのELO自動化装置の開発 (2) 4インチウエハ表面の高速観察(1時間以内)可能な装置の開発

6	H27 ～ H31	②-a 低コスト実装プロセス:エピ層移載・ウエハ再利用	シャープ(株)	基板コスト低減のために、エピタキシャルリフトオフ(ELO)プロセスにより化合物太陽電池層をGaAs基板から分離し、基板再生プロセスを経て、GaAs基板上に再度太陽電池層を成長させる一連のプロセスを確立することによって、セル製造コスト低減の見通しを得ることを目的とする。	【29年度中間目標】 ELOプロセスを経た2接合太陽電池層をセル化し、変換効率25%以上を達成すると同時に、分離した基板を少なくとも1回再成長に利用できるプロセスを開発する。 【31年度最終目標】 基板の再利用可能回数を10回まで向上させる。
7	H27 ～ H31	②-b シリコン上III-Vエピ成長	豊田工業大学	安価なシリコン基板上に高品質なIII-V化合物半導体層を成長する成膜技術を開発する。	【29年度中間目標】 歪緩和バッファ層の基本構造確立 シリコン上III-V層において、転位密度 10^6 cm^{-2} 以下 【31年度最終目標】 セル効率33%達成に必要な転位密度低減として、シリコン上III-V層において、転位密度 10^5 cm^{-2} 以下を実現する。
8	H27 ～ H31	②-b シリコン上III-Vエピ成長	宮崎大学(再委託)	Si上に高品質(低転移密度)のGaAs薄膜作製を目指し、エピタキシャル成長を行う。この際、ALE法、低温成長、レーザーアニール、Geバッファ層、選択成長、CBEとの2段階成長といった技術を組み合わせて低転移化を進める。	【29年度中間目標】 セル効率28%達成に必要な転位密度低減として、シリコン上III-V層において、転位密度 $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下を実現する。 【31年度最終目標】 セル効率 33%達成に必要な転位密度低減として、シリコン上 III-V 層において、転位密度 $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 以下を実現する。
9	H27 ～ H31	②-c 低コストIII-V化合物半導体製膜技術:MOCVD	大陽日酸(株)	多接合III-V族化合物半導体セルに用いるInGaP、GaAs等のMOCVDプロセスにおいて、原料利用効率とスループットを向上させる装置技術開発を行い、成長条件最適化指針を獲得する。 さらに、前述のとおり、同じサブテーマで開発するH-VPEの進捗も踏まえて、MOCVDとH-VPEのハイブリッド装置により、低コストIII-V化合物半導体太陽電池を形成する新規プロセスを構築することも検討する。	【29年度中間目標】 MOCVDにより成長速度 $40 \mu \text{ m/h}$ (GaAs)、 $10 \mu \text{ m/h}$ (InGaP)を得る。また、III族利用効率30%以上を達成する。さらに、in situクリーニングや搬送時間の削減による高スループット化の検証と問題点抽出を行う。 【31年度最終目標】 MOCVDとHVPEを組み合わせたハイブリッド装置により成長速度 $100 \mu \text{ m/h}$ (GaAs)、 $20 \mu \text{ m/h}$ (InGaP)を得る。また、III族利用効率40%以上を達成する。さらに、in situクリーニングや昇降温・搬送時間の削減による高スループット化手法を構築する。MOCVDとHVPEの長所を融合したハイブリッド装置やその大口径化の有効性を検証する。
10	H27 ～ H31	②-c 低コストIII-V化合物半導体製膜技術:MOCVD	東京大学	大陽日酸が開発する高速MOCVD装置および成長条件を用いて、GaAsおよびInGaP結晶層を成長し、キャリア移動度・寿命などの特性と成長条件との相関を明確化、高速成長条件最適化にフィードバックする。さらに、得られた条件をもとにGaAsおよびInGaP単セルを作製しつつ装置形状や製膜条件を改良し、多接合セルの低コスト・高効率化に十分な高速MOCVD条件を構築する。	【平成29年度中間目標】 大陽日酸と共同で、高速製膜条件を用いて単セル効率20%(GaAs $40 \mu \text{ m/h}$)、12%(InGaP $10 \mu \text{ m/h}$)を得る。 【平成31年度最終目標】 大陽日酸と共同で、MOCVDおよびHVPEを組み合わせた高速製膜(GaAs $100 \mu \text{ m/h}$ 、InP $20 \mu \text{ m/h}$)を用いて単セル効率20%(GaAs $40 \mu \text{ m/h}$)、12%(InGaP $20 \mu \text{ m/h}$)を得る。

11	H27 ～ H31	②-c 低コスト Ⅲ－Ⅴ化合物半導体製 膜技術： HVPE	大陽日酸 ㈱	東京農工大と連携してHVPE装 置の設計、開発を行う。Ⅲ族塩 化物生成反応、およびⅤ族水素 化物ガス分解効率を極限まで高 めた反応管の設計を行い、装置 製作、試運転を実施する。また、 ELO技術のためのAlAs層導入 や量産型装置設計の検討を行 う。さらに、HVPE、MOCVDの双 方の利点を生かしたハイブリッド 型結晶成長システムの構築を試 みる。	【29年度中間目標】 (GaAs)、10 μ m/h (InGaP)を得るとと もに、AlAs製膜における問題点を抽 出する。 【31年度最終目標】 HVPEにより成長速度100 μ m/h (GaAs)、20 μ m/h (InGaP)を得るとと もに、ELOによる基板リサイクル可能 なAlAsを製膜する。MOCVDと HVPEの長所を融合したハイブリッド 装置やその大口径化の有効性を検 証する。
12	H27 ～ H31	②-c 低コスト Ⅲ－Ⅴ化合物半導体製 膜技術： HVPE	産業技術 総合研究 所	超高速・低コストエピタキシャル 結晶成長法であるハイドライド気 相成長法(H-VPE法)により、Ⅲ- Ⅴ族化合物半導体太陽電池作 製技術の研究開発を行う。GaAs セルの製膜速度を現状の6倍以 上、成膜コストを1/10以下に削減 する革新的成膜技術の開発を 目指す。	【29年度中間目標】 ・高速成膜技術開発およびセル効 率15% (GaAs)、8% (InGaP)を達 成 ・AlAsをH-VPEにより得るための課 題抽出。InGaP/GaAsタンデム太陽 電池を試作、課題抽出。 【31年度最終目標】 ・成膜技術開発(高速成長)および単 セル効率18% (GaAs)、12% (InGaP) を達成する。 ・AlAs層の成長によりELOを実証。 InGaP/GaAsタンデム太陽電池を試 作し、開放電圧2V以上。
13	H27 ～ H31	②-c 低コスト Ⅲ－Ⅴ化合物半導体製 膜技術： HVPE	東京農工 大学	産総研、大陽日酸と連携し、 HVPEの設計に肝要な熱力学計 算及び流体計算を担当する。 具体的には以下を行う ・GaAsおよびInGaP三元混晶H- VPE成長の装置設計支援 ・GaAsおよびInGaP三元混晶H- VPE成長の成長支援 ・AlAs H-VPE成長支援	【29年度中間目標】 ・GaAsおよびInGaPのH-VPE成長の 原料生成メカニズムおよびH-VPE成 長のメカニズムを明らかにする。 ・熱力学解析および流体解析によ り、GaAs: 30 μ m/h以上、InGaP: 10 μ m/h以上の超高速成長技術の成 長条件を確立する。 ・AlAs H-VPE実現のための原料生 成および結晶成長メカニズムを明ら かにするとともに、熱力学解析によ り、原料部および析出部の反応メカ ニズムを明らかにする。 【31年度最終目標】 ・量産装置により、GaAs: 30 μ m/h以 上、InGaP: 10 μ m/h以上の超高速 成長技術の成長条件を確立する。 ・AlAs H-VPEの量産装置で実現す る。
Ⅲ. 低コストモジュール開発					
1	H27 ～ H31	③-a 低コスト モジュール開 発	シャープ (株)	Ⅱ.低コスト化プロセス技術開発 で開発する低コスト化合物太陽 電池セル技術を用い、将来の発 電コスト目標(7円/kWh @ 2030 年)達成に寄与し得るモジュー ル技術の開発を目的とする。具 体的には、1.5～3倍程度の低い 倍率の集光を行うことで化合物 太陽電池の使用量を一定量削 減し、モジュールの低コスト化を 図る。	【29年度中間目標】 集光倍率1.5～3倍程度の低倍集光 モジュールにおいて、許容入射角 (光学効率が、垂直入射時比90%と なる入射角)15° 以上を達成する 【31年度最終目標】 前記開発テーマ「Ⅰ.低コストセル技 術開発」および「Ⅱ.低コスト化プロセ ス技術開発」の 成果を利用して作製したセルを用 い、モジュール変換効率30%以上 を達成する。

2	H27 ～ H31	③-a 低コスト モジュール開 発	宮崎大学	低コストでモジュール効率を向上させる手法について開発する。汚れがセルへの入射光スペクトルに与える影響等を詳細に調査するとともに、簡便な超親水性シリカベースコートによりガラス表面の汚れを抑制できる技術を応用することにより、長期にわたり高出力を維持するモジュールの開発に取り組む。	【29年度中間目標】 モジュール表面コート技術の開発により、1.5～3倍程度の集光が可能な低倍集光モジュールの開発において、許容角15°で90%以上の出力を達成することに寄与する。 【31年度最終目標】 モジュール表面コート技術の開発により、非集光下での効率33%セルを使用し、モジュール効率30%を達成する。
3	H27 ～ H31	③-a 低コスト モジュール開 発	豊田工業 大学	宮崎大学と連携して追尾無し、あるいは低精度追尾でも安定した動作が可能なモジュールの開発を行う。具体的には、追尾無しでも動作可能なモジュールと、低精度および10分ごとの間欠追尾でも安定な発電を行うことが可能なモジュールの開発を行う。	【29年度中間目標】 10分ごとの間欠追尾でも動作可能なモジュールの設計と製作を行い、非集光下で効率30%のセルを用い、モジュール効率27%を達成する。 【31年度最終目標】 非集光下で効率33%のセルを用い、モジュール効率30%を達成する。
4	H27 ～ H31	③-b 低コスト モジュール発 電量試算、屋 外評価	宮崎大学	モジュール出力のスペクトル依存性を詳細に解析することにより、国内の実環境における環境要因において年間を通じて最も効率よく出力できるセルやモジュールの設計を行う。また、安価な追尾機構を実現するため、モジュール出力の太陽光入射角度依存性を測定し、どこまでラフな追尾でも出力を維持することができるかを明らかにする。	【29年度中間目標】 スペクトルや太陽光入射角度がモジュール出力におよぼす影響について実測・解析する。国内の実環境における環境要因において年間を通じて最も効率よく出力できるセルやモジュールの設計を行う。 【31年度最終目標】低コストモジュールの発電量や設備利用率の試算を実施し、7円/kWhの検証に必要なデータを取得する。
5	H27 ～ H31	③-b 低コスト モジュール発 電量試算、屋 外評価	シャープ (株)	前項③-a で開発したモジュールの屋外評価を、宮崎大学と連携して実施する。宮崎大学の評価技術およびテスト環境を活用し、当事業者が開発したモジュールを、宮崎大学が評価を実施し、評価データ、解析結果を共有する形で進められ、下記を目標として実施される。	【29年度中間目標】 スペクトルや太陽光入射角度がモジュール出力におよぼす影響について実測・解析する。また発電コスト試算に向け、実測データを元に設備稼働率の算出を行う。 【31年度最終目標】低コストモジュールのフィールドテストを実施し、発電量や設備稼働率の実測結果から、発電コスト7円/kWhの達成に向けた見通しを得る。
IV. 超高効率セル開発					
1	H27 ～ H31	④-a エピタキ シャル多接 合:希釈窒化 物-MBE	東京大学	1. 水素MBE成長により、Geボトムセル上への高品質GaInNAs:Sbセルの再成長条件の最適化を行う。 2. エピタキシャル成長、ウェハ接合、メカニカルスタック技術により InGaP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4接合セルを開発する。 さらに、窒素δドープ超格子構造を利用した1eV帯GaInNAs混晶の開発は埼玉大と協力して行う。また高倍集光時のルミネッセンスカップリングの影響を考慮した素子設計はシャープと連携して行う。4接合セル化は、東大グループ、産総研、シャープと連携して進める。	【29年度中間目標】 水素MBE法によるGeボトムセル上へのGaInNAs:Sbセルの再成長条件の最適化、及び2接合セルの作製評価 GaInNAs:Sbセルにおいて、上部サブセルのフィルタ下で短絡電流密度12mA/cm ² 以上の達成 【31年度最終目標】 GaInNAs:Sb/Ge 2接合セル上へのInGaP/GaAsトップ2接合セルのエピタキシャル積層技術、及びメカニカルスタック技術を確立し、4接合セルにより変換効率50%を実現。

2	H27 ～ H31	④-a エピタキシャル多接合:希釈窒化物-MBE	埼玉大学 (再委託)	InGaAs中へのN δドープ層導入で超格子を作製し格子歪・バンドギャップ制御を実証, バンドギャップ約1 eVのInGaAs:N δドープ超格子を実現. Si添加n型GaAs:N δドープ超格子の作製と電気特性評価を実施. 800度のアニールによりSiが活性化, かつ電子移動度が増大し, 同程度のN組成のGaAsNランダム混晶に比べ高い移動度を得た.	【29年度中間目標】 Geに格子整合可能な1 eV帯混晶膜の作製 少数キャリア寿命1~2 ns以上, 電子移動度400 cm ² /Vs以上の混晶膜の作製. 【31年度最終目標】 GaAs基板上GaInNAsへテロ接合セルの構造設計及び試作を行い, GaAsフィルタ下で短絡電流密度14 mA/cm ² 以上を得る.
3	H27 ～ H31	④-a エピタキシャル多接合:希釈窒化物-CBE	豊田工業大学	ケミカル・ビーム・エピタキシー(CBE)法を用いた高品質なGaInNAs材料を開発することにより, GaInNAs材料をサブセルに用いた3接合, 4接合セルの研究開発を行う。	テーマ整理により中止
4	H27 ～ H31	④-a エピタキシャル多接合:希釈窒化物-CBE	九州大学 (再委託)	ケミカル・ビーム・エピタキシー(CBE)法を用いた高品質なGaInNAs材料を開発することにより, GaInNAs材料をサブセルに用いた3接合, 4接合セルの研究開発を行う。	テーマ整理により中止
5	H27 ～ H31	④-a エピタキシャル多接合:既存構造	シャープ (株)	変換効率50%超(集光時)の実現に貢献するために, 前プロジェクトで開発した逆積み3接合型太陽電池の変換効率を37.9%(非集光)から更に向上させることである。具体的には, ルミネッセンスカップリングを活用した逆積み3接合セルを開発する	【29年度中間目標】 逆積み3接合型太陽電池において, ルミネッセンスカップリングの活用によって高効率化を進め, 前プロジェクトで達成した37.9%を超える変換効率(>38%)を達成する。 【31年度最終目標】 他機関と共同で4接合もしくは5接合型太陽電池を開発し, 50%(集光時)の変換効率を目指す。
6	H27 ～ H31	④-a エピタキシャル多接合:量子構造	東京大学 (中野・杉山G)	(1) 第3セルに有効バンドギャップ1.15 eVの超格子を挿入し, 電流整合のとれたエピタキシャル4接合を作製することで, 集光下効率50%の実現を目指す。 (2) 超格子挿入によるサブセルにおける発光再結合効率向上効果を定量化し, 複数のサブセルにおいて超格子を活用したルミネッセンスカップリングにより, 太陽光のスペクトル変動に影響されにくい3接合・4接合セルの設計手法を構築する。	【29年度中間目標】 1.15 eVバンドギャップサブセルに関して, 波状構造超格子を用いた単セルにおいて, 電流整合4接合セルの要求値(1.49 eVのフィルタ下で短絡電流9.5 mA/cm ² /sun, 開放電圧0.75 eV, 曲線因子77%)を達成する。また, 量子井戸セルを挿入した多接合セルにおけるルミネッセンスカップリングの効果を定量化し, 4接合セルの最適設計に資する。さらに, 超格子挿入4接合セルの実装に必要な低抵抗トンネル接合などの要素技術を確立する。 【31年度最終目標】 超格子を挿入した4接合セルにより, 集光下効率50%を達成する。

7	H27 ～ H31	④-a エピタキシャル多接合: 多接合動作解析	宮崎大学	多重量子井戸(MQW)を光吸収層に挿入した太陽電池構造に外部電場を印加し、バンド傾斜が各種キャリア緩和過程に与える影響を明らかにすることで最適構造に関する知見を得る。また、集光動作時の高温測定を行い、各種キャリア緩和過程に与えるセル温度の影響を明確にすることで、高いキャリア回収効率をもつ多接合セル構造(バンドラインナップ)の提案を行う。	【29年度中間目標】太陽電池光吸収層に多重量子井戸や超格子あるいは量子ドット構造を挿入したエピタキシャル多接合セルにおけるキャリア回収過程について、内部電界およびセル温度の影響を明確にする。 【31年度最終目標】 効率50%超の多接合・量子構造セル実現のための半導体バンドラインナップの確立
8	H27 ～ H31	④-b ハイブリッド多接合: ウエハ接合	東京大学 (中野・杉山G)	GaAs基板上に成長した2接合セルと、InP基板上に成長した2接合セルをウエハ接合技術によって接合させることで効率50%の4接合太陽電池セル実現を目指す。このために、まずInP上のInGaAsP/GaAsP 2接合セル作製技術を確立する一方、GaAsとInPの接合技術(主に表面活性化接合)を開発する。4接合セルの作製・実証はシャープと連携して行う。	【29年度中間目標】 GaAs系2接合とウエハ接合による4接合セルを形成するためのInP系2接合セルを作製し、GaAsフィルタ下でGaAs系2接合と電流整合条件を確認する。また、GaAs系2接合とInP系2接合の接合条件を確立する。 【31年度最終目標】 GaAs系接合とInP系2接合から成る4接合セルにより、非集光時変換効率42%、集光下変換効率50%を目指す。
9	H27 ～ H29	④-bハイブリッド多接合:窒化物	名古屋大学	窒化物半導体を用いて、半極性面および極性面における各In組成におけるPVセル効率のシミュレーションと(1-101)面GaNの決勝成長を行った。半極性面において、十分な性能のPVセルの作成が可能であることを示したが、実際の結晶成長においては、ヒロックからの電流リークが多く、エビ法の改善が必要である。平成29年度も引き続き(1-101)面での結晶成長の最適化を図る。	【29年度中間目標】InGaN吸収層を利用したPVのPCシミュレーションに基づき、c面、-c面、(1-101)面に成長する厚膜InGaNを用いたセルの最適構造設計を行う。 1) InGaN結晶成長を行い、各成長面におけるIn組成40%のInGaN膜成長を実現する。2)シミュレーションにおいて30%以上の変換効率を達成し、結晶成長およびデバイス構造の最適化との比較を行う。
10	H27 ～ H29	④-bハイブリッド多接合:窒化物	名城大学	窒化物半導体材料とGaAs系材料の接合技術を検討した。ITOを中間層として用いる方法および直接接合法の比較を行い、プロセスの容易さなどから直接接合法によりInGaN/GaInP/GaAs/Ge 4接合太陽電池を試作し、開放電圧の上昇などを確認した。平成29年度は同手法の最適化を進めInGaNトップセルの有用性を示すことを目的に実験を進める予定である。	【29年度中間目標】 窒化物半導体太陽電池と3接合太陽電池の接合技術を確立し、4接合セルを作製する技術を確立することし、窒化物半導体材料がトップセル材料として有用であることを実証する。
11	H27 ～ H31	④-bハイブリッド多接合:窒化物	東京大学 (藤岡G)	InGaNトップセルとGaAsベース3接合セルを4接合セル化するための取り組みを行う。本項目では、低温PSD法を用いて無歪・低欠陥のInGaN結晶成長を行い、高品位InGaN基板を供給するための技術を開発する。	【29年度中間目標】 低温PSD法によってIn組成40%、膜厚数ミクロン以上のInGaN厚膜を実現する。

12	H27 ～ H31	④ -c 量子ドット・マルチバンド	東京大学 (岡田G)	タイプII型量子ドット及び量子ドット超格子における中間バンド長寿命化による2段階光吸収の増大と、バリア構造による熱脱出の抑制とキャリア収集効率改善を目指した構造の検討を行い、中間バンド型動作による室温高効率化の達成に向けた指針を解明する。	<p>【29年度中間目標】 低倍集光量子ドットセルで効率30%を達成。</p> <p>【31年度最終目標】 低倍集光量子ドットセルで効率45%を達成。</p>
13	H27 ～ H31	④ -c 量子ドット・マルチバンド	東京大学 (久保・立間G)	<p>○量子ドットボトムセルの高効率化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・コロイド量子ドット溶液の吸収領域を0.65eVまで拡張し、EQEおよび短絡電流密度を高める。 <p>○ナノ粒子の設計・合成・評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1500 nm域までプラズモン共鳴を示す金属ナノ粒子を組み込んだ量子ドット太陽電池特性の光増強効果を確認。 	<p>【29年度中間目標】 (1)PbS/ZnO-NWセルの近赤外領域(800nm以上)で、PCE=4%とJsc=14mA/cm²を達成。 (2)PbS-QDの吸収領域を0.65eVに拡張し、第一励起子吸収に対応するEQEで20%を達成。 (3)金属ナノ粒子のプラズモン電場共鳴を1400nmで達成し、PbS/ZnO-NWセルに組込、特性を評価。</p> <p>【31年度最終目標】 プラズモン金属ナノ粒子層を組み込んだPbS/ZnO-NW太陽電池の近赤外領域(900nm以上)において、PCE=4%以上を達成すると共に、接合層を実装したタンデムセルを実現</p>
14	H27 ～ H31	④ -c 量子ドット・マルチバンド	産業技術総合研究所	ワイドギャップホストを用いたバンド構造の最適化、タイプII量子ドット構造によるマルチバンドの長寿命化を両立したセルを作製し、マルチバンドセルの超高効率化を実現する。	<p>【29年度中間目標】 低倍集光量子ドットセルで効率30%を達成する。(東大岡田Gと共同)</p> <p>【31年度最終目標】 低倍集光量子ドットセルで効率45%を達成する。(東大岡田Gと共同)</p>
15	H27 ～ H31	④ -c 量子ドット・マルチバンド	電気通信大学	面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の量子ドット成長技術の確立および熱処理による結晶性改善効果の確認。Type-II型面内超高密度量子ドット層における励起子状態、ドット間の電子輸送、光吸収・再結合遷移過程の解明。GaAsスペーサ層の導入による長寿命化の達成。	<p>【22年度中間目標】 量子ドット面内密度$1 \sim 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$の達成、 面内高密度量子ドット層の多重積層化($1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$の達成)、 type-IIバンド構造による蛍光寿命10ns以上、低集光特性評価</p> <p>【26年度最終目標】 面内高密度InAs(Sb)量子ドットの積層成長による超高密度化およびtype-IIバンド構造によるキャリアの長寿命化を達成し、集光時の変換効率45%を目指す。</p>

16	H27 ～ H31	④ -c 量子ドット・マルチバンド	神戸大学	キャリアの長寿命化と高いキャリア引出効率を実現するため、中間バンドを介したキャリアダイナミクスを超精密に評価する技術を開発し、キャリア寿命制御技術を構築する。これによって、中間バンドを介した2段階光励起プロセスを最大化し、量子ドット・マルチバンドセルの効率向上につなげる。	<p>【29年度中間目標】 キャリア寿命制御技術を構築して、10ns以上の長寿命化を達成する。2段階光吸収を顕在化させて、キャリア引出効率50%を達成する。</p> <p>【31年度最終目標】 中間準位キャリアの長寿命化の集光倍率依存性を解明するとともに、ワイドホストヘテロ構造の最適化によるキャリア分離の最適化の検討をより一層進めることによって、室温におけるキャリア寿命として100nsを超える長寿命化を実現し、キャリア取出し効率は80%以上まで引き上げる。以上により、量子ドット・マルチバンドセルの効率45%に貢献する。</p>	
----	-----------------	-------------------	------	--	--	--

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
塗布製造技術の開発						
1	H27 ～ H31	塗布製造技術の開発	パナソニック株式会社	高効率化技術の研究開発として新規材料の探索、物性評価を進め、高効率化及びその支配因子の特定を図り、変換効率20%の実証を図る。また、高耐久化技術の研究開発として薄膜太陽電池や有機EL封止技術等を活用し、効率的材料探索により変換効率20%の材料系での劣化要因抽出、耐久性向上方策を見出し、低製造コスト実現の要素技術開発を行う。また、モジュール化技術の研究開発として、直列構造化による効率低下抑制と直列化工法による効率低下抑制のための要素技術開発を行う。	<p>【中間目標】 0.5 cm²程度の小面積太陽電池において変換効率20%を実現する。また、同じく0.5 cm²程度の封止した小面積太陽電池において耐久性(85℃, 85%, 1000hrでの相対効率維持率95%以上)を実証する。さらに、5直列接続の集積モジュールで開放電圧5V(セル単位で1V)以上を達成する。</p> <p>【最終目標】 実験室レベル(100 cm²程度)でのモジュール効率20%を実現する集積化モジュール構造を確定するとともに、製造コスト15円/W達成の指針を示す。</p>	
超軽量太陽電池モジュール技術の開発						
1	H27 ～ H31	超軽量太陽電池用塗布印刷/モジュール化技術の開発	東芝	2030年での7円/kWhを目指し、ペロブスカイト太陽電池モジュールの開発を行う。印刷技術を用いて、高効率化技術の開発を行う。超軽量モジュールはロールトゥロールプロセスによる製造コスト低減が可能で、その軽量性から設置コストの削減も見込める。	<p>【中間目標】 ・5cm角程度の超軽量モジュールの変換効率10%を達成する。</p> <p>【最終目標】 30cm角程度の超軽量モジュールで変換効率15%、あるいは15cm角程度の超軽量モジュールで変換効率17%を達成する。</p>	
2	H27 ～ H31	超軽量太陽電池の耐久性向上技術の開発	東芝	2030年での7円/kWhを目指し、超軽量ペロブスカイト太陽電池の耐久性向上の開発を行う。	<p>【中間目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験の耐熱試験、光照射試験で、変換効率12%の1cm角程度の超軽量セルの相対低下率10%以下を達成する。</p> <p>【最終目標】 ・JIS規格C8938準拠の耐久性試験の耐熱試験、光照射試験</p>	

					で、変換効率17%の5cm角程度の超軽量モジュールの相対低下率10%以下を達成する。
低コスト R2R 太陽電池製造技術の開発					
1	H27 ～ H31	超軽量太陽電池の耐久性の向上	積水化学工業(株)	当社が構築してきた封止・バリア技術をベースに、ダイレクトバリア技術をペロブスカイト太陽電池へ適用し、屋外耐久10年以上を目指す。	【中間目標】 <ul style="list-style-type: none"> ・ J I S 規格 C 8 9 3 8 準拠の耐久性試験5項目について、変換効率10%の1cm角程度の超軽量セルの相対低下率10%以下を達成する。 【最終目標】 <ul style="list-style-type: none"> ・ J I S 規格 C 8 9 3 8 準拠の耐久性試験5項目について、変換効率17%の5cm角程度の超軽量モジュールの相対低下率10%以下を達成する。
2	H27 ～ H31	R2Rプロセス・材料技術の開発	積水化学工業(株)	低コスト製造工程の実現に向け、R2Rプロセス技術を構築し、超軽量太陽電池の革新的低製造コスト化を実現する。ペロブスカイト太陽電池の低コスト製造に必要な材料特性を明確化し、コンソ内にフィードバックすることにより発電コスト7円/kWhに向けた、量産時の製造コスト15円/W、モジュール効率15%の技術を開発する。	【中間目標】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 10cm角程度の超軽量セルにて変換効率ばらつき$3\sigma < 1$を達成する。 ・ 太陽電池セル材料・構造に関する要素技術を開発し、量産時に超軽量モジュール製造コスト15円/Wに必要な条件を明確化する。 【最終目標】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 超軽量基板小面積セルで変換効率18.8%(2mm角)を達成する。 ・ 30cm角程度の超軽量モジュールで15%、あるいは15cm角程度の超軽量モジュールで17%を達成する。 ・ 量産時にモジュール製造コスト15円/Wを実現し得る、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術を開発する。
高性能・高信頼性確保製造技術の開発					
1	H27 ～ H31	太陽電池セル構成材料の基礎検討(太陽電池の低コスト材料・製造技術の開発) セル・小モジュール(100mm角)作製プロセスの革新	アイシン精機株式会社	【低コスト化の要素技術】 <ul style="list-style-type: none"> ① 高性能高信頼性を確保する要素(材料・製造)技術開発 ② 低コスト化に向けた、革新的モジュール製造技術の開発 	【中間目標】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 金代替対極の開発 ・ 非焼成材料で焼成材料(TiO2)と同等の出力確保 ・ 低コスト塗工技術開発: スプレー塗工法の開発 ・ 100mm角モジュールで小型セル変換効率の8割を達成する製造技術の確立 【最終目標】 <ul style="list-style-type: none"> ・ 300mm角モジュールで小型セル変換効率の8割を達成する製造技術の確立
2	H27 ～ H31	太陽電池セル構成材料の基礎検討 (太陽電池の低コスト材料技術の開発)	株式会社アイシン・コスモス研究所	【低コスト化の要素技術】 <ul style="list-style-type: none"> ① 高性能高信頼性を確保するセル製造技術の確立 ② 低コスト化に向けた、新規HTM(ホール輸送剤)材料技術の開発 	【中間目標】 <ul style="list-style-type: none"> 新規HTM(ホール輸送剤)材料の探索と絞込み 【最終目標】 <ul style="list-style-type: none"> ・ ペロブスカイト層のモルフォロジー制御方法の確立 ・ 従来の材料 spiro-OMeTAD に対し、コスト1/10を実現しうる新

					規 HTM (ホール輸送剤) 材料の開発
高性能材料合成技術の開発					
1	H27 ～ H31	(1) 正孔輸送材料合成技術開発	富士フイルム	耐湿性低下を引き起こす親水性ドーパントを用いずに spiro-MeOTAD 同等の変換効率を有す正孔輸送材料を開発する。	<p>【中間目標】 HOMO レベル-5.3eV 以下と spiro-MeOTA 以上の電流値または spiro-MeOTAD に対し同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ 及び耐湿性を可能とする正孔輸送材料設計を抽出する。</p> <p>【最終目標】 spiro-MeOTAD 同等以上の効率および耐湿性が可能な正孔輸送材料設計を抽出する。</p>
2	H27 ～ H31	(2) ペロブスカイト材料技術開発	富士フイルム	ペロブスカイトの構成成分の変更、表面処理等の耐湿性向上技術を開発する。	<p>【中間目標】 長波長端 750nm 以上且つ、CH3NH3PbI3 同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ と耐湿性を可能とするペロブスカイト材料設計を抽出する。</p> <p>【最終目標】 CH3NH3PI3 同等以上の効率および耐湿性が可能なペロブスカイト材料設計を抽出する。</p>
3	H27 ～ H31	(1)、(2) 共通項目	富士フイルム		<p>【中間目標】 セル効率 20%以上</p> <p>【最終目標】 モジュール効率 20%以上 または、セル効率 25%以上</p>
基板材料技術と性能評価技術の開発					
1	H27 ～ H31	高性能基盤材料技術の研究開発	早稲田大学	<p>①モジュール用ホール輸送材料(HTM)コスト低減 (低コスト化技術・耐久性向上)</p> <p>②製造工程簡易化によるコスト低減 (高速製造技術の開発)</p> <p>③準位・界面制御によるセル効率向上 (出力向上)</p>	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・耐久性・歩留り高い最適な HTM を選定し、効率 20%を達成可能な HTM 材料でコスト 250 円/m²を実現する。 ・低コスト製造要素技術を検討し、効率 20%を達成可能な材料系でホール輸送層 (HTL) 製造コスト 500 円/m²を試験する。 ・以上、セル効率 20%を実現する要素技術を確立する。 <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・安価な材料から合成の工程最適化、HTM 材料コスト 100 円/m²・製造工程を簡易化、150 円/m² ・高性能な HTM 材料での効率増大、小面積セル 25%
2	H27 ～ H31	基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発	物質材料研究機構	セル構造の改良、認証データ取得	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・連続光照射 200 時間超でも安定動作可能なセル構造を明確化する。 ・$J-V$ 測定ヒステリシスを効率で 3%以内にするセル構造を提示する。 <p>【最終目標】 光照射 1000 時間超、ヒステリシス 1%以内のセル要素技術</p>
3	H27 ～ H31	信頼性の高い性能評価手法の確立	神奈川県立産業技術総合研究所	性能評価法の確立、耐久性評価と劣化因子の特定	<p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・環境制御下、単セルで発電性能の決定因子を解明し、信頼性高い評価法 (例えば P_{max}) を提示する (変換効率

					不確かさ 10%以内)。 【最終目標】ヒステリシスを解消できる測定条件、連続光照射試験の実施と劣化因子の特定
新素材と新構造による高性能化技術の開発					
1	H27 ～ H31	新素材と新構造の開発 1) 高性能化に向けたペロブスカイト材料の開発 2) 耐久性確保に向けた材料開発 3) 低コスト対極材料の開発 4) セル出力の高電圧化と電圧損失メカニズムの解析 5) ペロブスカイト太陽電池のセル構造の改良	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の性能向上に向けて、各層(透明導電電極、電子輸送層[正孔ブロック層]、ペロブスカイト層、正孔輸送層[電子ブロック層]、対極)を構成する材料の開発、各層のナノスケール構造の改良、そして各層が接する界面の制御を進める。このため、塗布製造の他、蒸着プロセスやドライプロセスの利用等も積極的に検討する。また、対極構造についても新規構造を検討し、バックコンタクト等も検討する。材料開発においては、まず主役であるペロブスカイト材料の高純度化、広帯域化、ドーピングの検討を行う。実験的研究だけでは分からないことも多いため、理論計算による材料探索も行う。正孔輸送層材料では、耐久性が期待できる金属化合物正孔輸送材料について検討する。また、簡便に対極を構築するための導電材料も開発する。ナノスケール構造の改良と界面制御は表裏の関係にあり、材料開発とも密接に関係する。特にペロブスカイト太陽電池の電子輸送層のナノ構造は、太陽電池効率やヒステリシス等に大きくかわるものと考えられており、電子輸送の役割を担う酸化半導体の構造制御について検討する。ペロブスカイト層と正孔輸送層の界面制御も重要であり、正孔輸送材料を改良することでこの界面を制御する検討も行う。	【中間目標】ガラス基板小面積セル(有効面積約 0.03 cm ²)で変換効率 20%を達成する。 1) 蒸着により 10 mm 角でラフネスが±30 nm 以内となる高品位ペロブスカイト薄膜を作成する。 2) ホール輸送材フリー構造セルを作製する。 3) カーボン対極を用いたセルを作製する。 4a) ヨウ臭化ペロブスカイトを用いたセルで Voc 1.4 V を実現する。 4b) 電圧損失を決めるペロブスカイト結晶の質と電荷輸送材料の物性を明らかにする。 5) バックコンタクト構造セルを作製する。 【最終目標】ガラス基板小面積セル(有効面積約 0.03 cm ²)で変換効率 25%を達成する。 1) 蒸着により 20 mm 角でラフネスが±30 nm 以内となる高品位ペロブスカイト薄膜を作成する。 2) ホール輸送材フリー構造モジュールを作製する。 3) カーボン対極を用いたモジュールを作製する。 4a) ヨウ臭化ペロブスカイトを用いた Voc 1.4 V 以上のセルを、低温製膜による低コスト工程で作製する。 4b) 電圧損失を最小とするモデルをもとに大面積モジュールの作製に使える製膜法を開発する。 5) バックコンタクト構造モジュールを作製する。
2	H27 ～ H31	界面制御技術	東京大学、産業技術総合研究所(再)	ペロブスカイト太陽電池の積層材料界面に、界面修飾材料を導入し、材料界面における電荷再結合および直列抵抗成分を制御し FF を向上させることによる高効率化を目指す。	【中間目標】界面制御により、Jsc 23 mA/cm ² 以上、Voc 1.2 V 以上の条件で FF 75%以上を実現する。 【最終目標】界面制御によりモジュールで FF 75%以上にするための指針を確立し、変換効率 20%達成に貢献する。
3	H27 ～ H31	高電流材料技術	東京大学、九州工業大学(再)	ペロブスカイト太陽電池の光電変換領域を広帯域化することにより、短絡電流密度を上げ高効率化を狙う。同時に、Pb 減量化ペロブスカイト太陽電池の可能性と開発指針を提案する。	【中間目標】Sn 系ペロブスカイト層の膜質を高めることにより Jsc 26 mA/cm ² を達成する。 【最終目標】Sn 系ペロブスカイト太陽電池(赤外光電変換)で Jsc 34 mA/cm ² を達成する。

4	H27 ～ H31	基板構造制御技術	東京大学、東京工業大学(再)	ペロブスカイト結晶と酸化物の界面構造と電子移動物性相関の学理を追及することによって、効率向上と動作安定化、長寿命化技術へと達する道筋を明確化する。また、電場ベクトル制御マイクロ波による界面選択加熱現象を用いて結晶化プロセス制御を行い、最終的には、粒界欠陥の極めて少ない単結晶様ペロブスカイト結晶をメソ細孔中で合成するプロセスを創製する。	【中間目標】基板構造制御により、4 mm 角セルで、変換効率面内ばらつき±0.5%以内に収める。 【最終目標】低欠陥ペロブスカイト結晶を形成することで最高デバイス効率を1%押し上げ、デバイスばらつきを±0.5%以内に収める。
5	H27 ～ H31	電極材料技術	東京大学、兵庫県立大学(再)	有機ホール輸送材に替えて無機系ホール輸送材を使用することで、「高信頼性化」、「低コスト」および「モジュール出力劣化抑制」の実現を目指す。	【中間目標】a)コスト 250 円/m ² 無機系ホール輸送材で効率 20% (150 円/m ² の場合は 16%) を実現する。b)無機系ホール輸送材を用いた貼り合わせ製造プロセスを開発する。 【最終目標】a)コスト 250 円/m ² 無機系ホール輸送材で効率 25% (150 円/m ² の場合は 20%) を実現する。b)無機系ホール輸送材を用いた貼り合わせ製造プロセスで、HTL 製造コスト 150 円/m ² を実現する。
6	H27 ～ H31	高純度材料技術	東京大学、京都大学(再)	ペロブスカイト太陽電池を構成する材料の高純度化法の確立に取り組み、その効果を詳細に検討する。また、溶液法によるペロブスカイト/バッファ層界面の制御による高性能化についても検討する。	【中間目標】材料高純度化により、塗布型セルでの光電変換効率20%の達成に貢献する。 【最終目標】材料の高純度化および界面制御により、Voc 1.2 V、および、0.83 を超える FF の実現を目指し、セル変換効率 25%の実現に貢献する。
7	H27 ～ H31	第一原理計算	東京大学、熊本大学(再)	第一原理分子動力学計算と太陽電池デバイス・シミュレーターおよびマテリアルズ・インフォマティクス(「物質に関する情報技術」)を用いて、エネルギー変換効率や安全性の面で優れたペロブスカイト太陽電池用材料の設計指針を確立し、具体的な材料を計算シミュレーションに基づいて提案する。	【中間目標】第一原理計算シミュレーションと太陽電池デバイス・シミュレーターに関する要素技術を確立するとともに、モジュール変換効率 17%以上を達成できる物質を予測する。 【最終目標】第一原理計算シミュレーションと太陽電池デバイス・シミュレーターを駆使した物質探索によって有望物質を理論的に予測し、実デバイスでのモジュール変換効率 20%以上を達成するまで in-silico 材料最適化を行う。

表. 4 研究開発項目③
「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」
(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	H27 ～ H31	Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発	北陸先端科学技術大学院大学	下地基板表面に損傷を与えず、優れた界面が形成できる低温薄膜堆積法、①Cat-CVD法、および、100℃以下の低温でリン(P)やボロン(B)を結晶シリコン(c-Si)に導入	【中間目標】Cat-CVD法を用い、効率25%以上の高効率c-Si太陽電池の実現を可能とする基盤的要素技術を開発する。 【最終目標】	

				できる新不純物ドーピング技術、②Cat-doping技術、および、新規電極形成技術などを駆使、厚み100・m以下の薄板c-Si基板にも対応できる、低価格で高効率な裏面電極型アモルファス・シリコン (a-Si) / c-Si ヘテロ接合太陽電池を作製する基盤技術の開発を行う	Cat-CVD法、Cat-doping法、新規裏面電極形成法を用い、効率26%の高効率c-Si太陽電池の低価格作製を可能とする基盤的要素技術を開発する。	
2	H27 ～ H31	薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発	産業技術総合研究所	企業との連携によりそれぞれの企業の研究開発目標の達成を支援するとともに、産総研は独自に共通基盤技術として、イオン注入技術を基にしたバックコンタクト型セルなどの開発や、これらのセルを用いた高効率・高信頼性モジュールの開発を行う。	<p>【中間目標】</p> (連携) 極薄ウェハ (厚み75 μ m) のセル評価プロセスを確立する。高効率 (セル効率22%) のためのセル化技術開発課題を明らかにする。長寿命 (35年) のための高信頼性モジュール化技術開発課題を明らかにする。 (共通基盤) 高効率セルの低コストのための簡易プロセス要素技術課題を明らかにする。高信頼性の高効率モジュール (モジュール効率22%) の技術開発課題を明らかにする。 <p>【最終目標】</p> (連携) 極薄ウェハ (厚み50 μ m) の品質指針及び高効率セルプロセス技術開発課題を明らかにする。高効率 (セル効率22%) のためのセル化技術開発指針を得る。長寿命 (35年) のための高信頼性モジュール化技術開発指針を得る。 (共通基盤) 高効率セルの低コストのための簡易プロセス要素技術指針を得る。薄型セルを用いた高信頼性の高効率モジュール (モジュール効率22%) の技術開発指針を得る。	
先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発 (コンソーシアム)						
1	H27 ～ H31	先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発	豊田工業大学	<p>①新規高効率標準試作ラインの構築 本テーマを推進するために必要な高効率太陽電池試作ラインを構築する。</p> <p>②高品質結晶シリコン材料・結晶評価 目標のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶に関する課題を明らかにする。</p> <p>③セルプロセス評価 各プロセス技術の量産適用時の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにする。</p> <p>④ヘテロ技術評価 従来型ヘテロ接合セル作製技術を確立し、新規ヘテロ接合セル製造プロセスを実現する。</p> <p>⑤モジュール評価 太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。</p>	<p>【中間目標】</p> ①23%のセル変換効率が得られる太陽電池セル試作ラインを構築する。 <p>②シリコン結晶の評価を進め、23%のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶の課題を明らかにする。</p> <p>③各プロセス技術を23%太陽電池量産に適用する際の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにして参画企業の開発を支援する。</p> <p>④高効率ヘテロ接合セルを作製する技術を確立する。新規ヘテロ接合太陽電池の技術的目途付けを行う。</p> <p>⑤23%太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。</p> <p>【最終目標】</p> ①変換効率25%の試作ラインを構築する。 <p>②25%のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶に関する</p>	

				⑥委員会等の開催	<p>る課題を明らかにする。</p> <p>③各プロセス技術を25%太陽電池セルの量産に適用する際の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにし参画企業の開発を支援する。</p> <p>④新規ヘテロ接合セルに関して、量産展開可能なプロセスを検討し、セル製造プロセスを実現する。</p> <p>⑤25%太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。</p>	
2	H27 ～ H31	材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発	明治大学	<ul style="list-style-type: none"> ・シリコン原料のデバイスへの影響の評価 ・極低濃度炭素の定量手法の開発 ・新規製造プロセスの評価 ・次世代型太陽電池の評価技術の開発 ・低コスト単結晶の評価 	<p>【中間目標】 現在の変換効率20%プロセスを改良し変換効率23%を実現するのに必要な基盤技術を確立する。特に、物理化学評価の側面から開発を支援し、豊田工業大学と協働して次々世代(23%)セル量産化のための新規材料・プロセスの評価・解析技術を確立する。それらを用いて、各大学や参画企業が開発している個々のプロセスや材料に関する課題を明らかにする。そこで得られた知見を各研究機関に対して横断的にフィードバックすることにより、本開発に関与している機関全体と協力して最終目標の達成に貢献する。</p> <p>以上の結果を各研究機関ならびに参画企業にフィードバックし、さらには参画企業の目標達成に貢献する。</p> <p>【最終目標】 物理化学評価を通じた支援を継続するとともに、変換効率25%の試作ラインの構築に貢献する。特に、25%高効率太陽電池量産化のための新規材料・プロセスの評価・解析技術を確立する。それにより得られた知見、技術開発指針をもとにプロジェクト連携・協力企業の技術開発を支援し、最終目標の達成に貢献する。</p> <p>さらに、変換効率25%を実現するために必要な基盤技術をもとに、そのための新規材料ならびにセルプロセス技術を提案し、各研究機関ならびに各企業との協力の上、参画企業の目標達成に貢献する。</p>	
3	H27 ～ H31	高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究	九州大学	<p>①X線カメラによるシリコン単結晶と多結晶の評価 3次元X線トポグラフィ法を用いて、シリコンウエハー内の変換効率低下に関係する欠陥の同定を行う。</p> <p>②CZシリコン結晶化速度、低不純物濃度を達成できる結晶育成方法の提案 高速、低不純物濃度のシリコンCZ結晶の育成方法を提案し、結晶育成を実施する。</p> <p>③セル作成評価</p>	<p>【中間目標】 ①X線カメラによるシリコン単結晶と多結晶の評価 X線セクショントポグラフィ法を用いて、シリコンウエハー表面近傍の研磨傷や析出物の3次元観察法を確立する。</p> <p>②CZシリコン結晶化速度の向上と低不純物化法の提案 CZシリコン結晶化速度の向上と低不純物化法の提案を提案し、育成実験を実施する。これにより高ライフタイムの結晶育成条件を提示</p>	

				育成した結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成し、今回育成した結晶の有利性を示す。	する。 ③ セル作成評価 育成した3インチn型結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成する。 【最終目標】 ① 3次元X線セクショントポラフ法を用いて、シリコンウエハ中のライフタイム低下欠陥を明らかにする。 ② CZシリコン結晶化速度、低不純物濃度を達成できる結晶育成方法の提案し、結晶成長を行う。高速、低不純物濃度のシリコンCZ結晶を用いて、セル政策を行う。 ③ 育成した3インチn型結晶を用いて、太陽電池セルを豊田工大と協力して作成し、本提案の結晶育成方法に優位性を実証する。	
4	H27 ～ H31	新規ヘテロ接合用材料に関する研究	名古屋大学	<ul style="list-style-type: none"> ・高品質かつ低吸収なパッシベーション膜の開発のためにクラスター型高性能ヘテロ接合研究開発システムの垂直立上げを行う。そして、上記システムを用いて、パッシベーション膜へのOやCなどの添加や新規材料開発を進める。 ・バンドエンジニアリングを駆使し、キャリア選択層に利用できる新規材料の探索を行う。 ・高品質セルに適用可能なシリコン基板の物性解明を行う。 	【中間目標】 ヘテロ接合材料の吸収係数 $1 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$ (@600nm)、導電率： $1 \times 10^{-7} \text{ S/cm}$ を達成する。この結果を本プロジェクト内の各研究機関ならびに関係企業にフィードバックする。 【最終目標】 バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合材料開発を行い、ヘテロ接合材料の吸収係数 $1 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$ (@600nm)、導電率： $1 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$ の達成を目指す。 。また、本研究で得られた知見や基盤技術を各研究機関ならびに関係企業の技術と組み合わせる。	
5	H27 ～ H31	アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究	東京工業大学	① ライフタイムおよび電流電圧特性の温度依存性測定を用いて、アモルファスシリコン系材料/結晶シリコン界面の精密な評価を行う技術を開発する。 ② 低ダメージで金属酸化エミッタを形成する技術を開発する。	【中間目標】 アモルファス膜と結晶シリコンとの界面構造や界面における再結合速度などを評価・解析して、得られた知見、技術開発指針をもとに、ヘテロ系デバイスにおける表面再結合電流 J_{ofront} を 75 fA/cm^2 、裏面再結合電流 J_{orear} を 40 fA/cm^2 に低減する方法を提案する。 【最終目標】 表面再結合電流 J_{ofront} を 10 fA/cm^2 、裏面再結合電流 J_{orear} を 10 fA/cm^2 に低減する方法を提案し、セルメーカーのヘテロ接合デバイスの高効率化を支援する。	
6	H27 ～ H31	低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究	兵庫県立大学	① 高性能パッシベーション膜材料開発： パッシベーション能力の高い膜を低コストな製膜法により開発し、表裏面再結合電流を低減する。 ② 界面近傍の特性評価技術の構築： 基板/パッシベーション膜界	【中間目標】 表面再結合電流 J_{ofront} 、裏面再結合電流 J_{orear} 、およびバルク再結合電流 J_{obulk} の総和 J_0 ($=J_{\text{ofront}} + J_{\text{orear}} + J_{\text{obulk}}$)を 500 fA/cm^2 まで低減する。 【最終目標】 表面再結合電流 J_{ofront} 、裏面再結合電流 J_{orear} 、およびバルク再結合電	

				面近傍の電気的特性を高精度に評価する技術を構築し、材料探索へフィードバックをかける。 ③ pn接合形成基盤技術の開発： pn接合（エミッター）の設計指針および形成技術をシミュレーション・実験により開発する。	流 J_{0bulk} の総和 J_0 ($=J_{0front} + J_{0rear} + J_{0bulk}$) を400 fA/cm ² まで低減する。	
--	--	--	--	---	---	--

(2) 高性能C I S太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
1	H27 ～ H31	光吸収層の高品質化による CIS 太陽電池の高効率化	産業技術総合研究所	①アルカリ金属元素制御技術の開発、バッファ層成膜技術の開発により、CdS/CIS 界面の高品質化技術を開発する。 ②高温製膜技術の開発、Cu/III 族元素組成比制御技術の開発により、CIS 結晶の高品質化技術を開発する。 ③新規透明導電膜材料の探索及び CIS/Mo 界面制御技術の開発を行う。	【中間目標】 CdS/CIS 界面の高品質化および CIS 結晶の高品質化を推進し、CIS 小面積セルで変換効率 22%を達成する。 【最終目標】 CdS/CIS 界面の高品質化および CIS 結晶の高品質化に加えて、新規な透明導電膜材料の探索および CIS/Mo 界面の不活性化を推進し、CIS 小面積セルで変換効率 23%を達成する。	
2	H27 ～ H31	界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化	東京工業大学	Ag 系カルコパイライト等を表面・界面に導入した CIGS 太陽電池の評価、あるいはこれまで開発してきたチオ尿素等の処理効果を駆使することにより、理論的に予想される高い変換効率を実現されることを実証する。また、裏面再結合速度を低減し、変換効率を飛躍的に向上させるために Ag 計カルコパイライト等を用いたバンドギャップ制御、あるいは酸化物層導入などを CIGS 系太陽電池に適用し、表面・裏面における界面制御技術の可能性を実証するとともに、薄膜化による低コスト化の可能性を検証する。	【中間目標】 表面、粒界および裏面における再結合成分を減少させる技術を開発し、開始時の短絡光電流と開放端電圧との積 25 (mA/cm ² ×V) から開放端電圧 Voc を +20mV 増加させ、 $J_{sc} \times Voc = 25.8$ (mA/cm ² ×V) を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 表面、粒界および裏面における再結合成分を減少させる技術を開発し、開始時の短絡光電流と開放端電圧との積 25 (mA/cm ² ×V) から開放端電圧 Voc を +30mV 増加させ、 $J_{sc} \times Voc = 26.2$ (mA/cm ² ×V) を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 23%の達成に貢献する。	
3	H27 ～ H31	バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発	立命館	伝導帯位置を制御できる材料として (Zn, Mg)O:B や Zn(O, S):B などの Zn 系 3 元混晶薄膜を用いて、CBO 制御可能な透明電極を開発する。また、デバイス内の総合的なバンドラインナップの最適化を実現するために、同材料系を用いた高抵抗バッファ層の開発を行う。CIS 表面へのスパッタダメージによる再結合センターの形成を回避するために、本テーマではソフトな成膜法である有機金属気相成長 (MOCVD) 法を用いる。	【中間目標】 従来よりも大きいバンドギャップ (3.5eV 以上) を有し伝導帯位置を制御可能な Zn 系 3 元混晶透明電極を開発し、研究開始時の従来の透明電極を用いたセルに対して 20mV 高い Voc、 $Voc \times J_{sc}$ 値においては 26mW/cm ² を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 Zn 系 3 元混晶透明電極の高品質化 (バンド位置制御性、低抵抗、高透過率) に加え、伝導帯位置を制	

					御できる Zn 系 3 元混晶バッファを開発し、デバイス内の総合的なバンドラインナップを最適化することで、研究開始時の従来構造のセルに対して 30mV 高い Voc、 $Voc \times Jsc$ 値においては 27mW/cm ² を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 23%の達成に貢献する。
4	H27 ～ H31	エピタキシャル成長を利用した CIS 太陽電池の高効率化指針の解明	東京理科大学	結晶粒界が無く、欠陥低減が予想される CIGS 単結晶薄膜をエピタキシャル成長法により製膜して太陽電池を作製し、格子欠陥、結晶粒界および表面ラフネスがデバイス特性へ及ぼす影響を詳細に評価し、欠陥低減技術の開発指針、ひいては CIGS 太陽電池の高性能化指針の解明を目指す。	【中間目標】 エピタキシャル CIGS 単結晶薄膜で、少数キャリア寿命 τ_2 の値で 80ns 以上 (300K) を達成する。また、本技術と他機関が開発する技術を総合して、変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 エピタキシャル CIGS 単結晶薄膜の禁制帯プロファイル制御やキャリア制御技術を開発し、少数キャリア寿命 τ_2 の値で、100ns 以上 (300K) を達成する。また、本技術と他機関の開発技術を総合して変換効率 23%の達成に貢献する。
5	H27 ～ H31	結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援	筑波大学	①価電子帯から 0.8eV にレベルを持つ欠陥の構造解明、濃度等の定量化を行うとともに、その構造と形成原因を明らかにする。また、価電子帯 0.3eV～0.8eV の未探索領域の欠陥準位の検出と同定を行う。 ②不純物相である Cu ₂ Se の存在形態（クラスターサイズや分布）とその定量化、Cu ₂ Se によるデバイス特性劣化のメカニズム解明、点欠陥の表面、界面を含めた欠陥分布を明らかにする。 ③Cu ₂ Se の形成原因が Ga の拡散不足、反応不足であることを明らかにし、熱や電子等によりエネルギーを与えることで拡散や化学反応を促進する実用的技術開発をする。	【中間目標】 格子欠陥、異相欠陥の検出と同定に関する知見と他機関が開発する技術を総合して、変換効率 22%の達成に貢献する。 【最終目標】 格子欠陥、異相欠陥の定量的評価と性質の理解を通して、また他機関が開発する技術を総合して変換効率 23%の達成に貢献する。
6	H27 ～ H31	積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発	鹿児島大学	(a) CIS 層～窓層に至る積層構造のビルトインポテンシャルの定量評価・増大技術の開発 (b) CIS 層堆積後処理による電子構造改質機構の解明及びその活用による接合改質技術の開発 (c) デバイス縦貫断面のバンド・電位プロファイルの可視化技術の開発	【中間目標】 ①CIGS _{Se} 表面状態解明 ②アルカリハライド処理効果の解明 ③CIGS _{Se} ～窓層までのバンドプロファイル評価技術の開発・改善指針の導出 ④裏面電極～CIGS _{Se} ～バッファ～窓層縦貫断面バンドプロファイルの可視化技術の開発 【最終目標】 ①光吸収層側界面におけるバンド湾曲の増大手法の導出 ②拡散電位 VD 向上指針の導出 ③裏面電極近傍電界、光吸収層内バンド傾斜の最適化指針の導出

7	H27 ～ H31	理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究	龍谷大学	第一原理計算とモデル実験を組み合わせ、Cu(In, Ga)(S, Se) ₂ 系化合物についてCu/(In+Ga)比やS/(S+Se)比が電子構造や欠陥の生成に与える影響について研究し、光吸収層の結晶粒界やバッファ層/光吸収層界面、光吸収層/Mo電極層界面の太陽電池特性に与える影響を明らかにする。硫黄を含むCIS光吸収層について得られた総合的な知見を、CIS光吸収層の材料設計に生かし、ソーラーフロンティア社のCIS系モジュールの高性能化に貢献する。	<p>【中間目標】 光吸収層としてCuInSe₂、CuGaSe₂、CuInS₂を中心とした3元系から、Cu(In, Ga)Se₂、CuIn(S, Se)₂、CuGa(S, Se)₂等を想定した4元系に検討する材料系を拡張して、CIS太陽電池の電子構造の明確化を図る。</p> <p>【最終目標】 光吸収層として4元系からさらにCu(In, Ga)(S, Se)₂を想定した5元系に材料系を拡張して、光吸収層、バッファ層、裏面電極等の構成要素やそれらの界面を含めたCIS太陽電池の理想的な材料設計技術を提案する。</p>	
---	-----------------	--	------	---	--	--

表. 5 研究開発項目④

「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
太陽電池性能高度評価技術の開発						
1	H27 ～ H31	新型太陽電池評価・屋外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	<p>I) 新型太陽電池高精度性能評価技術 ①各種新型太陽電池性能評価技術の開発 ②一次基準太陽電池校正技術の高度化</p> <p>II) 屋外性能高度評価技術の開発</p>	<p>【29年度中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新型太陽電池の性能評価再現性±0.5% (1σ) 以内を達成する ・WRRスケールに対するトレーサビリティを確実に維持する。AIST, NREL, PTB, ESTIの間で実施するWPVS国際根幹比較校正をホスト機関として実施する。また、その結果を基に、統計的解析値(En数)を算定し、根幹ラボ間の定量的な一致度を明らかにする。 ・高精度屋外測定に使用するPVモジュール日射センサのセル数等の構造、設置方法およびサイズが測定精度に及ぼす影響を明らかにし、高精度化のために必要な条件を定量化する。 ・上記開発及び共同機関の開発成果、屋内高精度測定との比較検証等により、市販タイプ結晶Si太陽電池モジュールの屋外測定再現性±1.0% (1σ) 以内を得るために必要な測定装置、条件、手順を明らかにして実証する。 <p>【31年度最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新たに開発される新型太陽電池の性能評価再現性±0.5% (1σ) 以内を達成する。 ・WRRスケールに対するトレーサビリティを確実に維持する。欧米圏に存在するWPVS根幹ラボ以外の多数の校正機関との間で実施する国際比較校正の結果から統計的解析値(En数、Zスコア)を算定し、定量的な一致度を明らかにして国際的な不整合を解決する。 	

					・屋内高精度測定との比較検証により、薄膜系を含む市販太陽電池モジュールの屋外測定再現性 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を実証する。
2	H27 ～ H31	屋外実性能 高能率測定 技術の開発	一般財 団法人 電気安全環境 研究所	太陽電池屋外測定技術高能 率化のための基本技術開発 と検証	<p>【29年度中間目標】 共同機関との連携による開発成果を基に、結晶 Si 系市販太陽電池モジュールのオンサイトにおける測定再現性精度$\pm 2\%$ (1σ) 以内が達成可能な装置仕様及び手順を明確にする。また、オンサイトでの性能評価を利用して長期間稼働中の太陽電池モジュールの信頼性を判断する手法を検討する。</p> <p>【31年度最終目標】 オンサイトにおいて薄膜系モジュールを含め1日複数台の測定と測定再現性精度$\pm 2\%$ (1σ) 以内を実証するための装置仕様、手順を明らかにする。これらの成果を基に高精度低コスト屋外測定手法のガイドラインをAISTと共同で策定する。</p>
3	H27 ～ H31	日射変動解 析技術の開 発	国立大 学法人 岐阜大 学	日射変動解析技術の開発 (i) PVモジュール日射セン サーアレイによる日射変動空間 分布の計測 (ii) 上空撮影カメラによる日射 変動空間分布の計測 (iii) 太陽電池評価に影響与 える要素に関して気象予報モデル による上空大気状態の解析 (iv) 雲のエッジ部による日射変 動特性の物理解析、太陽電池評 価への影響検討 (v) 雲の不均一性に伴う日射変 動特性の物理解析、太陽電池評 価への影響検討 (vi) 屋外高精度太陽電池性能評 価のための気象条件の定量化 (vii) 屋外高精度太陽電池性能評 価のための気象条件の定量化の 検証・更新 (viii) 大気放射モデルによる日射 スペクトルの解析 (ix) 大気放射モデルの改良によ る日射スペクトルの解析の高精 度化 (ix) 日射変化時のスペクトル変 化の評価	<p>【29年度中間目標】 平成 29 年度までの成果から、岐阜大での観測結果や物理気象モデルによる解析結果のほか AIST, JET, 立命大等共同機関での日射スペクトル測定から、雲のエッジ部による日射増大(雲エッジ効果)時および曇天時の雲不均一性に伴う日射強度とその変動時間と、上空大気特性(おもに、雲の高度・分布や移動、可降水量等の大気中水分量など)との物理的関係を明らかにする。そして屋外太陽光発電性能評価の高速 IV 計測の計測時間と同程度(ミリ秒オーダー)における日射強度変動特性とその上空気象状態との関連を整理し、屋外計測の高速 IV 計測で$\pm 1.0\%$ (1σ) 以内の測定精度を保証しうる気象条件(雲種類や可降水量など)を定量化する。このため、これらの結果は屋外計測を実施する AIST や JET に提供し、高速 IV 計測に要求される計測時間中の日射強度安定度を物理的根拠を基に定量的に示す指標として、屋外性能評価精度向上の精度目標達成に貢献する。 また日射スペクトル強度推定モデルを構築することにより、日射強度の急変時の日射スペクトル強度変化を推定し屋外計測に活用できるように整理し、屋外計測を実施する AIST や JET に提供し、屋外性能評価精度向上の精度目標達成に役立てる。</p> <p>【31年度最終目標】 平成 31 年度までの成果から、太陽光</p>

					<p>発電屋外性能評価高精度化に係わる気象状態、特に雲の高度や形態、移動速度などの気象三次元情報から、屋外性能評価実施者である AIST や JET がより入手・活用しやすい気象情報（例えば地上天気・温度・湿度・風向風速）で評価可能である新たな手法を確立する。岐阜大での観測・数値解析のほか、AIST, JET, 立命大等共同機関での日射スペクトル測定も活用して、入手しやすい新たな気象情報を基に、高速 IV 計測で$\pm 1.0\%$ (1σ) 以内の測定精度を保証しうる気象条件を再検討し、AIST, JET を提供する。</p> <p>また日射スペクトル強度推定モデルを高精度に修正することにより、日射強度の急変時の日射スペクトル強度変化を高精度に推定し、屋外計測を実施する AIST や JET が実施する屋外性能評価精度向上の精度目標達成に貢献する。</p>
4	H27 ～ H31	太陽電池温度の高精度測定技術開発	国立大学法人宮崎大学	<p>(i) 太陽電池温度の高精度測定手法の開発</p> <p>(a) 温度センサの種類や取り付け手法の確立</p> <p>(b) 有風時にも高精度な温度計測技術の確立</p> <p>(c) 温度解析シミュレーションによる温度解析</p> <p>(ii) 風の影響によるモジュール内温度分布を考慮した太陽電池温度の明確化</p> <p>(a) 大型風洞実験設備を用いた温度分布の実証</p> <p>(b) 温度解析シミュレーションによる温度分布解析・再現</p> <p>(iii) 高精度に計測された温度補正による屋外性能評価技術高精度化</p> <p>(a) 得られた高精度温度計測技術を活用し屋外における太陽電池実性能の高精度評価に寄与</p>	<p>【29年度中間目標】</p> <p>温度センサの取り付け手法等を検討し有風時にも高精度な温度計測技術を確立する。風の影響によるモジュール内温度分布を考慮した太陽電池温度を定義する。得られた高精度温度計測技術を活用し屋外における太陽電池実性能の温度補正に用いることにより高精度評価に寄与する。産総研において屋内計測され温度特性がわかっているシリコン太陽電池モジュールについて開放短電圧と測定温度の関係を検証し確立された手法の精度を検証する(前倒し事項)。これらの技術により太陽電池モジュールの実温度測定精度$\pm 2^{\circ}\text{C}$以内を達成する。</p> <p>【31年度最終目標】</p> <p>産総研において屋内計測され温度特性がわかっているシリコンおよびCIGS太陽電池モジュールについて開放短電圧と測定温度を整合させる。太陽電池モジュールの実温度測定精度$\pm 1^{\circ}\text{C}$以内を達成し、太陽電池モジュール出力特性の屋外測定において高精度温度測定結果を出力の温度補正に用いることにより$\pm 1.0\%$ (1σ) 以内の測定精度を達成することに寄与する。</p>
5	H27 ～ H31	PV日射計測によるシステム性能測定手法開発	学校法人東京理科大学	<p>PV日射計測によるシステム性能測定手法開発</p> <p>(i) システム屋外性能高精度評価のための測定手法の開発</p> <p>a) 屋外評価装置の構築と評価</p> <p>b) PVモジュール日射センサを用いた測定</p>	<p>【29年度中間目標】</p> <p>PVアレイおよびシステムの評価に展開するために必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法に対する要求事項を明らかにする。本要求事項を満たした場合の屋外におけるアレイ発電性能の測定精度として、算出値と測定値との誤差$\pm 3.0\%$ 以内を達成する。</p>

				<p>c) 高精度モジュール温度測定技術の適用</p> <p>(ii) PV日射センサを用いたPVシステム測定データ解析手法の開発</p> <p>a) 電流-電圧特性の重ね合わせシミュレーション</p> <p>b) 照度ムラ、温度ムラを考慮した測定条件の評価</p>	<p>【31年度最終目標】 小規模なPVアレイまたはシステムにおけるオンサイト屋外高精度測定を実施し、アレイ面内照度ムラ、アレイ面内温度分布把握、スペクトル補正等を行い、必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法および測定精度を検証することで、市販タイプ結晶Si太陽電池モジュールを用いた太陽電池アレイの屋外測定精度$\pm 1.0\%$ (1σ)を達成する。</p>
6	H27 ～ H31	スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発	学校法人立命館	<p>スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発</p> <p>(i) APE高速測定技術の開発</p> <p>(ii) APEを用いたスペクトル補正による太陽電池屋外測定高精度化技術の開発</p>	<p>【29年度中間目標】 APEセンサーの設計・開発・屋外測定実証を行い、太陽光スペクトル指標APE（二波長帯APE）の高速測定技術を開発する。同サイトに設置したシリコン系・化合物薄膜太陽電池モジュールの短絡電流値と二波長帯APEの相関を明らかにし、高速測定した各種太陽電池モジュールのスペクトル補正による高精度化の基本技術を開発して、屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の2分の1に高精度化する技術を検証し、確立する。</p> <p>【31年度最終目標】 4年以上の蓄積測定データを基に、高速測定した二波長帯APEを用いた各種太陽電池モジュールのスペクトル補正技術を高精度化させ、屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の3分の1に高精度化する技術を検証し、確立する。化合物薄膜太陽電池モジュールを含めた屋外測定の$\pm 1.0\%$ (1σ)以内の測定精度の達成に貢献する。</p>
太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発					
1	H27 ～ H31	経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	<p>各種太陽電池の経年劣化調査と発電量推定技術の開発</p>	<p>【29年度中間目標】 結晶シリコン系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、$\pm 5\%$の精度で発電量を推定する技術を開発する。</p> <p>【31年度最終目標】 ヘテロ接合系等の新型結晶シリコン系太陽電池アレイならびに薄膜系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、$\pm 5\%$の精度で発電量を推定する技術を開発する。</p>

2	H27 ～ H31	経年劣化を考慮した各種太陽電池の発電量評価技術の開発／メガソーラーの発電量及び信頼性評価技術の開発	一般財団法人電力中央研究所	<p>①各種太陽電池の発電量評価技術の開発</p> <p>②ガソラーの発電量診断手法の開発</p> <p>③IEC/TC82/WG2における発電量定格 (IEC 61853) の確立</p>	<p>【29年度中間目標】 各種太陽電池モジュールの発電性能の経年劣化率を1%程度の精度で算出することを可能にする長期信頼性評価技術を開発する。 メガソーラーの発電性能の経年劣化を2%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。 IEC/TC82/WG2にて、IEC 61853シリーズにて規格成立に向けて審議に参加する。IEC 61853-4に日本の気象データを提供し、日本を発電量定格の1つの気候区として採用されるに規格審議を行なう。</p> <p>【31年度最終目標】 5つの日射気候区における各種太陽電池の経年劣化を考慮した生涯発電量(25年)を算出する。 メガソーラーの発電性能の経年劣化を1%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。ガソラーの発電量診断手法に関するガイドラインの作成を行なう。 IEC 61853シリーズをJIS規格として成立させる。</p>	
3	H27 ～ H31	日射量データベースの高度化に関する研究	一般財団法人日本気象協会	<p>①5地点における日射スペクトル等の観測</p> <p>②日射量データベース整備の迅速化</p> <p>③日射量データベースの高密度化</p> <p>④日射量データベースの高精度化および日射量データベースの更新</p> <p>⑤日射スペクトルデータベースの更新と全国整備</p>	<p>【29年度中間目標】 前事業の資産である5地点における日射量観測システムの維持・管理に努めるとともに、データの品質管理を行い、⑤で述べるデータベース用のデータとして整備する。観測データの欠測率は10%以下を目標とする。 広く利用されているMONSOLA-11に準ずる月平均日射量データを迅速に整備する手法を開発し、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。また、整備した日射量データを用いて、わが国における日射量の年変動について明らかにする。 「ひまわり8号」から送信されるデータを蓄積するデータストレージを購入し、データ解析が可能な環境整備を実施する。また、「ひまわり8号」のデータを用いた日射量推定技術の開発を行い、1年分の日射量データベースとして整備する。現状のアメダス地点の日射量データを用いた場合との乖離度について解析し、高密度化の効果について定量的に明らかにする。 前事業で設置した5地点の気象観測地点における日射量の観測データを用いて、NEDOの日射量データベースの作成に用いた各種日射量推定モデルの検証・改良を行う。また、MONSOLA-11のデータ整備で用いている日射気候区について、最新の気象庁の観測データを用いて解析を行い、必要に応じて見直しを行う。 前事業で整備し、NEDOのホーム</p>	

					<p>ページで公開した日射スペクトルデータベースについて、ユーザーへのヒアリング等を実施し、本事業で公開するデータベースの内容を検討する。検討結果に基づき、2013年以降の観測データを収録した日射スペクトルデータベースを整備する。また、実測データを基に日射スペクトル推定モデルの改良を行い、気象庁の日射観測地点における平成29年までの日射スペクトルデータを整備する。</p> <p>【31年度最終目標】 観測は平成31年度の夏まで継続する。観測データは⑤で述べるデータベース用のデータとして整備する。平成31年度末までに観測システムの撤去作業を完了する。観測データの欠測率は10%以下を目標とする。</p> <p>中間目標で達成した成果について、ユーザーへのヒアリング等を実施し、本事業終了後の日射量データベースの更新頻度、公開方法等について決定する。本事業終了後の月平均日射量データの更新頻度については、毎年更新する事を目標とする。また、④で開発する日射量推定モデルを用いて、平成31年までの月平均日射量データベースを整備する。</p> <p>中間目標で達成した成果について、地上における日射観測データを用いて検証を行い、日射量推定技術の改良を行う。改良を加えた日射量推定技術を用いて、1kmメッシュ、1年分の日射量データベースとして整備する。</p> <p>中間目標で達成した成果について、地上における日射観測データを用いて検証を行い、日射量推定モデルの改良を行う。改良を加えた日射量推定モデル等により、気象庁から公開される2018年(平成30年)までの最新データを用いた日射量データベースを構築し、NEDOのWebサイトに掲載する。</p> <p>平成30年までの観測データを収録した日射スペクトルデータベースを構築する。また、実測データを基に日射スペクトル推定モデルの改良を行い、気象庁の日射観測地点における平成30年までの日射スペクトルデータを整備し、NEDOのWebサイトで掲載する。</p>
4	H27 ～ H31	アクセシブルな太陽光発電データベース構築技術の開発	国立大学法人佐賀大学	①屋外曝露メガソーラーで利用可能な高速測定システムの開発 ②発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアの開発 ③発電量、日射量データの解析ソフトウェアの開発	【29年度中間目標】 屋外曝露メガソーラーにおいて利用可能なリアルタイム発電量、日射量データの高速測定システムを試作し、様々な方式による性能比較を行い、最も性能の高い方式を提案すること、測定間隔を1秒を中間目標とする。 <p>高速測定システムの実用化の観点から、最適な測定時間間隔を決定する。発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを試作し、様々な数</p>

					<p>理工学的手法による補完アルゴリズムの性能比較を行い、試験データに対する補完誤差が10%を中間目標とする。</p> <p>発電量、日射量データの解析ソフトウェアを作成し、試験データ・推定データ間の誤差が20%を中間目標とする</p> <p>【31年度最終目標】 屋外曝露メガソーラーで利用できる発電量、日射量データの最高性能の高速測定システムを完成させること、測定間隔20ミ秒を最終目標とする。現実を再現できる発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを完成させ、試験データに対して補完誤差が10%以下になるようにする。発電量、日射量データの解析ソフトウェアを完成させ、日射量等の気象データと発電量との関連を明らかにすることによって、試験データと推定データの誤差が5%以下になることを最終目標とする。</p>
ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発					
1	H27 ～ H31	ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発	株式会社カネカ	<p>①ZEB適用を想定した長期信頼性試験の開発</p> <p>②建材寿命を考慮した長期耐久性、長期発電性能評価技術の開発</p> <p>③低コスト高信頼性太陽電池モジュールの耐久性評価として、高信頼性技術を適用したZEB適用型太陽電池モジュールに対して、40年間の運転年数を想定した長期信頼性評価を行い、発電コストの見積もりを行う。</p> <p>④ZEB適用型太陽電池モジュールの標準化への反映として、建材一体型太陽電池の建材としての適合性、太陽電池としての耐久性、発電性能、長期信頼性を適切に評価する基準に関する国際規格やZEBの普及に際してのガイドライン等に反映させる活動を行う。</p>	<p>【29年度中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ZEB適用型太陽電池モジュールの30年間以上にわたる発電量を推定する評価方法を確立する。発電量データとの比較から1年目の年間平均出力値としての推定精度は±5%以内とし、30年間以上の運転期間にわたる発電性能の年率低下率(%/年)を推定する評価方法を開発する。評価に要する期間は100日以内とする。 ・ZEB適用型太陽電池モジュールのZEB特有の負荷に対する耐久性を評価する試験方法と基準をBIPV国際標準化委員会にて提案する。 ・ZEB適用型太陽電池モジュールとして、発電コスト7円/kWhを達成するためのコスト目標と課題を明確化する。 ・信頼性・寿命評価技術の開発を行うほかの採択者と連携し、開発している評価試験法の特徴(メリット、デメリット)を明らかにする。 <p>【31年度最終目標】 ZEB適用型太陽電池モジュールの建材としての利用期間(40年間以上の運転期間)にわたる運転期間内総発電量(kWh/運転期間)を推定する評価方法を開発する。既設置の太陽光パネルに対しての長期信頼性評価に要する期間は100日以内とし、発電量実績データから算出される運転期間内総発電量を元に、太陽光パネルとしての継続利用機能耐用年数(継続利用可能期間)を推定する評価技術(推定精度5%目標)を開発す</p>

					る。	
レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発						
1	H27 ～ H29	ケーシング側から見た太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発	日清紡メカトロニクス株式会社	<p>(i) 発電劣化メカニズムの解明</p> <p>(a) 経年発電劣化メカニズムの解明</p> <p>(b) PID発生メカニズムの解明</p> <p>(c) 再現性良好なPID試験条件の決定</p> <p>(ii) 設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発</p> <p>(iii) 30年発電性能の寿命予測技術の確立</p>	<p>【29年度中間目標】</p> <p>i) 発電劣化メカニズムの解明</p> <p>(a) 経年発電劣化メカニズムの解明</p> <p>p型シリコンセル・n型シリコンセル、ヘテロシリコンセル搭載太陽電池モジュールの経年劣化メカニズムを「ケーシング」と「発電素子」の両面からレーザー技術で解析し、経年劣化メカニズムを提案する。</p> <p>(b) PID発生メカニズムの解明</p> <p>p型シリコンセル・n型シリコンセル、ヘテロシリコンセル搭載太陽電池モジュールのPID発生メカニズムを「ケーシング」と「発電素子」の両面からレーザー技術で解析し、PIDメカニズムを提案する。</p> <p>(c) 再現性良好なPID試験条件の決定</p> <p>実モジュールサイズの太陽電池モジュールで、PID試験結果がアレニウス則で整理可能な解析評価システムを開発する。同一太陽電池モジュール5枚のPID試験結果のばらつきが5%未満を達成する。</p> <p>(ii) 設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発</p> <p>設置される環境を①湿度、②温度、③塩水、④アンモニア、⑤高電圧に分け、DH条件</p> <p>(①&②)に対して、③、④、⑤の因子の劣化加速係数を算出する。</p> <p>設置場所の環境に対し、①から⑤の条件を指定することで、10年、20年、30年に相当するDH試験条件を提示できる試験方法を開発する。</p> <p>(iii) 30年発電性能の寿命予測技術の確立</p> <p>発電劣化メカニズム解明の結果を踏まえ、「ケーシング」のラマン分光分析結果とレーザーによるセルキャリア速度分布評価結果の両面の考察により、レーザー技術による太陽電池モジュールの25年寿命を予測する技術を提案する。</p> <p>信頼性・寿命評価技術の開発を行う他の採択者と連携し、それぞれ開発する評価試験法の特徴(メリット、デメリット)をテーマ全体で、明らかにする。</p>	
2	H27 ～ H29	標準化を目指した寿命予測検査技術の開発	国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学	<p>①標準化を目指した寿命予測試験法の検討と劣化メカニズムのモデル化</p> <p>②寿命予測技術の標準化に向けた規格提案</p>	<p>【29年度中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 発電素子の寿命評価技術を確立する。 ・ P型、N型、PERC型Si太陽電池におけるモジュール劣化メカニズムモデルを構築する。 ・ 寿命予測技術の標準化におい 	

					<p>て、規格第一案を提示する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・信頼性・寿命評価技術の開発を行う他の採択者と連携し、それぞれ開発する評価試験法の特徴(メリット、デメリット)をテーマ全体で、明らかにする。 <p>【31年度最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・劣化メカニズムの解明と、寿命30年間予測する加速試験における標準化規格案をJEMAに提示する。
太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発					
1	H27 ～ H31	太陽電池モジュールの劣化現象の解明、加速試験法の開発	国立研究開発法人産業技術総合研究所	<p>①モジュール劣化メカニズムの解明</p> <p>②各種加速試験法の開発</p> <p>③国際標準化とワークショップの創設</p>	<p>【29年度中間目標】</p> <p>長期屋外曝露されたモジュール内酢酸量と発電量低下の関係を定量的に評価する。</p> <p>高温高湿試験と紫外線照射試験の組合せ試験を施したモジュールの発電量と試験条件の関係を定量的に評価する。</p> <p>PID現象に影響を及ぼす要因を体系的に整理し、その影響の程度を定量的に評価する。</p> <p>太陽電池モジュールの性能25年を予測できるとともに、屋外曝露に対して70倍以上の加速係数を有する試験方法を実現する。</p> <p>本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴(メリット、デメリット)を明らかにする。</p> <p>計2回のワークショップを開催する。日本電機工業会の委員会から2件以上の技術テーマについて国際標準化に向けて提案する。IEA PVPS タスク13の情報を収集し、結果をフィードバックする。また、成果物作成に貢献する。</p> <p>【31年度最終目標】</p> <p>長期屋外曝露されたモジュールの各種劣化要因と発電量低下の関係を定量的に評価する。</p> <p>高温高湿試験、紫外線照射試験、温度サイクル試験、結露凍結試験等の組合せ試験を施したモジュールの発電量と試験条件の関係を定量的に評価する。</p> <p>屋外でのPID試験での劣化要因を体系的に整理し、PIDの劣化現象を定量的に評価する。</p> <p>各種環境に特有な劣化現象に応じた加速試験法を開発し、太陽電池モジュールの性能30年を予測できるとともに、屋外曝露に対して100倍以上の加速係数を実現する。</p> <p>計4回のワークショップを開催する。日本電機工業会の委員会から5件以上の技術テーマについて国際標準化に向けて提案する。</p>

2	H27 ～ H31	紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析と屋外曝露劣化との相関性検証	デュボン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社	①紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析 ②屋外曝露モジュールの劣化調査と複合劣化現象との相関性の検証 ③試験法開発	<p>【29年度中間目標】 紫外線を含む複合加速試験による封止材の劣化の定性的・定量的な指標を見出す。同時に屋外曝露モジュールの発電量低下の原因調査を実施することで、長期屋外曝露における劣化を再現することが可能な紫外線を含む加速試験方法の方向性を明らかにし、共同提案全体の目標である屋外曝露に対して70倍以上の加速係数(PVモジュールの寿命25年予測)を有する試験法の開発に貢献する。</p> <p>【31年度最終目標】 他の共同提案機関とも連携し、種々の複合加速試験条件における封止材の劣化と、様々な設置環境の屋外曝露モジュール等の劣化の情報を統合し、汎用性が高い長期信頼性を評価する加速試験条件を見出すことにより、共同提案全体の目標である屋外曝露に対して100倍以上の加速係数(PVモジュールの寿命30年予測)を有する試験法の開発に貢献する。また、得られた紫外線による劣化、及び試験条件から国際標準化への提案に貢献する。本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴(メリット、デメリット)を明らかにする。</p>	
3	H27 ～ H31	屋外曝露モジュールの分析による加速試験法の開発	東レ株式会社	①屋外曝露モジュールの分析 ②曝露環境の検討 ③複合加速試験の開発 ④国際標準化への取り組み	<p>【29年度中間目標】 本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴(メリット、デメリット)を明らかにする。 既保有長期曝露モジュール、短期曝露モジュールの解析結果から、裏面材の物性のうち環境ストレスにより劣化したパラメータを2種以上特定し、そのパラメータの劣化要因となったストレスの種類と量を推定する。複合加速試験について、既に提案されている試験および考案した試験の結果を検討し、屋外曝露モジュールとの相関について妥当性の検討を行い、加速試験の開発について目処をつける。目標値は、25年の耐久性を満足するかどうかを3ヶ月(0.25年)で判断できることとする(加速係数100倍)。</p> <p>【31年度最終目標】 中期の曝露モジュールと短期の曝露モジュールの分析結果を比較し、電気的安全性を担保する裏面材の物性が劣化する速度を見積もり、加速試験での挙動と比較する。 曝露環境について、モジュール裏面材が受ける温度・湿度・紫外線ストレス量を正確に理解する。 以上の検討結果を活用し、モジュー</p>	

					<p>ルの環境要因による影響を明らかにすること、および、モジュールの安全性低下につながる可能性のある裏面材の劣化メカニズムを再現する加速試験の開発を達成する。目標値は、30年の耐久性を満足するかどうかを4ヶ月弱(0.30年)で判断できることとする(加速係数100倍)。</p> <p>得られた知見・成果を基礎として、国際標準化の議論の場にて意見・提案を行い、標準化に向けた取り組みを行う。</p>	
4	H27 ～ H31	屋外での電圧誘起劣化の実証研究	石川県工業試験場	<p>①屋外でのPID実証試験 ②太陽電池の解析(太陽電池内部を理論的に解析することで、PIDの劣化メカニズムの解明する。)</p>	<p>【29年度中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高システム電圧で稼動する太陽電池のI-V特性の2年間分以上の測定データをまとめる。 ・PID誘発試験データから、PID発生時における特性の挙動を、1特性以上見出す。 ・シミュレーション解析を基にモジュール内においてPIDが誘発し易い箇所・部材を見出し、PID現象による劣化メカニズムの解明を目指す。 ・解析結果を基にPIDに有効な対策案を1つ以上見出す。 ・本NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴(メリット、デメリット)を明らかにする。 <p>【31年度最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高システム電圧で稼動する太陽電池のI-V特性の4年間分以上の測定データをまとめて、劣化とPID発生の関係性を導出する。 ・従来の太陽電池と比較して、PIDに対する耐性を2倍以上にするための条件を導出する。 	
5	H27 ～ H31	電圧誘起劣化が発生した箇所の特定方法、微視的評価手法の開発	国立大学法人岐阜大学	<p>①PIDのメカニズムの解明</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PID加速試験の制御物理量として、PID劣化時の周囲温度、印加電圧、湿度に注目しガラス中より析出するナトリウム化合物を分析する。 ・EVA樹脂中のナトリウム化合物の拡散過程を評価する。 <p>②LBICを用いたPID発生箇所の特定方法に関する研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・LBICを応用しPID発生箇所を高速で特定する測定システムを構築する。 ・太陽電池セルの電気的パラメータ(電流源、抵抗、容量)をモデル化し、V-I特性の2次元マッピングとの相関を明らかにする。 <p>③PIDの回復技術と抑止技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・室温および高温下において、PID回復現象の電界依存性を評価する。 ・ガラスに析出したナトリウム化合物を定量する。 ・PID抑止効果の液体ガラス塗布 	<p>【29年度中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・NEDO事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴(メリット、デメリット)を明らかにする。 ・樹脂中拡散過程、太陽電池へのナトリウム化合物の拡散と光起電力低下に関しての総合的で微視的なPID現象発現機構を明らかにする。 ・PID発生箇所の特定技術の開発 ・②で構築したPID発生箇所特定技術を応用し、局所的レーザー加熱装置を開発する。 ・レーザー加熱による拡散過程を評価する。 ・室温環境下にてPID回復を加速するための、印加電圧とレーザー照射条件を検討する。 ・ガラスの両面に液体ガラス層を形成し、ナトリウム化合物拡散バリアとして使用する。 <p>【31年度最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PID発生箇所の局所的特性測定装置とPIDの回復加速との双方の光学 	

				膜厚、焼結温度依存性を評価する。 ・液体ガラスを塗布したカバーガラスにおけるナトリウム化合物の分析を行う。	系を同軸に結合する。 ・液体ガラスを用いたPID抑止技術を施工済み太陽電池モジュールに応用し、PID抑止効果を確認する。
6	H27 ～ H31	太陽電池モジュールの湿熱劣化の実時間観測手法の開発	国立大学法人東京農工大学	1)蛍光色素pHセンサの開発 2)錫膜酢酸検出センサの開発 3)金ナノコンポジット膜の局在表面プラズモン共鳴(LSPR)酢酸センサの開発 4)3種の酢酸検出センサの高温高湿試験における性能比較 5)試験方法の開発	【29年度中間目標】 1)蛍光色素酢酸センサ基板はpH5程度を検出できることを明らかにする。 2) 錫薄膜酢酸センサ基板は、2000ppmの酢酸濃度を検出できることを明らかにする。 3)金ナノコンポジット局在表面プラズモン共鳴(LSPR)酢酸センサ基板は、100ppm程度の微量酢酸濃度を検出できることを明らかにする。 4)開発した酢酸センサ基板を太陽電池モジュール内に実装して、高温高湿試験を実施し、酢酸検出感度および高温耐久性を比較する。 5)3種の酢酸センサ基板のうち最適なセンサ基板を抽出する。 6)要求される検出性能を満たさない場合には、複数のセンサ基板を組み合わせ合わせたハイブリッドセンサとすることで要求仕様が満たされることを示す。 【31年度最終目標】 1)開発酢酸センサ基板を小型化し、太陽電池モジュール内に多数配置して水分浸入による酢酸発生経路を明らかにする。 2)各点で浸入した水分量を求めることで、水分および酢酸発生状態を明確化させ、太陽電池モジュールの劣化メカニズム解明の一助とする。 3)各測定点での酢酸検出分布を推定することでモジュール内部における水分とそれに伴う酢酸の微視的な動態を観測する。 以上を遂行することで、本手法が太陽電池モジュールの長期劣化を抑制するための新たな評価技術であることを証明する。
7	H27 ～ H31	n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化	国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学	①リアエミッター型太陽電池モジュールに関するPIDの機構解明 ②ヘテロ接合型太陽電池モジュール ③フロントエミッター型太陽電池モジュール	【29年度中間目標】 PID特性の明確化と、その抑制のための指針を明らかにする。 【31年度最終目標】 PIDによるモジュール変換効率の劣化率を30年で20%以下に抑える条件を明らかにする。
8	H27 ～ H31	発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価	学校法人東京理科大学	発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価	【29年度中間目標】 北杜サイトの第1期設置システムについて発電特性の分析を継続できる環境を整備・維持しデータ分析を行うとともに、システムの発電データ分析およびモジュールの屋内外測定により設置後10年を迎えるシステムの劣化状況を明らかにする。モジュールの屋内測定結果から算出した年劣化率に対し、屋外測定データを用いたモジュール年劣化率の算出精度として

					±10%以内(平均)を実現する。 【31年度最終目標】 北杜サイトの発電特性分析から得られた劣化率等の知見をNEDOが公開するSTEP-PVにおいて利用可能とする。本研究において得られた信頼性・劣化に関する知見を発電電力量の算出方法に取り込むことにより、STEP-PVを用いた北杜メガソーラーの設置後10年間の発電電力量の推定精度として±10%以内(平均)を実現する。	
--	--	--	--	--	--	--

表. 6 研究開発項目⑤

「動向調査等」

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	目標	その他
太陽光発電開発戦略に関する動向調査						
1	H27 ～ H31	「太陽光発電開発戦略」の推進に係る情報収集、太陽光発電コスト分析、太陽光発電産業・市場動向等に関するシナリオ分析	みずほ情報総研株式会社	①「太陽光発電開発戦略」で提示されている情報の更新 ②日本における太陽光発電システム発電コスト分析をするとともに、海外(欧米等)における発電コスト分析・評価事例の調査 ③国内外における太陽光発電市場の分野別規模や構成要素別の分析及び太陽光発電に係るバリューチェーンの主要企業の動向を調査	【中間目標】 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。 【最終目標】 発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの可否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する	
2	H27 ～ H31	「太陽光発電開発戦略」の方向性に関する検討		上記調査分析に基づき、太陽光発電技術開発の方向性に関する検討	同上	
3	H27 ～ H31	「太陽光発電システム搭載自動車」に関する調査		「高効率太陽電池」の特長を生かした「面積制約」を受けられる環境での活用例として「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出	同上	

発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査					
1	H27 ～ H31	太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性および産業競争力に関する動向調査	株式会社資源総合システム	①発電コスト調査 ②太陽電池モジュールの現状技術および産業競争力に関する調査 ③太陽電池モジュールの長期信頼性調査	【中間目標】 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。 【最終目標】 発電コスト7円/kWhの達成後の産業・市場の動向について、太陽電池モジュールの新たな利用方法の想定や、産業競争力向上による国内産業発展のためのシナリオ検討
2	H27 ～ H31	太陽電池モジュール製造技術開発と製造コストに関する調査・分析		①現在市場で主に流通している結晶シリコンと化合物太陽電池に焦点を当て、太陽電池モジュール製造技術の開発及びプロセス改善等によるモジュール性能向上の可能性、コストの内訳とその変化について調査・分析 ②欧米各国のや中国等の中核的研究機関や産業団体、大手太陽電池製造企業は発表する開発ロードマップ等の各種資料を調査・整理し、製造コストの内訳について把握 ③モジュールの製造コスト及び長期信頼性に寄与する太陽電池モジュール用材料・部材、製造装置の開発等によるモジュール性能向上の可能性検討	同上
3	H27 ～ H31	太陽電池モジュールの利用動向と今後の産業と市場の可能性に関する調査		①最近の市場動向から要請される太陽電池モジュール仕様の要件をまとめ、技術開発要素を整理する ②No. 1, No. 2, No. 4 の結果を総合して市場規模並びに導入地域が拡大したことにより新たに必要となる利用環境及び分散電源としての建物装置(BIPV, 軽量化)などへの応用可能性を検討するとともに、発電コスト低減目標達成後の太陽電池製造に係る産業および市場について、太陽電池技術と市場のニーズ、生産体制の構築や国外市場への展開などの国内産業の在り方も含めた検討を行う。	同上
4	H27 ～ H31	各国の太陽電池研究開発政策動向及び新たな太陽電池技術に関する調査		①主要国における研究開発政策動向に関する調査 ②新たな太陽電池技術の開発動向に関する調査	同上

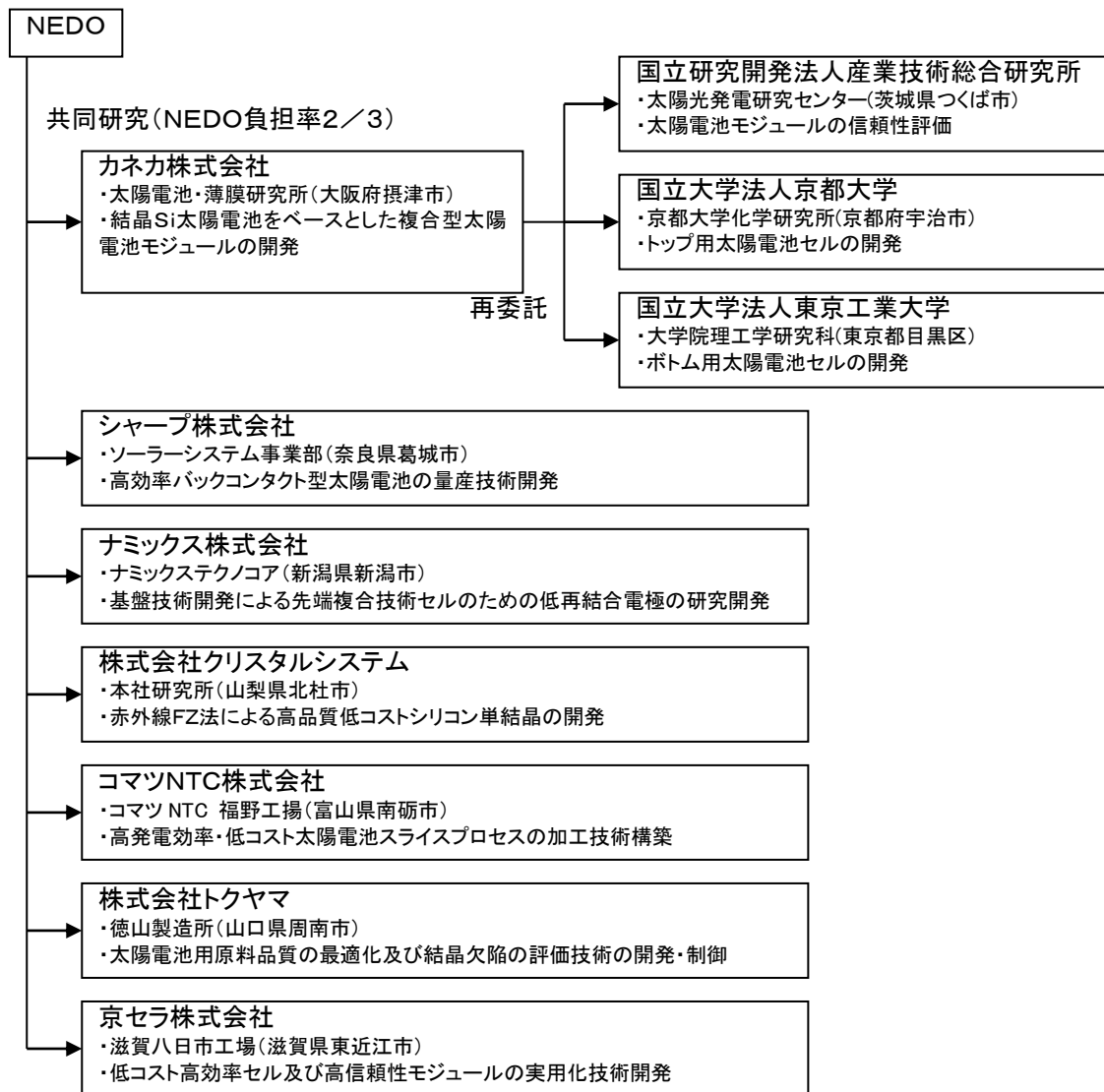
IEA PVPS 国際協力事業					
1	H27 ～ H31	タスク 1 専門家会議等の国際協力活動への参加及びタスク 1 に係る定期刊行物の作成及び重要刊行物の日本語版の作成	株式会社資源総合システム	国際協力活動への参加を通じて、日本の太陽光発電の国際競争力向上に資する情報収集を行うために太陽光発電動向の戦略的分析及び情報の普及を実施しているタスク 1 に参加する。	<p>【中間目標】 N E D O が参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。</p> <p>【最終目標】 PVPS の動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う</p>
2	H27 ～ H31	特別情報活動（ワークショップ）		タスク 1 が実施する特別情報（国際会議におけるワークショップ・セミナー等）に関しては、日本の専門家に対して要求される各国との事前調整及び国内調整を実施擦ると共に必要に応じて会費の講演・運営準備等を実施する。	同上
3	H27 ～ H31	タスク 1 に係る定期刊行物の作成及び重要刊行物の日本語版の作成		日本の太陽光発電に関する定期刊行物（調査報告書）の作成及び重要性の高い IEA PVPS 定期刊行物の日本語版の作成	同上

2.2 研究開発の実施体制

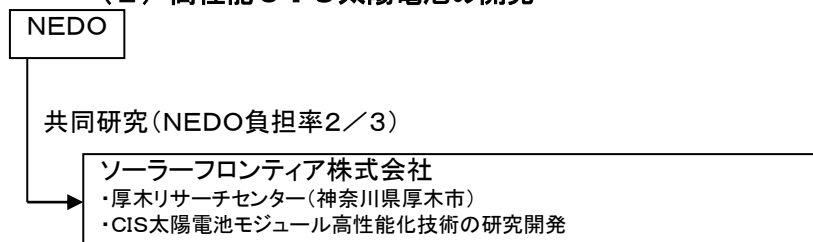
本研究開発は、NEDO が選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは国立研究開発法人等（以下、「委託先」という。）が、NEDO と委託研究契約を締結し実施している。

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発」

（1）先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

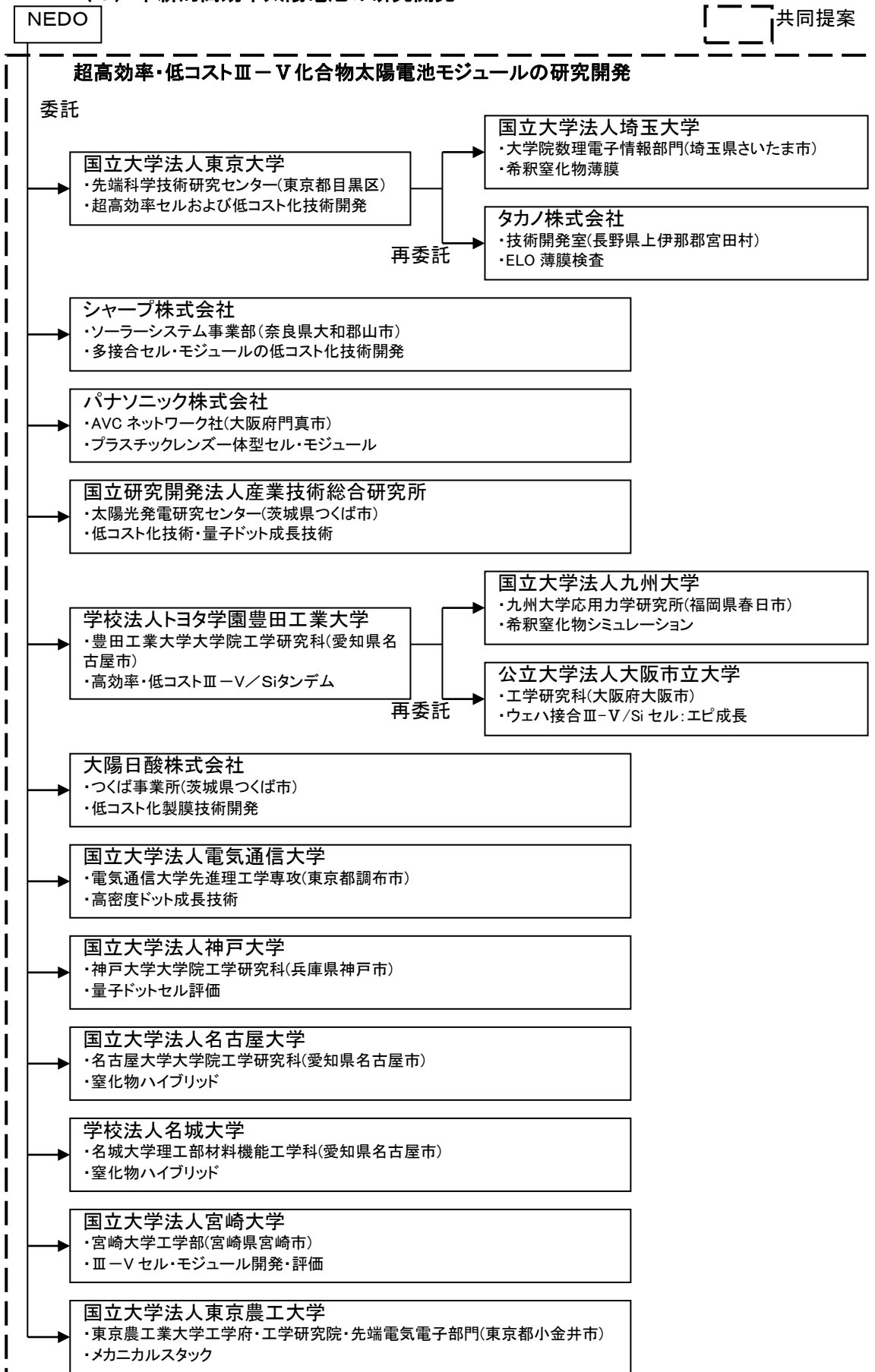


（2）高性能C I S太陽電池の開発



研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発



(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

NEDO

共同提案

ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

委託

パナソニック株式会社
 ・先端研本部材料研究室(大阪府門真市)、先端研(東大)
 ・塗布製造技術の開発

株式会社東芝
 ・研究開発センター(神奈川県川崎市)、先端研(東大)
 ・超軽量太陽電池モジュール技術の開発

積水化学工業株式会社
 ・先端材料開発センター(大阪府三島郡島本町)、先端研(東大)
 ・低コストR2R太陽電池製造技術の開発

アイシン精機株式会社
 ・技術開発研究所(愛知県刈谷市)
 ・高性能・高信頼性確保製造技術の開発

再委託
 株式会社アイシン・コスモス研究所
 ・アイシン・コスモス研究所(愛知県刈谷市)、
 先端研(東大)
 ・高性能・高信頼性確保材料技術

富士フイルム株式会社
 ・先進研究所(神奈川県足柄上郡開成町)、先端研(東大)
 ・高性能材料合成技術の開発

学校法人早稲田大学
 ・早稲田大学理工学術院(東京都新宿区)、先端研
 ・基盤材料技術と性能評価技術の開発

再委託

国立研究開発法人物質・材料研究機構
 ・太陽光発電材料ユニット(茨城県つくば市)
 ・基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発

地方独立行政法人神奈川県立産業技術総合研究所
 ・KSP(神奈川県川崎市)
 ・信頼性の高い性能評価手法の確立

国立研究開発法人産業技術総合研究所
 ・太陽光発電研究センター(茨城県つくば市)、
 先端研(東大)
 ・界面制御

国立大学法人九州工業大学
 ・生命体工学研究科(福岡県北九州市)
 ・高電流材料技術

再委託

国立大学法人東京工業大学
 ・大学院理工学研究科(東京都目黒区)
 ・基板構造制御技術

国立大学法人東京大学
 ・先端科学技術研究センター(東京都目黒区)
 ・新素材と新構造による高性能化技術の開発

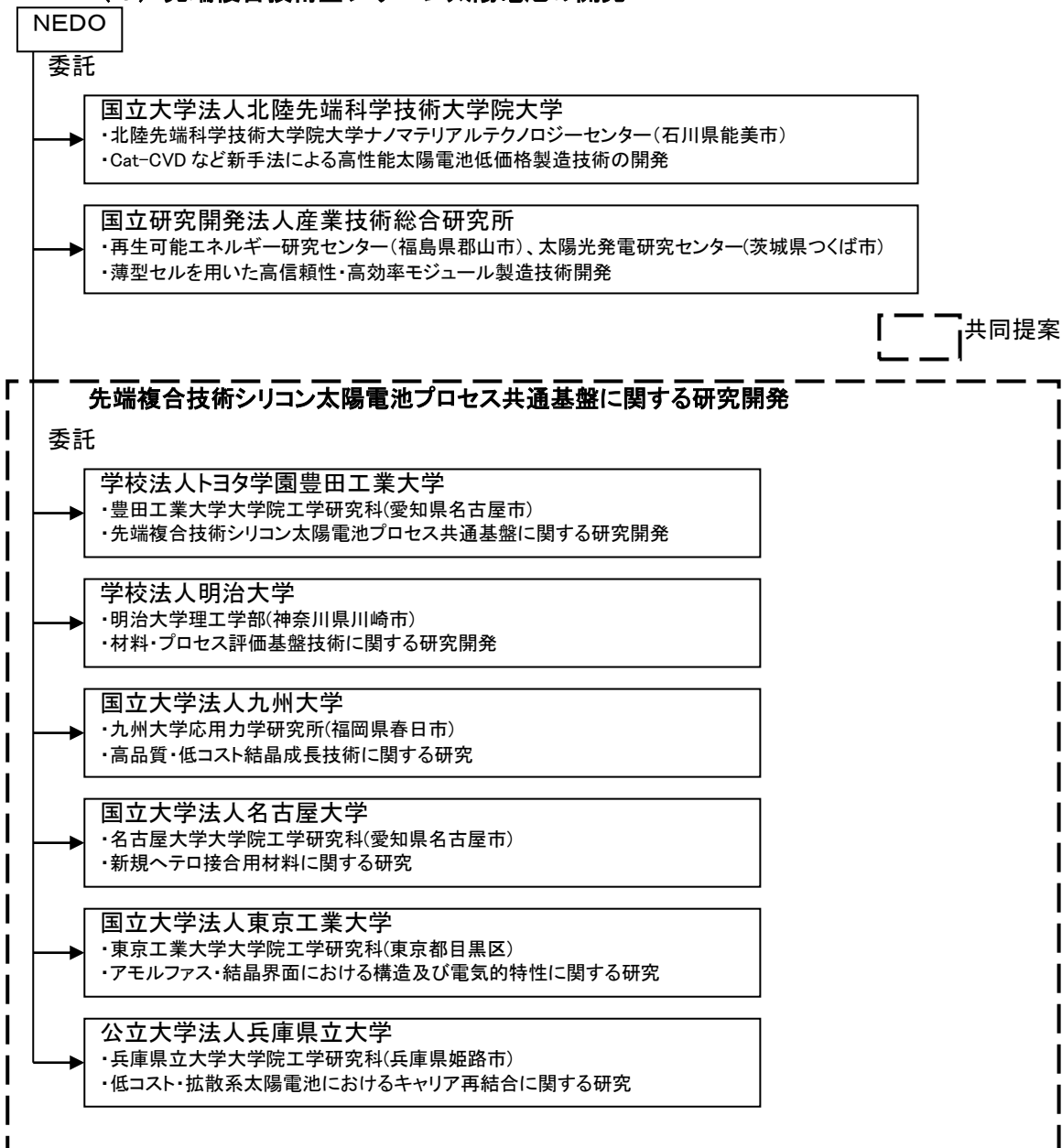
公立大学法人兵庫県立大学
 ・大学院工学研究科(兵庫県姫路市)
 ・電極材料技術

国立大学法人京都大学
 ・京都大学化学研究所(京都府宇治市)
 ・高純度材料技術

国立大学法人熊本大学
 ・大学院自然科学研究科(熊本県熊本市)
 ・第一原理計算

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発



(2) 高性能CIS太陽電池の開発

NEDO

共同提案

CIS太陽電池高性能化技術の研究開発

委託

国立研究開発法人産業技術総合研究所

- ・太陽光発電研究センター(茨城県つくば市)
- ・光吸収層の高品質化による CIS 太陽電池の高効率化

国立大学法人東京工業大学

- ・東京工業大学大学院電子物理工学専攻(東京都目黒区)
- ・界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化

学校法人立命館

- ・立命館大学理工学部電気電子工学科(滋賀県草津市)
- ・バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発

学校法人東京理科大学

- ・東京理科大学理工学部電気電子情報工学科(千葉県野田市)
- ・エピタキシャル成長による CIS 太陽電池の高効率化

国立大学法人筑波大学

- ・筑波大学数理物質科学研究科(茨城県つくば市)
- ・結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援

国立大学法人鹿児島大学

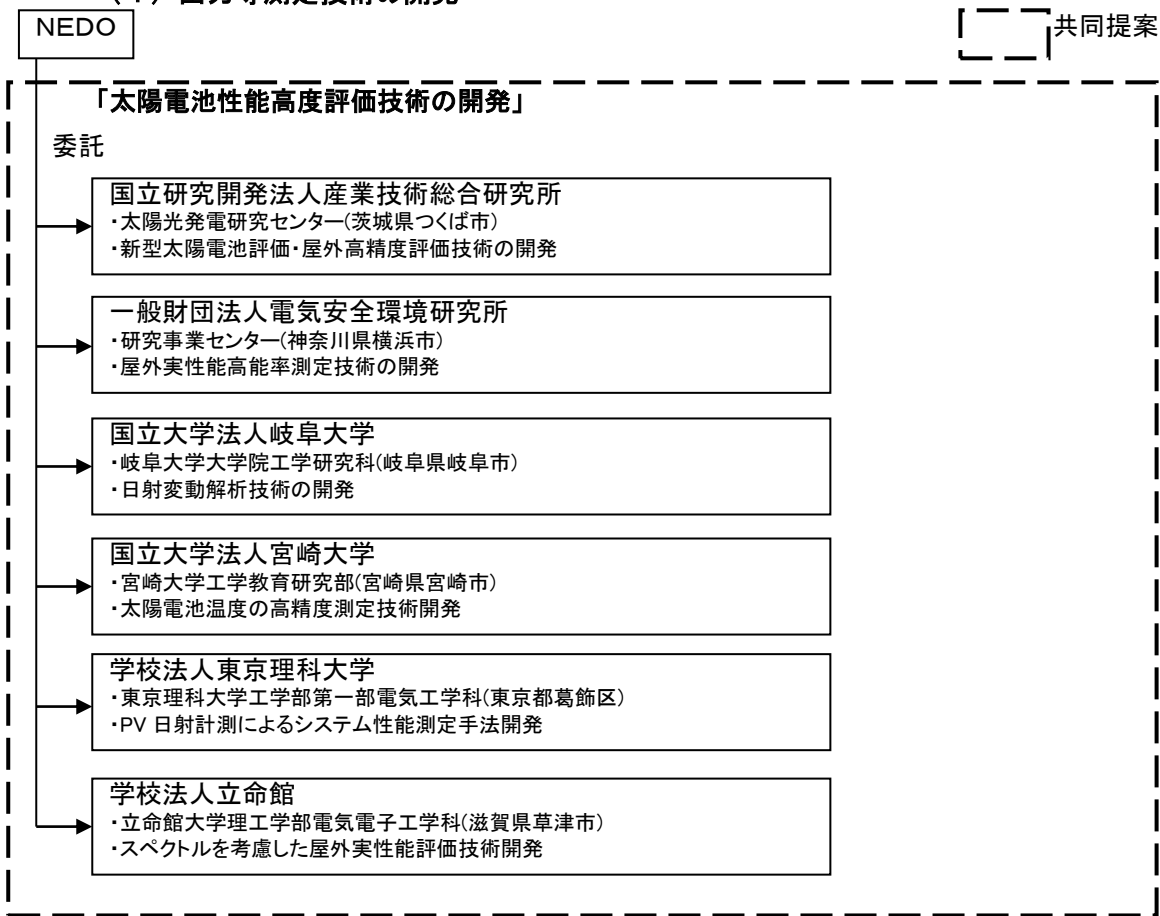
- ・鹿児島大学大学院理工学研究科(鹿児島県鹿児島市)
- ・積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発

学校法人龍谷大学

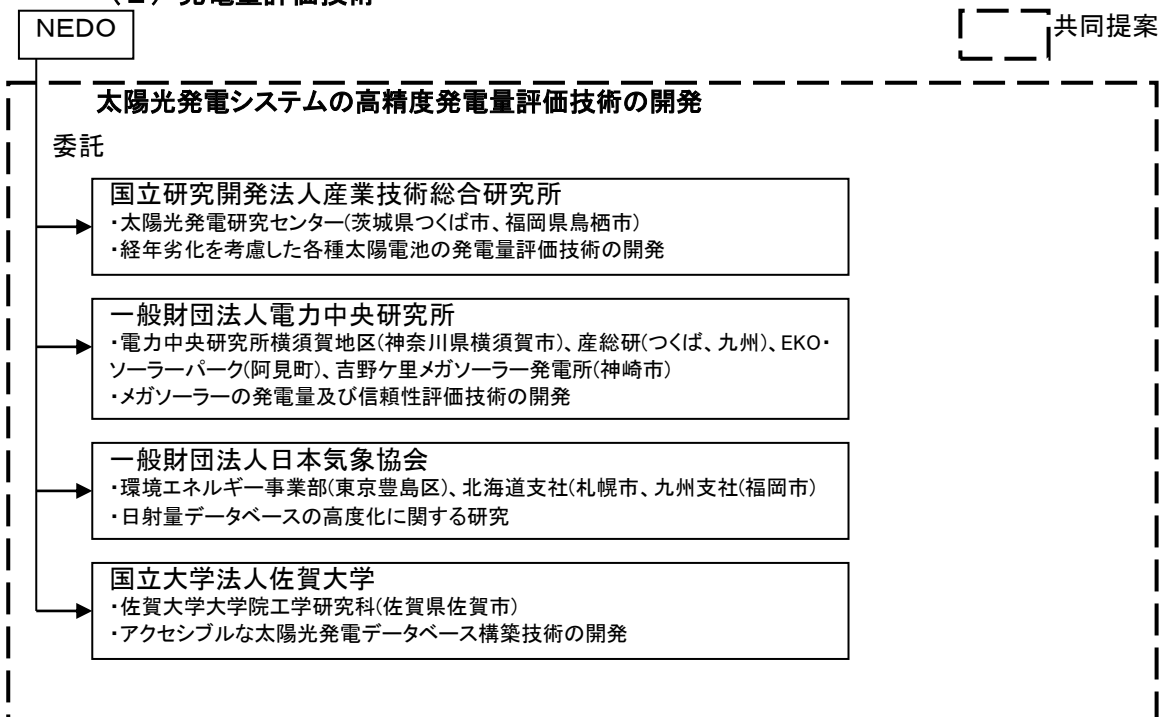
- ・龍谷大学理工学部(滋賀県大津市)
- ・理論計算と実験的手法を組み合わせた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

(1) 出力等測定技術の開発



(2) 発電量評価技術



(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

NEDO

共同研究
(NEDO負担率2/3)

株式会社カネカ

- ・株式会社カネカ(兵庫県豊岡市)
- ・ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発

共同提案

レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発とその標準化

委託

日清紡メカトロニクス株式会社

- ・美合工機事業所(愛知県岡崎市)
- ・ケーシング側から見た太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発

国立大学法人奈良先端科学技術大学院大学

- ・物質創成科学研究科(奈良県生駒市)
- ・寿命予測技術の標準化

太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発

委託

国立研究開発法人産業技術総合研究所

- ・太陽光発電研究センター(茨城県つくば市、福岡県鳥栖市)
- ・太陽電池モジュールの劣化現象の解明、加速試験法の開発に関する研究

デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社

- ・デュポンジャパン中央技術研究所(栃木県宇都宮市)
- ・紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析と屋外曝劣化との相関性検証

東レ株式会社

- ・環境・エネルギー開発センター(滋賀県大津市)
- ・屋外曝露モジュールの分析による加速試験法の開発

石川県工業試験場

- ・再生可能エネルギー技術開発PJ室(石川県金沢市)
- ・屋外での電圧誘起劣化の実証研究

国立大学法人岐阜大学

- ・岐阜大学工学部(岐阜県岐阜市)
- ・電圧誘起劣化の微視的評価手法の開発と低価格反射防止膜の信頼性評価

国立大学法人東京農工大学

- ・東京農工大学工学部(東京都小金井市)
- ・太陽電池モジュールの湿熱劣化の実時間観測手法の開発

国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学

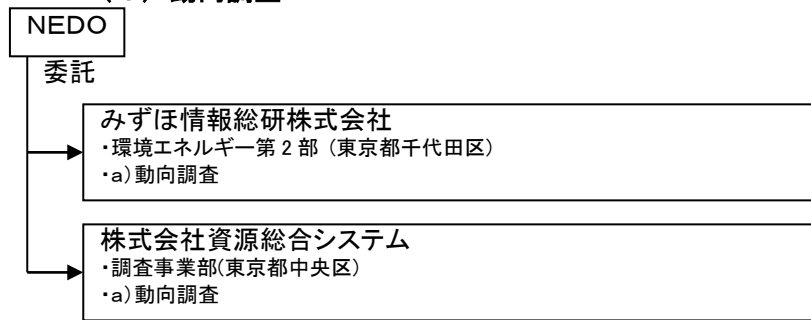
- ・グリーンデバイス研究センター(石川県能美市)
- ・n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化

学校法人東京理科大学

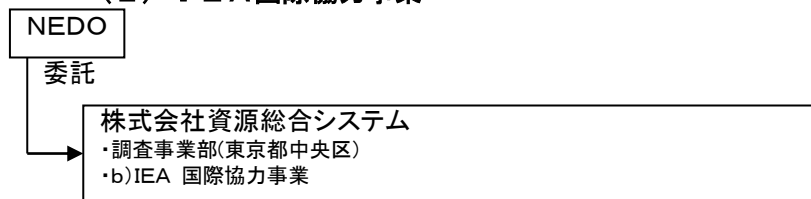
- ・東京理科大学工学部第一部電気工学科(東京都葛飾区)
- ・発電データ分析によるシステム信頼性および劣化率評価

研究開発項目⑤「動向調査等」

(1) 動向調査



(2) IEA国際協力事業



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)は研究開発実施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等を実施していたが、研究開発全体の管理・執行をより厳格に行うため、NEDOは平成28年度より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。技術検討委員会は以下の5テーマについて個別に各々3名の技術検討委員を設置し、2~3回/年の頻度で委員会を開催するとともに研究開発の運営に反映した。

【5つの技術検討委員会】

1. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会(結晶シリコン太陽電池)
2. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会(CIS太陽電池)
3. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会(III-V化合物太陽電池)
4. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会(ペロブスカイト太陽電池)
5. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会(共通基盤技術)

【技術検討委員(敬称略)】

1. 結晶シリコン太陽電池 : 小長井 誠(東京都市大学教授)
高倉 秀行(立命館大学教授)
山口 真史(豊田工業大学)
2. CIS太陽電池 : 小長井 誠(東京都市大学教授)、
山口 真史(豊田工業大学)
片桐 裕則(長岡工業高等専門学校教授)
3. III-V化合物太陽電池 : 小長井 誠(東京都市大学教授)
高倉 秀行(立命館大学教授)
今泉 充(宇宙航空研究開発機構(JAXA))
4. ペロブスカイト太陽電池 : 小長井 誠(東京都市大学教授)
工藤 一浩(千葉大学教授)
伊藤 紳三郎(京都大学特定教授)
5. 共通基盤技術 : 小長井 誠(東京都市大学教授)
高倉 秀行(立命館大学教授)
田中 良(NTTファシリティーズ)

【開催実績、開催予定】

年度	2015(H27FY)	2016(H28FY)	2017(H29FY)	2018(H30FY)	2019(H31FY)
技術検討委員会 (5テーマそれぞれ開催)	0※	2	2(予定) (中間評価実施年)	3(予定)	3(予定)

技術検討委員会ではテーマによってテーマリーダー、テー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、技術検討委員による質疑応答、及びNEDOと技術検討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、テーマリーダー、チームリーダー、各委託先担当者等に伝えた。技術検討委員会での主な指導内容を以下の表に示す。

1. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（結晶シリコン太陽電池）

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発」

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

分野	主な指導内容
結晶シリコン太陽電池（研究開発項目①、③）	<p>（平成 28 年 8 月）大学、産総研はオリジナリティーのある研究開発を行うとともに、チーム間の役割分担をクリアにすべき。</p> <p>（平成 29 年 1 月）研究開発が進んでいる研究テーマと探索段階のテーマとのギャップがある。研究開発が進んでいるテーマはそのまま開発を進めて頂き、探索段階のものは中間評価に向けてテーマを絞るべき。</p> <p>（平成 29 年 5 月）2020 年目標、2030 年目標のどちらに対する開発テーマなのか区別して、見極めを急ぐべき。</p>

2. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（C I S太陽電池）

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発」

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

分野	主な指導内容
C I S太陽電池（研究開発項目①、③）	<p>（平成 28 年 7 月）評価指標の考え方など基本的な部分については、共通の認識で連携を進めるべき。</p> <p>（平成 28 年 12 月）どのような欠陥がバルクライフタイムや FF に影響しているのかを解明し、効率向上につなげるべき。</p> <p>（平成 29 年 4 月）次の開発テーマとして、ワイドギャップ化に向けた具体的なアプローチを提案するべき。</p>

3. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（III-V化合物太陽電池）

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

分野	主な指導内容
III-V化合物太陽電池（研究開発項目②）	<p>（平成 28 年 7 月）7 円/kWh の実現に向けてそれぞれの技術開発の効果が見えるよう、全体シナリオを作成するべき。</p> <p>（平成 28 年 12 月）トップセルは InGaP に重点化に特化。GaN は見極めが必要。オンシリコンはテーマが多いので集約するべき。</p> <p>（平成 29 年 5 月）最終目標に向けてリソース集中に取り組むべき。超高効率セルは量産化につなげるという観点で評価するべき。</p>

4. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（ペロブスカイト太陽電池）

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

分野	主な指導内容
ペロブスカイト太陽電池（研究開発項目②）	<p>（平成 28 年 11 月）面積が小さいので 1 cm² 以上のセルで特性が得られるよう検討いただきたい。コスト試算については各技術がコスト低減にどう貢献するか、最終的なビジョンを描いて進めるべき。</p> <p>（平成 29 年 1 月）デバイス物理の観点から評価、解析を進めるとともに、デバイス化して目標を達成する道筋を立てるべき。</p> <p>（平成 29 年 5 月）目標達成に向けてどのような貢献ができるか検討の上、絞り込むテーマの選別を進めるべき。</p>

5. 高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発技術検討委員会（共通基盤技術）

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

分野	主な指導内容
共通基盤（研究開発項目④）	<p>（平成 28 年 8 月）産業界のニーズも踏まえて積極的に知財の創出に努めること。出口イメージを持って開発を進めるべき。</p> <p>（平成 28 年 12 月）特許などの知財獲得の取り組みが弱い。各グループとも知財獲得の具体的な戦略を示すべき。</p> <p>（平成 29 年 5 月）寿命予測、試験法の開発では劣化モードのマップ図を作り、既解明点、非解明点を明確にするべき。</p>

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 (結晶シリコン太陽電池)	(平成 28 年度) カネカ 11,011 千円増額 ヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池の高性能化に対し、ヘテロ接合部における高品位の界面の形成技術やパターニング技術の開発等の進捗を登録研究員が従事する時間を増加させることで加速した。これにより、中間目標であるモジュール変換効率 21%を 22%に向上させることができるとともに、最終目標に対しても、前倒しあるいは高いレベルでの達成に寄与するものと期待された。
	(平成 29 年度) カネカ 286,367 千円 「パターニング層形成装置」「出力評価装置」の導入により低コストパターニング技術開発や長期信頼性評価技術等の実用化技術の開発を加速させる。モジュール変換効率の最終目標値向上、達成の前倒し、運転年数延長が期待できる。
研究開発項目② (III-V化合物太陽電池)	(平成 29 年度) 大陽日酸 35,640 千円 H-VPE 装置、MOCVD 装置による GaAs、InGaP 高速製膜評価において、製膜高速化のための要素技術の設計及び装置改造を行い、実証評価を実施する。量産化装置の設計指針を早期に取得することができる。
	(平成 29 年度) シャープ 119,988 千円 新規用途開発に向けた化合物太陽電池の量産性検証、及び用途の候補である車載用との実現可能性についての検討を行う。化合物の低コスト化目標達成に向けた見通しを明確にすることができる。
研究開発項目③ (ペロブスカイト太陽電池)	(平成 27 年度) 積水化学工業 18,058 千円 ペロブスカイト塗工機へのドライエア発生装置の追加。ペロブスカイトセルの性能ばらつきを低減でき、小型モジュール装置実現が可能となった
	(平成 29 年度) 積水化学工業 23,760 千円 オール R2R プロセスでのペロブスカイト太陽電池の実証を 29 年度中に実施するためのスパッタ装置の R2R 化と原材料費の増額。ロールスパッタ装置専用のスパッタ電源を追加で導入することにより、要素検討とロール化検討を同時に進めることができ、R2R プロセス全体の開発を加速できるとともに R2R 太陽電池の早期実証が可能となった。
	(平成 29 年度) パナソニック株式会社 11,880 千円 ペロブスカイト膜均一製膜検討装置に基板への塗布液の被覆性の向上のための塗布液循環機構と塗布液供給制御機構を追加、高精細パターニング装置の透明電極のパターニング用のレーザの変更。最終目標として 30cm 角サイズのモジュールの面積での効率 20%実証の可能性が期待された。
研究開発項目④ (結晶シリコン太陽電池)	(平成 28 年度) 豊田工業大学 123,779 千円増額 先端複合技術型結晶シリコン太陽電池の早期実現に向けて、新たに「ヘテロクラスター型高性能ヘテロ接合研究開発システム」を導入し、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合技術の開発を加速するために増額を行った。これにより、先端複合技術型結晶シリコン太陽電池のセル変換効率の向上が期待された。
	(平成 28 年度) 名古屋大学 17,575 千円増額 先端複合技術型結晶シリコン太陽電池の早期実現に向けて、新たに装置 3 台(ドラフトチャンバー、純水製造装置、スピンドライヤー)を導入し、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合膜形成前の洗浄技術の開発を加速するために増額をおこなった。これにより、先端複合技術型結晶シリコン太陽電池のセル変換効率の向上が期待された。
研究開発項目⑤ (調査)	(平成 27~29 年度) みずほ総研 22,000 千円 「太陽光発電システム搭載自動車」に関する調査。「高効率太陽電池」の特長を生かした「面積制約」を受ける環境での活用例として「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出等を行った。

2.3.3 追加応募の実施

現段階で追加応募は実施していない。後述する「3. 情勢への変化の対応」において述べる拡充テーマ「高性能太陽電池製造技術実証」の実施が認められた場合は必要に応じて追加応募を行う予定。

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⑤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、マネジメントに反映させた。また、50 機関以上ある各事業者を訪問し、幹部や研究開発のキーパーソンとディスカッションを行うことにより各機関の戦略について議論するとともに、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

- 既に市販されている結晶シリコン太陽電池、及び CIS 太陽電池の開発において、ウエハスライス技術、パッシベーション技術、電極形成技術など、実用化に近い技術はプロジェクト期間内においても研究開発成果を順次量産プロセス及び市販セルに適用し、早期に実用化を実現するとともに、2020 年に発電コスト 14 円/kWh の目標達成を目指す。バックコンタクトヘテロ構造やその他の先端複合型セル構造など、大幅なプロセスの変更を伴う技術については、本プロジェクトで実用化に向けた要素技術を構築し、プロジェクト後半、或いはプロジェクト終了後に早期に小規模な製造実証や量産プロセスの構築を行い、実用化に結び付けるとともに 2030 年に 7 円/kWh、或いは 2030 年より前倒して 7 円/kWh 達成を目指す。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池は高速成膜装置や発電層の低コスト基板への転写などによる低コストプロセスを早期に実現し、2030 年発電コスト 7 円/kWh 達成を目指して大規模発電施設や住宅屋根など電力発電用途向け太陽電池モジュールの実用化を狙う。また、車載型太陽電池など、小面積で高効率を得られるメリットを最大限に活かせる用途についての開発を併せて行い、実用化を目指す。
- ペロブスカイト太陽電池は効率及び耐久性を担保しやすいガラス基板型モジュールと、より低コスト、軽量化を目指した樹脂フィルムや金属箔上の超軽量モジュールの両面から開発を進め、既存の太陽電池モジュールの重量では強度に課題がある建物への設置等、軽量、低コストなどのメリットを活かせる市場から順次事業化を検討する。市場投入と並行して効率、耐久性等の高性能化を進め、最終的には結晶シリコン等既存太陽電池の置き換えも念頭に 2030 年に 7 円/kWh 以下の達成を目指す。

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、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⑤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、マネジメントに反映させた。
- 発電コスト 14 円/kWh、7 円/kWh は調達価格等算定委員会でも価格目標として設定され、太陽光発電の固定価格買取制度からの自立が明確に求められるようになった。これまで開発してきた高効率セルの小規模設備製造実証や、実用化を加速するための新たな市場の創出に向けて、BIPV (ZEB) や、車載などの FS を開始した。高効率セルの小規模設備製造実証としては、「高性能太陽電池製造技術実証」として量産への架け橋となる技術開発のプロジェクトへの発展を計画中。本テーマではバックコンタクトヘテロ型太陽電池等、試作レベルで高効率を達成した太陽電池に対し小規模試作設備を導入し、多数枚同時処理プロセス、スループットやタクトタイムの向上など、量産を想定した場合に低コスト化につながる製造技術の開発を行い、2020 年 14 円/kWh を確実に達成するとともに、早期に (2030 年より前倒しで) 7 円/kWh を達成することを目指す予定である。
- 株式会社トクヤマの「太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御」において、平成 29 年度中間目標を平成 28 年度に達成したが、株式会社トクヤマのグループ会社が太陽電池用ポリシリコン事業を譲渡し撤退することが決定したことにより、最終目標である最適ポリシリコンの製品化の実現が困難となったため、平成 28 年度末で事業を終了した。本研究で得られた知見やポリシリコンは、連携先の豊田工業大学や明治大学に引き継ぐことで太陽電池製造技術、評価技術の基礎研究に有効に活用している。
- Ⅲ-V 化合物太陽電池については、技術検討委員会における「トップセルは InGaP に重点化に特化。GaN は見極めが必要。オンシリコンはテーマが多いので集約すべき」との指摘に基づき、一部チームの体制を変更。GaN のテーマについては及び開発内容の見直しを行った。

4. 評価に関する事項

【事前評価】

評価実施時期：平成 26 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：事前評価書に記載

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

結晶シリコン、CIS、Ⅲ-V化合物、ペロブスカイトなどの各太陽電池の研究テーマにおいて、2030年に発電コスト7円/kWhを達成するための技術開発として、各々設定した中間目標を達成すべく産学連携の下で研究開発を行った。結晶シリコン、CIS太陽電池は2020年14円/kWhを達成すべく、早期に量産プロセスに適用可能な技術についても併せて開発した。発電コスト低減には太陽電池セルの変換効率向上、材料、製造コストの低減、耐久性向上によるモジュール長寿命化などが必要となるが、変換効率向上については各太陽電池で世界最高効率を達成するなど、大きな成果をあげた。低コスト化についても高い変換効率を低減させずにコスト低減させる技術を開発しており、各太陽電池において発電コスト目標を達成できるコスト試算を行いながら低コスト化の基礎技術開発を行っている。耐久性向上については材料、製造プロセスなど太陽電池開発からのアプローチに加え、共通基盤技術として太陽電池特性評価、発電量評価や劣化要因解析、寿命試験方法の開発など、耐久性向上につながる技術を併せた開発を行っており、これらの技術についても大きな進展があった。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先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能CIS太陽電池の開発

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発した。

「高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発」では高品質アモルファスシリコンを用いたヘテロ接合技術や、電極の直列抵抗を低減させる技術、太陽光をより効率的に利用できるバックコンタクト技術を組み合わせたヘテロ接合バックコンタクト結晶シリコン太陽電池を開発し、結晶シリコン太陽電池セルとして世界最高のセル変換効率26.6%を実用サイズ(セル面積180cm²)で達成した。また、モジュールにおいても、結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高の変換効率24.37%を達成した。「高効率バックコンタクト型太陽電池の高効率化技術開発」ではフォトリソグラフィ技術を使用しない安価プロセスでセル変換効率24.5%を実証した。「低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発」においては、セル効率は20.49%であるが、プロセスコスト低減化により発電コスト14.9円/kWhを実現し、コスト目標を達成した。低コスト化については目標とする太陽電池に対し各実施者が個別に開発しており、数値として示すことが難しいが、量産プロセスに研究開発成果の一部を投入することにより中間目標として掲げている発電コスト17円/kWhを達成し、2020年に14円/kWhを達成すべく開発を継続している。また、セル変換効率25%以上を達成する技術においてはセル変換効率向上自体が発電コスト低減に寄与するが、高効率を維持しながら低コストを実現できるプロセスの開発をさらに進めるとともに小規模製造設備による実証等を通して量産プロセスに展開すべく開発を続け、2030年発電コスト7円/kWh達成を目指す。

2) 高性能CIS太陽電池の開発

CIS太陽電池は結晶シリコン太陽電池より変換効率は低いが、その分製造コストが低いことを見積もることができ、結晶シリコンとは少し異なる特性、コストバランスで2020年の14円/kWh達成、さらには2030年の7円/kWh達成を目指して開発を行っている。以下に主な成果を示す。

光吸収層表面および光吸収層・バッファ層界面のパッシベーションとバッファ層最適化による再結合抑制技術の開発を行い、セル変換効率22.3%を達成した。また、薄膜系太陽電池の30cm角サブモジュールでは世界最高となる変換効率19.2%を達成した。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1) 革新的高効率太陽電池の研究開発 (Ⅲ-V化合物太陽電池)

Ⅲ-V化合物は多接合化や集光により高い効率は実証されているため、目標の2030年7円/kWhを達成するために、どのように高い効率を保ったまま材料コスト、製造コストを低減するかを主体とした開発を行っている。具体的には発電層の低膜厚化や高価なGaAs系基板の使いまわしのための薄膜セルの基板からの剥離プロセス、安価な基板或いは安価な太陽電池との接合技術、及びタンデム化、光発電層の高速成膜化などである。併せて量子ドットセルなど、更なる高効率化を目指す技術開発も行っている。主な成果を以下に示す。

高効率Ⅲ-V薄膜セル開発(光閉じ込め)では、ミドルセルーボトムセル間のバッファ層厚さ低減検討を実施。従来の膜厚の1/2までは従来と同等の特性が維持できる構造を得た。また、裏面テクスチャをウエットエッチングのみで形成する手法を確立。光路長増大5倍を実証した(世界初)。低コスト化プロセス技術開発ではH-VPE装置を設計、導入し、約40mm/hの高速成長下でGaAsホモエピ、約16 μ m/hの高速成長下で格子整合系InGaPヘテロエピを実証し、InGaPを窓層としたGaAs太陽電池において変換効率20.29%を達成した。MOCVDでは90 μ m/hの高速成膜でGaAs単セルを形成し、効率25%を達成した(世界初)。低コストモジュール開発としては実用セルサイズでの逆積み3接合型モジュール(非集光、31cm角)の試作を実施。産業技術総合研究所で変換効率測定を実施し、31.2%の効率を得た。超高効率セル開発では70層の量子井戸により、800nmのフィルタ下で開放電圧0.77V、短絡電流10mA/cm²、曲線因子0.69を得た(世界初)。

2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発 (ペロブスカイト太陽電池)

ペロブスカイト太陽電池は2030年7円/kWh達成のために目標とするモジュール変換効率は20%と結晶シリコンより若干効率は低いものの、大幅な低コスト(7円/kWhの製造コスト15円/W)を目指して低コストを実現できる材料や製造プロセスなどの開発を行っている。本テーマではセルの高効率化を行い、研究レベルで20%以上のセル変換効率を実現できるようになってきたが、耐久性(耐湿性、耐熱性、耐光性)をあわせ持つ材料、製造プロセスを構築するべく開発を行っている。以下に主な成果を示す。

「塗布製造技術の開発」では、20cm角ガラス基板上35直列の集積型モジュールを試作し、モジュール変換効率12.6%を達成した。「超軽量太陽電池モジュール技術の開発」では、超軽量基板としてPENを用いた8直列の5cm角モジュールで変換効率13.7%を達成した。「低コストR2R太陽電池製造技術の開発」ではダイレクトバリアによる高耐久化を検討し、1cm角金属箔基板で変換効率12%のセルについてJIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目を達成した。また、「高性能・高信頼性確保製造技術の開発」では、新規な傾斜接合した逆型セル構造を開発し1cm角で効率18.2%。さらに欠陥を低減した同1cm²セルで世界最高効率19.2%(AIST認証)を達成した。また、85°C、500時間の耐熱、1Sun下1000時間連続照射試験も満足した。「新素材と新構造の開発」ではアモルファスTiO_x緻密層、ブルッカイトTiO₂高結晶多孔膜を用いたMAPbI₃ペロブスカイト太陽電池でVoc 1.16~1.18V、効率21.6%を得た。

研究開発項目③「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

本研究開発項目では7円/kWh達成を目標とする研究開発項目①の結晶シリコン太陽電池の高効率化、低コスト化のための共通基盤技術として、大学や研究機関が高品質シリコン結晶、高性能パッシベーション膜(ヘテロ膜)、電極のコンタクト部の再結合を抑制する新規構造や、大幅に工程を削減できるイオン注入などを使ったバックコンタクト形成プロセスなどの検討を行っている。主な成果を以下に示す。

「Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発」においては、ヘテロ接合バックコンタクト太陽電池の作製プロセスとして、結晶シリコンウエハのキャリアライフタイムを数msと良好な値を維持しながら、p型アモルファスシリコンをn型アモ

ルファスシリコンに変換できるプラズマイオン注入技術を開発した。「薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発」では、従来の熱拡散に代わり、イオン注入を用いて表面側ボロン、裏面側リンを注入、熱処理をしたn型両面受光セルを作製し、変換効率 20.4%を達成した。「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」の結晶育成技術においては、従来CZ育成技術に比べ、抵抗率が一桁高い極低濃度不純物のCZ結晶育成技術の開発に成功した。

2) 高性能 CIS 太陽電池の開発

本研究開発項目では 7 円/kWh 達成を目標とする研究開発項目①の高性能 CIS 太陽電池の高効率化、低コスト化のための共通基盤技術として、大学や研究機関が CIS 太陽電池の高効率化のための手法の開発や機構解明を行っている。以下に主な成果を示す。

3 段階法における 2 段階目に Se インターバルを設けることにより同構造が作製することを新たに見出し $V_{oc} \times J_{sc}$ 積 $0.672 \times 38.6 = 25.9$ ($\text{mA}/\text{cm}^2 \times \text{V}$)を達成した。また、バンド制御した透明電極である $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O}:\text{Al}$ [$\text{Mg}/(\text{Zn}+\text{Mg})=0.12$] をスパッタ法で成膜し、ソーラーフロンティア社製の CIS 基板を用いて太陽電池を作製することで、従来よりも 21mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値で $27.48\text{mW}/\text{cm}^2$ を達成した。

研究開発項目④「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

本研究開発項目では「出力測定技術の開発」、「発電量評価技術」および「信頼性・寿命評価技術の開発」を通じて、太陽電池の効率、耐久性を向上させるための共通基盤技術開発を行っている。以下に主な成果を示す。

「出力測定技術の開発」ではペロブスカイト、新型 CIGS 時定数、新型結晶 Si を含む各種新型太陽電池で高精度性能測定技術の開発・実施・実証を行った。また、屋外測定再現性 $\pm 1\%$ 以内の目処を得た。各種モジュールで連続検証中。ストリング評価への応用検討を開始した。

「発電量評価技術」では結晶シリコン太陽電池の経年劣化を、屋外データと室内データを用いて検証した。劣化の主要因は、ヘテロ接合系では開放電圧の減少、バックコンタクト系では高電位のモジュールにおける電圧誘起劣化であることを見出した。

「信頼性・寿命評価技術の開発」では長期屋外曝露モジュールでの酢酸による劣化機構が、加速試験同様、電極腐食にともなう電極直下のギャップ形成と、電極直下に残留した銀ピラーの整流性への特性変化の二段階で進行することを見出した。また、新規に開発した温度サイクルに関する加速負荷試験（ATC 試験）によって半田接続部の剥がれやタブ配線断線といった長期信頼性上リスクのある劣化モードも加速され、試験時間として 8 分の 1 以下に短縮可能である事を見出した。

研究開発項目⑤「動向調査等」

本研究開発項目では太陽光発電開発戦略に関する動向調査、発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査、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。

「太陽光発電開発戦略に関する動向調査」では「太陽光発電開発戦略」を推進するべく、市場動向や発電コストに関連する各種情報を収集し、最新の発電コストの分析を行った。また、制度動向、技術動向、経済性評価（グリッドパリティ等）の情報を調査し、太陽光発電の将来導入量に関する定量的な分析を行った。その他、今後市場の発展が見込めるアプリケーションとして検討を開始した「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出を行った。

「発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査」では太陽光発電システム設置価格とその内訳について調査・分析を行うとともに、世界における太陽電池モジュール技術および産業の現状を調査し、代表的な太陽電池製造企業の事業内容の整理および比較を行った。また、海外主要国における太陽電池の研究開発動向を調査し、各国の太陽電池技術開発戦略を体系的かつ明確に比較・分析できるよう、その枠組み、予算配分、目標等の比較

を行った。

「IEA PVPS 国際協力事業」ではタスク 1 専門家会議、ワークショップ等への参画を通じて、各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。また、各種ワークショップにおいて日本の動向について講演を行い、加盟国間の情報交換に貢献した。また、日本のタスク 1 に関わる調査を実施し、報告書を IEA PVPS に提出するとともに、IEA PVPS Trends Report 及び主要国の国内調査報告書等の日本語版を作製した。

2. 研究開発項目毎の成果と実用化・事業化見通し

(イ) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発

【A 結晶Si太陽電池をベースとした複合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	備考
① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発	①セル変換効率：26% モジュール変換効率：23% 発電コスト：17円/kWh	①バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルにおいて変換効率26.7%を達成した(designated area measurement) (産業技術総合研究所での測定結果)。 バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池モジュールにおいて変換効率24.4%を達成した(面積 1.31 m ² , designated area measurement) (産業技術総合研究所での測定結果)。 発電特性や長期信頼性の検討結果並びに製造コスト試算等を踏まえた試算により発電コスト17円/kWh以下が実現可能であることを確認した。	◎	
② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発	②バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池単セルより変換効率が向上することを確認する	②試作したセル等から実験的に得たパラメータを用いて実施した計算機シミュレーションにより、中間目標達成の前提条件を明らかにした。また、トップセル単セルの変換効率として、中間目標達成に必要な値を超える21.5%(社内測定)を実現し、複合型太陽電池がバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池単セルより変換効率が向上し得ることを確認した。	○	

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発】(シャープ)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
出力向上技術開発	モジュール変換効率21%を試作モジュールで確認する。	・フルサイズ(156mm角)の基板を用いて、セル変換効率24.5%を実証。 ・ミニモジュールを作製し、変換効率23.1%を得た。	○	フルサイズのセル変換効率24.5%は市販サイズのモジュール変換効率に換算すると21.5%程度になると考えている。従って、市販サイズモジュールでも中間目標をクリアしていると考ええる。
低コスト化技術開発	フォトリソグラフィ技術を使用しないプロセスで高効率化技術を開発する。	・フォトリソグラフィ技術を使用しない安価プロセスでセル変換効率24.5%を実証。	◎	

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発】(京セラ株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
低コスト量産プロセスでの高効率シリコン太陽電池の開発	発電コスト17円/kWh以下(セル効率21%、モジュール効率19%)	発電コスト14.9円/kWh実現 セル効率は20.49%であるが、プロセスコストおよびシステムコスト低減により発電コスト目標を達成。	○	

高信頼性シリコン太陽電池モジュールの開発	市場寿命35年以上を実現するための試験評価技術の確立、太陽電池用部材や構造の設計指針の明確化	主要3劣化モード(UV+湿熱、高電圧、温度サイクル/荷重)の劣化メカニズム解析に基づいて寿命予測Simulation技術を構築。寿命35年以上を実現するための複合試験条件と製品設計指針の見通しを得た。	○	
----------------------	--	--	---	--

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発】(ナミックス株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
①低表面濃度のn+層に対する接触抵抗低減	2 mΩ cm ² 以下 (1×10 ²⁰ cm ⁻³)	2.4mΩ cm ²	△	ガラスフリットの検討により中間目標を達成見込み
②p+層に対する接触抵抗低減	5 mΩ cm ² 以下	2.3mΩ cm ²	○	
③電極形成による再結合(j0-met)抑制	500fA cm ⁻² 以下	540fA cm ⁻²	△	ガラスフリットの検討により中間目標を達成見込み

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【E 赤外線FZ法による高品質低コストシリコン単結晶の開発】(株式会社クリスタルシステム)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
赤外線FZ法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	①インゴット製造経費：1,700円/kg	①実績に基づく試算にて1,100円/kg	◎	・粒状多結晶シリコン供給法の導入により平成29年2月末までに大口径化を達成する
	②直径：220mm	②130mm	△	
	③長さ：300mm以上	③105mm	△	
	④N型、リンドーブ	④N型 リンドーブ	○	
	⑤ライフタイム：5000 μ sec以上	⑤5843 μ sec (100 Ω cm) 7397 μ sec (1 Ω cm)	◎	
	⑥結晶欠陥：0.1個/cm ³ (大きさ100nm以上)	⑥0個/cm ³	◎	
	⑦転位：0個/cm ²	⑦0個/cm ² (ネッキング)	○	
	⑧抵抗面内分布：12%以下	⑧11.6%以下 (100 Ω cm)	○	
	⑨酸素成分濃度：≤ 2×10 ¹⁶ atoms/cm ³	⑨6.9×10 ¹³ atoms/cm ³	◎	
	⑩炭素成分濃度：≤ 2×10 ¹⁶ atoms/cm ³	⑩1.2×10 ¹⁵ atoms/cm ³	○	

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築】(コマツNTC株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
発電効率向上	スライスプロセスが与えるセルへの影響明確化	欠陥評価手法を確立し、スライスプロセスで生じるマクロ・ミクロの欠陥であることを発見した。	○	豊田工業大学・明治大学との連携試験結果
	連携大学先試作セル23%	現在、N型単結晶Bifacial PERTセル効率20.8%。電極部の影響等、デバイスシミュレーションによる目標達成への方策を明確化済み。なお、スライス後のウェーハ品質は23%相当を得た。	○	
製造コスト低減	厚さ75 μ mスライス技術構築	ワイヤソー主要部品である、多段溝ピッチの狭小化技術構築を完了。切断ピッチ0.20mm（ウェーハ厚さ125 μ m）までの技術を確立。目標の75 μ m厚スライス技術構築には、必要な方策を得ており、達成可能となる見込み。	△	*2018年2月末までに達成見込み
	厚さ75 μ m太陽電池試作	中間目標級のセル厚さ80 μ m太陽電池セル及びモジュール試作により、課題と対策を明確化した。また、極薄板基板による太陽電池性能への影響を評価し光吸収性やパッシベーション後のimplied Vocにおいて、薄板化による向上傾向を確認。	○	産業技術総合研究所との連携試験結果
	カーフロス75 μ mスライス技術構築	カーフロス75 μ mの加工技術開発を行い、市場量産と同等以上の生産性を確保する加工技術を構築した。また、最終目標であるカーフロス60 μ mの加工を先行評価し、加工可能であることを確認した。	◎	
	スライスコストの低減（19円/枚）	カーフロス75 μ mでの加工技術開発の結果、シリコン結晶材料費を除いたスライスコストは、18.8円/枚を達成した。（自社試算）	○	

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御】(株式会社トクヤマ)

テーマ名	最終目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御	不純物および欠陥の影響把握と制御化	太陽電池製造の熱プロセスで成長する酸素析出物の形態と数密度が、炭素濃度と結晶成長条件により変化し、ライフタイムや変換効率に影響を及ぼすことを解明した。酸素析出物の形態と密度を制御して高ライフタイムの単結晶インゴットを得る結晶成長技術を開発した。	○	
	ライフタイム目標値は1000 μ secとし、ライフタイム下限値は300 μ sec以上	開発した結晶成長技術と炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用して得られたインゴットのライフタイムは、全長にわたって2000 μ sec以上を達成した。開発したインゴットは熱プロセス後のライフタイム低下が抑えられ、ライフタイム下限値を300 μ secとすると、インゴットの直胴良品歩留りが11.5%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

【H C I S太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発】(ソーラーフロンティア株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
CIS太陽電池モジュール高性能化技術の研究開発	30cm角サブモジュール変換効率19%	カドミウムフリー30cm角CISサブモジュールにおいて変換効率19.2%を達成した (参考) カドミウムフリー7cm角CISサブモジュール変換効率19.8% 0.5cm ² 小面積セル変換効率： カドミウム含有セル22.3% カドミウムフリーセル22.0% 1.0cm ² 小面積セル変換効率： カドミウム含有セル21.7%	◎	カドミウムを含む技術も入れた薄膜系太陽電池技術全体のサブモジュールにおいて世界最高記録を達成 CdフリーCIS小面積セルで世界最高効率を達成 1.0cm ² CIS小面積セルで世界最高効率を達成

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

A 結晶Si太陽電池をベースとした複合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

1.1 達成状況

研究開発項目及び目標の達成状況を以下に記す。

① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

最も普及が進むSi太陽電池において、世界で初めてセル変換効率26%を突破し、26.7%(産業技術総合研究所での測定結果、designated area(da)測定)まで到達した。また、バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池モジュールにおいて変換効率24.4%達成（面積 1.31 m²、産業技術総合研究所での測定結果(da)）した。いずれの値も中間目標の数値目標を達成した。発電特性や信頼性試験の評価結果並びに製造コストの試算等を踏まえ発電コストの試算を行った結果、17円/kWh以下が可能であることを確認し、中間目標を達成した。

② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

試作したセルや要素サンプルから得られたパラメータを用いて、計算機シミュレーション（光学、回路）を実施し、中間目標達成の前提条件を明らかにした。また、トップセルの要素技術開発を進め、トップセル単セルの変換効率は、中間目標達成に必要な値を超える21.5%(社内測定)を実現した。これらの結果から複合型太陽電池がバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池単セルより変換効率が向上し得ることを確認し、中間目標を達成した。

1.2 成果の詳細

(1) 概要

本研究開発テーマでは、発電コスト14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化するための技術開発の観点から、「① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発」を実施し、この開発成果を活用し、2020年までの実用化と、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目的に、結晶Si太陽電池と非結晶Si系太陽電池とを組み合わせた太陽電池であり、更なる高効率化が見込まれる「② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発」を実施する。以下に各開発項目の概要を記す。

① 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

本項目では、太陽電池セル裏面側に集電極を集約することで光入射面側の遮光損を低減させ、更に、裏面側電極構造の改良により、裏面側からの光の取り込み効率を向上させることで、高出力化したバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セル及びモジュールを開発する。また、本研究開発テーマにて開発した太陽電池モジュールに対し、モジュール長寿命化を見据えた各種信頼性試験を実施する。信頼性試験の一部は、国立研究開発法人産業技術総合研究所に再委託して実施するものとする。

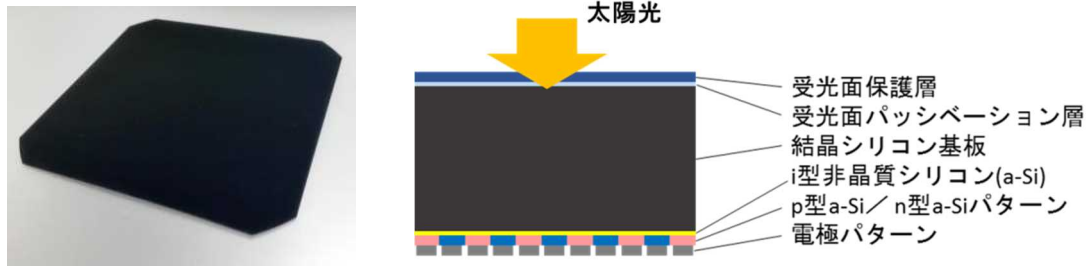
② 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

本開発項目では、結晶Si太陽電池と非結晶Si系太陽電池を組み合わせた高効率複合型太陽電池を実現するために必要な非結晶Si系太陽電池セルの開発、積層界面での光学損の低減技術、非結晶Si系太陽電池と結晶Si太陽電池との電氣的接続構造の開発を実施するとともに、長期信頼性の評価、低コスト量産要素技術開発等を実施する。非結晶Si太陽電池の要素技術開発の一部は、国立大学法人京都大学と国立大学法人東京工業大学に再委託して実施するものとする。

(2) 高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の開発

(2-1) 要素技術開発

バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池は、図Ⅲ-2-(イ)-A-1に外観写真と断面構造を示すように、電力を取り出すための電極を太陽電池の裏側にのみ形成した構造を有する。このように、電極を裏面に集約することで、受光面での光吸収や反射が抑制でき、両面電極構造よりも変換効率を高めることが可能である。本テーマでは、高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池を実現するために必要な要素技術開発として、表Ⅲ-2-(イ)-A-1に記す事項等に取り組んだ。

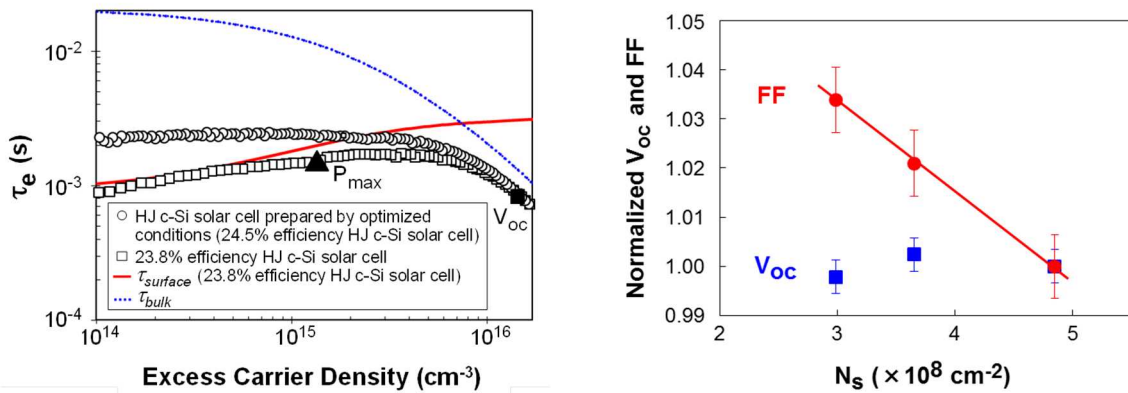


図III-2-(イ)-A-1：バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルの外観写真（左）と構造模式図（右）の一例

表III-2-(イ)-A-1：高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池を実現するために取り組んだ主要素技術開発項目

構成要素	要素技術の開発項目
受光面保護層	低光反射率/低光吸収
受光面パッシベーション層	低いキャリア再結合速度（長キャリアライフタイム） / 低光吸収
i型非晶質シリコン(a-Si)	
電極	界面抵抗、ライン抵抗による損失低減、高反射率

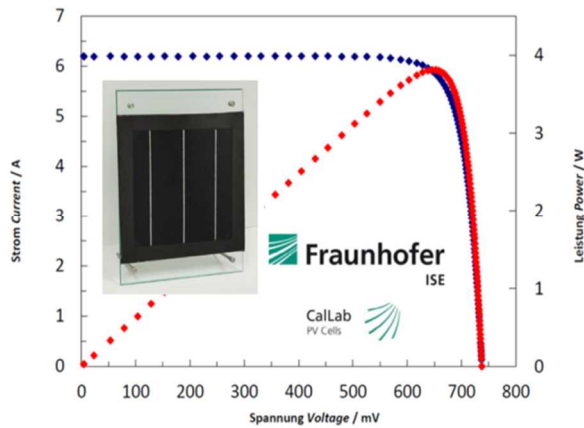
まず、両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池を用いて、パッシベーション特性や界面抵抗の観点からヘテロ接合部の改善に取り組み、ヘテロ接合部におけるキャリア再結合速度や界面抵抗損を低減させることが可能となった。ヘテロ接合部の特性改善技術の開発と並行して評価技術の開発を進め、ヘテロ接合界面におけるキャリアの再結合中心密度と開放端電圧 (V_{oc}) 及び曲線因子 (FF) の関係を明確にし、ヘテロ接合部の特性改善がFFの向上に大きく寄与することを明らかにした。ヘテロ接合部におけるキャリア再結合に関する検討結果の一例を図III-2-(イ)-A-2に示す。



図III-2-(イ)-A-2：高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池におけるライフタイム (τ_e) の注入キャリア濃度依存性（左）と、この関係等から求めたヘテロ接合界面におけるキャリア再結合中心密度 (N_s) と V_{oc} 、FFの関係（右）の一例。本検討により、高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池におけるキャリア再結合中心密度の低減は、 V_{oc} よりFFの向上に大きく寄与することが明らかとなった。

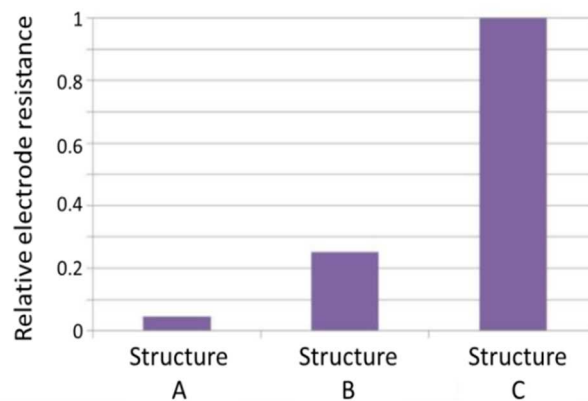
これらの技術開発の結果、2015年度に結晶Si太陽電池のFFとしては世界最高となる83.5%を実現、両面電極型結晶Si太陽電池では世界最高となる変換効率25.1%（第三者機関認証測定値）を実用サイズヘテロ接合結晶Si太陽電池セルにおいて達成した（図III-2-(イ)-A-3）。これによりヘテロ接合界面の特性改善が、FFの向上に有効であることを実証するとともに、更なるヘテロ接合界面の特性改善によりセル特性の改善が期待できることを明らかにした。

Area	151.9 cm ²
V _{oc}	738 mV
J _{sc}	40.8 mA/cm ²
FF	83.5%
Eff.	25.1%



図Ⅲ-2-(イ)-A-3：高効率ヘテロ接合結晶Si太陽電池の第三者機関における認証測定結果の一例

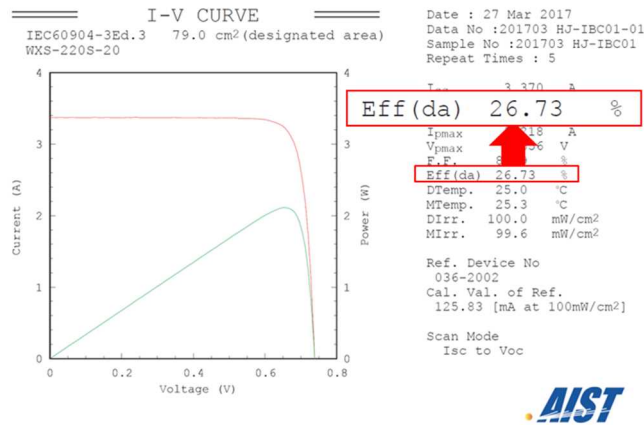
あわせて、バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池において、6インチセルに対するパターン形成技術及び電極抵抗の低減技術の開発を進めた。バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池は裏面に電極等の構造が集約した構造であることから、片面にp型パターン用電極とn型パターン用電極、インターコネクション用電極を配置する必要があり、配置パターンに関しては制約が多い。一方で、両面電極型結晶Si太陽電池よりも遮光損に関しては制約が少ないため電極の低抵抗化は実現しやすい。これらの特徴を踏まえ、電極抵抗の低抵抗化に関して6インチセルに対して開発した技術の成果の一例を図Ⅲ-2-(イ)-A-4に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-A-4：6インチバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池における電極抵抗の相対値を示す図。両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池における典型的な電極抵抗値（C）に対する開発品（A、B）の電極抵抗値を記す。これらの検討により電極抵抗値を大幅に低減させることが可能となった。

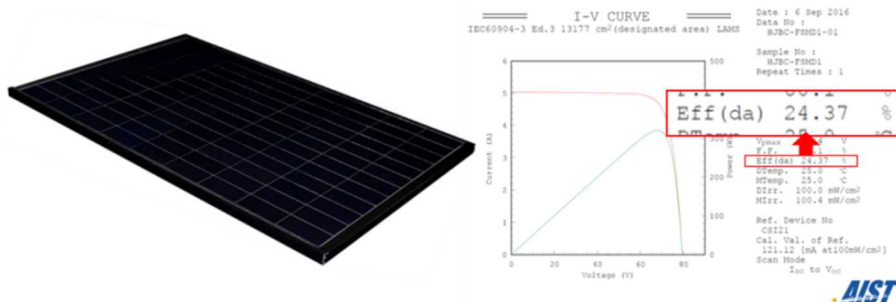
(2-2) 高効率セル、モジュール技術開発

上記のように要素技術開発により実現した高品質アモルファスSiを用いたヘテロ接合技術や、電極の直列抵抗を低減させる技術、太陽光をより効率的に利用できるバックコンタクト技術を、結晶Si太陽電池において組み合わせることで、結晶Si太陽電池セルとして世界最高となるセル変換効率26.33%を実用サイズ（セル面積180cm², da）のバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池において達成した（2016年度に報告）。更に、要素技術の開発を進め、セル変換効率は26.7%まで到達した（産業技術総合研究所での測定により確認：図Ⅲ-2-(イ)-A-5）



図Ⅲ-2-(イ)-A-5 : バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の産業技術総合研究所での測定結果 (da)。変換効率(Eff)26.7%はSi太陽電池セルにおいて世界最高の値である。

また、高効率バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池セルを用い、モジュール内での抵抗損失を最小限にするためのセル間配線技術やモジュールに照射された光の収集効率を高める技術などを新たに開発することで、結晶Si太陽電池モジュールとして世界最高の変換効率24.37% (面積13,177cm²)を2016年度に実現した (図Ⅲ-2-(イ)-A-6)。



図Ⅲ-2-(イ)-A-6 : 実用サイズである大判のバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池モジュールの産業技術総合研究所での測定結果 (da) (右) と測定したモジュールの外観写真 (左)。変換効率 (Eff)24.37%はSi太陽電池モジュールにおいて世界最高の値である。

(2-3) 信頼性評価

バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池の要素検討として、両面電極型ヘテロ接合結晶Si太陽電池の信頼性評価を実施し、小サイズのモジュール (ミニモジュール) の高温高湿試験 (条件 : 85°C /85%RH)において 6000時間以上にわたり保持率95%以上を維持することを確認し、ヘテロ接合結晶Si太陽電池の各構成要素が十分な信頼性を有することを確認した。また、ミニモジュールにおいて高温高湿試験や温度サイクル試験等を実施し、本テーマで開発したバックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池が標準的な試験条件において、特に問題が生じないことを確認した。

(3) 結晶Si太陽電池をベースとした複合型太陽電池の開発

試作したセルや要素サンプルから得られたパラメータを用いて、複合型太陽電池の特性を計算機シミュレーション (光学、回路) により検討し、中間目標達成の前提条件を明確するとともに、各要素セルの構造・光学特性が太陽電池特性に与える影響を明らかにした。また、トップセルの高効率化検討を行い、トップセルの候補であるペロブスカイト太陽電池において変換効率として世界最高水準である21.5%を得た。

これらのシミュレーションの結果や要素セルの出力等をもとに複合型太陽電池の出力 (変換効率) に関する検討を進め、バックコンタクトヘテロ接合結晶Si太陽電池単セルより変換効率が向上し得ることを確認した。

2. 実用化・事業化見通し

株式会社カネカ (以下、カネカ) は、薄膜Si太陽電池及びヘテロ接合結晶Si太陽電池を自社で生産し、これらを用いた住宅用ならびに産業用太陽光発電システムの販売を行っている。量産技術開発を進めるとともに、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活用することで、本プロジェクトで得られた成果の実用化・事業化は早期に実現できる見通しである。

なお、プロジェクトの成果を活用した高効率太陽電池は、展示会やニュースリリースなどで広くアピールすることで潜在的な顧客に対してもアプローチを図っている。また、国際会議での発表などを通じて、国内外の太陽電池関連の研究者、技術者へのアピールも積極的に行っており、いずれのチャンネルにおいても高い評価を得ている。

3. 波及効果

太陽電池の変換効率の向上は、発電量の増加に加え、一定の発電量がより小面積で得られることから、太陽光発電システムの導入費等の低減にも繋がる。現在導入が進む結晶シリコン太陽電池で27%近いセル変換効率と24%を大きく超えるモジュール効率をあわせて実現したことは、発電コストの低減に大きく寄与するといえる。

プロジェクトで開発したシリコン太陽電池の高効率化技術は、特に、設置面積が制限される住宅やビルにおける太陽電池の更なる普及に貢献するものと期待される。このことは、近年普及に向けた活動が進むZEHやZEBの実現可能性を高めることから、省エネルギー化への取り組みに弾みをつけるものと期待される。

設置面積の観点では車載用途も住宅、ビル用途と同様の課題を有しており、車載用太陽電池の市場拡大にも貢献するものと期待される。

4. 今後の展開

「2. 実用化・事業化見通し」で記したように発電コスト目標実現に向け、引き続き、太陽電池の変換効率向上、製造コスト低減、信頼性向上等の技術開発に取り組む。また、カネカは、今回の成果を活用した高効率太陽電池の製品の実用化に向け開発を進める。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	2	12(1)	2(2)	16 件
論文	1	2	1	4 件
研究発表・講演（うち国際会議）	5(3)	4(4)	2(2)	11 件
新聞・雑誌等への掲載	4	2	0	6 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	株式会社 カネカ	特願 2016-049562	国内	2016/3/14	出願	積層型光電 変換装置お よび製造方 法	三島 良 太、日野 将志、目黒 智巳
2	株式会社 カネカ	特願 2016-049569	国内	2016/3/14	出願	積層型光電 変換装置お よび製造方 法	三島 良 太、日野 将志、目黒 智巳
3	株式会社 カネカ	特願 2016-102521	国内	2016/5/23	出願	太陽電池及 びその製造 方法、並び に太陽電池 パネル	河崎 勇 人、吉河 訓太、中野 邦裕、小西 克典
4	株式会社 カネカ	特願 2016-161825	国内	2016/8/22	出願	太陽電池お よび太陽電 池モジュー ル	吉河 訓 太、河崎 勇人、吉田 航
5	株式会社 カネカ	特願 2016-182546	国内	2016/9/20	出願	太陽電池用 配線材およ び太陽電池 モジュール	小泉 玄 介、寺下 徹
6	株式会社 カネカ	特願 2016-186019	国内	2016/9/23	出願	シリコン基 板の製造方 法	吉田 航、 河崎 勇 人、吉河 訓太
7	株式会社 カネカ	特願 2016-186020	国内	2016/9/23	出願	太陽電池セ ル、及び太 陽電池セル の製造方法	吉田 航、 河崎 勇 人、吉河 訓太
8	株式会社 カネカ	特願 2016-188850	国内	2016/9/27	出願	太陽電池用 配線材およ び太陽電池 モジュール	小泉 玄 介、寺下 徹
9	株式会社 カネカ	特願 2016-202414	国内	2016/10/14	出願	光起電装置	中野 邦 裕、宇津 恒、山本 憲治
10	株式会社 カネカ	特願 2016-220573	国内	2016/11/11	出願	光電変換素 子及び光電 変換素子の	日野 将 志、三島 良太、目黒

						製造方法	智巳
11	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/4503	PCT	2017/2/8	出願	太陽電池及びその製造方法、並びに太陽電池パネル	河崎 勇人、吉河 訓太、中野 邦裕、小西 克典
12	株式会社 カネカ	特願 2017-053808	国内	2017/3/17	出願	太陽電池およびその製造方法	藤本 貴久、小西 克典、足立 大輔
13	株式会社 カネカ	特願 2017-063968	国内	2017/3/28	出願	太陽電池モジュールおよびその製造方法	寺下 徹、小泉 玄介
14	株式会社 カネカ	特願 2017-059763	国内	2017/3/29	出願	太陽電池モジュールおよび光電変換素子の製造方法	日野 将志、三島 良太、目黒 智巳
15	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/21546	PCT	2017/6/9	出願	太陽電池及太陽電池モジュール	吉河 訓太、河崎 勇人、吉田 航
16	株式会社 カネカ	PCT/JP2017/24040	PCT	2017/6/29	出願	太陽電池モジュール	寺下 徹、小泉 玄介

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	足立 大輔	株式会社 カネカ	Impact of carrier recombination on fill factor for large area heterojunction crystalline silicon solar cell with 25.1% efficiency	Applied Physics Letters 107, 233506	有	2015/12/9
2	足立 大輔	株式会社 カネカ	Effects of SiO _x barrier layer prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition on improvement of long-term reliability and production cost for Cu-plated amorphous Si/crystalline Si heterojunction solar cells	Solar Energy Materials & Solar Cells 163, 204-209	有	2017/1/30

3	吉河 訓太	株式会社 カネカ	Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%	Nature Energy 2, 17032	有	2017/3/20
4	三島 良太	株式会社 カネカ	High-current perovskite solar cells fabricated with optically enhanced transparent conductive oxides	Applied Physics Express 10, 062301	有	2017/5/15

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	山本 憲治	株式会社 カネカ	Progress & Challenges in Thin-Film Silicon Photovoltaics : Heterojunctions & Multijunctions	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/16
2	宇都 俊彦	株式会社 カネカ	25.1% efficiency Cu metallized heterojunction crystalline Si solar cell	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Global Photovoltaic Conference 2015	2015/11/17
3	山本 憲治	株式会社 カネカ	薄膜シリコン太陽電池技術の展開 —高効率ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池、及びそのペロブスカイト太陽電池との組み合わせへの適用	PVEXP02016	2016/3/2
4	足立 大輔	株式会社 カネカ	高効率銅電極ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/21
5	足立 大輔	株式会社 カネカ	薄膜技術を用いたヘテロ接合結晶シリコン太陽電池の展開	日本化学会第 96 春季年会	2016/3/25
6	吉河 訓太	株式会社 カネカ	6 inch High Efficiency Back Contact Crystalline Si Solar Cell Applying Heterojunction and Thinfilm Technology	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/5

7	足立 大輔	株式会社 カネカ	Over 25% Efficiency Heterojunction Crystalline Si Solar Cell	26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	2016/8/28
8	山本 憲治	株式会社 カネカ	26.33% heterojunction back contact silicon solar cell	7th Silicon-based Heterojunction and Tandem Solar Cells Conference	2016/11/25
9	足立 大輔	株式会社 カネカ	Record-breaking Efficiency Back-contact Heterojunction Crystalline Si Solar Cell and Module	Global Photovoltaic Conference 2017	2017/3/15
10	吉河 訓太	株式会社 カネカ	Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaic	2017/4/3
11	吉河 訓太	株式会社 カネカ	Record-breaking Efficiency Heterojunction Interdigitated Back- contact Crystalline Si Solar Cell and Module	IEEE 44th Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/25

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	株式会社 カネカ	高効率の太陽電池開発	日本経済新聞 13面	2015/7/29
2	株式会社 カネカ	太陽電池セル ヘテロ接合型で変換効率 24.52% カネカ	日刊工業新聞 14面	2015/7/29
3	株式会社 カネカ	カネカ、家庭用の高効率セル	日本産業新聞 11面	2015/7/29
4	株式会社 カネカ	太陽電池 変換効率 25.1%	日本産業新聞 8面	2015/10/27
5	株式会社 カネカ	セル変換効率 初の26%超	日刊工業新聞 15面	2016/9/15
6	株式会社 カネカ	太陽電池モジュール 変換効率、世界最高 24.37%	日本産業新聞 13面	2016/10/28

【その他】

- ・ニュースリリース「ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池、変換効率 24.5%を達成」(2015年7月29日 カネカ発表)
- ・ニュースリリース「結晶シリコン太陽電池でセル変換効率 25.1%を達成ー両面電極型結晶シリコン太陽電池における世界最高記録を実用サイズで更新ー」(2015年10月23日 NEDO/カネカ共同発表)
- ・ニュースリリース「結晶シリコン太陽電池で世界最高変換効率 26.33% ー世界初、実用サイズで達成ー」(2016年9月14日 NEDO/カネカ共同発表)
- ・ニュースリリース「結晶シリコン太陽電池モジュールで世界最高変換効率 24.37%を達成」(2016年10月27日 NEDO/カネカ共同発表)

B 高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発（シャープ株式会社）

1. 成果詳細

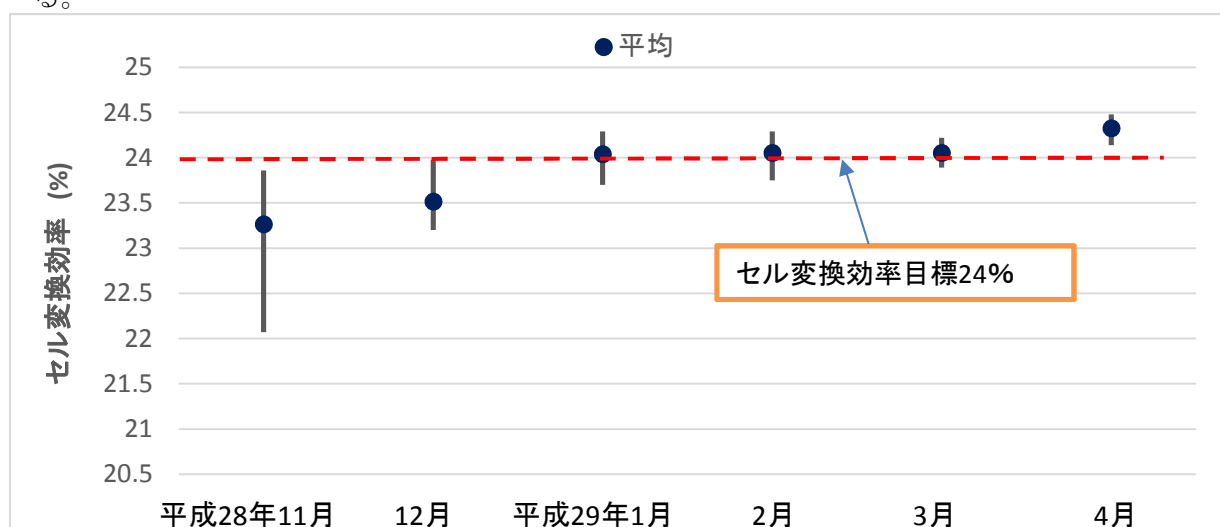
(1) 高効率・低コスト化検討

ヘテロバックコンタクト型太陽電池の実用化に向けた検討として、①受光面構造開発、②アモルファスシリコン成膜技術開発、③電極構造開発、④界面清浄化技術開発、⑤パターニング技術開発、⑥大面積セル化技術開発、⑦モジュール技術開発を精力的に推進し、量産展開可能な技術を蓄積している。図Ⅲ-2-(イ)-B-1には本プロジェクトの開始時期より現在に至るまでのセル変換効率の推移を示す。これより、各課題を解決しながら継続的に変換効率を向上し、現状ではフルサイズ（156mm角）のセル変換効率24.5%を実証した。



図Ⅲ-2-(イ)-B-1 セル変換効率の推移

図Ⅲ-2-(イ)-B-2には直近6か月の同一条件を用いて形成したセルの変換効率のばらつきを示す。図中のバーは変換効率が分布している幅を示し、その平均値を●印で示している。これより、変換効率のばらつきも大幅に低減できていることがわかり、量産化技術が蓄積されてきていることを示している。これらは、フォトリソグラフィ技術を使用しない安価なパターニング技術を用いたプロセスで生産性を向上した成果であり、コスト的にも量産に近づく大きな成果と考えている。



図Ⅲ-2-(イ)-B-2 セル変換効率のばらつき

上記のように、変換効率向上およびばらつき低減は、個々の技術開発の集積の結果であるが、以下では研究開発項目ごとに具体的な成果を述べる。

① 受光面構造開発

受光面側では、表面反射を抑え、より多くの光をセル内部に閉じ込めることができる光閉じ込め構造（膜構成、膜厚、テクスチャー形状等）が求められ、また、受光面側のキャリア再結合を抑えることが可能な高いパッシベーション性を持つ膜特性が同時に求められる。これらの目的を達成するために、受光面構造として、アモルファスシリコン膜と窒化シリコン膜の積層構造の最適化検討を行った。各層の屈折率、膜厚、吸収係数等の組み合わせを実験とシミュレーションの両面から検討した結果、従来に比べて、短絡電流密度 (J_{sc}) が向上し、 41 mA/cm^2 を超えるセルが得られている。これらの膜は前後のプロセスと関連したプロセス耐性も考慮しながら、最適な組み合わせの積層構造を決定している。

また、更なる J_{sc} の向上のために、現在所有している CVD 装置を改造して、新たにワイドバンドギャップ材料を用いた受光面構造の検討を予定している。

② アモルファスシリコン成膜技術開発

ヘテロ接合界面を形成するアモルファスシリコン膜の高品質化によるパッシベーション性の向上は変換効率向上に非常に重要と考えている。平成 28 年度にアモルファスシリコン膜を形成するための CVD 装置である量産検証型高品位接合形成装置を導入した。これにより、従来から所有している CVD 装置と 2 台体制となり開発の加速が可能になった。これらの装置を用いた成膜条件検討を詳細に行うことにより、パッシベーション性を改善し、開放電圧 (V_{oc}) が 740 mV を超えるセルを得ている。

③ 電極構造開発

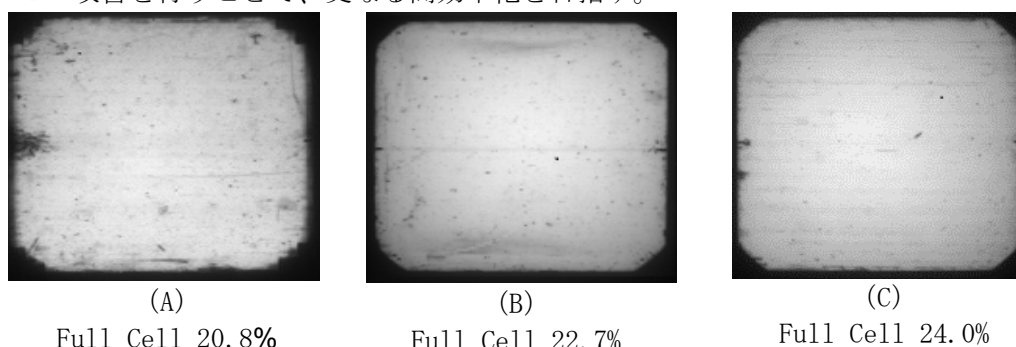
電極構造の最適化により、直列抵抗成分を低減し曲線因子 (FF) の向上を目指す。また、裏面での光の反射率を高めることで J_{sc} の向上にも寄与できる材料が望まれる。さらに、長期信頼性確保のためにも電極材料選定が重要になる。そのため、スパッタ法を用いた高品位裏面電極形成装置の導入を平成 27 年度に行い、電極材料としてさまざまな金属材料の組み合わせを検討してきた。その結果、電極として低抵抗かつ高反射率の特性を持つ材料を選定し、高効率化に寄与できている。更に選定された材料は、信頼性の観点から、基板との密着性が高いことも確認できている。現在、さまざまな長期信頼性試験を推進中である。

また、電極のパターニングを低コストかつ高精細に行うために、マスク成膜パターニング技術の検討を行った。新規マスクアライメント装置を平成 28 年度に導入し、平成 29 年度にはマスク検査装置を導入した。電極の線幅、ピッチの最適化、また電極形状を検討することで、セルの直列抵抗が改善し、変換効率が向上している。これらの検討により、低コストかつ高精細なパターニング技術を蓄積している。

④ 界面清浄化技術開発

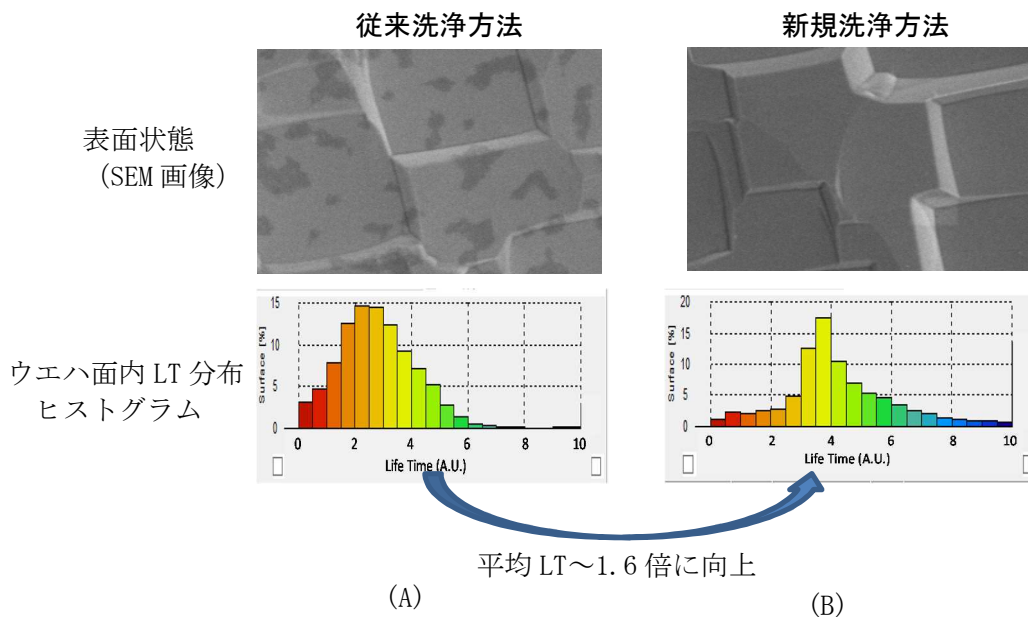
セルは複数のプロセスを経て作製されるが、プロセス間の洗浄方法や洗浄状態がセル特性に大きく影響する。特に、ヘテロ接合界面の洗浄状態は重要であり鋭意検討を行った。図Ⅲ-2-(イ)-B-3 には異なる変換効率を有するセルの Electro-Luminescence (EL) 画像を示す。同じ洗浄方法を用いても、さまざまな外部環境等により洗浄状態が大きく異なる場合がある。そこで、洗浄状態を規定するパラメータは複数あると考えられるが、その中の 1 つのパラメータに着目し、洗浄後のサンプルをそのパラメータで評価することで洗浄状態を独自に分類している。その分類方法を用いることで、図Ⅲ-2-(イ)-B-3 (A) よりも (B) の方で洗浄状態が良好で、さらに (B) よりも (C) で洗浄状態が向上していることがわかっている。これより、洗浄状態の改善により、EL 画像から判断できる欠陥が減少していることがわかり、それが変換効率の向上に結びついていると考えている。

現状では、EL 画像から判別される欠陥を完全に削除できているわけではなく、今後も、洗浄方法等のプロセス改善を行うことで、更なる高効率化を目指す。



図Ⅲ-2-(イ)-B-3 異なる変換効率を有するセルの EL 画像

また、従来の洗浄方法とは抜本的に異なる新しい洗浄方法の探索も並行して進めている。新規洗浄方法を検討するための洗浄装置を平成 28 年度に導入し、従来の洗浄方法との比較を行った。図Ⅲ-2-(イ)-B-4 には、結晶シリコン基板の上にアモルファスシリコン層を形成し、その後パターニングにより、一部アモルファスシリコン層を除去し、各洗浄方式で洗浄した後、膜を削除した場所を観察した Scanning Electron Microscope (SEM) 画像と、それぞれに対応したウエハのライフタイム (LT) の面内分布を示す。これより、従来の洗浄方法では図Ⅲ-2-(イ)-B-4 (A) に示すような洗浄ムラが局所的に見られたが、新規洗浄方法では洗浄ムラは観測されず、良好な洗浄状態を得ることができた。また、新規洗浄方法では、ライフタイムの面内平均値が従来の洗浄方法よりも約 1.6 倍向上しており、更なる高効率化の可能性が期待できる。



図Ⅲ-2-(イ)-B-4 洗浄方法の違いによるウエハ表面 SEM 画像およびそのウエハの LT 面内分布比較

⑤ パターニング技術開発

ヘテロバックコンタクト型太陽電池のプロセス上の課題として、基板裏面側に p 型アモルファスシリコン層と n 型アモルファスシリコン層を高精細にパターニングする必要があり、高コスト化の要因になっている。これまで、高効率セルを作製するためにはパターニング法として高価なフォトリソグラフィ技術の使用が必要と考えられていた。そこで、印刷技術をベースにしたパターニング法により、低コストでかつ高効率のセル作製技術の開発を行った。印刷技術を用いた高精細化は印刷材料（レジストやエッチングペースト等）の粘度や薬液耐性の最適化とともに、印刷材料の被印刷表面への印刷性の改善が必要になり、鋭意検討を行った。さらに、印刷位置精度の向上が重要になるため、アライメント手法の詳細検討を行った。その結果、印刷技術を用いたパターニング法で、セル変換効率 24.5%と高い特性を得ることが可能になった。

⑥ 大面積セル化技術開発

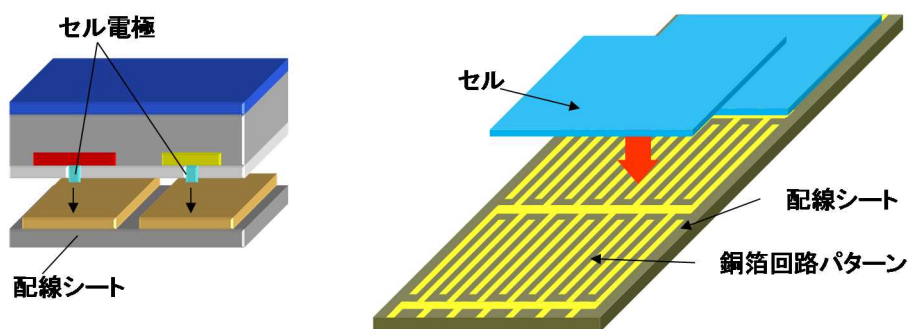
大面積化の課題は、各プロセスにおける特性の基板面内分布の改善になる。成膜プロセスでは、面内での膜厚分布や特性分布の改善検討、薬液による洗浄プロセスでは薬液濃度の均一化や基板を保持するキャリアの形状検討等を行った。また、電極パターンの最適設計を行い、基板端部の特性低下を抑制する検討を行った。以上の検討により、156mm 角のシリコンウエハ基板において、セル変換効率 24.5%の高い特性を得ることが可能になった。

⑦ モジュール技術開発

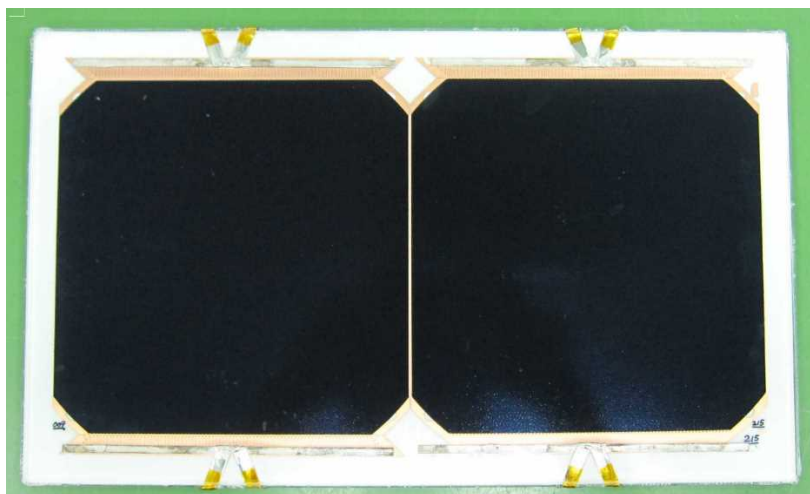
図Ⅲ-2-(イ)-B-5 に示すように、当社独自の配線シート方式は、バックコンタクト型セルをフィルム上に形成された銅箔回路パターン上に載置することでモジュール化する技術であり、配線プロセスを簡略化し、モジュール配線の抵抗損失低減、接続不良低減、高信頼性等に優れた技術である。この配線シート方式は当社で生産中の太陽電池である BLACKSOLAR に採用されているが、この技術を現在開発中のヘテロバックコンタクト型太陽電池に適用するためのモジュール技術開発を推進中である。

まず、信頼性評価を進めるために、図Ⅲ-2-(イ)-B-6 に示すようなミニモジュールの作製を行った。ミニモジュールはセル2枚を1組にしてモジュール化しているが、1枚ずつ独立に特性評価を行えるような電極構成としている。表Ⅲ-2-(イ)-B-1 には、作製されたミニモジュールの特性を対応するセル特性と比較して示している。その結果、セル変換効率 24.1%に対して、ミニモジュール変換効率 23.1%（フルサイズのセルエリアで測定）が得られており、当初の中間目標を前倒して達成できたものと考えている。また、市販サイズのモジュールを作製したと仮定した場合も、モジュール変換効率 21%以上に十分到達するものと考えられる。現在、これらのミニモジュールを多数枚作成して、温度サイクル試験、高温高湿試験、高温試験、結露凍結試験、屋外暴露試験等による信頼性評価を開始した。

これまでヘテロバックコンタクト型太陽電池の量産技術開発はどこの太陽電池メーカーも成功しておらず、世界初の量産技術開発への挑戦を着実に進めている。この開発を成功させるために、更なる高効率化技術開発と低コスト化技術開発を推進し、生産展開を達成していきたいと考えている。



図Ⅲ-2-(イ)-B-5 配線シート方式



図Ⅲ-2-(イ)-B-6 ミニモジュール

表Ⅲ-2-(イ)-B-1 セル特性とモジュール特性の比較
(セル、ミニモジュールともフルサイズのセルエリアで測定)

	Eff. (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF
セル	24.1	40.9	0.737	79.9
ミニモジュール	23.1	40.2	0.736	78.0

2. 実用化・事業化見通し

低コストでかつ高効率の新規太陽電池を開発し、日本をはじめ、世界各国の住宅市場をターゲットにして、事業化を狙う。そのために下記課題に重点的に取り組んでいる。

- ① 高効率化技術開発
- ② 低コスト化技術開発
- ③ 事業化戦略

まず、①の太陽電池の高効率化技術開発については、個別テーマの成果のところでも詳述しているように、着実に開発が進んでいる。ヘテロバックコンタクト型太陽電池において、セル変換効率 24.5% が得られ、ミニモジュールでは変換効率 23.1% が得られており、当初の中間目標を前倒して達成できたものと考えている。また、これは市販サイズのモジュールにおいても、モジュール変換効率 21% 以上が十分に達成できるレベルまで到達していると考えられ、本プロジェクトにより、技術開発は大きく進展した。今後の開発により、セル変換効率 26% 以上を目指しており、更なる高効率モジュールを開発していく。

次に、②の低コスト化技術開発について説明する。ヘテロバックコンタクト型太陽電池は電極が受光面側になく、裏面側に集中した構造を取っている。そのため、p 電極と n 電極のパターニングを高精細に行う必要があり、通常は高コストな Photo-Lithography 法を用いなければ高効率な特性を得ることはできなかった。われわれは本プロジェクトにより、鋭意研究を重ねた結果、低コストな印刷法を用いたパターニング法を開発し、低コストな手法でも高効率ヘテロバックコンタクト太陽電池を作製することに成功した。これにより、実用化の可能性が大きく広がったと考えている。しかし、市場で高い競争力を得るにはまだ十分ではないため、プロセスの簡易化や材料コストの低減等、更なる低コスト化技術開発を現在精力的に推進しているところである。モジュール製造コストを徹底的に削減し、最終的には既存太陽電池とコスト面でも対抗できるような技術開発を推進している。

最後に、③の事業化戦略について、現状での我々の主要な考え方を説明する。近年、市場では従来型のシリコン太陽電池や PERC 型太陽電池の低コスト化が急激に進み、太陽電池の大幅な価格低下が起こっている。これらに対抗し事業を継続していくためには、海外雇用を含め工場経費の安い生産体制の構築が必要である。さまざまなコストシミュレーションを行った結果、海外工場を前提とした多角的な生産形態により、極限までコストを低減する必要があると考えている。つまり、高コストな国内工場よりも、海外工場をフルに利用したグローバル展開を積極的に推進していくことが重要と考える。このとき、本プロジェクトで開発した当社の技術が海外に不当に流出しないように細心の注意を払う必要があり、当社が技術を厳格にコントロールする必要がある。そのためには、長期にわたり事業を継続でき、信頼が持てる海外パートナーを選択して協業することが必要になると考える。

以上のように、ヘテロバックコンタクト型太陽電池の高効率化開発は順調に進んでおり、低コスト化開発も精力的に推進している。本技術の事業化に向けては、グローバルな視点に立った事業化戦略の下で、高い競争力を有する生産スキームの構築が必要であり、上述の海外生産をベースにしたスキームが最も適していると考えられる。

ヘテロバックコンタクト型太陽電池が量産されれば世界で初めてとなり、太陽電池業界に大きなインパクトを与えることになる。その目標に向かって、それぞれの課題解決に取り組んでいる。

3. 波及効果

シリコンヘテロバックコンタクト型太陽電池は他のシリコン太陽電池に比べて高効率という点が大きな特徴であるが、それ以外にも、受光面側に電極がないために外観が美しいという特徴がある。これは特に住宅の屋根に載せる太陽電池の場合、大きなメリットになる。既に、バックコンタクト型太陽電池の生産が行われているが、更なる高効率化により太陽電池の魅力が一層高まるものと考えられる。そのため、これまで太陽電池には興味はあるが、外観上の理由で導入を見合わせていた顧客の掘り起こしが可能になり、新しい付加価値による需要の拡大につなげることが可能になる。

4. 今後の展開

技術開発としては、現在のセル変換効率 24.5%に対して 26%を超える高効率セルを目指して検討を進める。並行して信頼性評価では長期の安定的な発電を担保できることを確認する。また、低コスト化技術開発も精力的に推進し、プロセスの簡易化や材料費低減等を進めることで徹底的なコストダウンを行い、既存太陽電池と価格面で対抗できるようにする。更に、生産スキームの詳細検討を行い、具体的な協業相手の選定を進めることで、2020年度までに発電コストを14円/kWh以下を達成する生産技術の確立を目指す。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	10	6(4)	1	17 件
論文	0	0	1	1 件
研究発表・講演（うち国際会議）	2(1)	2(1)	0	4 件
展示会への出展	3	0	0	3 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	シャープ (株)	特願 2015-186521	国内	2015/9/24	公開	半導体基板、半導体基板の製造方法および光電変換素子の製造方法	森健史等
2	シャープ (株)	特願 2016-042064	国内	2016/3/4	公開	光電変換素子および光電変換モジュール	松本雄太等
3	シャープ (株)	特願 2016-042076	国内	2016/3/4	公開	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	石井真人等
4	シャープ (株)	特願 2016-042085	国内	2016/3/4	公開	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	石井真人等
5	シャープ (株)	特願 2016-057951	国内	2016/3/23	公開	光電変換装置	酒井敏彦等
6	シャープ (株)	特願 2016-057981	国内	2016/3/23	公開	光電変換装置、光電変換モジュールおよび太陽光発電システム	東川誠等
7	シャープ (株)	特願 2016-057982	国内	2016/3/23	公開	光電変換装置、光電変換モジュールおよび太陽光発電システム	東川誠等
8	シャープ (株)	特願 2016-061535	国内	2016/3/25	公開	光電変換素子およびそれを備えた光電変換モジュール	森健史等
9	シャープ (株)	特願 2016-064139	国内	2016/3/28	公開	光電変換装置、光電変換モジュールおよび光電変換装置の製造方法	鄒柳民等
10	シャープ (株)	特願 2016-063868	国内	2016/3/28	公開	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	浅野直城等
11	シャープ (株)	特願 2016-074353	国内	2016/4/1	出願	光電変換装置およびその製造方法	神川剛等
12	シャープ (株)	特願 2016-159105	国内	2016/8/15	出願	光電変換素子および光電変換装置	肥後輝明等

13	シャープ (株)	PCT/JP2016/073889	PCT	2016/8/16	公開	半導体基板、光電変換素子、半導体基板の製造方法および光電変換素子の製造方法	森健史等
14	シャープ (株)	PCT/JP2017/004492	PCT	2017/2/8	公開	光電変換素子および光電変換モジュール	松本雄太等
15	シャープ (株)	PCT/JP2017/008287	PCT	2017/3/2	公開	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	石井真人等
16	シャープ (株)	PCT/JP2017/010841	PCT	2017/3/17	公開	光電変換装置、光電変換モジュールおよび太陽光発電システム	東川 誠等
17	シャープ (株)	特願 2017-093770	国内	2017/5/10	出願	光電変換装置およびそれを備える太陽電池モジュール	東川 誠等

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	(JAIST) Cong Thanh Nguyen Koichi Koyama Koichi Higashimine Shigeki Terashima Keisuke Ohdaira Hideki Matsumura (SHARP) Chikao Okamoto Shuichiro Sugiyama	北陸先端大 (JAIST) シャープ株式会社 (SHARP)	Novel chemical cleaning of textured crystalline silicon for realizing surface recombination velocity <math><0.2\text{ cm/s}</math> using passivation catalytic CVD SiNx/amorphous silicon stacked layers	Japanese Journal of Applied Physics 56, 056502 (2017)	有	2017年 4月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Cong Thanh Nguyen ※JAIST と連携	北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST)	Effect and Optimization of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Flat and Textured Structure	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/20

2	Cong Thanh Nguyen ※JAISTと連携	北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST)	Effect of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Textured Structures	Material Research Society	2016/3/28
3	Cong Thanh Nguyen ※JAISTと連携	北陸先端科学技術大学院大学 (JAIST)	Effect and Optimization of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface recombination Velocity on Flat and Textured Structure	IEEE-PVSC	2016/6/5
4	杉山 秀一郎	シャープ (株)	高効率バックコンタクト型太陽電池の量産技術開発	NEDO 平成28年度成果報告会	2016/10/31

【展示会への出展】

番号	展示会	展示内容	展示会ブース	開催時期
1	PVJAPAN2015	HBCプロセス技術	シャープ (株) ブース	2015/7/29-7/31
2	〔関西〕 PVEXPO2015	HBCプロセス技術	シャープ (株) ブース	2015/9/2-9/4
3	PVEXPO2016	HBCプロセス技術	シャープ (株) ブース	2016/3/2-3/5

C 低コスト高効率セル及び高信頼性モジュールの実用化技術開発（京セラ株式会社）

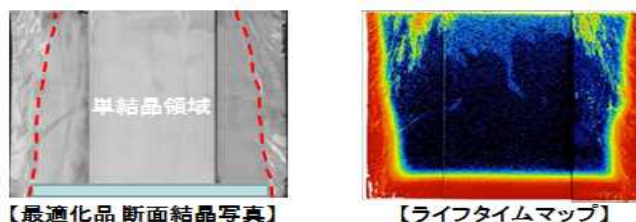
1. 成果詳細

①低コスト量産プロセスでの高効率シリコン太陽電池の開発(セル効率 22%、モジュール効率 20%)

(1) 高品質、低コスト結晶成長技術開発

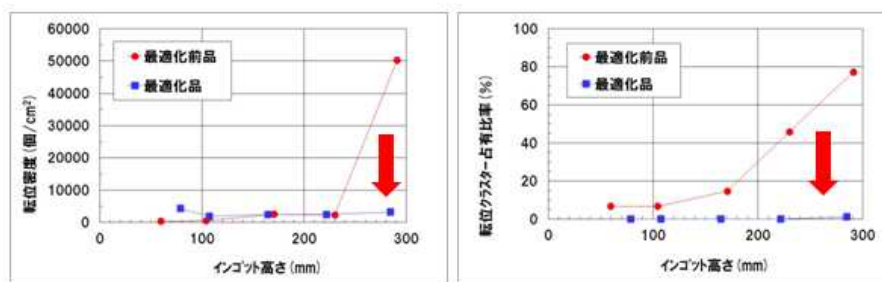
セル変換効率+0.5 ポイントに寄与する結晶品質の実現に向け、シードキャスト法による高品質な結晶育成方法の技術開発に取り組んだ。

結晶品質の高品質化には、結晶欠陥を低減することが必要で、特に結晶育成中の面内方向の温度差を低減させることが重要であることがわかった。シリコンを凝固させる鑄型の断熱性やシリコンの結晶育成中の温度制御方法を最適化し面内方向の温度差を低減することで、図Ⅲ-2-(イ)-C-1、図Ⅲ-2-(イ)-C-2に示すシードキャストインゴットを作製した。



図Ⅲ-2-(イ)-C-1 最適化品の断面結晶写真、ライフタイムマップ（赤色：低⇄青色：高）

最適化品の断面結晶写真とライフタイムマップを図Ⅲ-2-(イ)-C-1に示す。最適化品はブロックの中央からインゴット1本取りとしているが、インゴット高さ方向頭部まで単結晶成長しており、ライフタイムマップから転位クラスター発生が抑制されていることを確認した。



図Ⅲ-2-(イ)-C-2 シードキャスト最適化前後の転位密度、転位クラスター比較

さらにウェハにした状態で、基板品質の評価を実施し、図Ⅲ-2-(イ)-C-2に示すように、最適化品では最適化前品に比べ、インゴット高さ頭部領域の転位密度、転位クラスターが大幅に低減されていることを確認した。転位密度については、インゴット高さ底部から頭部まで全領域において5,000個/cm²以下、転位クラスター占有比率は同様に2%以下を実現した。この最適化品のウェハを用いたセルにおいては、通常多結晶ウェハに比べインゴット高さ方向全領域の平均効率として、+0.53ポイントを確認した。

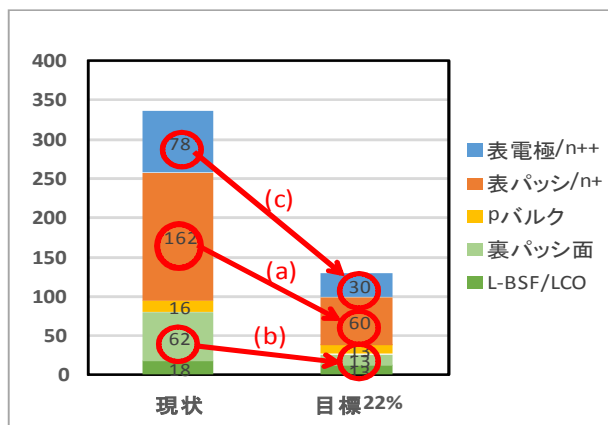
次の技術的課題としては、ブロック全面への単結晶領域拡大であり、結晶成長時の温度分布をさらに改善させることで改良を図っていく。

なお、シードキャストウェハの生産コストに関しては、シードに関する下記3項目を改善させることにより、単結晶ウェハ同等以下のコストを実現出来る見込みである。

- ①シード再利用化 ②組み合わせシード（複数枚） ③シード薄型化

(2) 高効率、低コストセル・モジュール技術開発

P型PERC構造でセル効率22%を達成するための設計指針を明らかにするために、デバイスシミュレーションにより暗電流ロス内訳解析を行った。その結果、ロスの改善効果の大きい順に、(a)表パッシベーション層+受光面拡散層、(b)裏パッシベーション層、(c)表電極下拡散層となった(図Ⅲ-2-(イ)-C-3)。



図III-2-(イ)-C-3 22%達成のためのJ0内訳

(a) においては、受光面拡散層の高シート抵抗化と表パッシベーション層構造の改善によって、高Voc化が可能である見込みを得た。具体的には、受光面拡散層シート抵抗 $120 \Omega/\square$ で SiN/AlOx によるパッシベーション層を形成する事により 680mV 達成の見込みを得た。

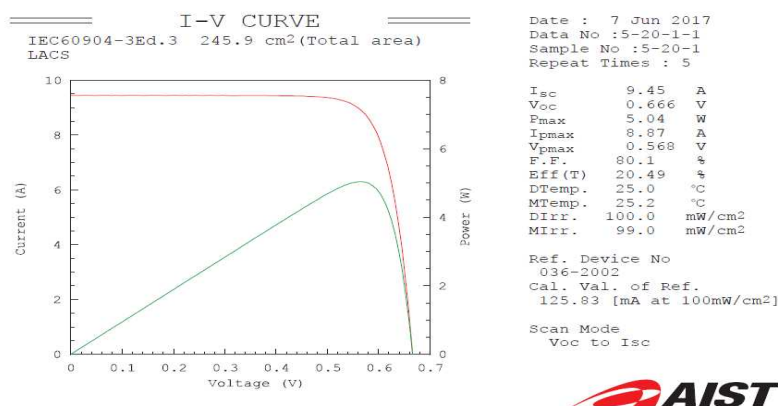
(b) においては、裏面 AlOx 製膜後のアニール条件を検討し、アニールなしに対して、650°C-15min/N2 雰囲気条件において変換効率で 0.24 ポイント向上の結果が得られた。長波長感度が大きく向上しており、裏面パッシベーション効果によるものと考えられる。

(c) においては、材料メーカーと高シート抵抗用かつ低ダメージの電極ペーストの検討をおこなった。SiN/AlOx 構造の受光面パッシベーション層においては、SiN 構造に比して表電極部のコンタクト抵抗が増大することが問題となっていたが、電極ペースト中のガラスフリットの成分/調整によりコンタクト抵抗を改善させることができた。結果として、SiN/AlOx 構造において SiN 構造比で、0.1 ポイントの効率向上を確認した。

また上記 (a) から (c) の改善に加えて、電極抵抗損失改善のために、バスバー本数の検討を行った。現状の 3 本バスバーから 5 本バスバーへ変更し、受光面 n+層のシート抵抗と表電極フィンガー幅/ピッチを最適化することで、効率で 0.46 ポイントの向上が確認された。

以上の素子高効率化要素技術を、(1)高品質、低コスト結晶成長技術開発で得られたシードキャストウェハに適用し、特性の検証を行った。結果として、固化率 20%~90%部のウェハを使用したセルの平均効率は、20.2% (社内測定) が得られた。また、その中の特性最高値のセルを産業技術総合研究所 (AIST) にて測定した結果、20.49%が得られた (図III-2-(イ)-C-4)。

今後、セル開発においては、表裏の界面再結合低減とバルクライフタイム向上化技術を、モジュール開発においては、光有効利用化技術と抵抗損失低減化技術を中心に検討し、平成 29 年度中に、セル効率 21%、モジュール効率 19%を達成見込みである。



図III-2-(イ)-C-4 シードキャストウェハ高効率プロセス特性最大値 (AIST 測定)

②高品質量産プロセスでの高信頼性シリコン太陽電池の開発 (寿命 35 年)

図III-2-(イ)-C-5 に本テーマの目標を示す。

H27~H28 年度は、結晶 Si 太陽電池における主な劣化モード (UV/湿熱劣化、温度/荷重サイクル劣化、高電圧 PID 劣化) について、各種単体ストレス試験及び分析を行い、劣化現象を定量的に把握した (※)。また、複数の市場から回収した太陽電池モジュールの評価/分析を行い、実際の市場で起こっ

ている主な劣化現象を定量的に把握した。これらの情報を踏まえて劣化メカニズムの解析を進め、寿命予測 Simulation 技術を構築した。単体ストレス下では寿命 35 年以上を確保できる見通しを得た（ただし、風荷重サイクル劣化モードについては寿命予測解析中）。

H28 年度からは、市場ストレス環境により近い条件下での劣化挙動を把握するため、複合ストレス試験を開始した（※）。また、さらなる長寿命化を目指した新たなモジュール材料やモジュール構造でのストレス試験を開始した（※）。

H29 年度は、これらの試験結果を解析し、市場寿命 35 年以上を検証できる試験評価技術（複合試験条件）を確立する。また、市場寿命 35 年以上を実現できる太陽電池用部材や構造の設計指針を明確にする。

なお、本文中（※）で記した部分の一部は、産総研 FREA（福島再生可能エネルギー研究センター）との共同研究によるものである。

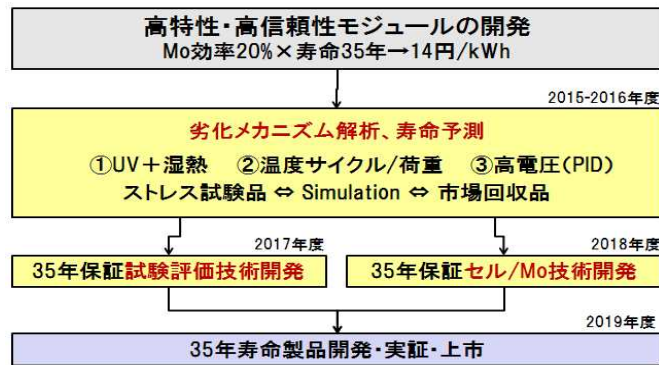


図 III-2-(イ)-C-5 信頼性テーマの目標

1) UV/湿熱劣化メカニズムの解析および寿命予測

UV 光および湿熱ストレスによって生じるこの劣化モードは、EVA 封止材中で発生した酢酸が電極コンタクト界面に存在するガラス層を腐食することで生じる（図 III-2-(イ)-C-6）。ガラス層の腐食速度は、EVA 中酢酸濃度と温度に依る。酢酸は、UV 光起因のものと EVA の加水分解反応起因のものがある。UV 光起因酢酸量は EVA 中添加剤量と UV 光照射エネルギー量で決まる。加水分解反応起因酢酸量は、該反応が酸触媒加水分解反応（酢酸自身が触媒となる水素イオン H+ を供給する）であることに起因し、時間とともに指数関数的に増大する（図 III-2-(イ)-C-7 左）。このため酢酸濃度が目安 1E19/cm3 程度に達した時点で FF 特性は急激に低下する（図 III-2-(イ)-C-7 右）。酢酸発生量は封止材中の添加剤配合（封止材仕様）で大きく変化する（図 III-2-(イ)-C-7 中の封止材 A と B）。UV 光起因の酢酸は市場寿命を著しく短縮しうる（図 III-2-(イ)-C-8）。

上記劣化メカニズムに基づき、寿命予測 Simulation を構築した。その結果、適切なモジュール設計を行えば、市場寿命 35 年以上を実現できることが予測された（図 III-2-(イ)-C-9）。主な設計要件としては、ガラス中の不純物添加量、封止材種類、封止材中添加剤配合、電極材料、電極形成条件、などがある。市場回収品の解析結果からも、モジュール仕様条件によって市場寿命が大きく異なることを確認し、劣化メカニズム解析知見及び Simulation 予測値とも整合する結果を得た。

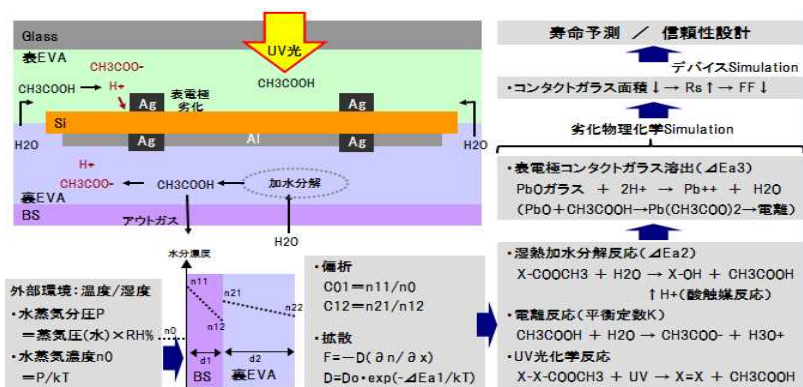
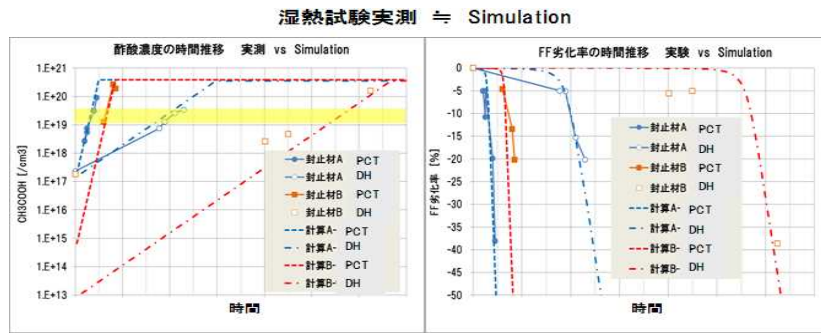
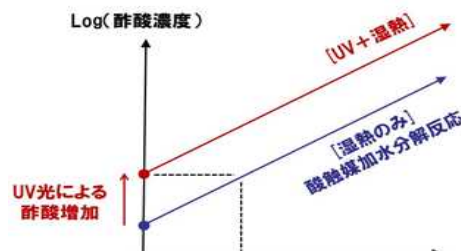


図 III-2-(イ)-C-6 モジュール内物質挙動イメージと湿熱劣化物理

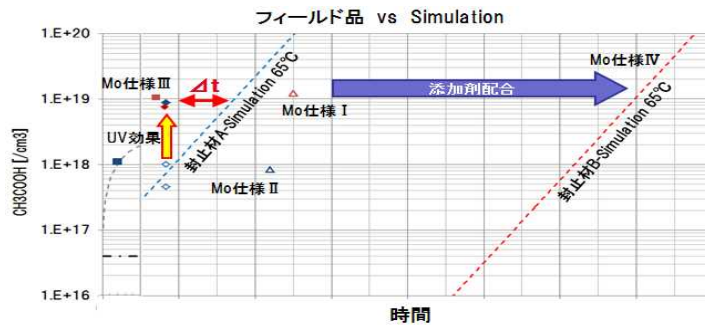


FF屈曲劣化目安 酢酸濃度 $1 \sim 3E19/cm^3$ ($1000 \sim 3000 \mu g/g$)

図III-2-(イ)-C-7 湿熱ストレス試験結果とSimulation結果の比較
左は酢酸濃度の時間挙動を、右はFF特性の時間挙動を示す



図III-2-(イ)-C-8 UV光起因酢酸による湿熱寿命短縮メカニズム (概念図)



所定地域の月別[温度、湿度]情報 → 有効寿命 $\tau_{eff} = [\sum(1/\tau_{月})/12]^{-1}$
 $\tau_{eff}(\text{封止材B 国内設置}) > 35\text{年}$

図III-2-(イ)-C-9 市場回収品のEVA中酢酸濃度とSimulation結果
(UV光起因酢酸の影響を黄色の↑向き矢印で示す)

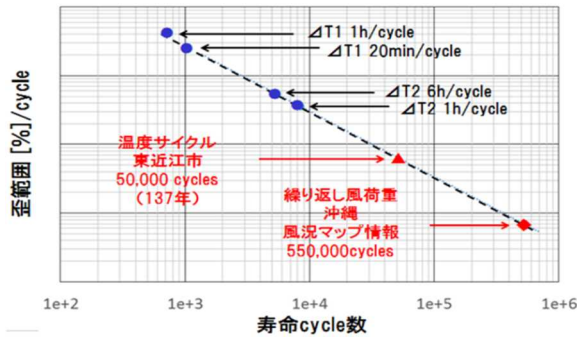
2) 温度/荷重サイクル劣化メカニズムの解析および寿命予測

温度差 (\propto 熱歪) や荷重 (\propto 曲げ歪) が繰り返し負荷されることによって生じるこの劣化モードは、電極の断線や剥がれ、半田内部クラックなどによって生じ、FF特性の低下を招く (※)。寿命劣化率を与える繰り返し回数と歪量には相関があり、Coffin-Manson 則などの疲労劣化経験則が適用できる (図III-2-(イ)-C-10)。

温度サイクル起因の劣化については、応力-歪 Simulation と疲労劣化経験則を組み合わせることで、市場寿命 35 年以上を実現するための電極構造設計要件を把握した。

一方、風荷重サイクル起因の劣化については、市場風況と太陽電池の設置形態に強く依存し、条件によっては長寿命化技術の導入も必要となる可能性が推測された。詳細解析中である。

なお、電極剥がれについては、湿熱ストレスが複合することによって劣化が加速する可能性が予想されており、現在複合ストレス試験を遂行中である (※)。

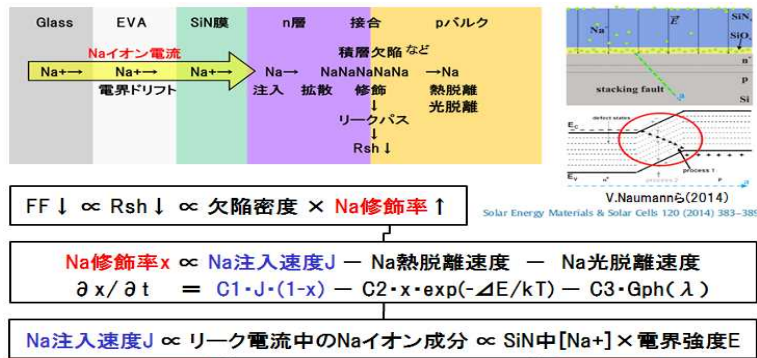


図III-2-(イ)-C-10 歪量 (∝温度差及び荷重ストレス量) と寿命サイクル数の関係

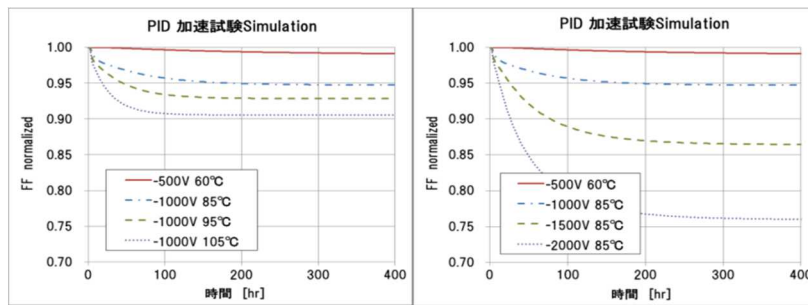
3) PID劣化メカニズムの解析および寿命予測

モジュールのフレームとモジュール中セル間に発生する電位差によって生じるこの劣化モードは、ガラスなどから供給される Na 等の不純物元素が、シリコン中に注入されて pn 接合部の欠陥に集積しリークパス (シャントパス) を形成することで生じる (図III-2-(イ)-C-11 上)。PID 耐性の弱いものは比較的短期間でシャント抵抗が大幅に低下し FF 特性が急激に低下する。接合部欠陥への Na 等不純物元素の修飾率は、不純物元素の注入速度と脱離速度のバランスで決まる (図III-2-(イ)-C-11 下)。

上記劣化メカニズムに基づき、寿命予測 Simulation を構築し、PID ストレス耐性はシャント抵抗 (∝FF 特性) の飽和劣化度で判定できることを把握した (図III-2-(イ)-C-12)。飽和劣化度は、Na 等の不純物量、pn 接合品質、フレーム-セル間電位差、温度、湿度、等に依存する。加速試験結果と寿命予測 Simulation から、封止材や SiN 膜の物性や構造などを適切に設計すれば、市場ケース目安 60°C・-500V 条件で PID フリーとできることが示された (図III-2-(イ)-C-13) (※)。



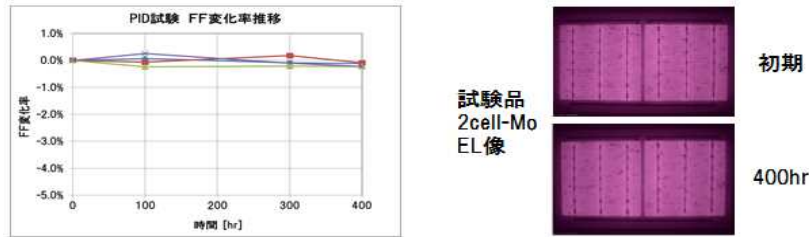
図III-2-(イ)-C-11 PIDメカニズム仮説と寿命予測に用いた物理モデル式



> 市場ケース例(60°C・-500V)でFF劣化率≦1% と同等の判定条件は
 例えば 85°C・-1000Vなら≦5%、85°C・-1500Vなら≦14%

図III-2-(イ)-C-12 PID加速試験 Simulation

85°C・85%RH・-1500V



➢FREAでの評価によれば、85°C・-1500Vでの劣化率は0.3%未満
→ 市場ケース例60°C・-500Vでの劣化率は0.02%未満と推定

図III-2-(イ)-C-13 PID試験結果

4) 複合ストレス試験

実市場における太陽電池は複数の環境ストレスに同時に曝されており、複合作用（相乗作用）による劣化の加速が予想される。このため、複合ストレス試験として、UV→湿熱→{TC、PID}試験（単体ストレス試験をシーケンシャル接続した試験）を遂行中である（※）。順次結果を確認しつつ、市場寿命 35 年以上を判定できる複合試験条件を H29 年度中に抽出する。

5) 長寿命化技術

モジュールの長寿命化については、EVA 代替材料の信頼性試験、合わせガラス構造の信頼性試験を遂行中である（※）。順次結果を確認しつつ、発電コスト 14 円/kWh 実現条件、さらには 7 円/kWh 実現に向けた道筋を H29 年度中に明らかにする。

2. 実用化・事業化見通し

高効率シリコン太陽電池の低コスト量産プロセスについては平成 29 年度第 4 四半期より一部製造導入を計画しており、本年度末までにセル効率 21%、モジュール効率 19%を量産プロセスラインにて実証する見通しである。

また、高信頼性モジュール技術については、平成 28 年度実施の主要 3 劣化モード(UV+湿熱、高電圧、温度サイクル/荷重)に関する寿命解析の結果、35 年以上の寿命を実現するためのセルデザイン・モジュール構成部材の選定指針を得ており、平成 30 年度以降に長期保証案件向けのモジュール製品に同仕様を適用し、順次生産量の拡大を図る見込みである。

上記の高効率シリコン太陽電池の低コスト量産プロセスと高信頼性モジュール技術の両立化を平成 31 年度までに実現し、平成 32 年度以降での本格生産・販売を計画する。

3. 波及効果

①長期安定発電の担保

寿命予測技術が確立されていない現状では、低品質モジュール、安全性にリスクがあるモジュールの設置が拡大する事で、設置後 10~15 年で発電量が急激に低下するリスクを持ったモジュールが多数設置される危険性が指摘されており、2020 年代後半より発電が停止する太陽光発電所が急増、エネルギー供給が不安定となり、大きな社会問題となることが懸念される。

これを解決するには、論理的な科学技術に立脚した製品設計がなされた、高品質・長寿命の太陽電池モジュールが正当な価格で取引される状況とする事が必須である。

本事業で確立しつつある寿命予測技術とその知見を元にした長寿命モジュール開発とその実証は、この懸念・リスクを払拭することができる内容であり、本知見を利用した技術を太陽電池業界全般に広く波及させる事で、太陽電池業界全体の信頼性を向上させると共に、設置後、長期間に渡り安定且つ安全な発電システムを保証し、CO2 削減という大きな目標達成に寄与する意義ある事業となる。

②発電コストの低減

高効率セル・モジュール技術開発を行うと同時に、確立された寿命予測技術を用いて太陽電池モジュールを最適設計する事により、過剰な耐久設計を見直す事が出来、発電コストの低減を更に加速させる事が可能となる。

4. 今後の展開

本事業における高信頼性・低コスト・高効率シリコン太陽電池開発による発電コスト 14 円/kWh の実現を通過点として、高信頼性技術を基盤とした太陽光発電システムの普及を通して、O&M コストの低減、リサイクル周期の延伸による関連コストの削減と、更なる高効率セル開発、両面受光タイプのモジュール構造採用による実質的な設備利用率の向上等に取り組み、2030 年より早期の 7 円/kWh 達成に向けて開発を加速していく。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	5	10(3)	5(1)	20 件
新聞・雑誌等への掲載	9	7	0	16 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	京セラ (株)	2015-168467	国内	2015/8/28	公開	太陽電池素子およびその製造方法	伊藤 憲和 他
2	京セラ (株)	2015-189563	国内	2015/9/28	公開	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川 信哉 他
3	京セラ (株)	2015-254634	国内	2015/12/25	取下	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川 信哉 他
4	京セラ (株)	2016-035189	国内	2016/2/26	取下	太陽電池素子	吉田 貴信 他
5	京セラ (株)	2016-068921	国内	2016/3/30	取下	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川 信哉
6	京セラ (株)	2016-079806	国内	2016/4/12	取下	絶縁性ペーストおよび太陽電池素子の製造方法	石川 信哉 他
7	京セラ (株)	2016-088824	国内	2016/4/27	出願	絶縁性ペーストおよびその製造方法並びに太陽電池素子の製造方法	石川 信哉 他
8	京セラ (株)	2016-148131	国内	2016/7/28	出願	太陽電池素子およびその製造方法	村尾 彰了 他
9	京セラ (株)	2016-189501	国内	2016/9/28	出願	太陽電池素子	村尾 彰了 他
10	京セラ (株)	2016-190693	国内	2016/9/29	出願	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	松島 徳彦 他
11	京セラ (株)	2016-209570	国内	2016/10/26	出願	太陽電池素子	村尾 彰了 他
12	京セラ (株)	2016-204546	国内	2016/10/18	出願	太陽電池素子	荒浪 順次 他
13	京セラ (株)	PCT/JP2016/08874 4	P C T	2016/12/26	出願	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方	石川 信哉 他

						法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	
14	京セラ(株)	2017-531639	国内(移行)	2016/12/26	出願	絶縁性ペースト、絶縁性ペーストの製造方法、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川 信哉 他
15	京セラ(株)	PCT/JP2017/007144	PCT	2017/2/24	出願	太陽電池素子	吉田 貴信 他
16	京セラ(株)	2017-533988	国内(移行)	2017/2/24	出願	太陽電池素子	吉田 貴信 他
17	京セラ(株)	PCT/JP2017/012602	PCT	2017/3/28	出願	太陽電池素子および太陽電池モジュール	石川 信哉
18	京セラ(株)	2017-088210	国内	2017/4/27	出願	太陽電池素子および太陽電池素子の製造方法	伊藤 憲和 他
19	京セラ(株)	15/484881	アメリカ	2017/4/11	出願	絶縁性ペーストおよび太陽電池素子の製造方法	石川 信哉 他
20	京セラ(株)	2017-077981	国内	2017/4/11	出願	絶縁性ペースト、太陽電池素子の製造方法および太陽電池素子	石川 信哉 他

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	京セラ(株)	京セラ搭載要領が 30%向上～住宅用太陽光 屋根を効率的利用	電気新聞	2016/3/2
2	京セラ(株)	京セラ 7 種類のモジュールで屋根搭載容量 30%増～住宅用新 PV システム	化学工業日報	2016/3/3
3	京セラ(株)	京セラ、単結晶 PV 技術に磨き 変換効率、1%高まり 19.8%に	化学工業日報	2016/3/9
4	京セラ(株)	京セラ住宅用太陽光の新製品～「RoofleX」4 月から順次発売	電波新聞	2016/3/9
5	京セラ(株)	京セラ発電効率アップ～太陽光システム新製品	京都新聞	2016/3/11
6	京セラ(株)	太陽光パネルの搭載容量 30%増加～新モジュールでゼロエネへ提案 京セラ	日刊木材新聞	2016/3/12

7	京セラ (株)	太陽光パネル住宅争奪戦～京セラ同面積で積載3割増	日経産業新聞	2016/3/14
8	京セラ (株)	搭載容量が30%向上～京セラ7種類のモジュール組み合わせ	プロパン新聞	2016/3/21
9	京セラ (株)	PV EXPO2016 レビュー～PERC 技術の導入急増	電子デバイス産業新聞	2016/3/24
10	京セラ (株)	ニュースワンダー ワンダーのトビラ 電力自由化	関西テレビ	2016/5/26
11	京セラ (株)	「報道ステーション」週2回CM	テレビ朝日系列	2016/4/20 ～9/31
12	京セラ (株)	「エキサイティング!J」週1回CM	KBS 京都放送	2016/4/1～ 12/31
13	京セラ (株)	エネルギー自給自足の商品を知ろう	住まいの設計	2016/7/1
14	京セラ (株)	太陽パネルメーカー問い合わせ一覧	ソーラージャーナル	2016/8/1
15	京セラ (株)	自家消費型システム提案	化学工業日報	2016/11/4
16	京セラ (株)	自社製 SOFC を投入	プロパン新聞	2016/11/14

D 基盤技術開発による先端複合技術セルのための低再結合電極の研究開発 (ナミックス株式会社)

1. 成果詳細

低コストプロセスではホモ接合のウェハを用いて効率向上する必要があるが、不純物拡散による再結合を抑制することでウェハとしては効率向上に繋がる。このようなウェハは不純物の表面濃度低下と、pn接合位置が浅くなることを意味し、このような拡散層では、電極形成プロセスで再結合が増大し、結果として効率が向上しない（逆に低下する）こともある。また、現行のPERCでは裏面にAl電極を用いてウェハに局所的なBSFを形成しているが、これが効率向上を妨げる要因の1つでもあるため、PERT（裏面にも拡散層を形成する構造）を視野に入れる必要がある。太陽電池の拡散層は半導体のそれに比べて高濃度に不純物を拡散させるため、表面では半導体は縮退し、ほぼ金属と同様の状態であると推察される。そのため、通常n層とp層では電極に用いられる金属種等を変更するが、太陽電池の場合にはこのような材料種変更をしなくとも電気接続を形成できると考えている。従って、裏面側に拡散層が形成されたとしても、同様に1種のペーストで電極形成できると考えており、これはその後のプロセス等を考慮しても有効な要因となる。このようなウェハに対しては、

- 接触抵抗を十分に低い値に保つ
- 電極形成による再結合増大を抑制する

の2つの機能が電極に求められる。これらの目標をクリアするために、電極用ペーストとして、以下の様な中間目標を設定した。

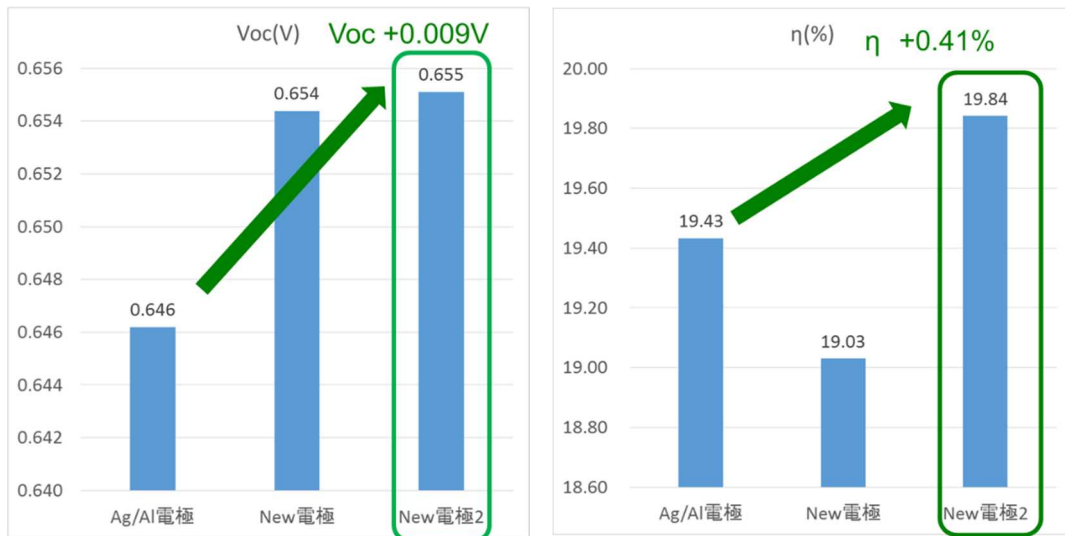
- n⁺層に対する接触抵抗が現行の銀ペーストの場合と同等かそれ以下
→2 mΩ cm² 以下、(但し拡散層の表面濃度は1×10²⁰ cm⁻³ 以下)
- p⁺層に対する接触抵抗が、現行の銀/アルミニウムペーストと同等かそれ以下
→5 mΩ cm² 以下
- 電極形成による再結合電流は500 fA cm² 以下
- 現行の電極材料を用いた場合のセルの開放電圧から5 mVの改善があること
→前提として、同じ基板を用いての、電極材料評価による

n-PERT型の基板のp+エミッター用に使用される銀ペーストは、基板と電極とのコンタクトを取ることが目的でアルミ金属を含有しているのが一般的である。しかし、生成したアルミ合金が基板側と接触し金属がSiへ拡散することで開放電圧(Voc)が下がり、変換効率が低下してしまうことがわかっている。本検討ではアルミ金属を使用せず、基板と電極金属と直接の接触面積を少なくすることで上記問題を解決できる電極の開発を目指した。

Ag/Al電極と開発品電極にてn-PERTセル(156mm□)を試作し太陽電池特性を測定した結果を示す(表Ⅲ-2-(イ)-D-1)。

表Ⅲ-2-(イ)-D-1 n-PERTセル太陽電池特性データ

電極ペースト	Jsc(mA/cm ²)	Voc(V)	FF	η (%)	Rs(mΩ)
Ag/Al電極	40.41	0.646	0.744	19.43	3.5
New電極	40.49	0.654	0.718	19.03	6.5
New電極2	40.54	0.655	0.747	19.84	3.7



図III-2-(イ)-D-1. 156mm 角セル上での I-V 特性結果

注目すべきは Voc の値で New 電極 2 は Ref. 対比+0.009V を達成し、その結果最終的な変換効率でも Ref. 対比+0.41%となった。New 電極の Voc は+0.008V と高いが FF が低いため変換効率が低い結果となっている(図III-2-(イ)-D-1)。

また、試験した電極と n+, p+層に対する接触抵抗、再結合電流(j_{0-met})の結果を表III-2-(イ)-D-2に示す。

表III-2-(イ)-D-2 n+, p+層に対する接触抵抗と再結合電流値

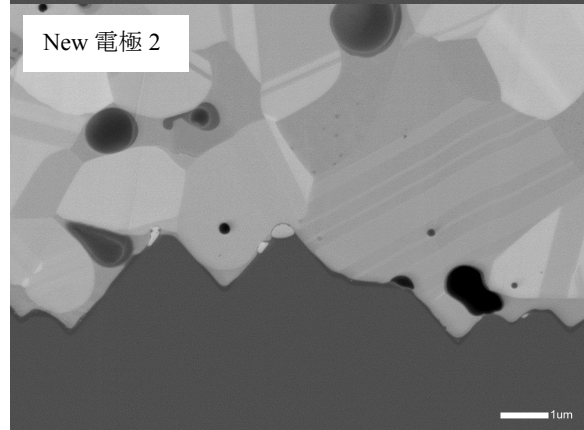
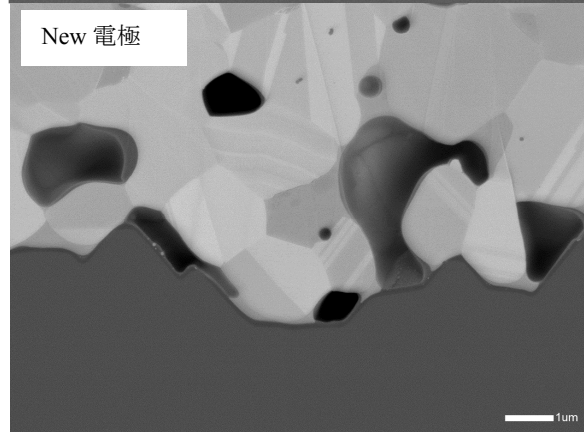
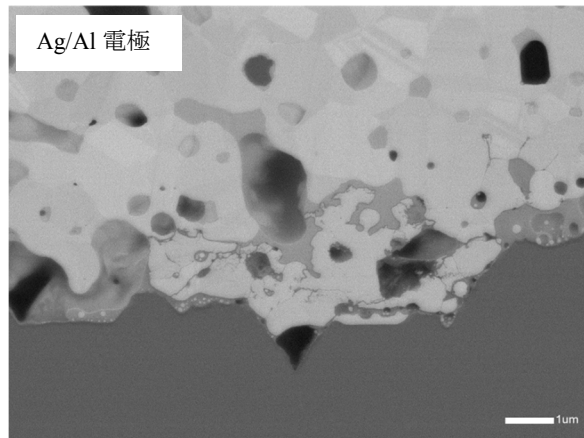
電極	①n+層に対する接触抵抗 (mΩ・cm ²)	②p+層に対する接触抵抗 (mΩ・cm ²)	③再結合電流j _{0-met} (fAcm ⁻²)
Ag/Al電極	2.7	1.8	810
New電極	2.1	5.1	440
New電極2	2.4	2.3	540

n+層に対する接触抵抗はどの電極でも低く良好レベルであった。一方 p+層に対する接触抵抗は New 電極で高くなっており、これが FF の低下の原因と考えられる。New 電極 2 では p+層に対する接触抵抗が低くなるように改良することで FF が向上している。

また再結合電流値は Ag/Al 電極>New 電極 2≥New 電極の順に低い。Ag/Al 電極の Voc が低いのは再結合電流が高いことに起因していると考えられる。New 電極と比較して New 電極 2 の再結合電流値は若干高いが Voc の値は高い値で New 電極のそれと同程度を維持しており、結果として良好な特性を得られている。

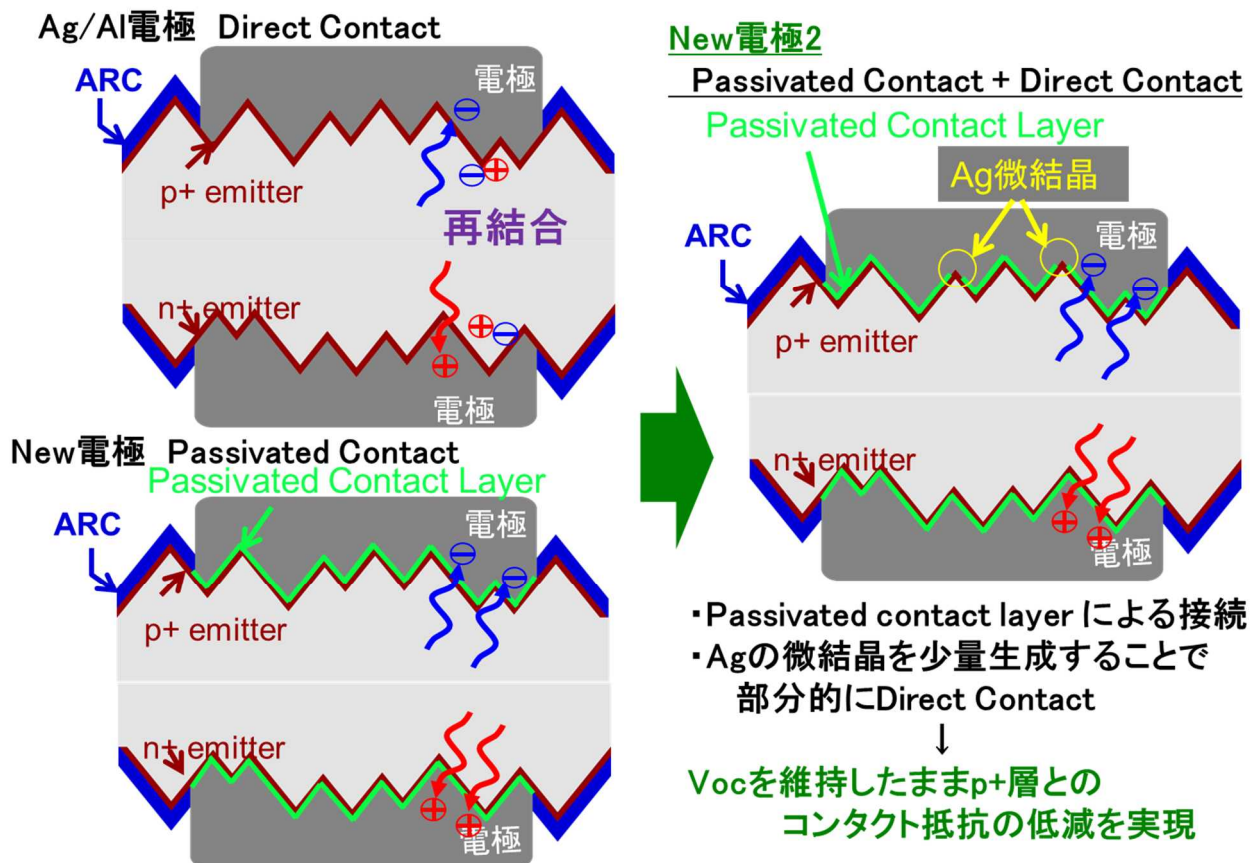
次に、高 Voc となった原因を調べる目的で、基板の界面状態を確認した(図III-2-(イ)-D-2)。Ag/Al 電極は SiN_x 膜が全体に除去され、Ag/Al 合金が接基板と接触し一部が Si 基板に刺さるような形で形成されていることがわかる(Direct Contact)。また、New 電極では電極界面に SiN_x 膜を残したままの状態電極との接続を取っていることがわかる(Passivated Contact)。このため Voc が高いがコンタクト不十分であり、これが FF の低い原因と考えられる。

一方 New 電極 2 ではテクスチャの頂上部に Ag の微結晶の生成が確認できる。この部位は ARC 膜が除去されているがその他の大部分は膜の存在が確認でき部分的な ARC 膜の除去にとどまっている。



図Ⅲ-2-(イ)-D-2. 断面 SEM 写真

上述の接続構造をモデル図で示す（図Ⅲ-2-(イ)-D-3）。



図Ⅲ-2-(イ)-D-3 電極と基板との接続のモデル

Ag/Al 電極ではペーストに含まれるガラスフリットにより基板表面の ARC を除去（ファイヤースルー）し、電極が直接基板 Si と接触している（Direct Contact）。この場合、電極と基板のコンタクト性は良好となるが、発生した電子が電極と基板の界面で再結合を起こし易く Voc が高くない。さらに基板には電極が直接接触しているため、焼成温度が高い場合には Ag が pn 接合界面まで拡散してしまい接合自体を破壊してしまう可能性も大きくなる。

一方、New 電極は界面にパッシベーション層を残したまま電極とコンタクトを取るモデルである。これは本研究で開発した特殊なガラスフリットが反射防止膜を改質しパッシベーションの効果を残したままコンタクトを取ることができるためであり、界面での再結合が抑制され高い Voc が得られるという特徴がある。ただし、今回の実験の結果のように電極との接続が不十分でコンタクト抵抗が高く FF が低くなってしまう場合があり、接続の安定化が課題であった。

今回の New 電極 2 はガラスフリットの ARC 膜への反応性を上げることでパッシベーション層を残したまま、テクスチャピラミッドの頭頂部の一部分のみ ARC 膜を除去し、Direct Contact により接続補完することで高 Voc を維持したまま高 FF 化に成功した（Passivated Contact + Direct Contact）。

ただし、この構造では ARC 膜を部分的に除去し直接基板と接触している部位が存在することとなる。再結合電流が New 電極で 440 fA cm^{-2} であったのに対し、New 電極 2 で 540 fA cm^{-2} と若干高くなったのはこのためと考えられる。Voc を落とさない範囲での Direct Contact の制御は今後も必要となる。

まとめ

p+エミッター用としてアルミを含まない銀電極ペーストの開発を実現した。従来品の問題であった Ag/Al 合金スポットと基板との Direct Contact から Passivated Contact へ変えることで Voc を向上に成功。一部 Direct Contact により接続を補完することで高 Voc を維持したまま FF の向上させることができた。最終的に Voc が 0.009V、変換効率が 0.41% 向上した。

また、中間目標に対しては①低表面濃度の n+層に対する接触抵抗低減 中間目標値 $2 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ 以下 ($1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) のところ $2.4 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ 、③電極形成による再結合 ($j_0\text{-met}$) 抑制 中間目標値 500 fA cm^{-2} のところ 540 fA cm^{-2} で未達であったが、ある程度 Voc と FF が高い値が得られていることから目標に

は近い電極と考えている。基板の影響も考えられることから今後はさらに基板開発と（研究機関）平行して開発を進めてゆく。

2. 実用化・事業化見通し

本研究開発を実用化するためには、信頼性評価、特に DumpHeat テストを実施確認が必要。特にセルメーカー、研究機関にて評価をしていただき、実力を見てゆく。信頼性試験をクリアできれば実用化めどが立つと考えている。平成 29 年度下期信頼性/量産化検討、平成 30 年度上期より顧客へのサンプルワーク開始。平成 30 年度下期には信頼性/認定。平成 31 年度より生産販売開始を見込む。

3. 波及効果

今後は、本検討で実施した n-PERT 構造のみならず広く両面受光タイプの p-PERC、p-PERT 構造への適用が考えられる。p 型ウェハが安価であること、設備投資費が低く抑えられることから p 型両面受光セル/モジュールへの検討が始まっており、上記構造への適用の可能性が見込まれる。更に本電極では Al を含まず p+層、n+層両面への適応が同一ペーストで可能であることから在庫管理の観点からも有利であり広く応用展開が期待できる。

4. 今後の展開

今後もセルメーカーおよび研究機関との協働によるセル/モジュールでの実証試験を進めてゆく。この際に、基板の表面拡散濃度や印刷条件に合わせてペーストの改良を進めてゆく。この際、研究機関での試験では可能な限り結果を公表していただく。また、これまでの結果はセルレベルで対外的に発表してゆく。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	0	0	0 件
研究発表・講演（うち国際会議）	3 (3)	1 (1)	1 (1)	5 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	高橋哲	ナミックス株式会社	Contact Formation Issues for High Efficient Crystalline Silicon Solar Cells	25th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules	2015/6/28
2	中村京太郎 高橋哲	豊田工業大学 ナミックス株式会社	Novel Silver and Copper Pastes for N-type Bifacial PERT Cell	EUPVSEC-2015	2015/9/17
3	高橋哲	ナミックス株式会社	The Current Conduction Mechanism of Novel Silver Thick Film Electrode	EUPVSEC-2015	2015/9/14
4	神岡武文 高橋哲、 村松和 郎、田中 亜樹	豊田工業大学 ナミックス株式会社	Novel Silver Paste to n- and p-Layers for Fabricating High Efficiency Crystalline Si Solar Cells	PVSEC-26	2016/10/28
5	神岡武文 村松和 郎、田中 亜樹	豊田工業大学 ナミックス株式会社	Carrier Transportation at Novel Silver Paste Contact	I-EEE PVSEC-44	2017/6/25- 30

E 赤外線FZ法による高品質低コストシリコン単結晶の開発 (株式会社クリスタルシステム)

1. 成果詳細

1-1. 大型赤外線単結晶育成装置の改造

試作開発済みの大型赤外線単結晶育成装置について、直径120～130mm、長さ1000mmの原料棒を安定的に熔融し、「最終目標：直径220mm、長さ300mm以上」の大口径シリコン単結晶の固化を最適化するとともに、単結晶歩留まりの向上と安定化を可能とする制御装置、および計測装置を試作した。

1-1-1. 赤外線集光分布制御装置

大口径単結晶育成時に安定した熔融帯を形成するためには、赤外線集光分布状態を育成単結晶の直径変化に合致させて最適状態に制御する必要があることが実験により明確となった。そこで、単結晶育成の連続したプロセス（ネッキング工程、クラウン工程、そして直胴部）において赤外線の照射位置が直径変化に合致するよう追尾して育成が可能な「赤外線集光分布制御装置」を導入した。本制御装置の導入により、単結晶育成中の赤外線集光分布を常に最適な状態に保つことが可能となり、直径130mmの単結晶シリコンを育成することに成功した。

1-1-2. 固液界面直上の液相拡がり角度精密測定装置

単結晶の安定成長を継続させるには直径の安定化及び肥大化を行うプロセスにおいて原料棒から供給される融液量を最適に制御する技術が必要となる。従って、単結晶育成時の最適融液量及び融液形状を正確に測定できる「液相拡がり角度精密測定装置」の設計、導入を行った。本装置をネッキングから直胴部に至る連続したプロセスに使用し、単結晶育成中における固液界面形状の測定を実施し液相量の制御を行った。従来からのオペレーター制御に、本装置による自動測定を付加することで、単結晶成長の安定化及び直径制御技術が向上し、直径130mm、長さ105mmの単結晶シリコンの育成に成功した。

1-1-3. 液相量制御自動装置

1-1-2に記載した「液相拡がり角度精密測定装置」により測定された固液界面の液相量について、得られた液相量を最適状態へと制御し自動制御を行うことで、安定した結晶成長を継続させるための「液相量制御自動装置」の設計、導入を行った。結果、単結晶成長の安定性が向上し、「液相拡がり角度精密測定装置」と併せて用いることで直径130mm、長さ105mmの単結晶シリコンの育成に成功した。

1-1-4. 大型赤外線単結晶育成装置本体部の改造

1) 種子棒シャフトへの結晶保持装置の付加

無転位単結晶成長をネッキング法にて行う場合、ネッキングと呼ばれる絞り（直径4mm以下、長さ50mm以上）を行い、その後直径220mmまで径を拡げるが、単結晶が成長するにつれ絞り部へかかる重量が増大するため絞り部の破損による結晶落下、および振動が発生しやすくなる。従って、上記問題を回避し、安全かつ安定して結晶育成が可能となる種子棒シャフト結晶保持装置の設計、導入を行い、育成中の結晶保持機構を付加した。

2) 原料保持シャフト中心軸調整装置

原料となるポリシリコンと育成単結晶の境界となる熔融帯は20mm以下の幅で制御されており、安定成長を行うためには熔融帯の安定した制御、即ち双方の回転軸の一致が必要となる。しかし、使用する原料ポリシリコンが1mと長い円柱状のため、長さ方向に若干の湾曲を含み、育成プロセス中に原料の回転軸中心が変動するという問題を含んでいる。

従って、育成中に原料の回転軸中心を調整する原料保持シャフト中心軸調整装置を設計、導入を行い、熔融帯の安定化を向上させることで、単結晶成長を最適化した。

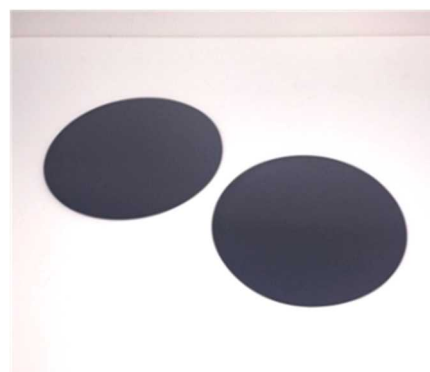
1-2. 高品質シリコン単結晶育成条件の検討

1-2-1. 直径および長さ

赤外線集光分布の最適化ならびに固液界面の液相量制御を行うことで、安定的な原料熔融と結晶固化を両立し、直径130mm、長さ105mmのシリコン単結晶を育成した（図III-2-(イ)-E-1）。得られた結晶は、シリコン特有の金属光沢が認められ、結晶軸<100>において結晶側面には育成方向に沿って伸びる明確な晶癖線が4回対称の位置、即ち(110)の方向に認められた。このことは得られた結晶には大きな結晶粒界は無く、単結晶であるこ

とを示している。

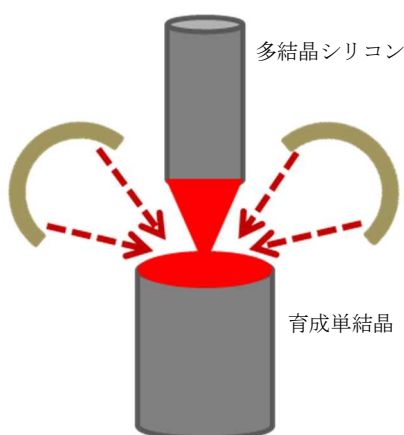
また、育成した単結晶から直径125mmのシリコン鏡面ウェーハを作製し、赤外線FZ法により育成された単結晶が通常プロセス（市販されているウェーハと同一プロセス）にて遜色ない加工が可能であることを実証した（図Ⅲ-2-(イ)-E-2）。



図Ⅲ-2-(イ)-E-1 育成したシリコン単結晶 図Ⅲ-2-(イ)-E-2 シリコン鏡面ウェーハ

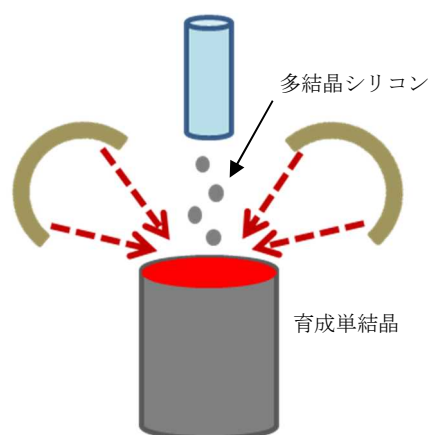
なお、育成単結晶の大口径化を試み、直径130mm品までは成功したがこれ以上の大口径化には届いていない。育成結晶の大口径化には原料融液の供給と育成結晶側での安定した固化条件の確立が必要となる。本研究開発においては原料棒の予備加熱と育成結晶に対する後加熱を併用して、原料棒の熔融とシリコン単結晶の固化、双方を安定的且つ最適な状態で継続させることで直径130mmまでの単結晶育成に成功している。しかし、直径130mm以上の単結晶を育成する場合、市況に存在する原料棒の直径の制約上（130mmが上限直径）、原材料径を超える直径の単結晶を育成することになる。そのため、赤外線の照射角度、照射位置、出力、などの各要素の相互関係を明確化して最適育成条件を見出すことを進めているが、市況の原材料の制約（最大直径130mm、最大長さ1m）も踏まえ、新たな原料供給方法の改善として、粒状多結晶シリコンを用いた供給機構を付した装置設計、育成方法の検討も併せて開始した（図Ⅲ-2-(イ)-E-3、4参照）。

双方の技術検討ならびに各要素技術の相互関係を引き続き明確化し、最適育成条件を確立して早期に目標を達成したい。



図Ⅲ-2-(イ)-E-3

棒状多結晶シリコンによる育成法



図Ⅲ-2-(イ)-E-4

粒状多結晶シリコンによる育成方法

1-2-2. 導電型

シリコン単結晶の比抵抗値は添加される添加剤の濃度と相関関係にある。本研究開発においてはN型としてリンを添加剤に用い、比抵抗値1～100Ωcm品の制御を目指し、当該比抵抗に合致する濃度のリンを添加した単結晶を合成することとした。本質的には原料棒に予め必要量のリンが添加されていることが望ましいが現実問題としては市販品は無添加品なので、購入後、必要濃度のリン添加が必要となる。

本研究開発では一般的なシーメンス法による多結晶シリコン棒（直径130mm）に溝を設け、ここにCZ（引上げ）法で作製された高濃度リン添加単結晶片をレーザ法で溶着する。溶着するCZ法育成単結晶片は育成軸方向に沿ってリン濃度が変化しているため育成軸方向を互いに逆にした単結晶片を二枚、一組として溶着し、添加するリン濃度の均質化を図ることに成功した。実際に製造した原料棒を図Ⅲ-2-(イ)-E-5に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-E-5
ドーパントを溶着した
多結晶シリコン棒

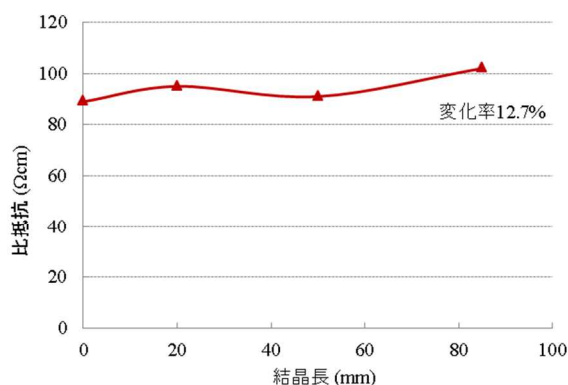
なお、溶着に洗浄プロセスを施すことにより、最終的に汚染の無い多結晶シリコン原料棒の作製技術を確立した。

育成した単結晶はPN判定器によりN型を有していることを確認した（エヌピーエス(株)製PN-01による）。

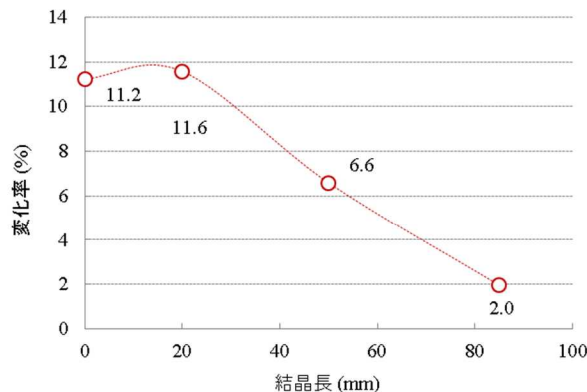
1-2-3. 抵抗面内分布

1-2-2の手法において、多結晶シリコン原料棒に溶着させる単結晶片のリン添加濃度および単結晶片の量を調整することにより以下の通り最終目標を達成する結晶育成に成功した。

- ・ 中心比抵抗：目標とする100Ωcmに対して89～102Ωcm。
- ・ 比抵抗分布 成長方向：目標とする15%以内に対して、12.7%。（図Ⅲ-2-(イ)-E-6）
- ・ 比抵抗分布 面内方向：目標とする12%以内に対して、11.6%以下。（図Ⅲ-2-(イ)-E-7）



図Ⅲ-2-(イ)-E-6 結晶長と比抵抗の関係



図Ⅲ-2-(イ)-E-7 比抵抗変化率と結晶長の関係

注1) 比抵抗測定装置：四探針抵抗率測定器

注2) 比抵抗分布：((比抵抗 max - 比抵抗 min)/(比抵抗 max))×100

1-2-4. ライフタイム

赤外線FZ法により育成したシリコン単結晶を晶癖線に沿って切断し、ラッピング研削およびエッチングによる表面加工変質層の除去後、ライフタイム測定を行った。測定は、実用的な太陽電池仕様を考慮し、比抵抗1～100Ωcmの種々比抵抗体での測定を実施した（表Ⅲ-2-(イ)-E-1）。

結果、各比抵抗におけるライフタイムは最終目標値5000μsecを大幅に超えた数値を得ることに成功した。

表Ⅲ-2-(イ)-E-1 ライフタイム測定結果

試料	比抵抗 (Ωcm)	ライフタイム (μsec)
1	1	7397
2	5	7962
3	100	5843

1-2-5. 結晶欠陥

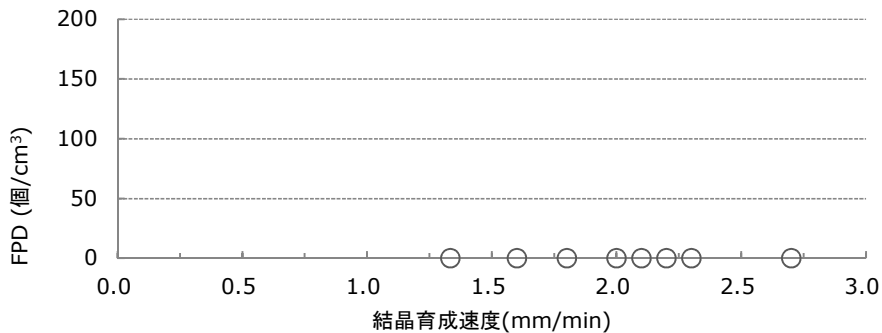
太陽電池としての性能劣化を抑止するため、本研究開発では転位、酸化励起積層欠陥、COP等の結晶欠陥を抑制した高品質単結晶の開発を目標としている。

転位については後述する「1-2-6. 転位」の項にて詳細を記載する。また、酸化励起積層欠陥については後述する「1-2-7. 酸素成分濃度および炭素成分濃度」の項に記載しているように、結晶中に含有する酸素成分が低濃度であることから欠陥の発生は抑制できていると考えられるが、別途熱酸化処理による評価を実施する予定である。

従って、本項ではCOPの結果を主とし、最終目標 0.1 個/cm³ (大きさ100nm以上) に対する評価結果を以下に記載した。COPに関しては、一般的に評価を行うには種々測定器、測定対象試料の高度な表面前処理、ならびに付随して要する測定環境、雰囲気等の多々設備、技術が必要となり、本研究開発期間にて正確な評価をすること難しい。従って、COPと欠陥分布の一致が知られているFPD (フローパターンディフェクト) を評価することにより、結晶欠陥の評価を実施した。

評価は、単結晶のスライス加工後、表層の加工歪層を完全に除去することが必要であり、当該プロセスの確立を併せて行うことで、自社プロセスでの結晶欠陥評価を可能とした。本プロセスにて加工した試料を、セコエッチングと呼ばれるエッチャントで処理し、微分干渉顕微鏡にて表面観察を行うことで、FPDを評価した。

結晶欠陥は種々の結晶育成速度にて行い、個数を密度として換算した結果を図III-2-(イ)-E-8に示す。



図III-2-(イ)-E-8 結晶育成速度とFPDの関係

結果、赤外線FZ法にて育成された単結晶には、FPDは一切確認されず、 0 個/cm³であることを確認した。

1-2-6. 転位

従来のCZ法、ならびに高周波FZ法によるシリコン単結晶育成においてはダッシュ法と呼ばれるネッキング手法を用いて無転位単結晶を製造している。この方法は細い結晶を成長させることにより種子結晶と原料棒を接合した際に導入される転位を外側に誘導して排除し無転位化する手法である。本赤外線FZ法においても、ダッシュ法の導入によりφ65mmまでの単結晶にて無転位化 (0 個/cm²) が可能となった (図III-2-(イ)-E-9)。

なお、転位の評価は選択エッチング法によるエッチピット観察、及びX線トポグラフ法により行った (図III-2-(イ)-E-10)。また、φ130mm品が得られているネッキングレス法では転位密度 $1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8$ 個/cm²であることを確認した。



図III-2-(イ)-E-9 実際のネッキング品



図III-2-(イ)-E-10 X線トポグラフ像

1-2-7. 酸素成分濃度および炭素成分濃度

育成したシリコン単結晶について、フーリエ変換赤外分光法により各結晶部位での酸素成分濃度、炭素成分濃度分析を実施した。結果、双方ともに濃度は検出されず測定装置の検出限界値以下であり、最終目標を達成していることを確認した。(検出限界値：酸素成分濃度 $< 2.0 \times 10^{16} \text{ atoms/cm}^3$ 、炭素成分濃度 $< 1.0 \times 10^{16} \text{ atoms/cm}^3$)

また、数値の更なる定量化として、低温フーリエ変換赤外分光法を用い濃度を定量化した結果を表Ⅲ-2-(イ)-E-2に記載する。結果、酸素成分濃度、炭素成分濃度ともに最終目標を大幅に下回る数値を有していることが確認できた。

以上より、本研究開発で試作した赤外線単結晶製造装置は酸素成分濃度、および炭素成分濃度を低濃度とする高純度単結晶育成が可能であることを実証した。

表Ⅲ-2-(イ)-E-2 低温FT-IR

(Unit : atoms/cm³)

サンプル	酸素成分濃度	炭素成分濃度
赤外線FZ品	6.9×10^{13}	1.2×10^{15}

(Bruker製IFS-66v/s)

2. 実用化・事業化見通し

シリコン単結晶を用いた太陽電池について、目下のところ最も効率が低いとされているセルはリンを添加したN型シリコン単結晶とアモルファスシリコンを併せたHIT型に電極を裏側にのみ配置したバックコンタクト方式を組み合わせたHBC型と呼ばれる方式であり、これにはN型単結晶基板が必要とされている。

また、太陽電池として使用される素材はシリコン結晶以外にもあるが、依然としてシリコン単結晶は高い占有率を示しており将来に涉って主要な基材であると言われている。市場規模としても拡大の一途を辿ると期待されている。それでも太陽電池の発電コストは依然として高いのが現状でありさらなるコスト削減策が求められている。従って、安価で高性能なシリコン単結晶基板製造方法の確立は極めて重要な課題であり、本研究開発の成果はこのようなニーズに合致したものである。

従来のCZ法、もしくはキャスト法は一方向凝固法と呼ばれる方法に属しており、これらの方法でリンを添加した結晶を育成するとリンの分配係数は0.35であり、得られた単結晶中のリン濃度は成長に伴って急激に変化するため、最適なリン濃度(比抵抗値)品のみを使用すると製品の歩留まりが低く、製造コストが極めて高額となる。そこで製造コストを下げるために比抵抗値範囲を広げて使用しているのが現状である。さらには使用する石英ルツボから固溶する酸化ケイ素による影響(酸素析出、酸化励起積層欠陥)や結晶中に内在する結晶欠陥(COP、転位)により性能劣化を招いているのが現状である。他方、高周波FZ法では原理的には均質組成の単結晶を育成可能であるが、特別に調整された高価なポリシリコン原料棒が必要であり、コスト的に安価に製造することは困難である。

本研究開発において大型赤外線単結晶製造装置で育成された直径130mmの単結晶では、現在までに得られている比抵抗値、ライフタイム値、転位、結晶欠陥、酸素および炭素成分濃度は目標値を大幅に超過達成しており、本赤外線FZ法で現状のCZ法、ならびに一方向凝固法の結晶が抱える問題を解決できる高品質単結晶が製造可能であることが実証された。また、太陽電池性能としての特性を示す解析についても、現在連携先である豊田工業大学、明治大学、九州大学に協力をいただき評価を進めており、具体的な特性値も明確化できる予定である。

本赤外線FZ法ではルツボなどの消耗品が不要であり、必要電力量も半分以下と推定されるので製造コストは大幅に低くなる上に最適組成で均質組成の高品質単結晶が製造可能であることが実証された。従って、従来法よりも遥かに高品質品を安価に製造、販売することが可能であり実用化の可能性は極めて高い。

なお、現在までに育成できているN型シリコン単結晶は直径が130mmに止まっているが、本研究開発では直径220mmの大口径化に対する技術的な課題はクリアにされており、赤外線の照射方向、分布制御などの要素技術を最適化することにより達成は可能であると確信している。また、並行して粒状多結晶シリコンによる新たな原料供給法の検討も開始し、最終目標の直径220mm向けて万全体制での研究を進めている。

3. 波及効果

シリコンは多くの単結晶材料の中でも最も市場規模の大きい素材であり太陽電池産業以外にもLSI用、パワーデバイス用など多岐な分野において多用されている。他に光通信分野、医療機器分野、など多くの産業分野でさまざまな単結晶材料が利用されているが主な製法は引上法（CZ法）である。しかしシリコン単結晶育成の例でも示したように引上法はルツボを使用して一方向凝固法により単結晶を得る方法であるため、ルツボから不純物が製品中に混入してしまう他、添加物濃度を均質にできない本源的な欠点がある。

赤外線FZ法はルツボを使用しないため安価に高純度の単結晶製造が可能でありかつ添加物濃度を最適組成で均質化できる方法であるが従来は育成可能な最大直径がせいぜい30mm程度とされていた。本研究開発ではすでに直径130mm品の合成に成功しており、更には新たな原料供給手段となる粒状原料供給方式の技術確立も進めており、直径220mm品の合成法もまもなく確立されると予測される。このことはシリコン以外の多くの単結晶材料製造法への適用が可能となることであり、極めて大きな波及効果が期待される。

4. 今後の展開

本赤外線FZ法は世界的にも全く新しい大型単結晶製造法であり、基本特許は株式会社クリスタルシステムが国内外において取得している（日本、米国、ヨーロッパ、中国、韓国）。それでも基本特許以外に多くのノウハウを内包しており、知的所有権の海外への流出を抑止するためにも当面は装置の外販を行わず、シリコン単結晶材料のみの製造、販売を想定している。

尚、事業化に際しては製造工場の新設のみではなく、既存の半導体工場を活用して早期の生産規模拡大を図ることも検討する。

さらには本研究開発事業で開発した大型赤外線FZ法はシリコン以外の光材料、蛍光体材料などの単結晶製造にも最適な方法でありこれらの産業への普及についても積極的に推進していく。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	2	0	2 件
研究発表・講演（うち国際会議）	0	1	0	1 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(株)クリスタルシステム	特願 2016-128546	国内	2016/6/29	出願	単結晶製造装置 および製造方法	進藤勇
2	(株)クリスタルシステム	特願 2016-148306	国内	2016/7/28	出願	単結晶製造装置	進藤勇

【研究発表・講演】

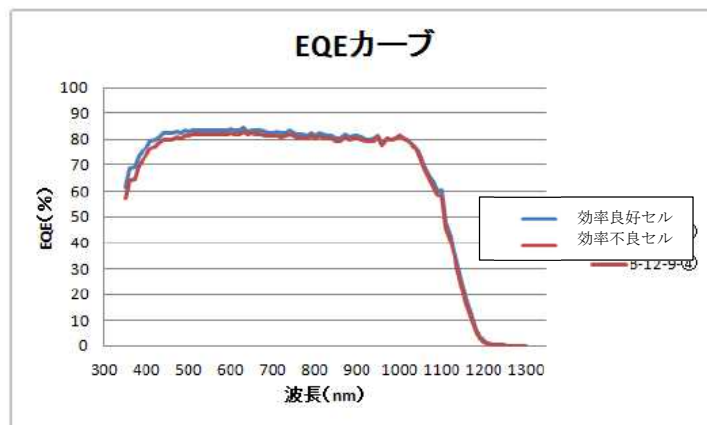
番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	佐藤剛	(株)クリスタルシステム	赤外線 F Z 法による高品質低コストシリコン単結晶の開発	平成 28 年度 N E D O 新エネルギー成果報告会	2016/10/31

F 高発電効率・低コスト太陽電池スライスプロセスの加工技術構築 (コマツNTC株式会社)

1. 成果詳細

①結晶シリコン太陽電池の発電効率向上

発電効率向上のため、本プロジェクトの連携先である豊田工業大学の太陽電池セル試作品で確認された、図Ⅲ-5-(イ)-F-1のような短波長側の外部量子効率（EQE：External Quantum Efficiency）が悪化している効率不良セルについて、不良プロセス特定のための各種解析を実施した。



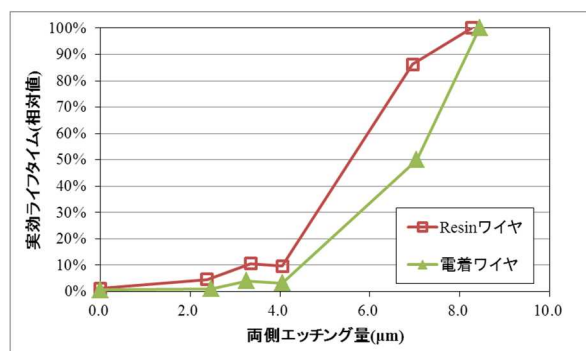
図Ⅲ-5-(イ)-F-1 試作セルの外部量子効率比較

その結果、連携大学である明治大学が有する UV-PL イメージング解析技術により、ウェーハ外周部にワイヤソー起因であるダメージが影響し、外部量子効率を悪化させていることを発見した。(図Ⅲ-5-(イ)-F-2) 加えて、ウェーハ形状精度にも優劣があることを確認した。よって、ウェーハスライスプロセスにて生じるマクロ/ミクロの問題であることを明らかにした。



図Ⅲ-5-(イ)-F-2 試作セル分光感度マッピングおよび PL イメージングでの評価例

加えて、スライスプロセスで生じるウェーハ表面のダメージが及ぼす影響を明確化するため、スライス後のウェーハをフッ硝酸にてエッチングし、エッチング前後の重量換算におけるウェーハ除去量と実効ライフタイムの相関を測定することにより実験的に求めた。その結果、回復までの傾きに差があるものの、使用するワイヤ種に関わらず、実効ライフタイムが回復するエッチング量は、両面で 9μm 以上必要ことがわかった。(図Ⅲ-5-(イ)-F-3)



図Ⅲ-5-(イ)-F-3 エッチング量と実効ライフタイム回復率 (相対値)

②結晶シリコン太陽電池の製造コスト低減

1) シリコンウェーハの薄板化

結晶シリコン太陽電池の基板となるシリコンウェーハを薄板化し、材料歩留りを向上させることで、製造コストの低減が可能となる。そのため、シリコンウェーハの薄板化は発電コストの削減に寄与することができる。ワイヤソーによるスライスプロセスにおいて、シリコンウェーハの薄板化を行うには、ワイヤソー主要部品のメインローラと呼ばれる多段溝ピッチの狭小化が必要となる。そこで、その溝加工技術構築に取り組み、切断ピッチ 0.15mm までのマルチワイヤ駆動が可能となった。また、これまでの試験により、ウェーハ厚さ・カーフロス共に 75 μm となるスライス技術構築に必要な方策を得た。(図 III-5-(イ)-F-4)。

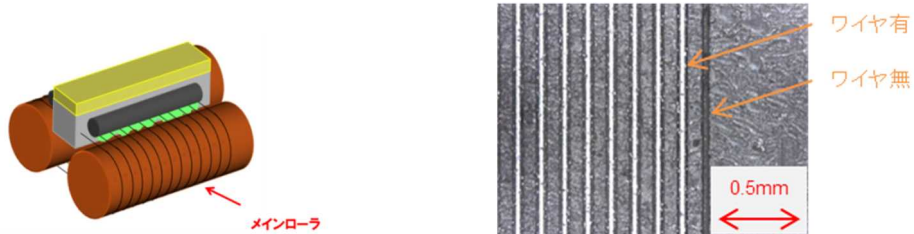


図 III-5-(イ)-F-4 ワイヤソー概念図と切断ピッチ 0.15mm のワイヤ保持状態

加えて、連携先となる(国研)産業技術総合研究所が有する太陽電池セルおよびモジュール製造ラインにて、セル厚さ 100 μm の評価を完了。厚さ 75 μm 級太陽電池を具現化する方針を明らかにした。

一方、ウェーハの薄板化に関しては、太陽電池セルの発電効率が低下することが考えられる。すなわち、薄板スライス技術による製造コスト削減を行ったとしても、太陽電池の発電効率低下が影響し、結果として発電コストの削減が達成できない可能性がある。よって、薄板基板を用いた太陽電池性能への影響を評価することも重要となる。この薄板基板による太陽電池性能への影響は、(国研)産業技術総合研究所にて評価した。その結果、光吸収性は、図 III-5-(イ)-F-5 に示すように理想モデルにほぼ対応した特性が得られた。また、パッシベーション後の implied Voc においても、薄板化による向上傾向が確認された。(図 III-5-(イ)-F-6)。

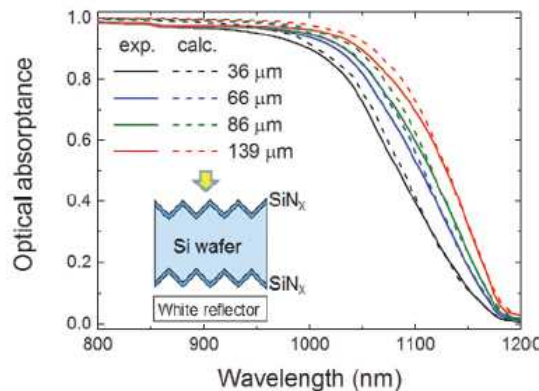


図 III-5-(イ)-F-5 模擬太陽電池の光吸収特性

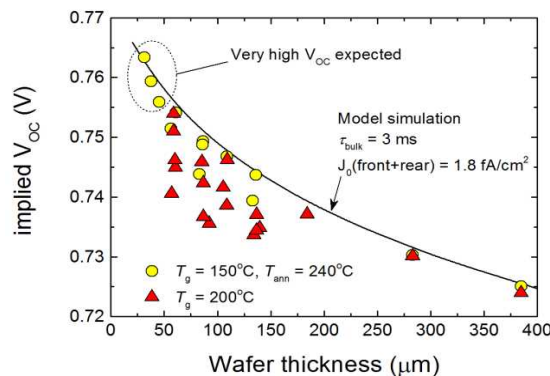
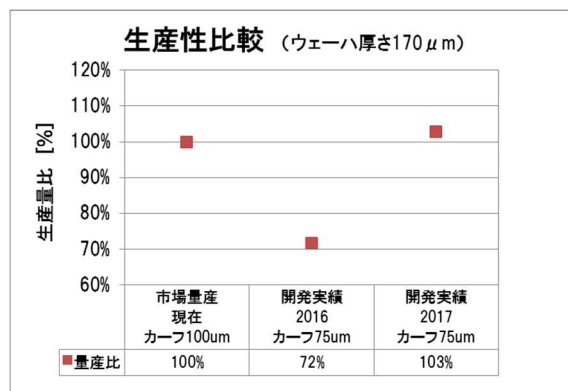


図 III-5-(イ)-F-6 パッシベーション後の implied Voc

2) 固定砥粒ワイヤの細線化によるカーフロス極小化

結晶シリコン太陽電池の製造コスト低減のため、スライス時の切り代（カーフロス）を極小化する固定砥粒ワイヤの細線化に関し、カーフロス 75 μm （芯線径 ϕ 60 μm ）の固定砥粒ワイヤを使用した加工条件の最適化を実施した。その結果、市場量産条件と同等の加工が可能となる切断条件を確立した（図Ⅲ-5-(イ)-F-7）。なお、本加工技術開発の結果、シリコン結晶材料費を除いたスライスコストは、18.8円/枚を達成した。（自社試算）

さらには、最終目標となるカーフロス 60 μm （芯線径 50 μm ）の先行評価も実施した。芯線の細線化に伴いワイヤの破断張力は減少するため、ワイヤ走行時の張力変動抑制や低張力での加工条件確立が必要となる。そのスライス検証において、一般精度を満足する結果が得られた。



図Ⅲ-5-(イ)-F-7 ワイヤソー生産性比較

2. 実用化・事業化見通し

2009年以降より固定砥粒用マルチワイヤソーを商品化し事業化している当社のマーケットシェアは、廉価版ワイヤソーの市場投入により価格競争に晒され、急激にシェアを奪われつつある。しかし、本開発によって得られた極細固定砥粒ワイヤ加工技術は優位性を確保しており、その得られた技術を装置へ展開することにより、廉価版ワイヤソーとの差別化が可能となりシェア回復が見込まれる。

また、連携先との技術開発課題である発電効率向上加工技術や薄板加工技術による太陽電池試作実績は、到底後進メーカーが達成できない技術と位置づけることができ、現状装置販売価格の値戻しやシェア奪還に加え、圧倒的に競争力を持つ新機種投入も計画している。

3. 波及効果

結晶シリコン太陽電池のスライスプロセスに必要な不可欠な固定砥粒ワイヤにおいても、これまで日本国産ワイヤが圧倒的なシェアを有していた。しかし、現在ではワイヤソー同様に廉価版ワイヤが市場投入されており、そのシェアを徐々に奪われつつある。本開発は、ワイヤ仕様の最適化も加工技術の構築の一環として行っており、国内ワイヤメーカーの技術力向上とマーケットシェア確保を担っている。

また、これまで量産化への移行が進まなかった超薄型結晶シリコン太陽電池の実現においても、アカデミアとの連携により明らかにしてきたことで、実現できることが示唆できている。その具現化においては、搬送などの付帯技術も改善が必須であり、産業の活性化につながるものと推察する。

4. 今後の展開

現在、20.8%程度となっている連携大学試作セルの発電効率向上へのスライス技術による貢献と、各諸条件の最適化による薄板スライス技術構築を達成し、極薄ウェーハのセルおよびモジュール試作を繰り返し、問題点の把握と改善のプロセスを経て、最終目標となる加工技術構築を完了させる。また、その超薄板太陽電池の事業化を推進するため、各セルメーカーへの提案を行う。

細線化による省カーフロス削減については、目標達成の前倒しや更なる価値創造となる技術構築を行う。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	2	0	2 件
研究発表・講演（うち国際会議）	1	4(2)	3(3)	8 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	コマツ NTC 株式会社	特願 2017-013394	国内	2017/1/27	出願	ワイヤソー及びワイヤソーによるワークの切断加工方法	河津知之 他
2	コマツ NTC 株式会社	特願 2017-045111	国内	2017/3/9	出願	ワイヤソー及びワイヤソーによるワークの切断加工方法	河津知之 他

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	K. Nakamura A. Tanizaki K. Okamoto Y. Kawamoto Y. Ohshita	Meiji University Komatsu NTC Ltd. Mitsuboshi Diamond. Industrial Co. Noritake Co. Toyota Technological Institute	Mono Crystalline Si PERC using Less Than 100 μ m-thick Wafer by MWS Slicing	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/20
2	鈴木 涼太 小島 拓人 木下 晃輔 河津 知之 中村 京太郎 大下 祥雄 小椋 厚志	明治大理工 明治大理工 明治大理工 コマツ NTC 株式会社 明治大理工 豊田工大 明治大理工	PL イメージングを用いた結晶シリコン太陽電池のスライスダメージ評価	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（朱鷺メッセ）	2016/9/15
3	鈴木 涼太 小島 拓人 木下 晃輔 河津 知之 中村 京太郎 大下 祥雄 小椋 厚志	明治大理工 明治大理工 明治大理工 コマツ NTC 株式会社 明治大理工 豊田工大 明治大理工	Evaluation of Saw Damages with Diamond-Coated Wire in Crystalline Silicon Solar Cell by Photoluminescence Imaging	PVSEC-26, Singapore	2016/10/26
4	Kyotaro Nakamura1, Tomoyuki Kawatsu2, Kazuo Muramatsu3	1Meiji University, 2Komatsu NTC Ltd., 3NAMICS CORPORATION, 4Toyota Technological	P-type Bi-facial PERT Solar Cell using Less Than 100 μ m thick Cz Wafer and Cu Paste	PVSEC-26, Singapore	2016/10/27

	and Yoshio Ohshita ⁴	Institute			
5	齋均 ¹ , 海汐寛史 ¹ , 布村正太 ¹ , 松井卓矢 ¹ , 河津知之 ² , 高遠秀尚 ¹ , 松原浩司 ¹	産総研, コマツ NTC	極薄ウェーハを用いた a-Si:H/c-Si ヘテロ接 合太陽電池の検討	第 64 回応用物 理学会春季学術 講演会	2017/3/17
6	Yoshio Ohshita ¹ , Takuto Kojima ² , Ryota Suzuki ² , Kosuke Kinoshita ² , Tomoyuki Kawatsu ³ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Ogura ²	Toyota Technological Institute, Meiji University, Komatsu NTC Ltd.	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	2017/6/25
7	H. Sai ¹ , H. Umishio ¹ , T. Matsui ¹ , S. Nunomura ¹ , H. Takato ¹ , T. Kawatsu ² , and K. matsubara ¹	1 産総研, 2 コマツ NTC	Potential of a a- Si:H/c-Si heterojunction solar cells with very thin wafers	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017/6/28
8	Yoshio Ohshita ¹ , Takuto Kojima ² , Ryota Suzuki ² , Kosuke Kinoshita ² , Tomoyuki Kawatsu ³ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Ogura ²	1Toyota Technological Institute, Nagoya, Japan /2Meiji University, Kawasaki, Japan /3Komatsu NTC Ltd., Nanto, Japan	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), June 25-30, 2017, Washington D. C, U. S.	2017/6/29

G 太陽電池用原料品質の最適化及び結晶欠陥の評価技術の開発・制御 (株式会社トクヤマ)

1. 成果詳細

1-1. 不純物および欠陥の影響把握と制御化

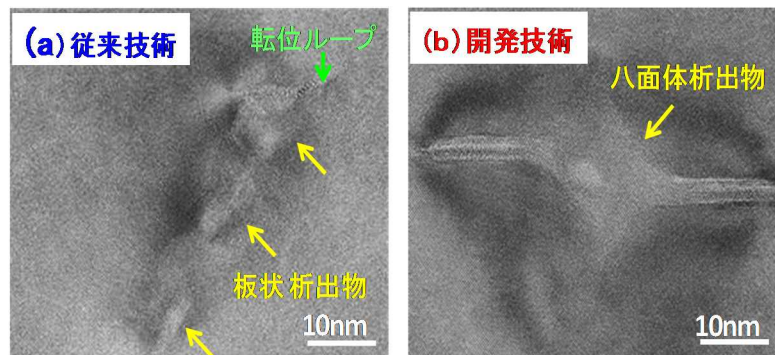
1-1-1. 金属不純物の影響

原料ポリシリコン中の金属不純物の太陽電池性能に及ぼす影響が非常に小さいことを確認した。トクヤマグループ会社のシーメンズ法により製造したポリシリコン中の金属不純物の濃度は数 ppbw 未満であり、また金属不純物の偏析係数が 10^{-4} ~ 10^{-6} のオーダーであることから、原料ポリシリコン由来の金属不純物が単結晶シリコン中に取り込まれる量は極めて微量で、ライフタイム等の結晶品質には影響を及ぼさなかった。

単結晶中に含まれる金属不純物は、その殆どは単結晶インゴット製造工程における汚染である。単結晶製造工程で故意汚染した単結晶を用いて太陽電池試作を行ない、拡散定数の大きい金属は太陽電池製造のリン拡散工程でゲッターリングされ、変換効率への影響の小さいことを確認した。

1-1-2. 炭素不純物の影響とキラ欠陥の制御

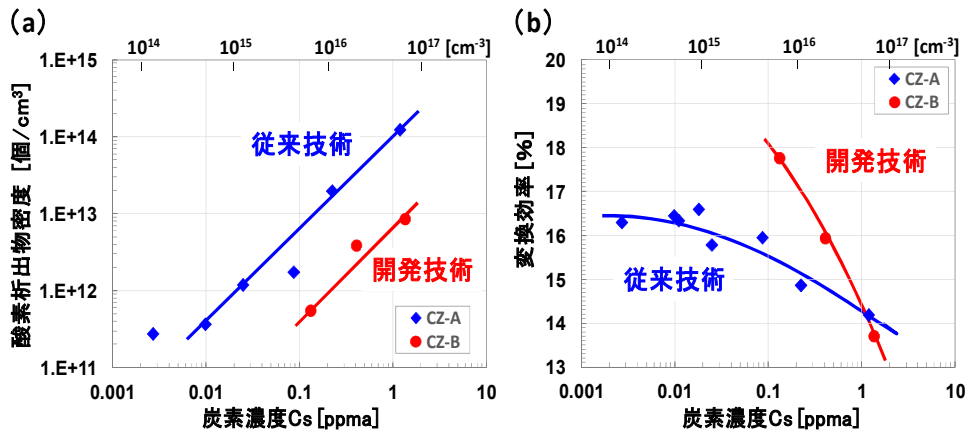
炭素を核に成長する酸素析出物がキラ欠陥となり、結晶のライフタイムや太陽電池の変換効率を低下させた。太陽電池製造の熱プロセスを経ることで、単結晶シリコン基板中に酸素析出物が成長し、転位等の二次的な欠陥が発生することを高分解能透過電子顕微鏡により観察した。半導体分野では、シリコン基板に高温・長時間の熱処理で 100~1000nm のサイズに成長した酸素析出物を観察解析しているが、本共同研究では、実際の太陽電池セル中に短時間の熱プロセスで成長した 7~30nm 程度の微小な析出初期の酸素析出物の形態を観察した。



図Ⅲ-2-(イ)-G-1 酸素析出物の透過電子顕微鏡像 (2,000,000倍)

従来の結晶成長技術による単結晶基板中に成長した酸素析出物 (図Ⅲ-2-(イ)-G-1(a)) は、薄い板状で、歪が大きく多くの転位を伴うことで変換効率が低下した。一方、研究成果の開発した結晶成長技術では、アズグロウン結晶中に形成する析出核の構造を制御することにより、基板中に成長した酸素析出物の形態は八面体構造となった (図Ⅲ-2-(イ)-G-1(b))。

その結果、転位の発生が非常に少なく、ライフタイムや変換効率の高い単結晶基板が得られた。また開発技術による単結晶基板では、炭素濃度に対する酸素析出物の密度も従来技術に比べて約 1桁低かった (図Ⅲ-2-(イ)-G-2(a))。インゴットのトップ部の同一部位 (酸素濃度が高く、酸素析出の影響の顕著な部位) から取得した基板でセル評価した n 型両面受光セルの変換効率は、開発技術による基板は従来技術の基板に比べて高く、結晶中の炭素濃度が低くなるほどその効果が大きかった (図Ⅲ-2-(イ)-G-2(b))。



図III-2-(イ)-G-2 (a)酸素析出物密度および(b)変換効率と炭素濃度の関係

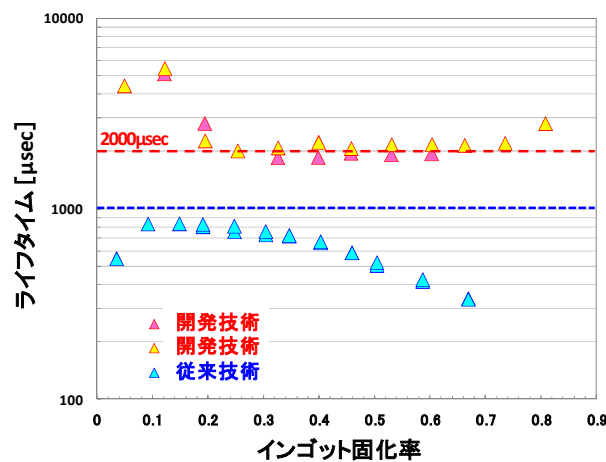
太陽電池製造の熱プロセスの温度域（～1000℃）で成長する酸素析出物の形態は一般に板状であり、八面体の酸素析出物は 1100℃以上の高温で成長すると言われている。研究成果の開発した結晶成長は、通常の板状析出物が成長する熱プロセスにおいても八面体析出物が成長するように、結晶成長工程において析出核の構造を制御できていると考えている。このような実際の太陽電池のシリコン基板内に成長した酸素析出物の形態を解析した例はこれまでに無かった。

1-2. ライフタイム目標値および下限値の達成

1-2-1. ライフタイム目標値 1000 μsec

市場で取引される単結晶インゴットや基板のライフタイム値は、太陽電池製造の熱プロセスを経ていないアズグロウン結晶のライフタイム値である。一般的なn型単結晶のライフタイムは100μsec以上と言われているが、ライフタイムは比抵抗、すなわちドーパント濃度によっても変化する。CZ法単結晶の場合、結晶成長中に偏析によってドーパント濃度が変化するため、インゴットのトップ～ボトムでも変動がある。本研究では、インゴットのトップ～ボトムの比抵抗が3～1Ω・cmの範囲の比較的低抵抗の結晶を作製して評価した。

熱処理を受けていないアズグロウンの単結晶インゴットのライフタイム目標値を1000μsec以上とした。一般的な太陽電池用ポリシリコンを原料として従来技術で成長させたインゴット（トップ部の炭素濃度0.066ppma=3.3×10¹⁵cm⁻³）の長手方向のライフタイム分布は300～900μsecであったが、炭素濃度を低減したポリシリコン原料を使用し、開発した成長技術で得られたインゴット（トップ部の炭素濃度0.012ppma=6.0×10¹⁴cm⁻³）のライフタイムは全長にわたって2000μsec（2msec）以上であり、ライフタイム目標値の1000μsec以上を達成した（図III-2-(イ)-G-3）。

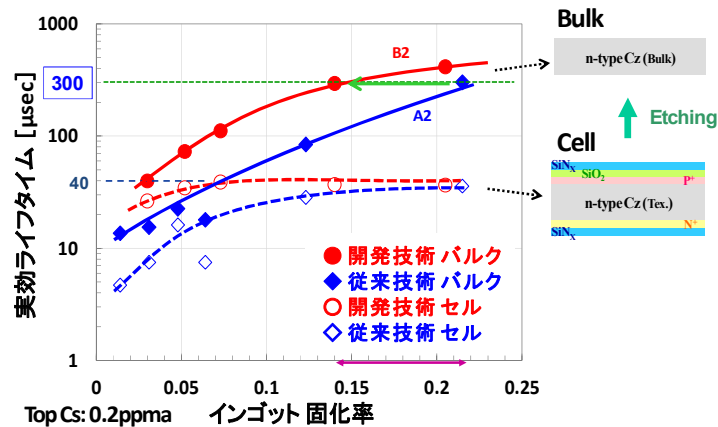


図III-2-(イ)-G-3 単結晶インゴット全長のライフタイム分布

1-2-2. ライフタイム下限値 300 μ sec 以上

太陽電池製造の熱プロセスを経ると基板のライフタイムは大きく変化した。特に結晶中の酸素濃度が高く、結晶成長中に CZ 炉内で徐冷されて酸素析出核の多いインゴットのトップ側は熱プロセス後のライフタイム低下が著しかった。

現状の太陽電池では、セルの実効ライフタイムはセル設計で決まる限界値で頭打ちするが（図Ⅲ-2-(イ)-G-4 の破線）、セル表面の拡散層、パッシベーション層をエッチングにより除去した基板の結晶バルクのライフタイムはもっと高いことがわかった（図Ⅲ-2-(イ)-G-4 の実線）。本研究で評価した太陽電池セルの限界値は約 40 μ sec であり、熱プロセス後の基板のライフタイムが 100 μ sec 以上であれば、セルの実効ライフタイムは限界値 40 μ sec に達することがわかった。すなわち、セルの実効ライフタイムが限界値になる基板の熱プロセス後のライフタイムの下限値が 100 μ sec である。基板のライフタイムは、熱プロセス後にこの下限値以上であればよい。言い換えれば、同じセル設計ではライフタイムの高い基板を使用しても、変換効率は一定値以上に高くなることはない。このような単結晶の品質（ライフタイム）と太陽電池性能（変換効率）との関係を明確にすることができた。このような関係から、現在の太陽電池製造においては、単結晶インゴットのライフタイムの極端に低い部位を除いて使用すれば、ライフタイムにばらつきがあっても、変換効率が一定の安定した太陽電池を製造することができる。



図Ⅲ-2-(イ)-G-4 熱プロセス後の実効ライフタイム（バルクとセルの比較）

また図Ⅲ-2-(イ)-G-4 は、太陽電池技術が向上して変換効率が向上してくれば、すなわち、上記のセルの限界値が高くなれば、基板の結晶品質の差が顕在化してくることを示唆している。将来の変換効率の向上を考慮して、必要な基板のライフタイム下限値を 300 μ sec と設定した。この場合、従来技術で成長させたインゴットではトップ側の固化率 0.210 以上の部位が良品となるが、開発した結晶成長技術で得られたインゴットでは固化率 0.135 以上の部位となり、300 μ sec 以上の直胴良品部が長くなる（図Ⅲ-2-(イ)-G-4 の実線 A2→B2）。本実験結果では、直胴長を固化率 0.86 まで成長させたインゴットにおいて、直胴良品部が固化率 0.210 以上（すなわち、直胴良品部 0.210~0.86）から、固化率 0.135 以上（0.135~0.86）に改善され、固化率で 0.075、直胴良品部の歩留まりとして 11.5% 向上した。

図Ⅲ-2-(イ)-G-4 は、トップ部の炭素濃度が 0.2ppma と比較的高いインゴットの結果であるが、開発技術により直胴部の良品歩留まりが向上してコストダウンに効果のあることが証明された。特に、インゴット引上げ回数とともに偏析によって原料融液中の炭素濃度が濃縮されるマルチプリング法においては、開発した結晶成長技術の適用が非常に有効である。また開発した結晶成長技術では、結晶中の炭素濃度が低くなるほど、高ライフタイムの単結晶を得ることができる（図Ⅲ-2-(イ)-G-2(b)）。したがって、より高い変換効率を目指した太陽電池開発のための基板としても期待することができる。

1-3. 2020 年発電コスト目標 14 円/kWh に対する貢献度の試算

豊田工業大学と明治大学による 2020 年発電コスト目標 14 円/kWh に至るコスト試算では、NEDO プロジェクトにおける結晶成長、スライス加工、セルプロセスの各技術開発成果を活用することによってモジュール製造原価を 23.4 円/W、発電コストを 4.0 円/kWh 低減する。さらに、BOS コストの低減および設備利用率向上を織り込むことにより、発電コスト 14 円/kWh 達成が可能と見込んでいる。本コスト試算プログラムを使用して、研究成果の 2020 年発電コスト目標 14 円/kWh に対する貢献度を試算した。

1-3-1. インゴットのライフタイム向上

図Ⅲ-2-(イ)-G-3 に示すように、従来技術で成長させたインゴットのライフタイム 300~900 μ sec に対し、開発した技術によるインゴットのライフタイムは全長で 2000 μ sec 以上に向上した。ライフタイムの向上がセルの変換効率にどのくらい寄与するのかを、PC1D デバイスシミュレーションにより n 型両面受光セルとして見積もった。従来技術のライフタイム 600 μ sec で得られる変換効率が 20.5%であるのに対して、開発技術によるライフタイム 2000 μ sec では 20.8%、変換効率で 0.3%向上する。上記コスト試算プログラムによれば、2015 年見積りを基準に、変換効率が 20.5%から 20.8%に向上した場合、モジュール製造原価で 0.9 円/W、発電コストで 0.31 円/kWh のコスト低減効果を見込むことができる。

1-3-2. インゴットの良品歩留まり向上

図Ⅲ-2-(イ)-G-4 に示すように、開発した結晶成長技術により、セル化の熱プロセス後のウェハのライフタイムが従来技術よりも高くなる。セルプロセスの技術開発により変換効率が向上し、熱プロセス後のライフタイムが 300 μ sec 以上のウェハが必要になったと仮定する。本実験の結果では、従来技術では固化率 0.210 未満のインゴットトップ側は不良、開発技術によれば不良部が 0.135 未満に低減（直胴良品部の歩留まりが 11.5%向上）した。このインゴット直胴歩留りの改善 11.5%を、コスト試算プログラムを用いて試算した結果、モジュール製造原価で 1.0 円/W、発電コストで 0.07 円/kWh のコスト低減効果を見込むことができる。また、インゴット原価を 199 円/kg、ウェハ価格を 4.0 円/枚低減する効果を見込むことができる。

尚、試算においては 2015 年見積りのうちインゴット収率のみを変更し、セルの変換効率は 20%のままとした。実際には、ライフタイムの高いウェハが要求されるのは、セルの変換効率が高くなった場合であるため、変換効率向上による発電コスト低減も見込むことができる。変換効率の向上は、材料コスト低減よりも発電コスト低減への寄与が大きいため、インゴット収率低下の影響を十分に吸収できる。

上記のインゴットのライフタイム向上分と、良品歩留まり向上分とを合わせると、モジュール製造原価を目標 23.4 円/W に対して 1.9 円/W、また、発電コストの目標 14 円/kWh のうち NEDO プロジェクトの技術開発分 4.0 円/kWh、さらに結晶成長技術開発による発電コスト低減 0.2 円/kWh の試算に対して、0.38 円/kWh 低減する効果を見込むことができる。

2. 実用化・事業化見通し

太陽電池性能に対する原料ポリシリコン、インゴットの品質を把握し、その課題を明確にすることができた。本研究開発の開始時には原料ポリシリコン、単結晶インゴット・基板、太陽電池セルの間の品質や性能の関係が不明確であったが、インゴット成長実験および太陽電池試作評価をとおして、それぞれの品質・性能の関係を明らかにすることができた。トクヤマのグループ会社で製造するポリシリコンの金属および炭素不純物に関する品質が、太陽電池性能に要求されるレベルを十分満足していることが確認できた。

変換効率の向上において、結晶品質の影響の大きいことを示唆する結果を得た。発電コスト 7 円/kWh の実現に資する技術開発目標は達成できなかったが、14 円/kWh の実現に資する技術の開発には成功した。トクヤマの太陽電池用ポリシリコン事業の譲渡、撤退により、開発した技術を用いた太陽電池用ポリシリコンの製品化は困難になった。

3. 波及効果

炭素と酸素析出物が重要な不純物・キラー欠陥である。単結晶インゴットの成長条件によって、太陽電池製造の熱プロセスで成長する酸素析出物の密度と形態が変化してライフタイムや変換効率に影響を及ぼす。透過電子顕微鏡観察により、10nm レベルの酸素析出物の析出初期状態の構造を捕え、その形態がライフタイムに影響を及ぼしていることを明らかにした。

現状の太陽電池ではその影響は未だ小さいものの、将来の変換効率向上において問題になるであろうことが示唆された。結晶成長において酸素析出の核を制御し、結晶品質の改良が可能であることを示した。

4. 今後の展開

トクヤマとして開発した技術を用いたポリシリコンの製品化は困難になったが、研究成果である酸素析出物の挙動や構造に関する知見、評価サンプルおよびデータ、開発した結晶成長技術による単結晶インゴットおよび基板は、本プロジェクトの連携先である、豊田工業大学、明治大学に引き継ぎ、酸素析出メカニズムの解明や高変換効率太陽電池の試作、研究に活用することで、発電コスト低減の

目標達成に寄与する。また、試作したインゴットおよび基板は、大学コンソーシアムの豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学へ提供した。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	1	1(1)	0	2件
論文	0	0	2	2件
研究発表・講演（うち国際会議）	3(1)	9(3)	1(1)	13件

(2017年6月30日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(株) トクヤマ	特願 2016 - 134375	国内	2016/7/6	出願	単結晶シリコン板状体	正田勲 他
2	(株) トクヤマ	PCT/JP2017/024235	PCT	2017/6/30	出願	単結晶シリコン板状体およびその製造方法	正田勲 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	T. Tachibana, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, T. Shimoda, I. Masada, E. Nishijima	AIST, Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effects of thermal budget in n-type bifacial solar cell fabrication processes on effective lifetime of crystalline silicon	American Institute of Physics Advances, 7, 045111 (2017)	有	2017/4/12
2	H. Kiuchi, M. Tajima, F. Higuchi, A. Ogura, N. Iida, S. Tachibana, I. Masada, E. Nishijima	Meiji University, Tokuyama Corp.	Determination of low carbon concentration in Czochralski-grown Si for solar cells by luminescence activation using electron Irradiation	Japanese Journal of Applied Physics Rapid Communication Vol. 56, No. 7, 070305 (2017)	有	2017/6/9

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	T. Tachibana, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, T. Shimoda, I. Masada, N. Hayashi, E. Nishijima	AIST, Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	The effects of annealing processes on effective lifetime in n-type crystalline silicon	31st European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC-2015)	2015/9/14~9/16

2	小椋厚志, 小島拓人, 中村京太郎, 田島道夫, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橘昇二	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	結晶シリコン太陽電池におけるウェハとプロセスの相性	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/ 3/19~ 3/22
3	小島拓人, 鈴木涼太, 小椋厚志, 立花福久, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橘昇二	明治大学 産総研福島 豊田工業大学 トクヤマ	n型 CZ シリコンのキャリア寿命に対する熱処理による酸素析出の影響	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/ 3/19~ 3/22
4	T. Kojima, R. Suzuki, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, E. Nishijima, I. Masada, N. Iida, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Influence of Growth Conditions on Thermal Process Sensitivity for n-Type Cz Silicon	32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC-2016)	2016/6/20~6/24
5	正田勲, 橘昇二, 飯田伸仁, 西島英一, 小島拓人, 中村京太郎, 小椋厚志, 大下祥雄	トクヤマ 明治大学 豊田工業大学	単結晶シリコンの品質に及ぼす炭素と酸素析出の影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/ 9/13~ 9/16
6	小島拓人, 木下晃輔, 鈴木涼太, 中村京太郎, 小椋厚志, 立花福久, 大下祥雄, 西島英一, 正田勲, 飯田伸仁, 橘昇二	明治大学 産総研福島 豊田工業大学 トクヤマ	n型 CZ シリコン太陽電池のプロセス起因酸素析出に対する成長条件の影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/ 9/13~ 9/16
7	木内広達, 田島道夫, 樋口史仁, 小椋厚志, 飯田伸仁, 橘昇二, 正田勲, 西島英一	明治大学 トクヤマ	電子線照射発光活性化 PL 法による太陽電池用 CZ-Si 中の低濃度炭素の定量	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/ 9/13~ 9/16

8	T. Kojima, R. Suzuki, K. Kinoshita, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, E. Nishijima, I. Masada, N. Iida, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effects of carbon concentration and growth conditions lifetime degradation by oxygen precipitation in Cz silicon	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/ 24～ 10/28
9	H. Kiuchi, M. Tajima, F. Higuchi, A. Ogura, N. Iida, S. Tachibana, I. Masada E. Nishijima	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Determination of Low Carbon Concentration in CZ-Si for Solar Cells by Luminescence Activation Using Electron Irradiation	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials (JSPS Silicon Symp.)	2016/11/ 21～ 11/25
10	正田勲	トクヤマ	太陽電池用 CZ シリコンの 品質に及ぼす炭素と酸素析 出の影響	第 5 回パワーデ バイス用シリコ ンおよび関連半 導体材料に関する研究会	2017/ 2/22～ 2/23
11	木下晃輔, 小 島拓人, 鈴木 涼太, 小林弘 人, 大下祥 雄, 正田勲, 橘昇二, 小椋 厚志	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	赤外線トモグラフィによる太陽電池用 n 型 Cz-Si 中の酸素析出挙動の評価 - 炭素濃度と成長条件の影響 -	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会	2017/ 3/14～ 3/17
12	小島拓人, 木 下晃輔, 鈴木 涼太, 中村京 太郎, 小椋厚 志, 大下祥 雄, 正田勲, 橘昇二	明治大学 豊田工業大学 トクヤマ	TEM 像解析による太陽電池 用 n 型 Cz-Si 中の酸素析出 挙動の評価 - 炭素濃度と成長条件の影響 -	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会	2017/ 3/14～ 3/17
13	T. Kojima, R. Suzuki, K. Kinoshita, K. Nakamura, A. Ogura, Y. Ohshita, I. Masada, S. Tachibana	Meiji University, Toyota Technological Institute, Tokuyama Corp.	Effect of Carbon Concentration and Growth Conditions on Oxygen Precipitation Behavior in n-type Cz-Si	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (IEEE PVSC-44)	2017/6/2 5～6/30

表Ⅲ-2-(イ)-H-1 小面積セル、サブモジュール研究開発の成果

セル/モジュール	達成年	第1 バッファ	第2 バッファ	カリウム 処理	開口部面積 (cm ²)	η (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	測定機関
小面積セル	2014	ZOS	ZnO	無	0.519	20.9	39.9	686	76.5	FhG-ISE
	2015	CdS	ZnO	有	0.512	22.3	39.4	722	78.2	FhG-ISE
	2016	ZOS	ZMO	有	0.512	22.0	39.4	717	77.9	FhG-ISE
サブモジュール	2014	ZOS	ZnO	無	808	17.5	35.3	680	72.8	AIST
	2017	ZOS	ZMO	無	841	19.2	38.0	686	73.7	AIST
	2017	ZOS	ZMO	有	24.2	19.8	37.1	724	73.6	FhG-ISE

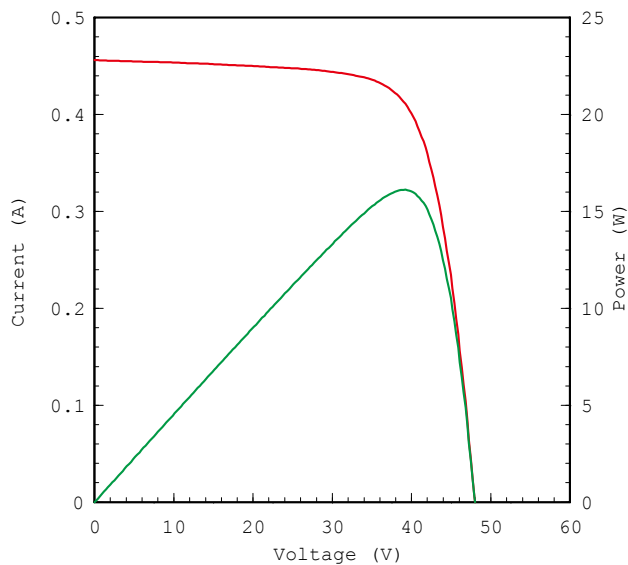
ZOS : Zn(O, S, OH)_x、ZMO : (Zn, Mg)O、FhG-ISE : フラウンホーファー研究機構太陽エネルギーシステム研究所、AIST : 産業技術総合研究所

b. 高性能小面積セルの研究開発

表Ⅲ-2-(イ)-H-1 に示すように、Cd フリー小面積セルにおいて変換効率を 20.9%から 22.0%へと高めることに成功した。このために用いた技術は(Zn, Mg)O (ZMO) 第 2 バッファ層の導入と光吸収層表面へのカリウム処理の適用である。まず、従来の ZnO 第 2 バッファ層をよりバンドギャップの広い ZMO へと置き換えることによって、窓層における透過光損失を低減した。さらに ZMO の Zn と Mg の固溶比を変えることによって伝導帯位置の制御が可能となり、CIS との間で最適な伝導帯接続状態を実現することによって開放電圧と曲線因子を向上させた。また、近年 CIS 光吸収層表面へのアルカリ金属処理が特性改善に有益なことが注目されており、本研究開発においてはカリウムを用いた独自の表面処理を開発した。これを用いることにより開放電圧を約 30mV 向上させることに成功した。これらの技術の適用により、Cd フリー小面積セルにおいて世界最高記録となる 22.0%の変換効率を達成した (2017 年 7 月現在)。

c. サブモジュール高性能化技術の研究開発

表Ⅲ-2-(イ)-H-1 に示すように、Cd フリー30cm 角サブモジュールにおいて開口部面積効率を 17.5%から 19.2%へと大幅に向上させることに成功し (図Ⅲ-2-(イ)-H-2)、さらに 7cm 角サブモジュールにおいては 19.8%を達成した。このために用いた技術の概要について図Ⅲ-2-(イ)-H-3 に示す。まず、20.9%Cd フリーセルに用いられた既開発技術をサブモジュール開発へと導入した。透明導電膜である ZnO:B (BZO) の高移動度化・高透過率化技術と光吸収層バンドプロファイル最適化技術の導入によって、主に光学的損失を大幅に低減することに成功した。さらに、上述の 22.0%Cd フリーセルに用いられた新規開発技術 (ZMO 第 2 バッファ層、カリウム処理) をサブモジュールに適用した。カリウム処理に用いる機器における基板サイズの制限により、カリウム処理は 30cm 角 CIS 基板を 7cm 角に切断した基板に対して行った。このため、カリウム処理は 30cm 角サブモジュールには適用されておらず、7cm 角サブモジュールのみに適用されている。2 つのサブモジュールはカリウム処理の有無と基板サイズ以外は基本的に同一のものである。これらの技術に加え、従来のサブモジュールからデッドエリアを削減することによって発電面積を拡大させた。このように、小面積セルにおける基礎研究によって開発された技術をサブモジュール開発へと移転させるとともに、サブモジュールの集積構造に特有の技術を改善することによって上述の成果を達成した。これらの成果はいずれも、Cd を含む CIS 太陽電池や CdTe 太陽電池も入れた薄膜系太陽電池技術全体のサブモジュールにおいて世界最高記録である (2017 年 7 月現在)。



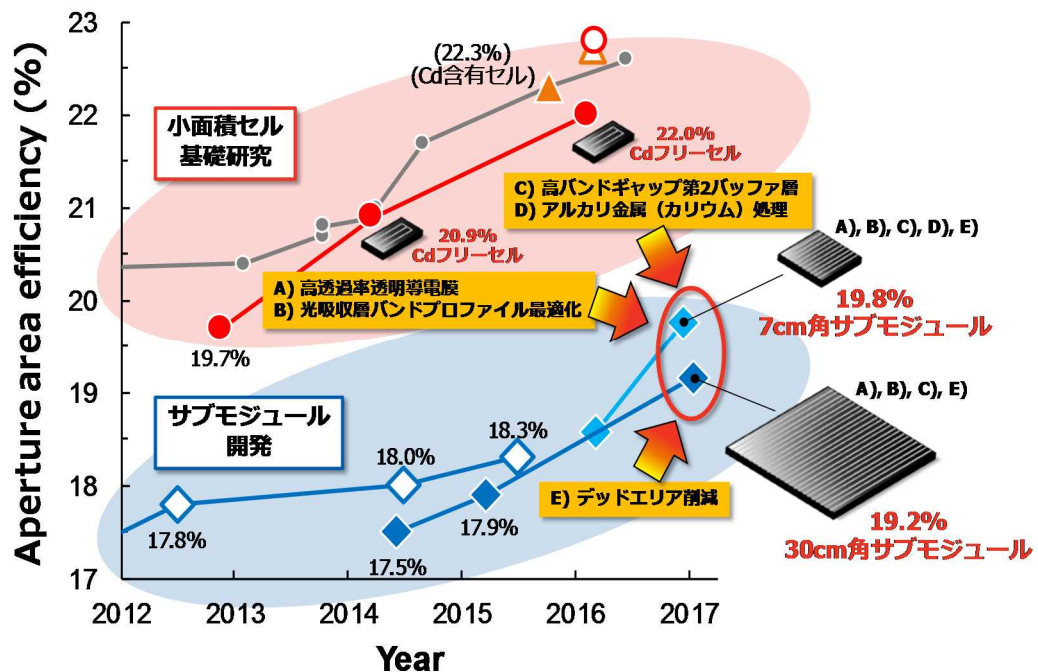
Sample No :
1G-2254
Repeat Times : 1

I_{sc} 0.456 A
V_{oc} 48.0 V
P_{max} 16.11 W
I_{pmax} 0.412 A
V_{pmax} 39.13 V
F.F. 73.7 %
Eff(da) 19.16 %
DTemp. 25.0 °C
MTemp. 25.0 °C
DIrr. 100.0 mW/cm²
MIrr. 100.1 mW/cm²

Ref. Device No
CSI21
Cal. Val. of Ref.
121.12 [mA at100mW/cm²]
Scan Mode
V_{oc} to I_{sc}



図Ⅲ-2-(イ)-H-2 Cdフリー30cm角 CIS 太陽電池サブモジュール開口部面積効率 19.2%の達成
(産業技術総合研究所による測定結果)



図Ⅲ-2-(イ)-H-3 CIS サブモジュール高性能化技術の概要

d. カリウム処理の効果

今回の変換効率の向上においてはカリウム処理が非常に重大な貢献をしている。さらなる高性能化技術開発のため、また量産モジュールへの適用へ向けて、その効果の理解が重要である。そのため、カリウム処理の効果を理解するためにいくつかの分析を行った。表Ⅲ-2-(イ)-H-2 に、カリウム処理有無の小面積セルの典型的なデバイス特性の比較を示す。我々が開発したカリウム処理は再現性良く開放電圧を約 30mV 向上させ、曲線因子も明らかに改善させる。Drive Level Capacitance Profiling (DLCP) 測定によってフリーキャリア密度 (N_{DL}) を測定すると、キャリア密度が明らかに増加していることが分かった。表Ⅲ-2-(イ)-H-2 の例におけるキャリア密度の増加は、キャリア

密度と開放電圧の関係から、約 13mV の開放電圧の増加に対応する。このことから、開放電圧の向上分のうち約半分はキャリア密度の増加によってもたらされることが明らかになった。また時間分解フォトルミネッセンス測定によって得られた少数キャリア寿命は 22ns から 58ns へと増加し、開放電圧の温度依存性から見積もった再結合の活性化エネルギーは約 20meV 向上していた。さらに、再結合分析により、ヘテロ接合界面、空乏層、擬中性領域のすべてにおいて再結合係数が減少していることが分かった。これらのことから、カリウム処理によって太陽電池デバイスにおける界面からバルクの全域にわたってキャリアの再結合が低減されていることが明らかになり、これが残り半分の開放電圧の向上分を説明すると考えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-H-2 カリウム処理がデバイス特性におよぼす効果の比較

Sample	η (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF (%)	N_{DL} (cm ⁻³)	R_0^i (cm ² s ⁻¹)	R_0^d (cm ² s ⁻¹)	R_0^b (cm ² s ⁻¹)
Ref.	19.2	39.3	666	73.4	1.8×10^{15}	5.9×10^5	1.8×10^{11}	1.6×10^6
K-treated	20.8	39.4	696	75.8	3.0×10^{15}	1.9×10^5	7.9×10^{10}	4.8×10^5

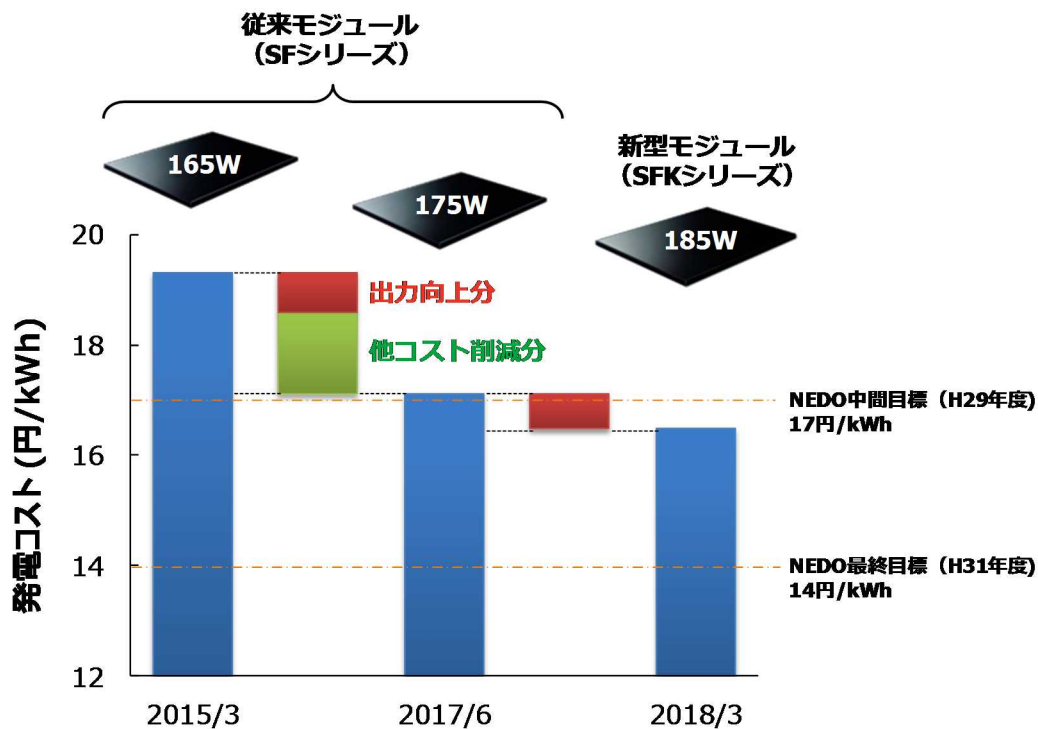
N_{DL} : DLCP 測定によって得られたキャリア密度、 R_0^i, R_0^d, R_0^b : それぞれ、ヘテロ接合界面、空乏層、擬中性領域における再結合係数

e. 量産モジュールの高性能化

2017年6月21日にソーラーフロンティアは出力および機能性を大幅に向上させた新型 CIS 太陽電池モジュール「SFK シリーズ」の販売開始をリリースした。モジュール出力は従来モジュール「SF シリーズ」の 165W~175W から 180W~185W へと向上させた。上述のように、本研究開発においては小面積セルとサブモジュールの高性能化技術開発と並行して、既開発技術の工場移転や工場における各製造プロセスの改善に取り組んでいる。今回の新型モジュールには、主に 20.9%Cd フリーセルにおいて開発された既開発技術の移転と、光吸収層製膜プロセスを中心とした細かなプロセスのチューニングや改善が活かされている。今後、Cd フリーサブモジュールにおいて実証された 22.0%Cd フリーセルの技術を中心とした成果をさらに工場へ導入していくことにより、最終目標である量産モジュール効率 16% (196W) の達成を目指す。

f. 発電コストの低減

図Ⅲ-2-(イ)-H-4 に 2015年3月時点(本研究開発事業開始前)と 2017年6月現在、および 2018年3月見込の発電コストの比較を示す。発電コストの算出には内閣官房国家戦略室「発電コスト試算シート」を使用し、既設住宅用 5kW システム、設備利用率 13%、稼働年数 20 年、法定耐用年数(原価償却) 17 年、年劣化率 0.8%/年、割引率(金利) 3%、修繕費 1.5%/年、廃棄費用 5%を想定した。本研究開発事業開始前当時の国内住宅用 CIS 太陽光発電システムの実売価格は 280 円/W 程度であり、発電コスト換算で約 19.3 円/kWh と見積もられる。2017年6月現在の同システム実売価格は一部で 250 円/W 以下を観測しており、発電コスト換算で約 17.1 円/kWh となる。この発電コストの低減のうち、モジュール出力を 165W から 175W へと向上させたことによる効果は約 0.7 円/kWh と見積もられ、残りは BOS コストの削減などの努力による。先述のとおり、本研究開発の成果として 185W の SFK シリーズ新型モジュールが 2018 年初頭に市場投入されることとなっている。この出力向上によるさらなる発電コスト低減効果は約 0.6 円/kWh となり、平成 29 年度の間目標 17 円/kWh は十分達成できる見込みである。このように、量産モジュールの出力向上は発電コスト低減に対して非常に大きな影響を持っているため、今後もコスト削減努力を続けると同時に、量産モジュールの高性能化を継続して行うことで、最終目標である発電コスト 14 円/kWh の達成を目指す。



図Ⅲ-2-(イ)-H-4 2015年3月時点 (本研究開発事業開始前)、2017年6月現在、および2018年3月 (見込) の発電コスト比較

2. 実用化・事業化見通し

上述のように本研究開発事業における既開発技術の工場移転と製造プロセスの改善により、出力向上を果たした新型モジュールの市場投入がすでに予定されており、発電コスト低減に大きく貢献することが見込まれる。今後は製造プロセスの改善を継続するとともに、本研究開発において新規に開発された技術の工場移転を行い、さらなる量産モジュールの高性能化を目指す。

3. 波及効果

本研究開発の成果によって CIS 太陽電池が多結晶 Si 太陽電池や CdTe 太陽電池よりも高性能化できる可能性を示した。このことは、CIS 太陽電池が低コストだけでなく性能的な面においても高い可能性を有しており、発電コストの観点からも総合的に優れた太陽電池技術であることを示している。今後、本研究開発の成果がさらに実用化されていくことによって、さらに低コストで高性能な CIS 太陽電池が市場に供給され、国内の太陽光発電システムの発電コスト低減に大きく貢献することが予想される。また、本研究開発の成果が学術・産業界を刺激し、より多くの人的・資金的リソースが CIS 太陽電池の研究開発に注がれることによって、その基礎的な理解の進展を通じてさらなる高性能化への道が開かれることが期待される。

4. 今後の展開

本研究開発のこれまでの成果により、Cdフリー小面積セル変換効率 22.0%を達成し、その技術を移転することによって Cd フリー30cm 角サブモジュール開口部面積効率 19.2%を達成した。また小面積セル、サブモジュール開発における既開発技術の移転や製造プロセスの改善によって出力を大幅に向上させた 185W 新型モジュールをリリースし、中間目標である発電コスト 17 円/kWh を達成見込みである。今後もこのような技術移転の流れを踏襲して CIS 太陽電池の高性能化を進める。まずは、19.2%サブモジュールを実現した技術の工場移転を進めることによって量産モジュールのさらなる高出力化を目指す。このためには新たに導入するプロセスを開発し、そのコストメリットの検討、大面積薄膜での面内均一性や繰り返し再現性、安定性などの検証を通じて工場での実証実験へと移行する必要がある。また、小面積セルの研究に立ち返り、次世代の高性能化要素技術の開発に注力し、変換効率 23%以上の達成を目指す。その技術を再度サブモジュール、量産モジュールへと移転していくことによって CIS 太陽電池技術全体の高性能化を進めていく。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	1	5(1)	0	6 件
論文	0	1	0	1 件
研究発表・講演（うち国際会議）	8(5)	9(7)	3(3)	20 件
新聞・雑誌等への掲載	206	46	74	326 件
受賞実績	0	0	1	1 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	ソーラーフロンティア (株)	特願 2015-205591	国内	2015/10/19	取下	光電変換素子	足立駿介 他
2	ソーラーフロンティア (株)	特願 2016-091479	国内	2016/4/28	出願	光電変換層の製造方法及び光電変換素子の製造方法	半田篤志 他
3	ソーラーフロンティア (株)	特願 2016-091509	国内	2016/4/28	出願	光電変換層の製造方法及び光電変換素子の製造方法	廣井誉 他
4	ソーラーフロンティア (株)	特願 2016-130949	国内	2016/6/30	出願	光電変換モジュール	木島駿介 他
5	ソーラーフロンティア (株)	特願 2016-130867	国内	2016/6/30	出願	光電変換モジュールの製造方法	木島駿介 他
6	ソーラーフロンティア (株)	PCT/JP2016/78718	PCT	2016/9/28	出願	光電変換素子	足立駿介 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	T. Kato	Solar Frontier K.K.	Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ solar cell research in Solar Frontier: Progress and current status	Jpn. J. Appl. Phys. 56 (4S) 04CA02-1-04CA02-8	有	2017/2/13

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	H. Sugimoto et al.	ソーラーフロンティア	Achievement of over 18% efficiency on 30×30cm ² -sized Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ submodules	国際会議発表：2015 European Materials Research Society (EMRS) Spring Meeting, Lille, France	2015年5月
2	R. Kamada et al.	ソーラーフロンティア	Evaluation of "rollover" in Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ thin film solar cells using Suns-V _{oc} measurements	国際会議発表：42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), New Orleans, USA	2015年6月
3	M. Nakamura et al.	ソーラーフロンティア	Current status at Solar Frontier: From fundamental research to industrial mass production of Cd-free Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ solar cell	国際会議発表：42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), New Orleans, USA	2015年6月
4	加藤 拓也	ソーラーフロンティア	セレン化法による CIS 太陽電池の高効率化	国内会議発表：日本学術振興会第175委員会「化合物薄膜太陽電池分科会」第5回研究会，京都	2015年9月
5	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア	Capacitance and admittance studies on metastable and sodium-related defects in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ thin film solar cell	国際会議発表：31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
6	K. Kitani et al.	ソーラーフロンティア	Characterization of Na depleted Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ thin-film solar cell	国際会議発表：31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Hamburg, Germany	2015年9月
7	杉本 広紀	ソーラーフロンティア	大面積 CIS サブモジュール及び CZTS サブモジュールの高効率化	国内会議発表：平成27年度応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会，長岡	2015年12月
8	杉本 広紀	ソーラーフロンティア	次世代カルコパイライト系薄膜太陽電池の現状と展望	国内会議発表：立命館グローバル・イノベーション研究機構シンポジウム，草津	2016年2月
9	H. Sugimoto	ソーラーフロンティア	Recent progress in development of Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ solar cells in Solar Frontier R&D to manufacturing	国際会議発表：Photovoltaic Technical Conference (PVTc) 2016, Marseille, France	2016年5月

10	R. Kamada et al.	ソーラーフロンティア	New world record Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ thin film solar cell efficiency beyond 22%	国際会議発表：43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, USA	2016年6月
11	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア	Characterization of the back contact of CIGS solar cell as the origin of "rollover" effect	国際会議発表：32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Munich, Germany	2016年6月
12	T. Kato	ソーラーフロンティア	Recent research progress of high-efficiency CIGS solar cell in Solar Frontier	国際会議発表：7th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech), Munich, Germany	2016年6月
13	加藤 拓也	ソーラーフロンティア	CIS系太陽電池の現状と展望	国内会議発表：第4回 環境・エネルギー・資源シンポジウム, 宮崎	2016年6月
14	杉本 広紀	ソーラーフロンティア	CIGS太陽電池の現状と今後の展望	国内会議発表：第35回 電子材料シンポジウム (EMS), 守山	2016年7月
15	K. F. Tai et al.	ソーラーフロンティア	Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ solar cell research in Solar Frontier K.K. with 22.3% world-record efficiency	国際会議発表：International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM) 2016, Tsukuba, Japan	2016年9月
16	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア	Recombination analysis of CIGS solar cells using temperature and illumination dependent V _{oc} measurement	国際会議発表：26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC), Singapore	2016年10月
17	K. F. Tai et al.	ソーラーフロンティア	From 20.9% to 22.3% CIGS solar cell: Reduced recombination rate at the interface and depletion region due to K-treatment	国際会議発表：26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC), Singapore	2016年10月
18	T. Kato	ソーラーフロンティア	CIGS solar cell research in Solar Frontier - Progress and current status	国際会議発表：2017 Materials Research Society (MRS) Spring Meeting, Phoenix, USA	2017年4月
19	H. Sugimoto	ソーラーフロンティア	Challenge for high efficiency CIGS solar cells in Solar Frontier from R&D to manufacturing	国際会議発表：8th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech), Stuttgart, Germany	2017年5月
20	T. Kato et al.	ソーラーフロンティア	Enhanced efficiency of Cd-free Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ minimodule via (Zn,Mg)O second buffer layer and alkali post treatment	国際会議発表：44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Washington DC, USA	2017年6月

【新聞・雑誌等への掲載】（主要なものに限る）

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	ソーラーフロンティア	高効率、曲がる太陽電池、ソーラーフロンティア、電気変換13%台	日本経済新聞 他	2015/6/22
2	ソーラーフロンティア	開発物語 ソーラーフロンティア「CIS太陽電池」 常識を覆した驚異の変換効率達成	フジサンケイビジネスアイ	2015/9/28
3	ソーラーフロンティア	ソーラーフロンティア、CIS型太陽電池で効率22.3%を達成	日経テクノロジーオンライン 他	2015/12/8
4	ソーラーフロンティア	CIS太陽電池で効率26%へ、コスト低減では世界を牽引	日経エレクトロニクス	2016/1/13
5	ソーラーフロンティア	ソーラーフロンティア、コスト20%削減の新型パネル展示	フジサンケイビジネスアイ 他	2016/7/1
6	ソーラーフロンティア	Solar Frontier's CEO Aims for 40-Cents-Per-Watt CIGS Modules	GreenTechMedia 他	2016/9/16
7	ソーラーフロンティア	ソーラーフロンティア、CIS系薄膜太陽電池サブモジュールで世界最高変換効率19.2%を達成	読売新聞 他	2017/2/27
8	ソーラーフロンティア	ソーラーフロンティアの太陽電池モジュール、環境省による「L2-Tech認証」取得	日経産業新聞 他	2017/4/4
9	ソーラーフロンティア	昭和シェルとソーラーフロンティア、平成29年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰で 科学技術賞（開発部門）を受賞	電波新聞 他	2017/4/12
10	ソーラーフロンティア	ソーラーフロンティア、高出力の新型 CIS 薄膜太陽電池「SFK シリーズ」	日本経済新聞 他	2017/6/21

【受賞実績】

番号	賞名	業績名	受賞者	所属・職名	受賞日
1	平成29年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞（開発部門）	原料から廃棄まで地球環境に配慮した薄膜太陽電池技術の開発	榎屋 勝巳	ソーラーフロンティア株式会社 フェロー兼知財戦略室室長	2017/4/11

(ロ) 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

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
① 低コストセル技術開発：東京大学、シャープ(株)、豊田工業大学、パナソニック(株)				
①-a 高効率III-V 薄膜セル 開発 (光閉じ込め) シャープ(株)	化合物太陽電池層の膜厚を従来の1/4に低減した構造で、変換効率30%を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> セル薄層化のためのミドルセルーボトムセル間のバッファ層厚さ低減検討を実施。従来比1/6までの検討を行い、1/2までは従来と同等の特性が維持できる構造を得た。 要素検討(裏面反射構造、サブセルベース厚さ短絡電流依存性、バッファ層薄型化)を組み合わせて、3接合型セルの薄層化検討試作を実施。総厚約50%減で従来と同等の電気特性を得た。 	△	<ul style="list-style-type: none"> 層厚50%までの低減は確認。 バッファ層の更なる薄層化、現時点で検討未実施の層の薄層化検討で達成を目指す
①-a 高効率III-V 薄膜セル 開発 (光閉じ込め) 東京大学(岡田G)	<p>(1) 薄膜多接合セルにおいて、LC効果を解析し、有効な光閉じ込め構造を決定する。</p> <p>(2) 薄膜多接合セル、薄膜量子ドットセルの構造最適化により、変換効率30%(非集光)の実現可能性を示す。</p>	<p>(1) 薄膜光閉じ込め構造を有する薄膜量子ドットセルを作製し、電流・効率の改善を実証。</p> <p>(2) 3接合セルにおけるLC効果の評価と解析を擬2次元に拡張し、LC効率の面内分布が効率に及ぼす影響を解析。</p>	○	項目②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載、項目④-c 量子ドット・マルチバンドと協力して、今年度末に達成見込み
①-a 高効率III-V 薄膜セル 開発 (光閉じ込め) 東京大学(中野・杉山G)	多接合セルに対して有効な光閉じ込め構造を開発し、量子井戸を含むIII-V 薄膜3接合セルおよびIII-V 薄膜2接合+シリコンセルの最適層構造を提案する。これにより、変換効率30%(非集光)の実現可能性を示す。	<ul style="list-style-type: none"> 裏面テクスチャ光閉じ込め構造をウエットエッチングのみで形成する手法を確立。光路長増大5倍を実証(世界初)。 シャープと共同で、薄層化3接合セルのボトムセルに裏面テクスチャを施す新構造を考案。裏面コンタクト層のAlInGaAs層に対してフォトリソグラフィ及びウエットエッチングによるテクスチャの形成、また多接合セルにおける光閉じ込め効果を実証するためのエピウエハ構造を検討した。 薄膜サブセルの有限光吸収とLC効果、発光再結合効率を考慮した現実的な薄膜3接合セルの効率シミュレーションを実施。サブセル厚の合計1.5μmで効率33%以上を達成できる可能性を示した。 	○	

<p>①-b シリコン上Ⅲ-V 部分集光ヘテロエピ成長多接合セル</p> <p>豊田工業大学</p>	<p>部分集光用ヘテロエピ成長によるシリコン上 III-V 多接合セルにおいて、非集光下でセル効率 28%を達成する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2 社 2 種類の InGaP/GaAs エピウエハに対しセル化プロセスを検証した。 ・ Si ボトムセルが接合時の界面損傷により劣化することを究明し、接合界面欠陥低減のためのセル構造を案出した。中間層を設けた裏面ポイントコンタクト型 Si ボトムセルを開発した。 ・ 上記セルを用いて、大阪市立大学で 28%のセル効率が得られた。 ・ メカニカルスタックにより 28.2% (産総研確認) の効率を確認した。 ・ さらにブラッシュアップされたプロセスにより 33.0%のメカニカルスタック型セルの効率がシャープにより達成された。 ・ 上記セルをモジュール化するための新構造を案出した。III-V セルを 4x~7x に部分集光することで、さらに 20%コストダウン出来る可能性を見いだした。 ・ 部分集光のための光学系加工の予備試作を実施した。PMMA の切削加工で十分な品質の非軸対称光学系が試作可能であることを確認した。 ・ 国内外の大気パラメータ変動量を求め、モンテカルロ法により 2 端子構造、4 端子構造の III-V/Si セルの年間発電量をシミュレーションした。4 端子型が年間発電量でも有利であることを定量的に示した。 	○	
<p>①-b シリコン上Ⅲ-V (ウエハ接合セル)</p> <p>大阪市立大学 (豊田工業大学から再委託)</p>	<p>・ ウエハ接合によるシリコン上 III-V 多接合セルにおいて、非集光下でセル効率 28%の実現可能性を示す。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 透明導電性酸化膜 (ITO) を中間層とする接合形成。耐熱性・低界面抵抗実証。InGaP/GaAs/ITO/Si タンデムセル作製。ITO 中間層導入による直列抵抗低下、変換効率向上を実証。1mm 角セルの変換効率~27%。特許出願し、測定結果を PVSC で発表。 ・ GaAs 基板再利用に向けたウエハ接合セルプロセス検討。ウエハ接合試料から GaAs 基板分離、セル作製に成功。 	◎	
<p>①-c プラスチックレンズ一体型セル・モジュール (PIC)</p> <p>パナソニック (株)</p>	<p>以下の性能を有する PIC モジュール (23cm²、集光倍率: ~1000 倍) の実現</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 発電効率: >30% ・ システム価格 125 円/W を実現する構造・工法を明確化 	<p><u>1 高効率モジュール設計技術の確立</u></p> <p><u>1-1) モジュールの基本構造の設計</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ PIC の基本構造・工法を設計し、要素技術検証モジュール (2cm²、単セルモジュール、1mm² 3 接合 III-V 族半導体セル) にて変換効率 30%を実現。基本設計の有効性を確認した。 ・ プラスチックレンズとガラス回路基板との熱膨張差を吸収した基本構造検証用 PIC モジュール (12cm²、5 	PIC の基本構造・工法の設計 ・ 要素技術検証モジュール変換効	

		<p>×5 レンズアレイ、4 分割ガラス回路基板、3 接合Ⅲ-V族半導体 1mm□セル)を設計し、研究実施場所(大阪)にて最大変換効率：31.3 %を確認した。同構造のモジュールを宮崎大学にて評価し最大変換効率：30.3%を確認した(対外発表：2 件、論文：1 件)。</p> <p>・3 分割フレネルレンズとプラスチック基板を組合せた基本構造検証用 PIC モジュール(12cm□、5×5 レンズアレイ、ガラス小片埋込プラスチック回路基板、1mm□3 接合Ⅲ-V族半導体セル)を開発し、研究実施場所(大阪)にて最大変換効率：31.5%を確認した。</p> <p>・レンズの成型形状に起因する光学ロスを従来の約 28%から約 6%に低減する高光効率レンズ構造と低コスト金型作製方法を開発した。</p> <p>・レンズの集光量ばらつきによる発電効率の低下を抑制する回路基板配線パターンを発明、開発した(特許出願 1 件)。</p> <p>・宮崎大学の開発している簡便塗布型の AR コートを 3 分割フレネルレンズに適用し、波長 400nm から 1, 000nm で透過率を平均 3.6%向上させ得ることがわかった。</p> <p><u>1-2) 発電素子の実装、配線への電気接続技術の開発</u></p> <p>・低コストかつ高精度な回路基板形成技術(ガラス基板)を確立し、要素技術検証モジュール(単セルモジュール)、基本構造検証用 PIC モジュール(ガラス回路基板)に適用した。</p> <p>・基本構造検証用 PIC モジュール(ガラス回路基板)の屋外評価を、研究実施場所(大阪)、宮崎大学にて継続。屋外環境にて、樹脂材料による構造的な不具合や、大幅な特性劣化は見られない。</p> <p>・プラスチック基板上の低温電気接続技術を検討し、低コスト工法を発明、開発した(特許出願 1 件)。</p> <p><u>1-3) プラスチック基板上への配線形成技術の開発</u></p> <p>・プラスチック基板上に 95℃以下の硬化温度で配線を形成し、ヒート</p>	<p>率：> 30% ○</p> <p>高効率モジュールの開発 ・基本構造検証用 PIC モジュール最大変換効率：31.5% ○</p> <p>低コスト・高精度回路基板形成技術の開発 ・素子配置精度： ± 10 μm(0.3 5 秒/Chip) ○</p> <p>プラスチック基板上への配線形成</p>	
--	--	---	--	--

		<p>サイクル試験を満たす Ag ペースト材料を抽出した。配線の抵抗率：$5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の目標値を達成した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・プラスチック基板にガラス小片を埋め込んだガラス小片埋込プラスチック基板に対して配線技術を新たに開発し、基本構造検証用 PIC モジュール(ガラス小片埋込プラスチック回路基板)に適用した。 <p><u>1-4) 1000 倍集光を可能にする低コストレンズ設計・基本作製工法の開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・高温高湿環境による光学損失を従来のフレネルレンズよりも 1/5 に低減した集光レンズ構造(3 分割フレネルレンズ)と低コスト成形工法を發明、開発した(特許出願 1 件)。 <p><u>2 低コストアSEMBL技術の確立</u></p> <p><u>2-1) 低コスト・高精度射出成型技術の開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・3 分割フレネルレンズアレイと 2 次集光レンズアレイのはめ合い精度 $\leq \pm 10 \mu\text{m}$ を満たすレンズ成型技術を開発し、目標を達成した。 <p><u>2-2) 低コスト実装・組み立て技術の開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・PIC モジュール組立設備の基本仕様を決定し、装置の導入を行ない、試作ラインを構築した。 ・試作ラインの基本仕様を考慮したシステムコストの試算式を更新し、システム価格 125 円/W を達成するためのコストターゲットを明確化した。 	<p>技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電気特性：$< 5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ <p>○</p> <p>低コストレンズ設計・基本作製工法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・光学損失を抑えた 3 分割フレネルレンズを開発 <p>○</p> <p>高精度レンズ成型技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・はめ合い精度：$\pm 10 \mu\text{m}$ <p>○</p> <ul style="list-style-type: none"> ・システムコスト 2030 年(100MW/年生産時)：118 円/W <p>○</p>	
<p>② 低コスト化プロセス技術開発：産業技術総合研究所、東京農工大、東京大学、宮崎大学、豊田工業大学、太陽日酸(株)</p>				
<p>②-a 低コスト実装プロセス：メカニカルスタック</p> <p>①低コストハイブリッド多接合技術開発</p> <p>産業技術総合研究所</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs/Si 系、GaAs/CIGS 系多接合で変換効率 28%。 ・システム価格 220 円/W を見込むスタック技術達成手段の明確化。 	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs/Si 系 3 接合で 27.7%、GaAs/CIGS 系 3 接合で 24.2% (いずれも非集光時)。効率改善のために、電流整合の調整(層厚等の最適化)および Si 光閉じ込め構造等の検討継続中。 ・モジュールコスト分析の結果、低倍集光系導入の検討を開始。スマートスタックセルに適用可能であることを確認 (GaAs/Si 系で非集光時 19.3%→8 倍集光時 23.7、GaAs/CIGS 	<p>○</p>	

		系で非集光時 22.8%→5.7 倍集光時 25.3%)。 ・スマートスタック InGaP/GaAs/Si モジュール変換効率 30%、6 インチセル、寿命 30 年、H-VPE の原料利用効率 50% でモジュール価格 103.5 円/W と試算され、システム価格 220 円/W が達成可能なことがわかった。		
②-a 低コスト実装プロセス：メカニカルスタック ②実用化技術開発 産業技術総合研究所	・セル面積 4 インチ相当実装技術の明確化。 ・素子寿命 30 年の高信頼性化技術指針の明確化。	・トップセルプロセスの改善により 12.5mm 角（従来は 5mm 角）でのスタック化に成功、セル動作を確認。 ・大面積実装に向けた一括転写プロセスの技術進展、良好な素子特性確認。また自在配列に優位な個別搬送プロセスも複数の手法に関し検討。CO ₂ 超臨界洗浄乾燥装置を用いた手法ではアレーセル化に成功。以上において 4 インチ相当実証技術を明確化した。 ・GaAs/Si 系セルの温度サイクル試験を実施、特性劣化がないことを確認。 ・素子寿命 30 年のための信頼性試験法に関し、高温通電試験、温度サイクル試験を行い、活性化エネルギー 1.0 eV を仮定すると 60℃、1sun において 30 年稼働相当の耐久性を確認。	○	
②-a 低コスト実装プロセス：メカニカルスタック 東京農工大	①高度光利用技術開発：メカニカルスタック層の光の伝達効率92% (光反射ロス8%) ②大面積低抵抗接合技術開発：4インチレベルにおいてメカニカルスタック層の接合抵抗率0.8Ωcm ² ③高効率多接合セル用低コスト化スタック技術開発：効率28%セルの実現とシステムコスト220円/Wを見込むスタック技術確立。	①-1 光反射ロス評価用数値解析プログラム開発 GaAs、GaP、Si、Ge 等異種基板貼り合せ計算成功 ①-2 無反射透明導電膜成膜開発 ・スパッタ IGZO/エポキシ接着剤を用いた GaAs/Si 貼り合せ試料作製、光伝達効率 A _{eff} 94% ・スパッタ IGZO/エポキシ接着剤を用いた GaP/Si 貼り合せ試料作製、光伝達効率 A _{eff} 93% ・光入射角度変化光反射率及び光伝達効率測定装置作成。 ②-1 低抵抗化検討 ・メカニカルスタック層の接合抵抗率 0.3Ωcm ² 達成	○	
②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載 東京大学（岡田 G）	4 インチウエハサイズのエピ薄膜を再現性よく剥離するための ELO プロセスの最適化を行う。	(1) 支持材、保護層、選択エッチング層構造、エッチャントの検討を進め、再現性よく ELO 薄膜層を分離する技術を確立。ELO 自動機（試作 1 号機）を用いて、プロセス温度の検	○	

	<p>ウエハ再利用に向けた ELO 時の基板表面保護層、ELO 後のウエハ表面清浄化手法の最適化を行う。</p>	<p>討を行い剥離時間の短縮に成功（従来条件の 1/8）。 (2) ELO 薄膜 GaInNAs:Sb セルを作製し、光吸収スペクトル解析により光閉じ込め構造による電流増大効果を確認した。 (3) ELO 自動機（試作 2 号機）を用い、剥離速度 10mm/h を達成（H27 年度末から 20 倍の高速化を達成）。 (4) ELO 後の基板表面の化学エッチングによる清浄化を検討し、原子層レベルで平坦な表面を得ることに成功。今回、ELO 後の残渣の成分分析、及び ELO 後基板上への再成長を実施した。</p>		
<p>②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載 タカノ(株) （東京大学から再委託）</p>	<p>(1) 4 インチウエハサイズの ELO を再現性良く行うための ELO 装置化に向けた検討 (2) 基板再利用に向けた ELO 後ウエハ表面の全面観察手法に関する基礎技術の開発と装置化に向けた検討</p>	<p>(1) 2 インチウエハ対応の HF 滴下/ウエハ引揚方式（再委託元：東京大学）と、4 インチウエハ対応の HF 注入/ローラー移動方式（再委託元：シャープ(株)）の ELO 自動化装置を作製。 それぞれ HF と薄膜/基板の接触時間を低減し、かつ反応温度/剥離速度を制御する方式を採用。 (2) 分光技術と光干渉をベースとした 3 次元計測を検討し、「高速化 820%」、「精度向上」、「広範囲化（解析範囲□4mm）」を実現。（再委託元：東京大学） 基板表面全面観察用の試作機（空間分解能 □2um）を立上げ、「低屈折率の残渣の画像化」と「エピ膜側 GaAs 層の PL 画像化」を確認した。（再委託元：東京大学） シャープ(株)と協力し、ELO 後の 4 インチウエハ/エピ膜を用い、基板表面全面観察用の試作機や InGaAs センサ等で 異常点観察と解析評価を開始した。（再委託元：シャープ(株)）</p>	○	
<p>②-a 低コスト実装プロセス：エピ層移載・ウエハ再利用 シャープ(株)</p>	<p>ELO プロセスを経た 2 接合太陽電池層をセル化し、変換効率 25%以上を達成すると同時に、分離した基板を少なくとも 1 回再成長に利用できるプロセスを開発する。</p>	<p>・エピ層剥離については、2 接合型を中心に検討を実施。再委託先のタカノ(株)にてローラー型検討装置の作製を行い、クラックレスでの剥離プロセスを開発した。 ・剥離後のウエハ、エピ層それぞれの検査手法の検討をタカノ(株)と協力して実施。各種評価手法を用いて検討を実施し、ウエハは画像解析による異常点観察、エピ層はフォトルミネッセンス（PL）法によるクラック観察の可能性を得た。</p>	△	今年度中に達成見込

		<ul style="list-style-type: none"> ・剥離後基板の再生方法の検討を実施。化学機械研磨 (CMP) 法または化学エッチング法で処理した基板上へのエピ成長を実施し、両者とも正規品と同等の電気特性を得た。 		
②-b シリコン上 III-V エピ成長 豊田工業大学	<ul style="list-style-type: none"> ・歪緩和バッファ層の基本構造確立 ・シリコン上 III-V 層において、転位密度 10^6 cm^{-2} 以下 	<ul style="list-style-type: none"> ・低温成長 GaAs/Si 膜において転位密度を $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ に低減。 ・低温成長 MEE 層挿入による転位密度低減効果を確認。 ・N ドープ GaAs 層挿入による転位密度低減効果を、格子不整合 InGaAs/GaAs 膜で確認。 ・層状半導体バッファ層において、GaAs および Si 基板上での層状 In_2Se_3 成膜技術の確立。層状 In_2Se_3 上への GaAs エピ成長の実証。GaAs エピ成長層の劈開による剥離とガラス基板上移載の実証。(世界初) 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・今年度末に中間目標達成見込み (MEE 層挿入と N ドープ GaAs 層挿入による転位密度低減効果を確認しており、低温成長膜にこれら手法を適用して、さらなる転位密度の低減が可能)
②-b シリコン上 III-V エピ成長 宮崎大学	セル効率 28% 達成に必要な転位密度低減として、シリコン上 III-V 層において、転位密度 $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下を実現する。	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs on Si 試料へのレーザー照射実験 ・ラマン散乱法による結晶性評価 ・ALE 法にて SiO_2 マスク付き Si 基板上に GaAs を作製 ・試験成長用として豊田工業大学に送付済み ・新規 Ge 原料を用いた Ge バッファ層の導入 ・Ge バッファ層の TEM 観察による詳細な構造評価実施 ・Si 基板と GaAs 基板上での Ge 原料の反応性の違い評価 ・レーザーアニール領域の場所依存性の評価実施 	○	
②-c 低コスト III-V 化合物半導体製膜技術：MOCVD 大陽日酸(株)	MOCVD により成長速度 $40 \mu \text{ m/h}$ (GaAs)、 $10 \mu \text{ m/h}$ (InGaP) を得る。また、III 族利用率 30% 以上を達成する。さらに、in situ クリーニングや搬送時間の削減による高スループット化の検証と問題点抽出を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・多接合 III-V 族化合物半導体セルに用いるガリウムヒ素及びインジウムガリウムリン等の MOCVD プロセスにおいて、原料利用率とスループットを向上させる装置技術開発を行い、成長条件最適化指針を獲得することを目的として開発を行った。装置設計に当たっては、原料利用率の向上を目的とした装置改造が容易であること、スループット向上を目的として将来実施予定である In-situ クリーニングに適した装置設計である点を考慮して検討を行った。本装置は製作および出荷前調整を完了し、H-VPE 装置同様、2016 年 3 月に産業技術総合研究所に設置した。 ・MOCVD 装置の立上を 2016 年 6 月末までに完了。 	○	

		<ul style="list-style-type: none"> ・ GaAs 製膜を開始。正常に製膜できることを確認した。 ・ GaAs 製膜速度 90 $\mu\text{m/h}$ を達成。 ・ InGaP 製膜も正常に製膜できることを確認した。 		
②-c 低コスト III-V 化合物半導体製膜技術：MOCVD 東京大学（中野・杉山 G）	大陽日酸と共同で、高速製膜条件を用いて単セル効率 20% (GaAs 40 $\mu\text{m/h}$)、12% (InGaP 10 $\mu\text{m/h}$) を得る。	稼働した高速 MOCVD 装置により、90 $\mu\text{m/h}$ の成長速度で GaAs 単セル効率 25% を達成した。基板のついた GaAs セルの効率としては最高水準の効率であり、90 $\mu\text{m/h}$ の高速成長で実現したのは世界初である。GaAs セルについては最終目標をほぼ達成。InGaP セルについては 8 $\mu\text{m/h}$ で 5% 以下の効率であり、さらに改善が必要。	GaAs セル ◎ InGaP セル △	InGaP 成長条件の改善指針は得られており、今年度末に中間目標達成見込み
②-c 低コスト III-V 化合物半導体製膜技術：HVPE 大陽日酸(株)	HVPE により成長速度 40 $\mu\text{m/h}$ (GaAs)、10 $\mu\text{m/h}$ (InGaP) を得るとともに、AlAs 製膜における問題点を抽出する。	<ul style="list-style-type: none"> ・ III-V 族化合物半導体太陽電池作成に、超高速・低コストエピタキシャル結晶成長法であるハイドライド気相成長法 (H-VPE 法) を応用することを目的として、装置の設計及び製作を行った。具体的には、当社で以前に製作実績のある GaN (窒化ガリウム) 向け H-VPE 装置の設計を基に、GaAs (ガリウムヒ素) 及び InGaP (インジウムガリウムリン) を一度の成長運転で連続的に成長できることを達成できるように設計を行った。本装置は製作および出荷前調整を完了し、2016 年 3 月に産業技術総合研究所に設置した。 ・ H-VPE 装置の立上を 2016 年 6 月末までに完了。 ・ H-VPE 装置による GaAs 製膜を開始。正常に製膜できることを確認した。 ・ GaAs 製膜速度約 30 $\mu\text{m/h}$ を確認。 ・ InGaP 製膜速度約 16 $\mu\text{m/h}$ を確認。 	○	
②-c 低コスト III-V 化合物半導体製膜技術：HVPE 産業技術総合研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高速成膜技術開発およびセル効率 15% (GaAs)、8% (InGaP) を達成 ・ AlAs を H-VPE により得るための課題抽出。 InGaP/GaAs タンデム太陽電池を試作、課題抽出。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 大陽日酸(株)と共同のもと、H-VPE 装置設計および装置導入（立ち上げ完了 H28 年 6 月末）。 ・ H-VPE 技術検討より、約 40 $\mu\text{m/h}$ の高速成長下での GaAs ホモエピ、p-n 接合制御を実証。 ・ 約 16 $\mu\text{m/h}$ の高速成長下での格子整合系 InGaP ヘテロエピを実証。 ・ GaAs 太陽電池において InGaP 窓層の開発を行い変換効率 20.29% を達成。 ・ InGaP 太陽電池において Voc:1.2V、変換効率:8.06% を達成。 	◎	

		<ul style="list-style-type: none"> ・Al系成長に関して、$AlCl_3$にすることで、石英管の腐食を防止できることがわかった。タンデムセルに関しては、今年度後半に試作予定。 		
②-c 低コスト III-V化合物半 導体製膜技術： HVPE 東京農工大	HVPEにより成長 速度 $40 \mu m/h$ (GaAs)、 $10 \mu m/h$ (InGaP)を得ると ともに、AlAs製 膜における問題点 を抽出する。	<ul style="list-style-type: none"> ・高速成長および高品位結晶の成長が可能なHVPE成長法をIII-V族化合物半導体太陽電池作成に応用するために、熱力学解析を用いてGaAsおよびInGaP三元混晶の成長系の設計を行った。その結果、GaAsではGa-HCl-Ash3系、InGaPでは、In-HCl-Ga-HCl-PH3系により、GaAsおよびInGaP混晶の成長が可能であることを見出した。これらの結果を、大陽日酸と共有し、大陽日酸の装置製造を支援した。 ・GaAsおよびInAsPのHVPE成長装置は、大陽日酸により設計・製作がなされ、2016年3月に産業技術総合研究所に設置された。 ・その後、HVPE装置によりGaAsおよびInGaPのエピタキシャル成長がなされ、約$30 \mu m/h$のGaAs成長速度および$16 \mu m/h$のInGaPの成長速度が達成された。 	○	
③ 低コストモジュール開発：シャープ(株)、宮崎大学、豊田工業大学、				
③-a 低コスト モジュール開発 シャープ(株)	集光倍率1.5~3 倍程度の低倍集 光モジュールに おいて、許容入 射角（光学効率 が、垂直入射時 比90%となる入 射角） 15° 以上 を達成する	<ul style="list-style-type: none"> ・低倍集光モジュール（原理確認用試作）を作製し、評価を実施した。 ⇒太陽と正対したときの集光倍率1.9倍、および、屋外測定で許容角約$\pm 13^\circ$の結果を得た。 	△	<ul style="list-style-type: none"> ・目標値に近い結果が得られたこと、現時点ではセルコスト低減の達成度合いが見積もれず、目標集光倍率が決まらないため、一旦開発を中断する
③-a 低コスト モジュール開発 宮崎大学	モジュール表面 コート技術の開 発により、1.5 ~3倍程度の集 光が可能な低倍 集光モジュール の開発におい て、許容角 15° で90%以上の出 力を達成するこ とに寄与する。	<ul style="list-style-type: none"> ・シリコン太陽電池モジュールを用いた表面コートの屋外評価 →3%の電流増加を確認 ・光学シミュレーションを用いたIII-V族多接合太陽電池への最適膜厚の検討 ・広角モジュールに反射防止膜を塗布し屋外評価 →3%の変換効率増加を確認 ・III-V族多接合太陽電池への反射防止兼防汚膜の光入射角度依存性を解析 	○	

<p>③-a 低コスト モジュール開発 豊田工業大学</p>	<p>10分ごとの間欠 追尾でも動作可 能なモジュール の設計と製作を 行い、非集光下 で効率30%のセ ルを用い、モ ジュール効率 27%を達成。</p>	<p>・広角モジュールに用いられるレ ンズ材料の基板を用いた反射防止 兼防汚膜の反射防止効果の評価 間欠追尾広角光学系の試作検証完 了。28.5%効率を達成。 間欠追尾広角モジュールを試作。 30分間欠追尾でも日発電量損失を 1%に抑制できることを検証。 無追尾低倍集光の光学系の基本設 計を完了。予備試作により無追尾 動作確認。 部分集光により、III-V/Siセルの さらなる低コスト化の可能性を開 拓した。 無追尾集光動作解析（車載への応 用可能性等を検討）。</p>	<p>○</p>	
<p>③-b 低コスト モジュール発電 量試算、屋外評 価 シャープ(株)</p>	<p>スペクトルや太 陽光入射角度が モジュール出力 におよぼす影響 について実測・ 解析する。また 発電コスト試算 に向け、実測 データを元に設 備稼働率の算出 を行う。 【変更後】 スペクトルや太 陽光入射角度が モジュール出力 におよぼす影響 について実測・ 解析する。また 発電コスト試算 に向け、実測 データを元に設 備稼働率の算出 を行う。 加えて、化合物 太陽電池セルの 試作を実施し、 その特性および 歩留等の結果に 基づいて、量産 性の検証および コスト低減効果 の検討を行う。</p>	<p>・実用セルサイズでの逆積み3接合 型モジュール（非集光）の試作を実 施。産業技術総合研究所で標準条件 下でのモジュール変換効率測定を実 施し、31.2%の効率を得た。 ・低倍集光モジュールおよび非集光 モジュールの屋外発電評価を、結晶 Siセル・モジュールと比較しながら 実施。（宮崎大学と協力）非集光モ ジュールは、結晶Siモジュールと比 較して、定格出力あたりの発電量 （Wh/W）で96.1%、モジュール 単位面積当たり（枠部を除く）の発 電量で、156.2%の結果を得た。ま た、低倍集光モジュールでは非集光 モジュールに対し、定格出力あたり で83.2%、モジュール面積当たりで 92.4%の発電量が得られた。</p>	<p>△</p>	<p>収集中の屋外 データの解析 を本年度に実 施、稼働率の 算出を行う。</p>

<p>③-b 低コストモジュール発電量試算、屋外評価</p> <p>宮崎大学</p>	<p>スペクトルや太陽光入射角度がモジュール出力におよぼす影響について実測・解析する。国内の実環境における環境要因において年間を通じて最も効率よく出力できるセルやモジュールの設計を行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・世界で初めて非集光 III-V 太陽電池モジュールに対する太陽光スペクトルの影響を屋外測定結果より解析 →屋外動作で 30%の変換効率を達成 ・全天日射スペクトル測定装置の設置 →太陽光スペクトルの非集光 III-V 太陽電池モジュールへの影響を解析 ・広角モジュールの屋外実証試験を実施 →広角モジュールが間歇追尾において高い変換効率を維持することを実証 ・太陽電池発電特性測定装置の導入 	○	
<p>④ 超高効率セル開発：東京大学、シャープ㈱、宮崎大学、産業技術総合研究所、電気通信大学、神戸大学</p>				
<p>④-a エピタキシャル多接合：希釈窒化物-MBE</p> <p>東京大学（岡田 G）</p>	<p>水素 MBE 法による Ge ボトムセル上への GaInNAs:Sb セルの再成長条件の最適化を進める。NEDO 革新的太陽光発電技術研究開発プロジェクトで開発した GaInNAs:Sb 材料を適用して、上層サブセルのフィルタ下で短絡電流密度 12 mAcm⁻² 以上を目指す。</p>	<p>Ge ボトムセル上の高品質 GaInNAs:Sb セル作製に向け、水素 MBE により製膜した GaInNAs:Sb セルへのポストアニール条件の最適化を実施。従来より 100℃低い 750℃のアニール条件での特性向上を達成。このことから、アニールによる Ge ボトムセルの特性劣化を抑制しつつ高品質の GaInNAs:Sb セルが実現できることが示唆される。再成長用テンプレート基板、および微傾斜基板への成長条件の検討を実施、特性劣化のない GaInNAs:Sb 単接合セルの再成長に成功。InGaP/GaAs/GaInNAs:Sb/Ge 4 接合セル構造作製手法の検討を実施。</p>	○	
<p>④-a エピタキシャル多接合：希釈窒化物-MBE</p> <p>埼玉大（東京大学から再委託）</p>	<p>Ge に格子整合可能な 1 eV 帯混晶膜の作製 少数キャリア寿命 1~2 ns 以上、電子移動度 400 cm²/Vs 以上の混晶膜の作製。</p>	<p>制御プログラムの作成により MBE セルシャッター開閉動作を自動化 第一原理計算により III-V 族半導体への N_δ ドーピングの効果を検討し、電気・光学特性への影響を解明 InGaAs 中への N_δ ドープ層の導入により超格子を作製し、格子歪・バンドギャップ制御を実証 MBE 成長条件の検討によりバンドギャップ約 1 eV の InGaAs:N_δ ドープ超格子を実現 Si 添加 n-GaAs:N_δ ドープ超格子の作製と電気特性評価を実施。800 度のアニールにより Si が活性化かつ電子移動度が増大、同程度の N 組成</p>	○	<p>InGaAs:N_δ ドープ超格子のキャリア寿命およびキャリア移動度については今年度中評価予定</p>

		の GaAsN ランダム混晶に比べ高い移動度 ($\sim 250 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) 得た。		
④-a 希釈窒化物-CBE 豊田工業大学	<ul style="list-style-type: none"> ・ GaInNAs サブセルを用いて、多接合セルで集光時のセル効率 40%の達成 ・ 他機関の欠陥評価に協力し、希釈窒化物における欠陥の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> ・ GaAs(111)B 微傾斜基板上に成膜した GaAsN で、ステップ端のみでの N 取り込みを示唆 (高品質化が期待できる) ・ セル作製プロセスの改良 (電極形成、AR 膜形成等) ・ 残留アクセプター-N-H 複合欠陥の明確化 (エネルギー準位、H 取り込み過程等) 	×	テーマ整理により中止
④-a 希釈窒化物-CBE 九州大 (豊田工業大学から再委託)	豊田工業大学における希釈窒化物の欠陥評価を理論的側面から支援し、目標達成に貢献する。得られた成果を他機関の欠陥評価にも展開する。	GaAsN 薄膜中の複合欠陥の電子構造解析および格子振動数解析を完了。また、それぞれの複合欠陥の形成エネルギーを解析し構造安定性を明確化。いくつかの文献結果と比較し、膜中の複合欠陥構造の絞り込み・分類に成功。	△	テーマ整理により中止
④-a エピタキシャル多接合:既存構造 シャープ(株)	<p>逆積み3接合型太陽電池において、ルミネッセンスカップリングの活用によって高効率化を進め、前プロジェクトで達成した 37.9%を超える変換効率 (> 38%) を達成する。</p> <p>【変更後】 逆積み3接合型太陽電池において、ルミネッセンスカップリングの活用もしくは InGaP トップセルにおける裏面ヘテロ接合構造の採用によって高効率化を進め、サブセルの変換効率を前プロジェクトで達成した 37.9%セルとの比較での向上を目指す。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3接合セルのトップセルの開放電圧向上を目的として、トップセルの pn 接合の改良検討を順積み構造で実施。従来と比較して 0.02 V の開放電圧の向上を確認した。あわせて変換効率の向上も確認した。 ・ トップセルの短絡電流向上を目的として、窓層の改良を実施。組成比変更、厚さ変更で短波長領域の量子効率が向上する結果を得た。トップセルが感度のある全波長域では約 3% の短絡電流の上昇を確認した。 	○	

<p>④-a エピタキシャル多接合：量子構造</p> <p>東京大学（中野・杉山 G）</p>	<p>4 接合セルの第 3 セルに用いて集光下効率 50%超を達成するための 1。15 eV バンドギャップサブセルに関して、波状構造超格子の構造制御手法を確立する。それを用いた単セルにおいて、電流整合 4 接合セルの要求値（1.49 eV のフィルタ下で短絡電流 9.5 mA/cm²/sun、開放電圧 0.75 V、曲線因子 77%）を達成する。</p>	<p>階段状量子井戸において、吸収端 1.15 eV、Woc = 0.35 V を達成。70 層の量子井戸により、800 nm のフィルタ下で開放電圧 0.77V、短絡電流 10 mA/cm²、曲線因子 0.69 を得た。（世界初）第 3 セルの性能目標値は、ほぼ達成。</p> <p>波状量子井戸の構造制御により、200 層積層に成功。</p> <p>InGaAs 波状構造断面形状と InGaAs、GaAsP 成長時間の相関関係を同定。構造制御の指針獲得。</p> <p>（追加的成果）波状構造において超長寿命のキャリアを確認（室温 0.3 μs、7 K で 3 μs）、中間バンドセルへの応用可能性あり。</p> <p>InGaAs 波状量子井戸を含む GaAs 単セルにおいて 2 段階光吸収による電流測定に成功。</p>	<p>◎</p>	
<p>④-a エピタキシャル多接合 多接合動作解析</p> <p>宮崎大学</p>	<p>太陽電池光吸収層に多重量子井戸や超格子あるいは量子ドット構造を挿入したエピタキシャル多接合セルにおけるキャリア回収過程について、内部電界およびセル温度の影響を明確にする。</p>	<p>MQW 太陽電池に独自の評価技術等を適用し、発光再結合・非発光再結合・井戸からの熱脱出過程を高感度に検出した。</p> <p>速度方程式に基づく解析から、量子井戸からの熱脱出および非発光再結合に必要な活性化エネルギーを算出した。</p> <p>障壁層が薄くなることで形成されるミニバンド幅をフォトリフレクタンス法によって感度よく測定した。</p> <p>理論計算より、p-i-n 太陽電池構造に内在する内部電界（1 μV/m 程度）でミニバンドが一部局在化することが分かった。</p>	<p>○</p>	
<p>④-b ハイブリッド多接合：ウエハ接合</p> <p>東京大学（中野・杉山 G）</p>	<p>GaAs 系 2 接合とウエハ接合による 4 接合セルを形成するための InP 系 2 接合セルを作製し、GaAs フィルタ下で GaAs 系 2 接合と電流整合条件を確認する。また、GaAs 系 2 接合と InP 系 2 接合の接合条件を確立する。</p>	<p>MOCVD の低温成長化により、InP 基板上の InGaAsP および InGaAs 成長を改善。バンドギャップ 1.05 eV の InGaAsP セル、0.75 eV の InGaAs セルそれぞれについて、単セルの要求性能をほぼ達成。2 接合の特性も得た。</p> <p>2-4 インチサイズウエハ対応表面活性化接合装置を立ち上げ、Si、GaAs ウエハに対して機械的接合が成立する条件を求めた。GaAs-Si ウエハの接合について、ボイドレスで均一な接合面が得られた。</p> <p>表面活性化ウエハ接合に関して、高速原子ビームで処理した表面を、ショットキー接合を形成してアドミタンス測定を行うことで評価し、表面の電氣的欠陥の定量に成功。n-</p>	<p>△</p>	<p>1.05/0.75 eV の 2 接合セルに関しては、今年度中にトンネル接合を改良・目標性能達成予定。</p> <p>GaAs 系と InP 系のセル接合に関しては、素子構造と表面結晶組成を詰めて今年度中に接合条件を得る予定。</p>

		GaAs ホモ接合の界面抵抗と上記で評価した濃度の相関を確認。		
④-b ハイブリッド多接合：窒化物 名古屋大	InGaN 吸収層を利用した PV の PC シミュレーションに基づき、c 面、-c 面、(1-101)面に成長する厚膜 InGaN を用いたセルの最適構造設計を行い、その結果を東京大学及び名城大学へ提供する。	c 面、-c 面(1-101)面に成長する厚膜 InGaN を用いたセルの特性を、ピエゾ電界の効果を取り入れた PC シミュレーションにより予測、非極性面の優位性を実証した。 m 面サファイア基板への $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 成長を行い、セル特性を測定した。(1-101)面上での PC シミュレーションに関して、系統的に膜厚と In 組成を変化し、30%程度の In 組成で 300 nm 膜厚の場合に、7 mA/cm ² の電流が得られることが分かった。(1-101)面 GaN 基板を用い、In 組成 20%程度の 180nm 膜厚の InGaN 成長し、表面モフォロジーの良い InGaN 結晶が得ることに成功した。 エミッション顕微鏡によりリーク箇所を特定したところ、ファセット由来のリークが確認され改善を必要とすることが分かった。	○	
④-b ハイブリッド多接合：窒化物 名城大	窒化物半導体太陽電池と 3 接合太陽電池の接合技術を確認し、4 接合セルを作製する技術を確認することし、窒化物半導体材料がトップセル材料として有用であることを実証する。	ITO を中間層として用いた接合技術の確立。特に ITO の貼り合わせに関しては、ITO の膜質に注目し、作製方法をスパッタ法、イオンプレーティング法、蒸着法など様々な方法を検討し、イオンプレーティング法が接合特性の改善が確認できた。その一方で、接合界面の抵抗が向上してしまう問題が確認できたので、その点の改善を行った。 接合強度を引っ張り試験機で定量的に評価を行い、得られた結果から直接接合においてはプロセスに問題ない接合強度が得られた。またデバイスプロセスを行い、定量的な解析を進めた。また、4 接合セルの試作を行い、開放電圧の向上を確認した。半極性面 GaN 上の厚膜 InGaN の作製技術を確認し、その太陽電池への有用性の検討を進めた	○	
④-b ハイブリッド多接合：窒化物 東京大学 (藤岡 G)	低温 PSD 法によって In 組成 40%、膜厚数ミクロン以上の InGaN 厚膜を実現する。	スパッタガンの改造やチャンバー構造についての検討を進め、InGaN 薄膜の成長速度 1.2 μm/hr までの高速化を実現した。 PSD 法を用いて格子整合 ScAlMgO ₃ (0001) 基板上への InGaN エピタキシャル成長を実現した。 PSD 高速成膜条件において、InGaN 薄膜成長条件の最適化を実施し、GaN テンプレート基板上において高品質 $In_{0.3}Ga_{0.7}N$ 成長を実現した。	○	

		トンネル接合用の高 Si 濃度 n 型 GaN 層を作製する技術を開発し、電子濃度 $10^{20}/\text{cm}^3$ 台で電子移動度 $100 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上、を実現した。		
④-c 量子ドット・マルチバンド 東京大学 (岡田 G)	(1) 面内密度 $10^{12}/\text{cm}^2$ 前後の超高密度 InAs 量子ドットのサイズ微小化と高均一化、 (2) InAs/GaAsSb タイプ II 超格子を用いた中間バンドの長寿命化、 (3) 2 段階吸収による電流増大を改善するための AlGaAs、InGaP などの高エネルギーギャップ材料を用いた量子ドット埋め込み構造、を統合的に実装した量子ドットセル、及び低電流・高電圧型低倍集光セルで効率 30% の達成を目指す。	(1) AlAsSb バリア構造の導入により、量子ドット太陽電池のキャリア収集効率を改善。 (2) Type-II 型 GaSb/GaAs 量子ドット太陽電池の開発に着手し、量子ドットに As を照射することで EQE の改善に成功。 (3) 低電流・高電圧型量子ドットセルに向けた InP 基板上 InGaAs セルの開発に成功。 (4) 量子ドット閉じ込め準位間での電子トンネル効果導入によりデバイス内での効率的なキャリア分離をシミュレーションにより確認。 (5) 多重積層量子ドット導入によるラチェット効果により特性向上が期待されることをシミュレーションにより確認。 (6) フォトンラチェット機構を取り込んだ最適セル構造をシミュレーションにより設計。 (7) 産業技術総合研究所と連携し、系統的なバリア層ワイドギャップ化により、室温 2 段階光吸収の高効率化に向けた設計指針を解明。 (8) 量子ドットによる 2 段階光吸収を実用レベルに高めるための設計指針を実験的に解明。 (9) Type-II 型量子ドット太陽電池において、2 段階光吸収の電流増大を維持しつつ、動作温度を 250K まで改善することに成功。	○	今年度末に達成見込み
④-c 量子ドット・マルチバンド 東京大学 (久保・立間 G)	・ PbS/ZnO-NW セルの近赤外領域 (800nm 以上) で、PCE=4% と $J_{sc}=14\text{mA}/\text{cm}^2$ を達成 ・ PbS-QD の吸収領域を 0.65eV に拡張し、第一励起子吸収に対応する EQE で 20% を達成 ・ 金属ナノ粒子のプラズモン電場共鳴を 1400nm で達成し、PbS /ZnO-NW セルに組込、特性を評価	○量子ドットボトムセルの高効率化 ・ ボトムセルとしてのポテンシャル検証として、750nm カットフィルターを装着したセルで、短絡電流密度 $15.3 \text{ mA}/\text{cm}^2$ および変換効率 2.63% を達成した (中間目標 : 800nm カットフィルター装着、 $14 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 、4%)。 ・ コロイド量子ドット溶液の吸収領域を 0.65 eV まで拡張した。また、吸収に対応する波長領域で光電変換を実現した。 ・ EQE の立上りを拡張し、第一励起子吸収 (0.82 eV) の EQE で 29% を達成。前回報告した励起子吸収 (0.92 eV) の EQE は、26% から 40% に向上。	○	一部未達の間目標は、今年度末に達成見込み

	<ul style="list-style-type: none"> ・メカニカルタンデムセルを作製し、光電変換特性を評価 	<p>EQE の立上りを 0.65eV まで拡張した。</p> <p>○ナノ粒子の設計・合成・評価および増強効果の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1500 nm 域までプラズモン共鳴を示す金属ナノ粒子を組み込んだ量子ドット太陽電池の光電変換特性を確認。 		
④-c 量子ドット・マルチバンド 産業技術総合研究所	低倍集光量子ドットセルで効率 30% を達成（岡田 G と共同）	<ul style="list-style-type: none"> ・InGaP 系ワイドギャップ半導体中にタイプ II 型 InP 量子ドットを作製することに成功。 ・タイプ II 型 InP 量子ドットにおいて長キャリア寿命（30 ナノ秒以上）を達成。 ・タイプ II 型 InP 量子ドットを導入した InGaP 系ワイドバンドギャップ量子ドット太陽電池において長キャリア寿命（50 ナノ秒以上）を達成（世界最高）。 	△	年度末までに岡田 G と共同で達成見込み。
④-c 量子ドット・マルチバンド 電気通信大学	量子ドット面内密度 $1\sim 3\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の達成	<ul style="list-style-type: none"> ・低コスト水冷 MBE による世界最高面内密度 $1\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の量子ドット成長技術の確立。 ・面内超高密度量子ドット層の熱処理による結晶性改善効果の確認。 ・面内超高密度 InAs 量子ドット層における 3 次元量子閉じ込め状態の観測。 	◎	
	面内高密度量子ドット層の多重積層化 ($1\times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ の達成)	<ul style="list-style-type: none"> ・量子ドット面内密度 $0.5\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の 10 層積層成長による $0.5\times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ を達成。 	△	
	type-II バンド構造による蛍光寿命 10 ns 以上	<ul style="list-style-type: none"> ・GaAs スペーサ層の導入による長寿命化（蛍光寿命 20 ns）を観測。 ・Type-II 型面内超高密度量子ドット層における励起子状態、ドット間の電子輸送、光吸収・再結合遷移過程の解明。 	◎	
	超高密度量子ドットセルの試作と低集光特性 評価	<ul style="list-style-type: none"> ・Urback tail による開放端電圧 (Voc) の低下現象を観測した。 ・成長条件の検討により、高密度量子ドット試作セルにおいて Voc を 0.2 V 改善。 	○	
④-c 量子ドット・マルチバンド 神戸大学	キャリア寿命制御技術を構築して、10ns 以上の長寿命化を達成 2 段階光吸収を顕在化させて、キャリア引出効率 50% を達成	<p>(1) 量子ドット超格子を作製する成長条件を明らかにし、波長制御と超格子化を同時実現する技術を構築した。(世界初)</p> <p>(2) 量子ドット超格子ミニバンド中でキャリアが効果的に分離することを見出し、電子寿命は 10ns を超えて 1 μs 程度まで長くなっている可能性を明らかにした。(世界初)</p>	◎	

		<p>(3) ワイドギャップ材料の AlGaAs で量子ドットをサンドイッチした構造により室温で2段階光吸収電流を観測した。(世界初)</p> <p>(4) 量子ドット超格子ミニバンド中のキャリア分離によってキャリア引出が最大で2倍以上向上することを見出した。(世界初)</p> <p>(5) ワイドギャップ材料の AlGaAs で量子ドットをサンドイッチした構造において励起光強度(光集光)依存性を詳細に調べ2段階光励起が最大化する条件を明らかにするとともに、室温で電子寿命が1ms程度まで長くなっている可能性を見出した。(世界初)</p> <p>(6) ワイドギャップ材料の AlGaAs で量子ドットをサンドイッチした構造におけるサブバンドギャップ光による2段階励起電流が全光電流の70%(赤外光によるキャリア引き出し効率)に達していることを確認し、100倍集光程度で開放端電圧が顕著に増加することを見出した。(世界初)</p>		
--	--	---	--	--

* 1 達成度

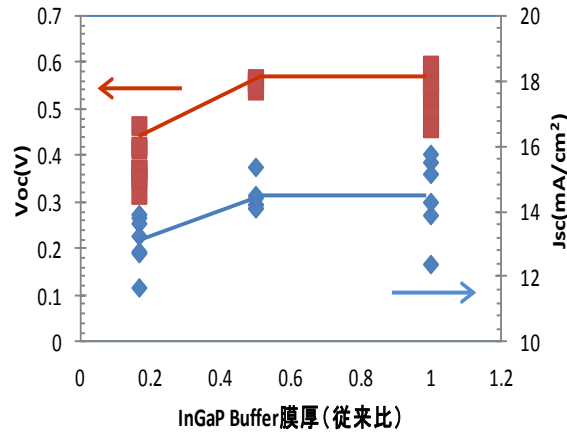
◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

1. 成果詳細

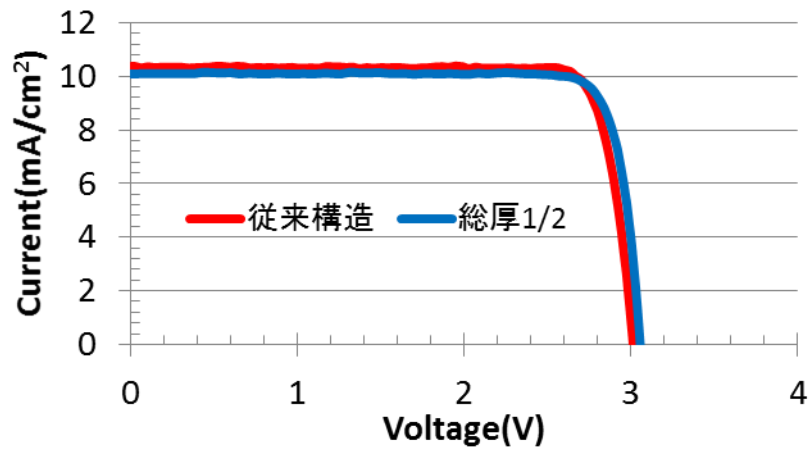
《チーム①. 低コストセル技術開発》

Ⅲ-2- (ロ) -1-①-a 高効率Ⅲ-V薄膜セル開発 (光閉じ込め) シャープ(株)

- ・セル薄層化のためのミドルセラーボトムセル間のバッファ層厚さ低減検討を実施。従来比 1/6 までの検討を行い、1/2 までは従来と同等の特性が維持できる構造を得た。
- ・要素検討 (裏面反射構造、サブセルベース厚さ短絡電流依存性、バッファ層薄型化) を組み合わせて、3 接合型セルの薄層化検討試作を実施。総厚約 50% 減で従来と同等の電気特性を得た。



図Ⅲ-2- (ロ) -1-①-a-1 バッファ層上セル (InGaAs) の電気特性のバッファ層厚さ依存

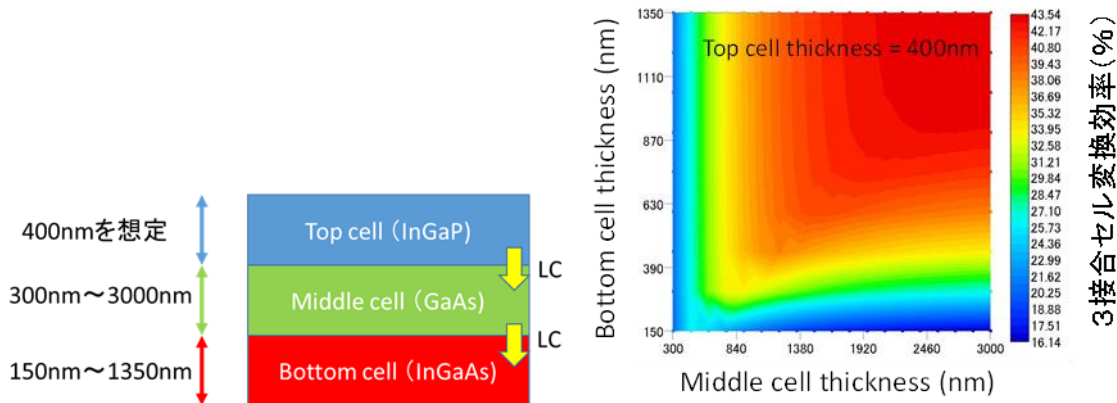


図Ⅲ-2- (ロ) -1-①-a-2 3 接合セルの電気特性 (従来構造と厚さ 1/2 の比較)

III-2- (ロ) -1-①-a 高効率III-V薄膜セル開発 (光閉じ込め) 東京大学 (岡田 G)

・多接合セルにおける LC 効果解析

ルミネッセントカップリング (LC) 効果を考慮した InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池の変換効率の数値解析を行った。InGaP トップセルの厚みを 400 nm に設定した時、LC 効果により変換効率が 0.15% 程度増大する結果を得た。また LC 効果を考慮することで各サブセルの厚みを薄くできることを明らかにした。



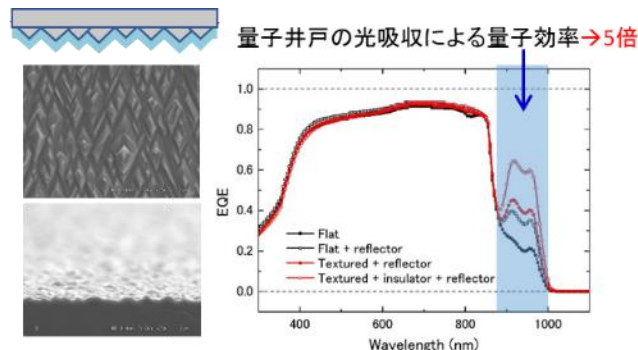
図III-2- (ロ) -1-①-a-3 InGaP/GaAs/InGaAs 3 接合太陽電池における LC 効果を考慮した変換効率の理論解析。LC 効果を利用して高効率を維持し、各サブセルの厚みを薄くすることが可能になる。

・多接合セルにおける LC 効果の擬 2 次元シミュレーション解析

ルミネッセントカップリング (LC) 効果を考慮した解析を擬 2 次元に拡張し、InGaP/GaAs/Ge 3 接合太陽電池における LC 電流の面内分布を評価した。Laser beam induced current (LBIC)により測定した GaAs/Ge サブセル間の LC 電流は面内で不均一になり、擬 2 次元シミュレーション解析を用いて再現した。LC 効果の面内不均一性を改善することにより、変換効率が 0.36% 増大する結果を得た。

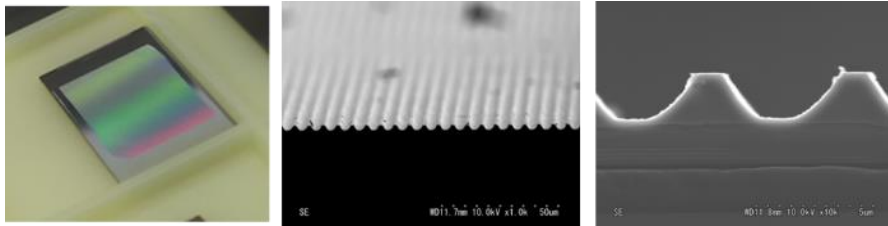
III-2- (ロ) -1-①-a 高効率III-V薄膜セル開発 (光閉じ込め) 東京大学 (中野・杉山 G)

裏面テクスチャ光閉じ込め構造をウェットエッチングのみで形成する手法を確立。量子井戸挿入 GaAs 単セルをテストケースとして効果を実証した。セル裏面から基板を除去、薄層誘電体と金属による裏面光散乱構造を形成し、量子井戸の光吸収波長領域における外部量子効率の増大から、光路長増大 5 倍を実証した (世界初)。今回の実証では光吸収が弱い量子井戸の吸収波長域のみで EQE の増大が示されたが、原理的に本手法は波長によらず効果を発揮し、多接合を含むあらゆる構造の太陽電池における光吸収増大に適用可能である。



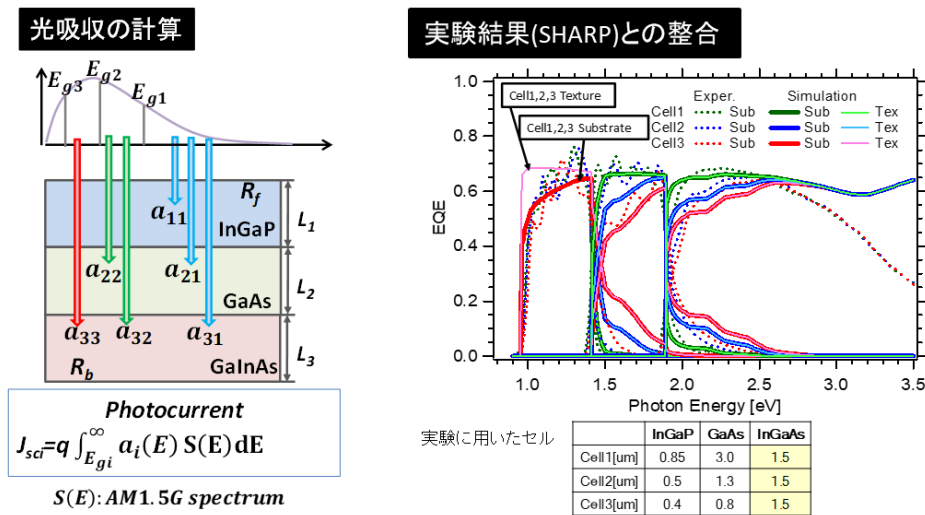
図III-2- (ロ) -1-①-a-4 量子井戸挿入 GaAs 単セル裏面に形成した光散乱構造と、それによる量子井戸光吸収領域での EQE 増大

シャープと共同で、薄層化3 接合セルのボトムセルに裏面テクスチャを施す新構造を考案。裏面コンタクト層の AlInGaAs 層に対して光散乱テクスチャの形成に成功した。また多接合セルにおける光閉じ込め効果を実証するためのエピウエハ構造を検討した。



図III-2- (ロ) -1-①-a-5. 薄層化3 接合セルのボトムセル裏面に形成した光閉じ込めテクスチャ

このような裏面散乱体の存在を仮定して、3 接合セルの各サブセルにおける光吸収が 100%でない条件において、薄膜サブセルの有限光吸収と LC 効果、発光再結合効率を考慮した薄膜3 接合セルの効率シミュレーションを実施した。サブセル厚の合計が 1.5 μm 程度で効率 33%以上を達成できる可能性を示した。



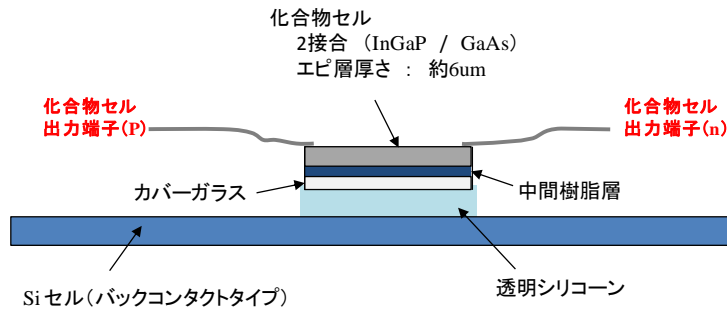
図III-2- (ロ) -1-①-a-6. 裏面が完全光吸収体、完全反射ミラー、理想的な光散乱体（ランバート散乱体）の3 ケースを想定した、薄層化3 接合セルにおける光吸収と生成電流・EQE のシミュレーション。左はモデルの概念を表し、右はシャープが作製した薄膜3 接合セル（サブセルの厚さが異なる3 構造）のEQE をシミュレーションし、モデルの妥当性を検証した結果。

表III-2- (ロ) -1-①-a-1. 裏面が理想的な光散乱体の場合に、電流整合する3 接合セルのサブセル厚さの組み合わせと、予測される効率。隣接サブセル間におけるルミネッセンスカップリングを考慮し、内部発光効率 1%を仮定した。

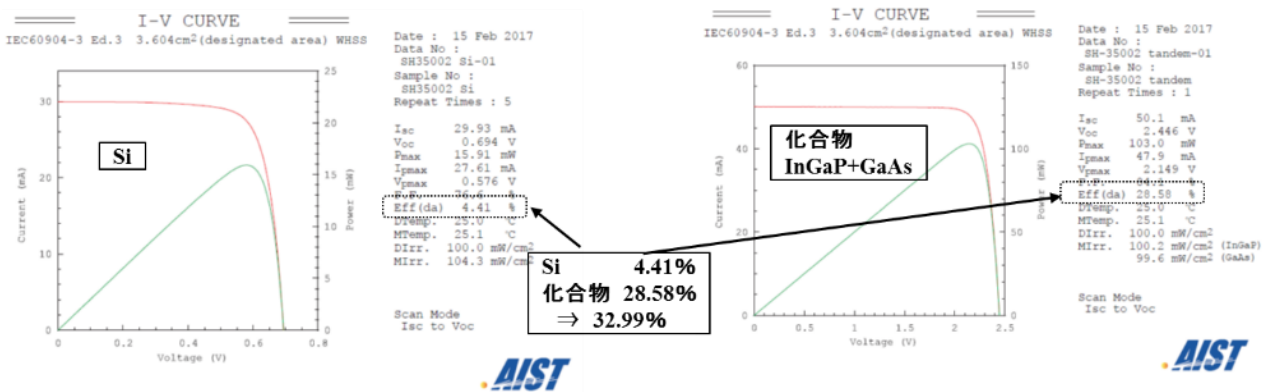
L1	L2	L3	Eff.
100	47	11	23.37
200	122	24	27.75
300	266	45	30.52
400	526	78	32.50
450	696	99	33.25
500	885	122	33.86
550	1086	147	34.36
600	1304	174	34.78
700	1789	229	35.38
800	2435	287	35.76

III-2- (ロ) -1-①-b シリコン上III-V (多接合セル) シャープ

・メカニカルスタック法にて、化合物2接合 (InGaP/GaAs) と Si セル (バックコンタクト型) とを透明樹脂層を介して接合したセルを試作。産業技術総合研究所での測定で 33.0%を確認した。



図III-2- (ロ) -1-①-b-1 産業技術総合研究所で測定を実施した化合物2接合+Siセルの構造



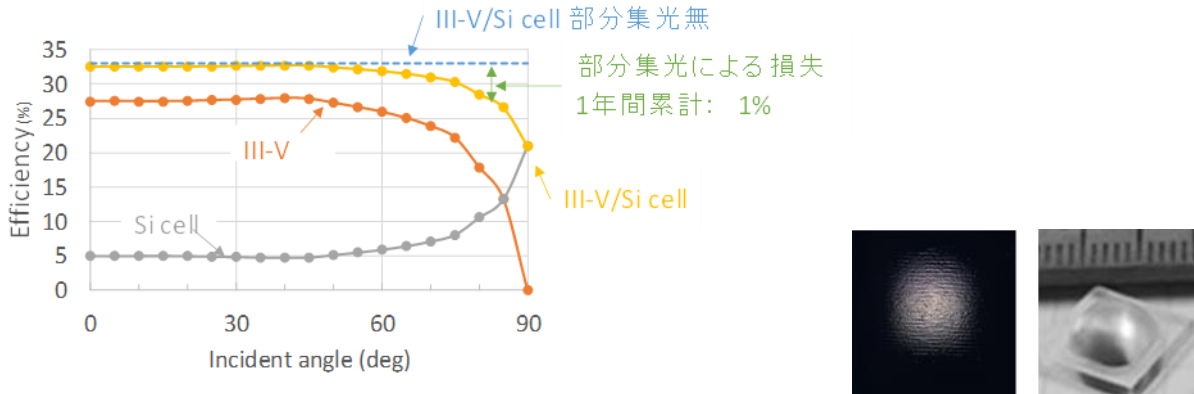
図III-2- (ロ) -1-①-b-2 産業技術総合研究所での電気特性測定結果

III-2- (ロ) -1-①-b シリコン上III-V部分集光多接合セル 豊田工業大学

III-V/Si 用ボトムセルとして、裏面再結合を抑制し長波長の応答を改善したボトムセルを開発した。さらに、プラズマダメージを抑制する中間層を付与したボトムセルを開発し、大阪市立大学で28%のIII-V/Siセル効率が得られた。

メカニカルスタック型III-V/Siセルを開発し、28.2%（産業技術総合研究所確認）が得られた。この成果は、前節で述べたシャープによる33.0%効率モジュール実現に貢献した。

また、トップセルであるIII-Vセル部をコストダウンするため、チームIIIの成果を活用し、部分集光によるメカニカルスタックを検討した。Siと比較して高価であるIII-Vセルの使用量が無追尾集光により削減できるメリットがある。予備試作を実施し、試作可能であること、および、集光による年間発電量も1%しかなく、発電コストでメリットがあることを示した。

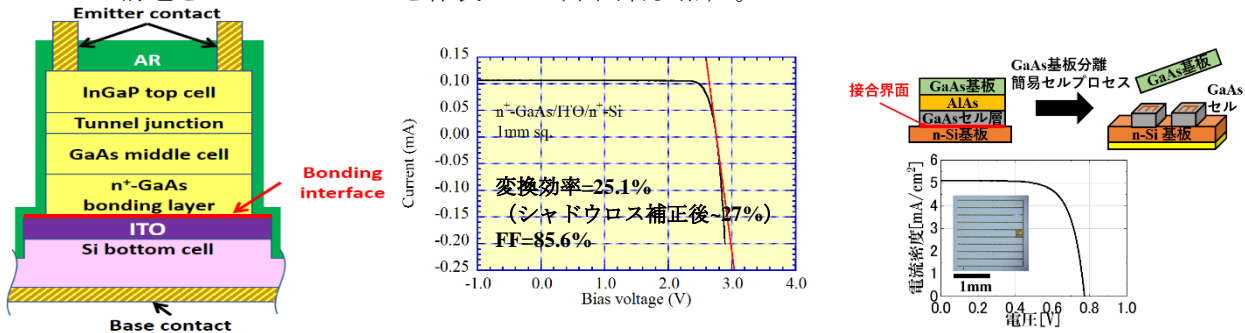


図III-2- (ロ) -1-①-b-3 (左) 部分集光セルの効率予測、(右) 予備試作したメカニカルスタック用部分集光レンズと表面加工痕顕微鏡写真

III-2- (ロ) -1-①-b シリコン上III-V (ウエハ接合セル) 大阪市立大学 (豊田工業大学から再委託)

ITOを接合中間層とするInGaP/GaAs/ITO/Si 3接合太陽電池を作製した。暗中のI-V測定により、中間層を用いない3接合太陽電池と比較して界面抵抗の低減を確認した。in houseの測定により1mm角セルの変換効率~27%（シャドウロス補正後）を得た（下図左及び下図中参照）。本構造を特許出願した。

犠牲層エッチングにより、GaAs/Siウエハ接合構造からGaAs基板を分離した。Si基板に残ったGaAsセル構造をプロセスしセルを作製した（下図右参照）。



図III-2- (ロ) -1-①-b-4 InGaP/GaAs/ITO/Si 3接合太陽電池の構造とI-V特性

III-2- (ロ) -1-①-c プラスチックレンズ一体型セル・モジュール (PIC) パナソニック(株)

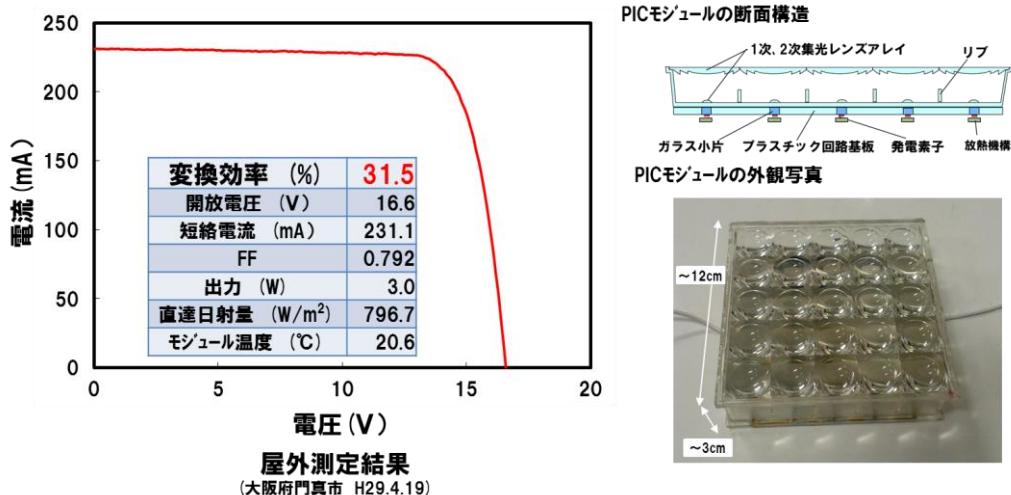
本テーマは、1) 高効率モジュール設計技術の確立と2) 低コストアSEMBル技術の確立の2項目で開発を進めている。

1) 高効率モジュール設計技術の確立：

1-1) モジュールの基本構造の設計

PICモジュールはプラスチックを主材料とするため、これまで実用化されている集光型太陽電池モジュールと比較して強度・剛性・耐衝撃性に課題を有することが予測された。このため、これら機械的な強度と低コスト化を両立する箱型モジュール構造を設計開発し、1次レンズと2次レンズおよび2次レンズと回路基板を接着する技術を開発適用することで、長期の屋外環境での評価に耐え、国際

規格(IEC62108)の降電試験でも破壊されないモジュールを開発した。下図に PIC の太陽電池特性と外観写真を示す。構造としては、一次集光レンズとしての3分割フレネルレンズ(レンズアレイ：11cm□)、内部にリブ構造を配し機械的な強度を確保した2次集光レンズ、ガラス小片を埋め込んだプラスチック回路基板、放熱機構から構成されている。これらを組合せた基本構造検証用 PIC モジュール(12cm□、5×5 レンズアレイ、ガラス小片埋込プラスチック回路基板、1mm□ 3 接合 III-V 族半導体セル)を開発し、研究実施場所(大阪)にて最大変換効率：31.5%を確認した。

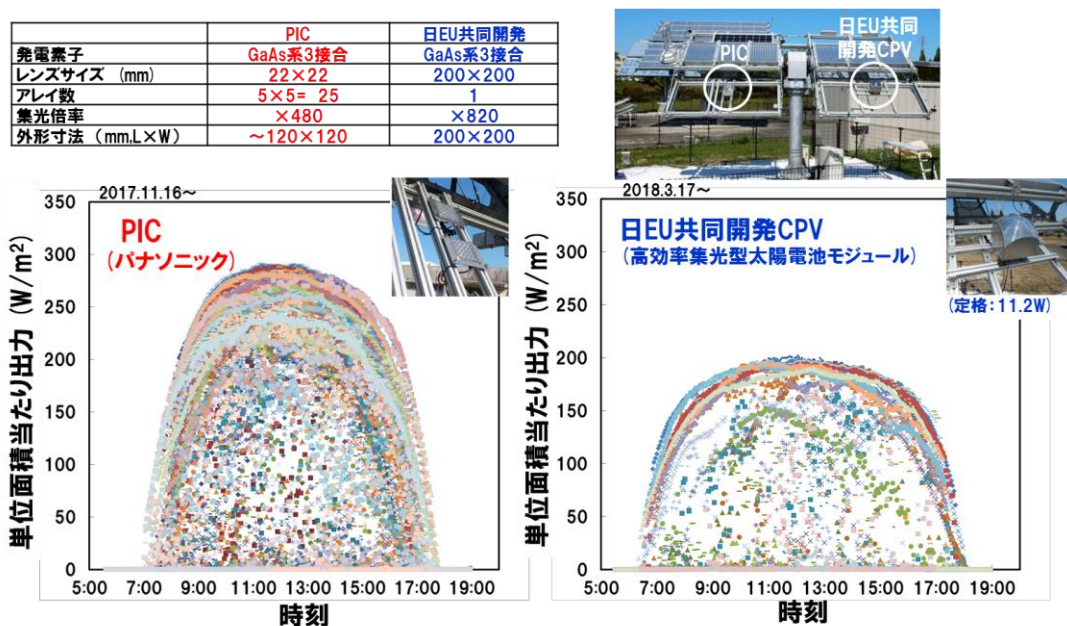


図III-2- (ロ) -1-①-c-1 PICの太陽電池特性と外観写真等

1-2) 発電素子の実装、配線への電気接続技術の開発

発電素子を回路基板上に高精度に配置して電気接続する実装技術としてパナソニック(株)の保有するSMT (Surface Mount Technology) ¹⁾と、はんだリフロー工程時のセルフアライメント効果を組み合わせた実装技術を開発した。印刷した回路の電極と発電素子の電極、それぞれの中心位置のXYずれ量を±10μm以内に収まるプロセス技術を開発した。さらに、これら技術を用いて開発した基本構造検証用PICモジュール(ガラス回路基板)は、研究実施場所(大阪)および宮崎大学での屋外評価施設で7ヶ月以上の評価後もプラスチック材料起因による発電性能の低下が観察されていない。また、図1-2に宮崎大学で評価した、PICと日EU共同開発CPVの発電特性を示す。単位面積当たりの出力で比較すると、日EU共同開発CPVと同等以上の出力を得ている事がわかった。

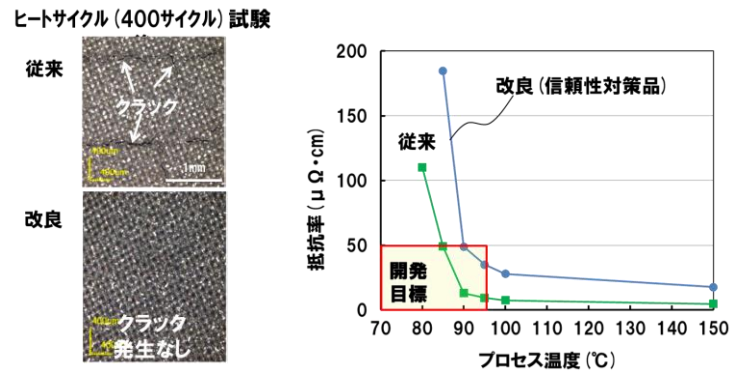
1)パナソニックホームページ：https://industrial.panasonic.com/jp/products/fa-welding/fa/mounting-related



図III-2- (ロ) -1-①-c-2 PICと日EU共同開発CPVの太陽電池特性比較(宮崎大学)

1-3) プラスチック基板上への配線形成技術の開発

独自に開発した Ag ペースト材料を用いて、印刷法と低温硬化処理を組み合わせた配線形成技術を開発した。図 1-3 に評価結果を示す。平成 27 年に報告した Ag ペースト材料(従来)は、低温で硬化し抵抗率も目標を満たす材料であったが、ヒートサイクル試験(-40℃~85℃、IEC62108)でクラックが発生することがわかった。このため硬化温度と抵抗率で目標を満たすと共に、ヒートサイクル試験でもクラックの発生が観察されない新たな Ag ペースト材料(改良)を開発した。実施計画で想定していた回路基板のプレ加工(ミゾ加工)を行なうことなく、平坦なプラスチック基板に配線を印刷し、この基板の耐熱温度よりも低い 95℃で熱硬化する事で目標とした配線の抵抗率： $5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下を得る事に成功した。



図III-2- (ロ) -1-①-c-3 Ag ペースト材料の表面写真と抵抗率の硬化温度依存性

1-4) 1000 倍集光を可能にする低コストレンズ設計・基本作製工法の開発

実施計画では、発電素子の外形寸法を 1mm□から 0.6mm□とすることで発電素子と集光レンズの面積比率で 1000 倍の集光を実現し、ウエハコスト(発電素子コスト)を約 64%低減するとしていた。しかしながら、低倍集光発電用ウエハ開発の進捗を鑑みると、目標である現状コストの $1/10^1$ に向けた開発が進み、同じコストであればより大きな面積の発電素子が使用可能となりつつある。PIC の場合、発電素子の面積拡大に伴い、レンズの許容入射角が大きくなり、追尾装置のアクチュエータが簡略化され、コスト低減が可能となる²⁾。さらに、今回開発した高精度なレンズ成形技術と正確な実装技術を用いる事で、組立てマージンの一部をレンズ許容入射角の拡大に割り当てることが可能となり、さらなる追尾装置のコスト低減につながる。海外の追尾装置メーカーから得た情報によると、追尾精度が $\pm 0.25^\circ$ の場合、追尾装置のコストは 66.8 円/W であるが、追尾精度が $\pm 1.0^\circ$ であればそのコストは 39.5 円/W まで低下し、この差額 27.3 円/W のコスト低減が可能となる ($\$1=\text{¥}100$ で換算)。この低減率は追尾精度が $\pm 0.25^\circ$ の場合の約 41% に相当し追尾装置の低コスト化に大きく寄与する。

この新たな観点から、発電素子のサイズを実施計画の 0.6mm□から 1.2mm□とする事で、追尾マージンを 0.25° から 1° まで緩和できるモジュール・システム設計を行っている。今年度は、これらの観点を含めて、低コストモジュールの設計・基本作製工法を確立する。

また、PIC はプラスチックレンズを用いる事から、プラスチック材料の耐光性が課題となる。研究実施場所(大阪)では、プラスチック材料の劣化による変換効率への影響などを評価するために 10 ヶ月以上の屋外評価を行ない、さらに、レーザ光を用いたプラスチック材料の加速評価装置を開発し、評価を進めている。

1) 岡田 等, 平成 28 年度 NEDO 新エネルギー成果報告会 太陽光発電分野, 予稿集 No.P1-13 「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」, 2016

2) 荒木 等, 「集光型太陽光発電 (CPV) の最新動向〜集光型太陽電池技術と市場の概要から、集光セル、集光光学系、集光モジュール、追尾架台、発電システムの実際まで〜」セミナー資料, 2012, (株) 情報技術センター

2) 低コストアセンブル技術の確立:

2-1) 低コスト・高精度射出成形技術の開発

実施計画に従い、射出成形時間と形状の再現性をバランスした高精度射出成形技術の開発を行なった。今年度は、この開発をさらに進め、長寿命と低コストを両立する金型作製技術の開発を行ない、低コスト・高光利用率を得る新規のレンズ構造を実現する金型を作製し、仕様を満たす射出成形技術の開発を行なう。

2-2) 低コスト実装・組み立て技術の開発

新たに設計した PIC 構造を実現するための基本工法を設計し、これを各工程の基本仕様へ落とし込み、次いで、それを具現化するための設備仕様を決定、導入・立上げを行った。これにより、PIC を試作し、要素技術を開発するための環境を構築した。さらに、工法および設備の基本仕様を考慮したシステムコストの試算式を更新し、2020 年から 2030 年に向けたコスト試算式の拡充とコストターゲットを明らかにした。

《チーム②. 低コスト化プロセス技術開発》

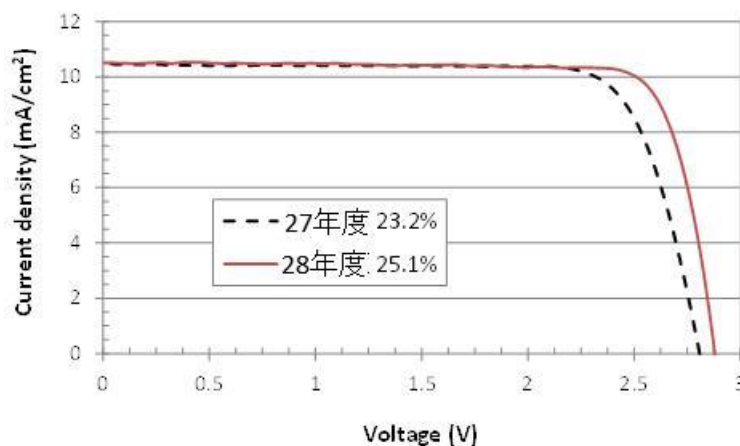
Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a 低コスト実装プロセス：メカニカルスタック 産業技術総合研究所

＜スマートスタック＞

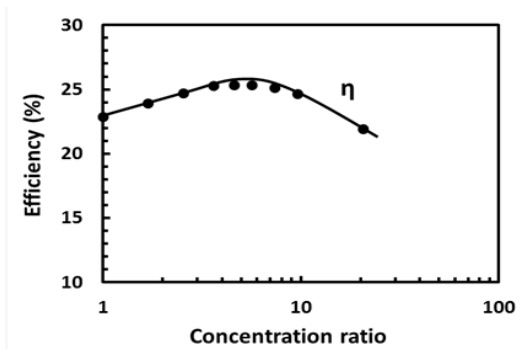
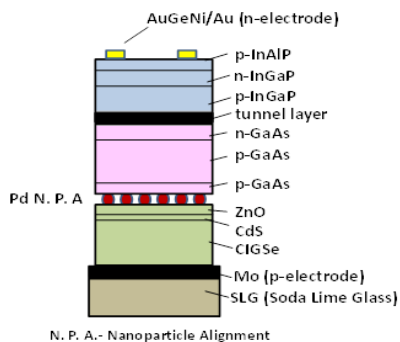
本テーマにおいては、Pd ナノ粒子配列を利用したスマートスタック技術により、モジュール発電効率 30%以上を有しかつコストミニマムなセル構造および実用化技術を検討している。以下の二項目について、これまでに得られた研究開発成果の詳細を記す。

① 低コストハイブリッド多接合技術開発

スマートスタック接合条件、プロセスの最適化、III-V 族トップセルの高品質化及び最適膜厚の検討により、III-V/Si や III-V/CIGS 多接合セルの高効率化を図った。特に GaAs 系トップセルのハンドリング技術を開発し、シリコン樹脂を用いることにより、脆弱な GaAs 系トップセルの基板からの剥離→ボトムセルへの搬送・接合→シリコン樹脂のみの除去、といった一連のプロセスが歩留り良く実施できることを見出した。この新たなプロセスを用いた場合のスマートスタック接合条件を検討し、最適となる荷重量・温度・時間に目途をつけた。ダイシング加工により、トップセルとボトムセルの面積整合を図ったことによる Voc 向上を確認した。以上の新プロセス・新条件・加工を適用することにより、III-V/Si スマートスタックセルの変換効率としては、28 年度に 25.1%を達成した。その電流電圧特性を下図に示す。27 年度の 23.2%から向上していることがわかる。また、低コストの観点より開発を行う低倍集光セルにおいては、III-V/Si スマートスタックセルの変換効率として 23.7% (8 倍集光) を達成、基本検証に成功した。さらに、GaAs/CIGS 3 接合スマートスタックセルについては、25.3% (5.7 倍集光) を実現し、III-V/CIGS 系 2 端子セルとして世界最高性能を確認した (図Ⅲ-2-(ロ) -1 -②-a-2)。CIGS 上に III-V 族を接合できる技術はスマートスタックにおいて他に無い。特に CIS をボトムとして InGaP/GaAs と電流整合した 3 接合セルを作製可能という点で、超高効率・低コストセル応用への大きな利点がある。中間目標は、III-V/Si または III-V/CIGS 多接合セルで 28%を達成することである。今年度に入り、サブセルの特性改善や接合プロセスの改善により 27.7%の変換効率を確認しており、ほぼ中間目標達成したと言える。



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-1 III-V/Si スマートスタックセルの IV 特性



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-2 III-V/CIGSe スマートスタックセルの断面模式図と変換効率・集光倍率特性

低コスト・高効率スマートスタックセル実現に向けた要素技術として、GaAs 基板上的 InGaP トップセルの高効率化、及び InP 基板から剥離させた inverted 型ボトムセルの開発を行った。トップセルについては、固体ソース分子線エピタキシー (MBE) 法を用いて、InGaP セルの GaAs 基板オフ角度依存性を調べた。図 III-2- (ロ) -1 -②-a-3 にその I-V 特性とセルパラメータを示す。この結果から、[110] 方向にオフした基板と、[1-10] 方向に 2° オフした基板で変換効率が高くなることがわかった。[110] 方向にオフした基板では自然超格子形成が抑制されて Voc が高くなり、[1-10] に 2° オフした基板では自然超格子形成が一方向にのみ促進され、欠陥やトラップが減少することにより Jsc が増加することがわかった。

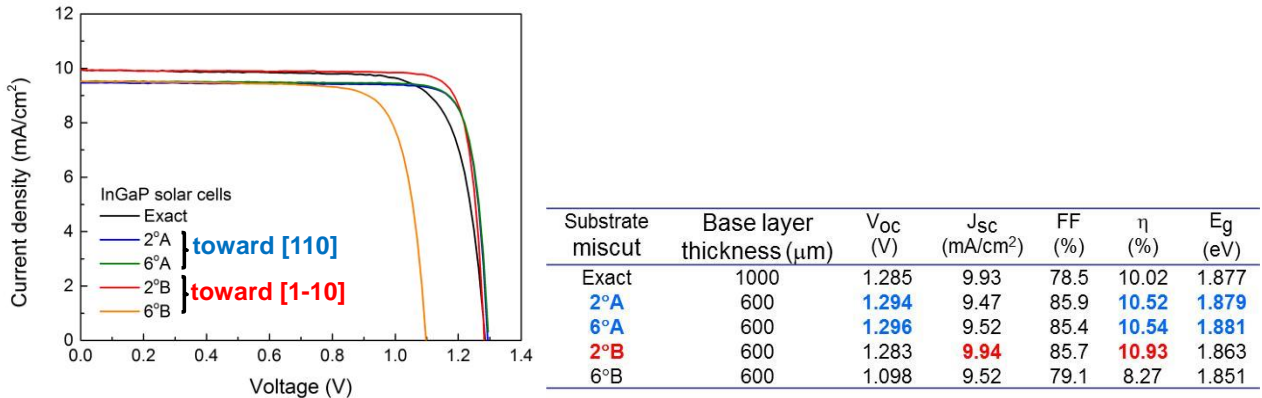


図 III-2- (ロ) -1 -②-a-3 InGaP セルの GaAs 基板オフ角度依存性と各セルの太陽電池パラメータ

ボトムセルを InP 基板から剥離して低コスト支持基板に転写する技術は、基板の再利用に繋がるほか裏面電極の反射を用いた光閉じ込めによってセル特性が改善されることを見込める。1.05 eV InGaAsP セル、及び 0.7 eV の InGaAs ボトムセルを開発した。半導体基板から剥離させていないセル (upright セル) に比べて、Si 支持基板に転写した inverted セルはいずれのサブセルにおいてもすべてのセル特性パラメータが向上し、変換効率は InGaAsP で 9.5% から 12.1% に、InGaAs で 8.2% から 9.5% に向上した (図 III-2- (ロ) -1 -②-a-4)。室温時間分解フォトルミネッセンス測定を用いて InGaAsP ボトムセルのキャリア寿命を評価したところ、inverted 型では 15.2 ns から 20.2 ns に長寿命化することが分かり、裏面反射によりフォトンリサイクリング効果が促進されたことが明らかになった。inverted 型ボトムセルを適応させた Si 支持基板上にプロセスした薄膜型 3 接合 InGaP /GaAs//InGaAsP (//はメカニカル接合部) スマートスタックセルを開発し、接合プロセスを改善することにより、変換効率は前年の 15.9% から 21.0% に向上した (図 III-2- (ロ) -1 -②-a-5)。

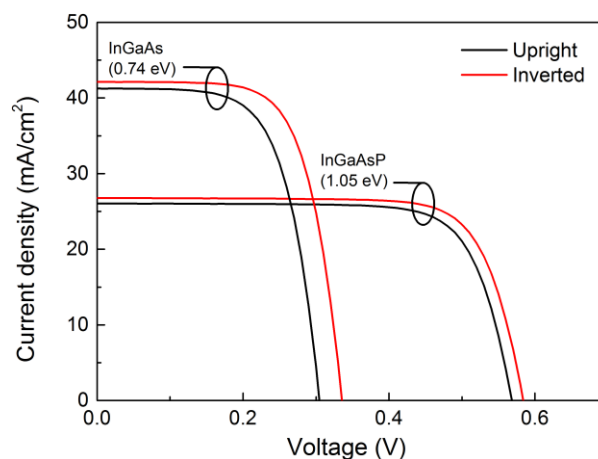
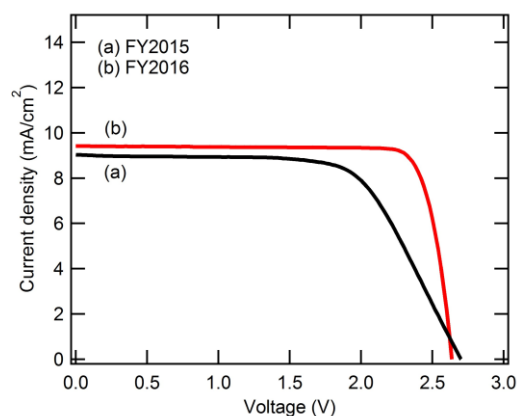


図 III-2- (ロ) -1 -②-a-4 InGaAsP, InGaAs ボトムセルの I-V カーブ (AM1.5G, 1sun)

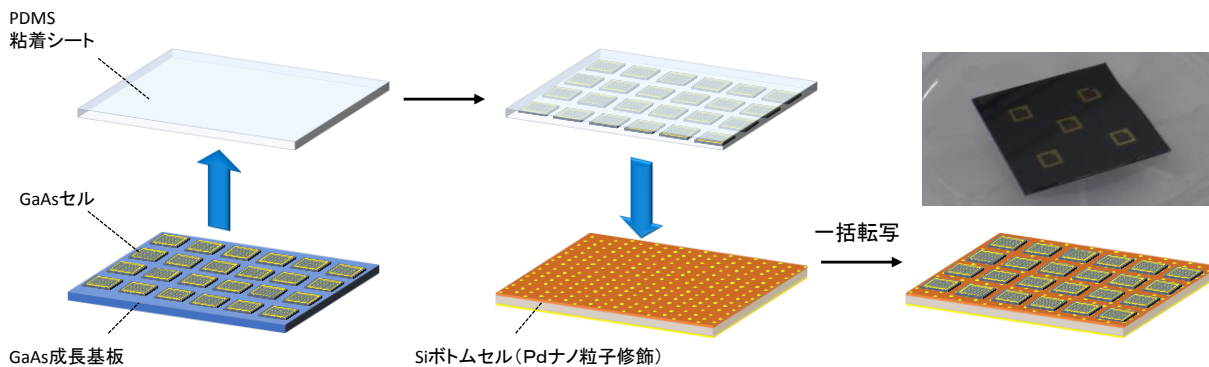


図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-5 InGaP/GaAs//InGaAsP 3 接合セルの I-V カーブ (AM1.5G, 1sun)

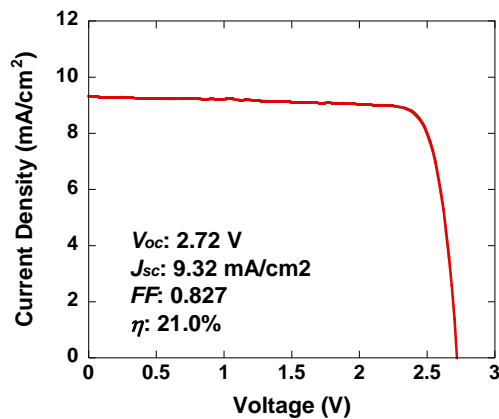
② 実用化技術開発

①で述べたシリコン樹脂を用いた新プロセスを応用し、複数枚の GaAs 系トップセルの一括剥離・転写プロセスを実証した (図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-6)。各セルの太陽電池特性にバラつきがないことを確認した。AR コートを施していない電流-電圧特性を図 7 に示す。変換効率は 21.0% であり、AR コート後には 25~26% の効率が期待できる。これと並行して、LED 実装等で用いられている高速マウンター装置を用いた個別搬送法も実証した。剥離プロセスに課題が見られたが、搬送・接合に関しては良好な知見が得られた。以上のように、中間目標にある、大面積化に応用可能な実装技術を実証した。剥離・搬送・荷重という一連のプロセスを歩留り良く行うためには、樹脂シート・トップセル・ボトムセル間の位置合わせ及び均一加重を高速に実行することが不可欠である。自動位置合わせおよび均一荷重機構を備えた実装装置の設計・作製も行っており、スマートスタック実用化、モジュール化に繋げることが可能である。

また、InGaP/GaAs//Si スマートスタック 3 接合素子について、150℃、100 時間、10 mA (105 mA/cm²、10sun 相当) の高温通電試験、及び -40℃ から 80℃、200 サイクルの温度サイクル試験を行った。いずれの試験においても素子の劣化は観察されなかった。活性化エネルギー 1.0 eV を仮定すると、60℃、1sun において 30 年稼働相当の耐久性を確認した。



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-6 複数枚 GaAs セルの一括剥離・転写プロセス概念図および 5 枚実証写真

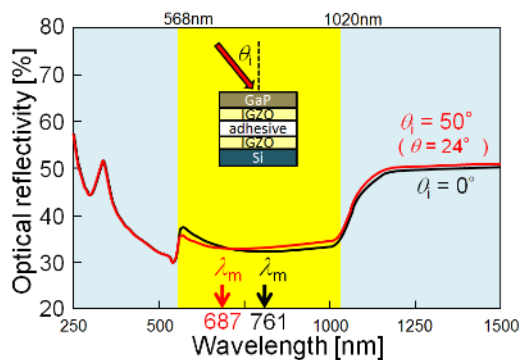


図III-2- (ロ) -1 -②-a-7 一括転写した InGaP/GaAs//Si 3 接合セルの J-V 特性

III-2- (ロ) -1 -②-a 低コスト実装プロセス：メカニカルスタック 東京農工大

① 高度光利用技術開発

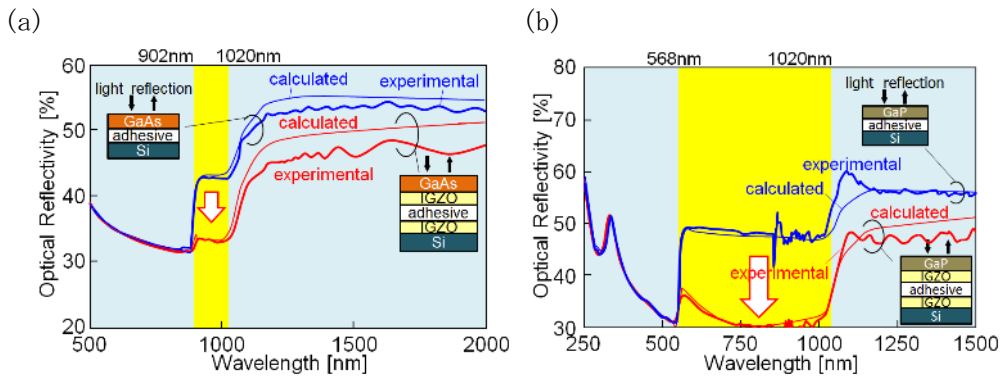
①-1. 光反射ロス評価用数値解析プログラム開発：半導体トップセルとボトムセルをメカニカルスタックしたときの光反射ロス低減評価のための数値解析プログラムを開発した。既に開発した air/非干渉半導体基板/多層干渉無反射層/非干渉半接着層/多層干渉無反射層/非干渉半導体基板/air 構造の計算プログラムに光入射角度効果を導入したプログラム開発を行った。図III-2- (ロ) -1 -②-a-8 に光をゼロ度正入射と 50 度入射したときの GaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Si 構造の試料の光反射スペクトルを示す。入射角度変化により無反射干渉効果に変化して反射率が僅かに変化することを確認した。本プログラムにより、入射角度を有する光のトップ基板透明、ボトム基板透明の波長領域における、実効的光伝達率 A_{eff} の算出が可能になった。



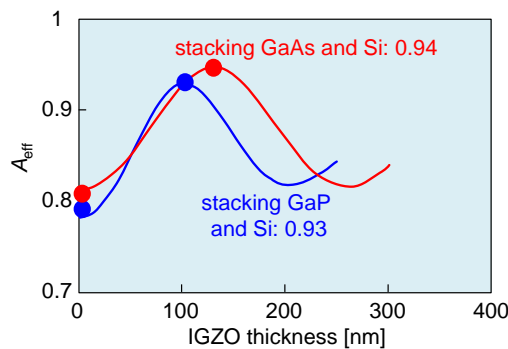
図III-2- (ロ) -1 -②-a-8 ゼロ度正入射と 50 度入射時の GaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Si 構造の光反射スペクトル

①-2. 無反射透明導電膜成膜開発：3 インチ GaAs 基板と 4 インチ Si 基板のスタック及び 2 インチ GaP 基板と 4 インチ Si 基板のスタックを検討した。プラズマパッタ法を用いて屈折率 1.85 の IGZO 薄膜を GaAs 及び Si 表面に 130nm、GaP 及び Si 表面に 102nm の厚さ形成した。そして IGZO 面にエポキシ接着剤を塗り 20 μ m サイズ ITO 粒子を 6 Wt%分散して IGZO 薄膜面を貼りあわせて、GaAs/130nm IGZO/adhesive/130nm IGZO/Si と GaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Si の試料を作製した。比較のために IGZO を形成しない試料も作製した。図III-2- (ロ) -1 -②-a-9 に分光光度計を用いて 5 度正入射測定した反射率スペクトルを示す。波長 902~1020 nm の光が GaAs に透明でありシリコンに吸収される波長帯であり (図III-2- (ロ) -1 -②-a-9 の(a)黄色帯)、568~1020 nm の光が GaP に透明でありシリコンに吸収される波長帯である (図III-2- (ロ) -1 -②-a-9 の(b)黄色帯)。IGZO 膜を形成した場合、黄色帯域の反射率は大きく低下し、黄色帯左外側端の反射率 (トップ基板のみの反射率) に近い値になった。これは IGZO 薄膜の無反射光干渉効果により接着層名面の光反射が低下して反射ロスが抑

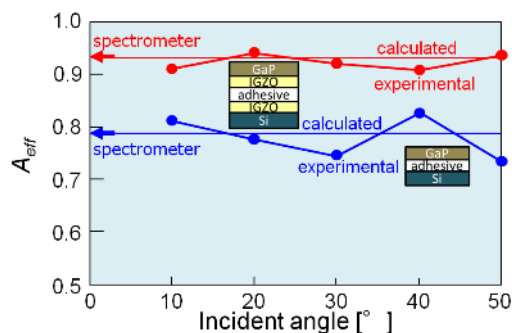
えられ、効率よく光がSiに吸収されたことを示している。図III-2-(ロ)-1-②-a-10にIGZO膜厚を変化したときの実効的光伝達率 A_{eff} の計算結果と実験結果を示す。シリコンに光が吸収される波長帯により最適IGZO膜厚を選ぶことにより高い A_{eff} を得られることがわかった。実験結果は計算のピーク値に近い値を示しており、GaAs/130nm IGZO/adhesive/130nm IGZO/Siにおいて A_{eff} は0.94、GaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Siにおいて A_{eff} は0.93と高い値となった。図III-2-(ロ)-1-②-a-11に光入射角度を0~50度としたときのGaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Si試料の A_{eff} の変化を示す。現状実験装置の精度は8%であるが、入射角50度するとき A_{eff} は0.91となり0度よりも僅かに小さくなった。



図III-2-(ロ)-1-②-a-9 5度正入射光反射率スペクトル(a) GaAs/130nm IGZO/adhesive/130nm IGZO/Si, (b) GaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Si



図III-2-(ロ)-1-②-a-10 IGZO膜厚を変化したときの実効的光伝達率 A_{eff} の計算結果と実験結果 (●)

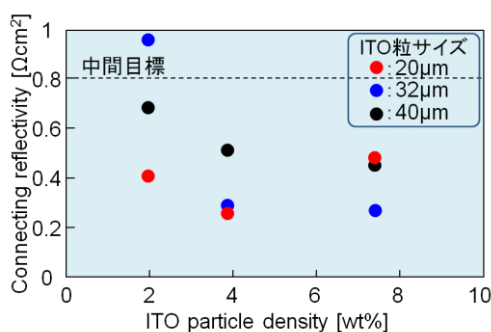


図III-2-(ロ)-1-②-a-11 GaP/102nm IGZO/adhesive/102nm IGZO/Si試料の A_{eff} の入射角度変化

② 大面積低抵抗接合技術開発

②-1. 低抵抗化検討：低抵抗シリコン基板を用いて低抵抗スタック化最適条件を調査した。エポキシ接着剤を塗布した基板とITO導電粒子を散布した基板を貼り合わせることで低抵抗化を試みた。またITOサイズ20, 32, 40 μm を調査した。図III-2-(ロ)-1-②-a-12に貼りあわせガス圧力0.8 MPaのときの接合抵抗率とITO重量比の関係を示す。ITO 3.8~7.4 wt%のとき、接合抵抗率 $0.3 \Omega\text{cm}^2$ の低い

値が得られた。ITO 粒子は分級しているが、粒子サイズと接合抵抗率との明確な相関は観測されなかった。



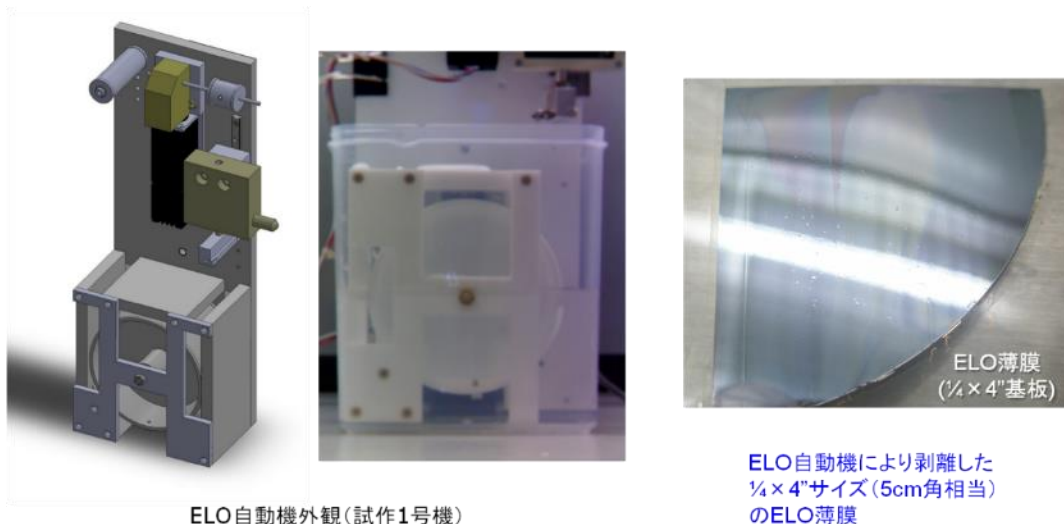
図III-2- (ロ) -1 -②-a-12 接合抵抗率と ITO 重量比の関係

III-2- (ロ) -1 -②-a 低コスト実装プロセス：メカニカルスタック 東京大学 (岡田 G)

H27 年度は、最適な ELO 条件の把握のために、ウェイト支援 ELO 法を用い支持材、リリース層厚、エッチャント濃度、曲げ半径 (ウェイト) 等の各種実験パラメータの条件出しを行った。これにより 12mm 角サンプルで再現性よくクラックフリーの ELO 薄膜層を分離する技術を確立した。この成果をもとに、タカノ (株) と共同で 2 インチウエハ対応の ELO 自動機 (試作 1 号機) を開発した (図 III-2- (ロ) -1 -②-a-13)。試作 1 号機ではウエハをエッチャントに液浸させる方式を採用した。

H28 年度は、試作 1 号機を用いて ELO プロセス条件の最適化を進め、①ELO プロセス時間の大幅短縮 (当初剥離速度 0.5mm/h から、4mm/h へ 8 倍の高速化)、②2 インチウエハ相当の大面積ウエハ (4 インチウエハの 1/4 サイズ) での ELO を達成した。

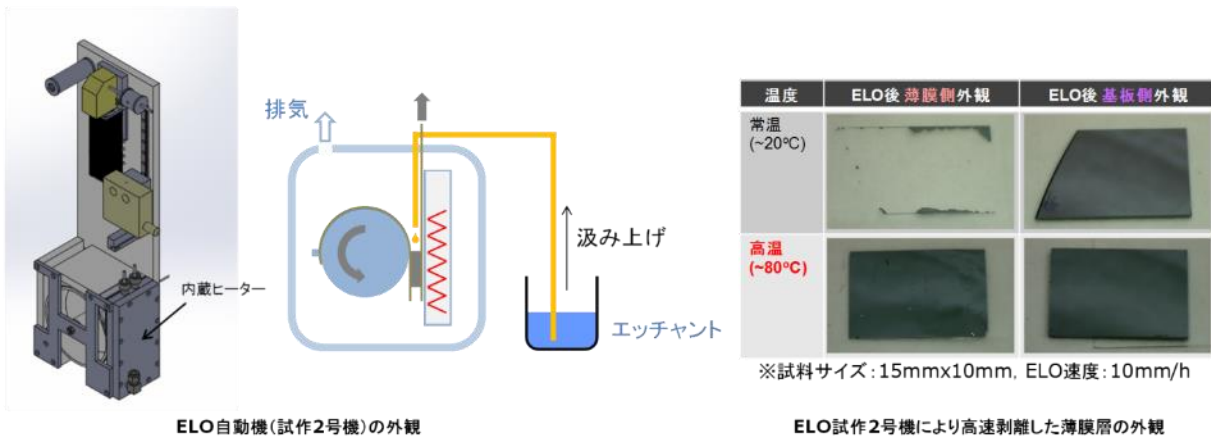
さらに、試作 1 号機での問題点を改良した ELO 自動機 (試作 2 号機) をタカノ (株) と共同開発した (図 III-2- (ロ) -1 -②-a-14)。試作 2 号機では主な機能としてウエハおよびエッチャントの温度制御機能を実装し、またウエハとエッチャントとの接触時間を低減させるため、滴下方式を採用した。試作 2 号機を用いて更なる高速化を図り、剥離速度 10mm/h での薄膜層の全面分離を達成した (当初剥離速度と比べ 20 倍の高速化)。



ELO自動機外観(試作1号機)

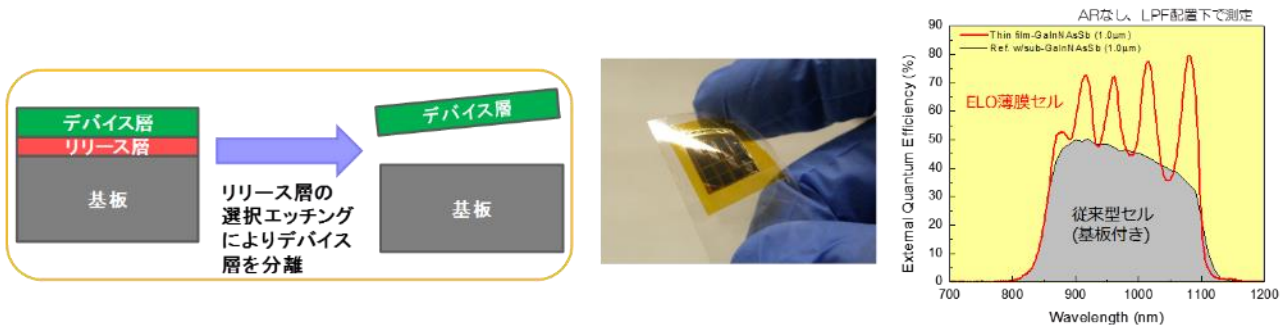
ELO自動機により剥離した
1/4×4"サイズ(5cm角相当)
のELO薄膜

図III-2- (ロ) -1 -②-a-13 ELO 自動機 (試作 1 号機) 外観と、剥離した 2 インチウエハ相当デバイス薄膜層



図III-2-(ロ)-1-②-a-14 ELO自動機(試作2号機)外観と、高速剥離したELO薄膜層写真

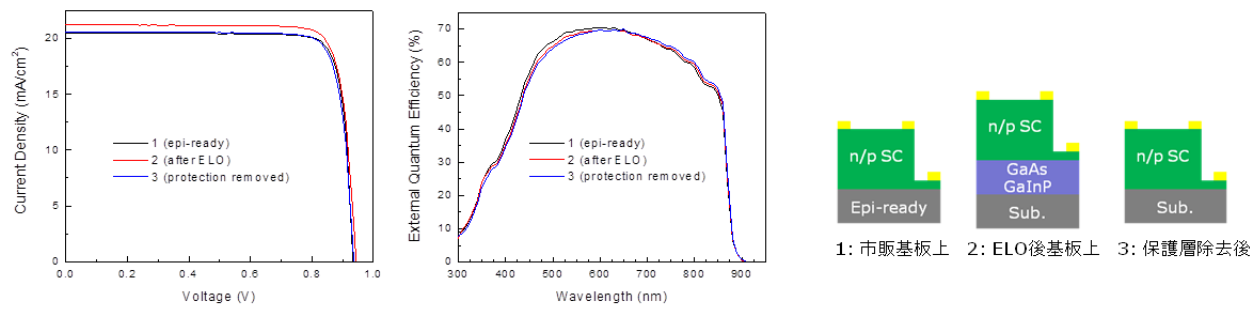
また、ELOにより分離した薄膜層のデバイス化プロセス開発を進め、ELO薄膜GaInNAs:Sbセルの作製に着手した。薄膜化による損傷を生じることなく、通常セルと比較して遜色ない特性を得ることに成功した(図III-2-(ロ)-1-②-a-15)。生成電流に関して通常セルよりも高い数値が得られており、光吸収スペクトル解析により光閉じ込め構造による電流増大効果を確認した。



図III-2-(ロ)-1-②-a-15 試作したELO薄膜GaInNAsSb太陽電池

また基板再利用に向けて、ELO後基板の清浄化技術開発を進めている。リリース層と基板の間に予め形成した保護層(選択エッチング層)を化学エッチングにより除去することにより、原子層レベルで平坦な表面を得ることに成功した。また、X線光電子分光法(XPS)およびグロー放電表面分析(GDS)を用い、ELO後、および保護層除去後の表面分析を行った。これらの分析から、ELO後の表面にはGaF₃やAs酸化物、Ga酸化物等による残渣が形成され、保護層の除去工程においてGaF₃等の反応生成物が除去できていることを示唆する結果を得た。(As酸化物、Ga酸化物はGaAs基板表面に形成されるため区別不可。)

次に、ELO後基板上へのGaAs太陽電池の再成長実験を実施した。基板として、(i)ELO後、(ii)ELO後保護層除去、(iii)市販GaAs基板(参照用)について比較を行った。いずれの試料においても再成長後の表面平坦性は良好であった。また図III-2-(ロ)-1-②-a-16に示すように、1回再利用相当の「ELO後基板」、「保護層除去後基板」の上に再成長したGaAs太陽電池において、「市販基板」上と遜色ないデバイス特性を確認した。なお、図III-2-(ロ)-1-②-a-16は各サンプルのトップデータ比較であるが、一方で同じ試料における複数デバイス間の特性のばらつきは小さくなく、歩留り(均一性)向上が今後の課題である。



図III-2- (ロ) -1 -②-a-16 ELO 後基板上へ再成長した GaAs 太陽電池のデバイス特性評価

Ⅲ-2- (口) -1 -②-a 低コスト実装プロセス：メカニカルスタック タカノ(株) (東京大学から再委託)

① ELO 自動化装置の開発

2 インチ (4 インチ×1/4) 対応 の ELO 自動化装置を作製した。

【特徴】

- ・基板/HF 加熱 ⇒ELO の高速化
- ・HF 滴下方式 ⇒HF 接触時間の低減
薄膜/基板のダメージ低減
- ・薄膜引き剥がし力の測定
⇒薄膜のクラック防止
- ・基板/HF 温度の調整可能
⇒ELO 最適条件の調査可能
- ・巻取り速度の変更可能
⇒ELO 最適条件の調査可能

【成果】
現状で最適な HF 濃度/温度、基板温度と巻取り速度の条件を探索し、10mm/h での剥離に成功した。

【課題】
エピ膜/保護膜の欠陥に起因すると考えられるピンホールの発生を、ELO の条件等で低減することができるか、調査を進める。

図Ⅲ-2- (口) -1 -②-a-17 ELO 自動化装置の開発

② 基板表面全面観察評価機の開発

基板表面全面観察評価機の立上げを行い、ELO 後 4 インチウエハの異常点の検出 と レビュー観察ができる環境を構築した。

ELO 自動化装置で得られた ELO 後ウエハ及びエピ膜で発生している異常点の解析、検出手法の最適化・簡易化・低コスト化の検討を進め、ELO を用いた製造方法に対する歩留まり向上に繋げる。

全体イメージ

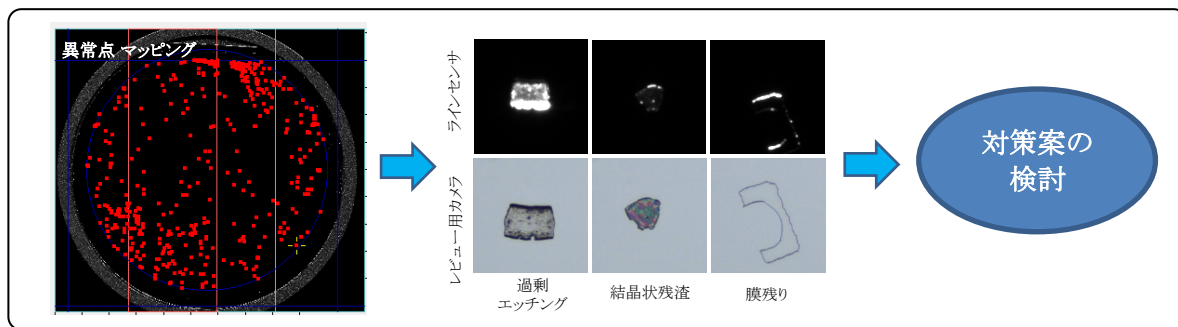
ELO 後ウエハ
低屈折率の残渣の画像化

ELO 後 エピ膜
GaAs セル層の PL の画像化

図Ⅲ-2- (口) -1 -②-a-18 基板表面全面観察評価機の構築

ELO 後 ウエハ に対しては、微弱な回折光をラインセンサで画像化する事で表面状態の異常箇所を抽出し、顕微鏡レビュー観察 と異常点分類の自動運転を行う事を目標として開発を進め、ELO 工程 (主にリフトオフ時) の 問題と結びつける。

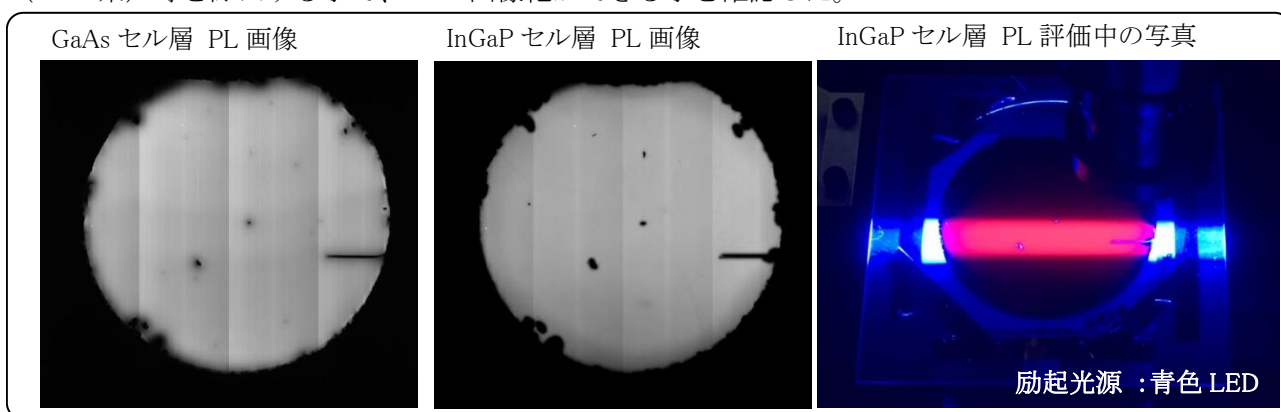
また基板再利用で問題となる、ELO 後ウエハに発生する“過剰エッチング”と“膜残り”に対しては、シャープ(株)と共同で対策案の検討を進めている。



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-19 ELO 後ウエハの異常点観察と対策案の検討

ELO 後 エピ膜 に対しては、GaAs セル層に届く波長帯 (700~800nm) の励起光を斜めから照射し、ラインセンサで画像化された PL 画像から ELO 工程 (主に結晶成長・リフトオフ時) の問題と結びつける。

また InGaP セル層について ELO 直後の状態では PL の画像化が困難だが、上に形成されている保護層 (GaAs 系) 等を除去する事で、PL の画像化ができる事を確認した。



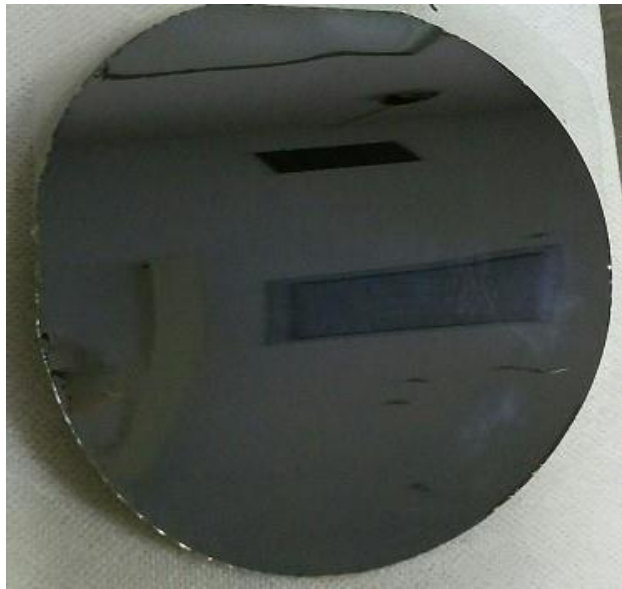
図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-20 ELO 後エピ膜の PL 画像化

Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a 低コスト実装プロセス：ウエハ再利用 シャープ㈱

・エピ層剥離については、2 接合型を中心に検討を実施し、再委託先のタカノ㈱にて開発のローラー型 ELO 装置を用いた検討でクラックレスでの剥離プロセスを確立した。

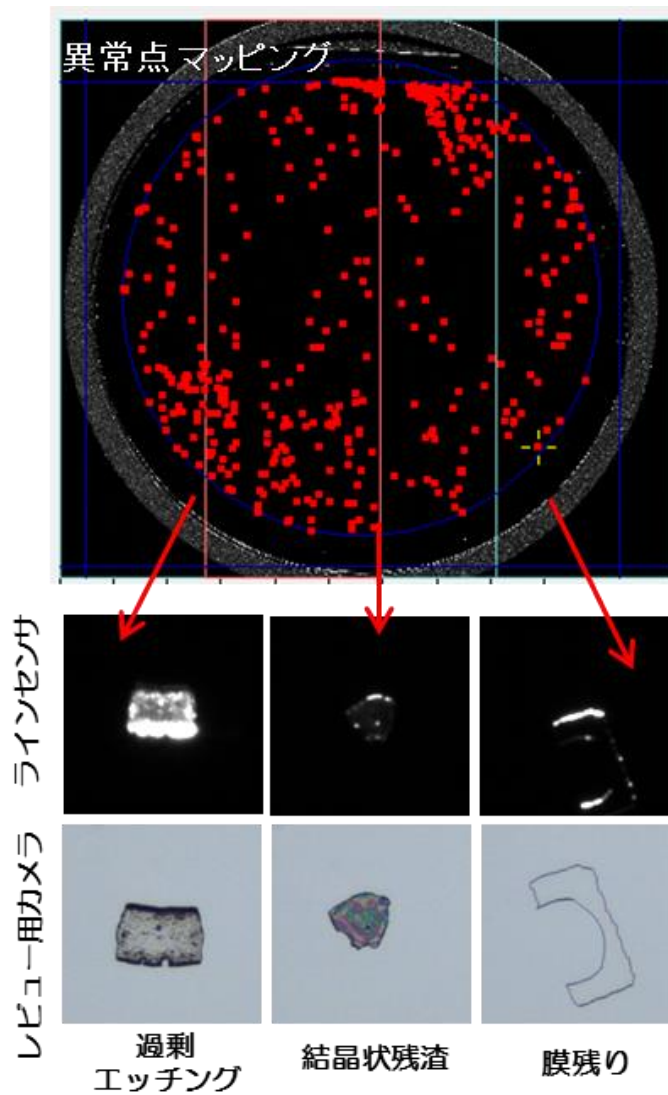


図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-21 タカノ㈱にて開発のローラー型 ELO 装置

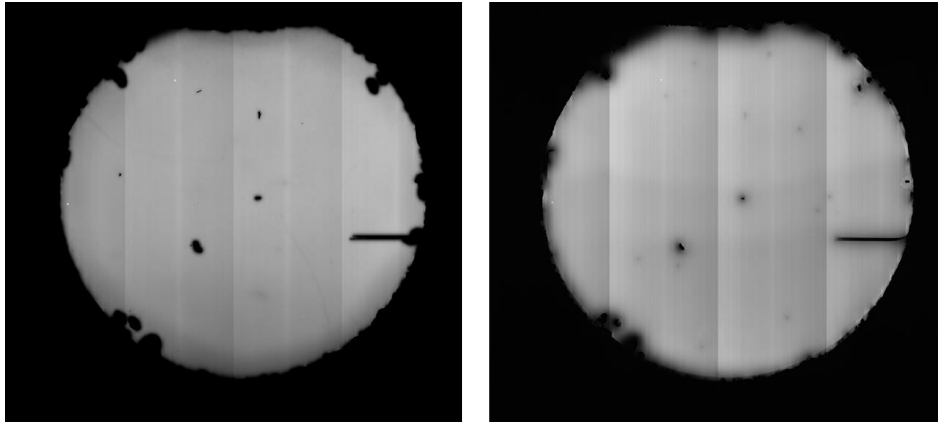


図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-22 剥離後エピ外観

・剥離後のウエハ、エピ層それぞれの検査手法の検討をタカノ㈱と協力して実施。各種評価手法を用いて検討を実施し、ウエハは画像解析による異常点観察、エピ層はPL法によるクラック観察の可能性を得た。

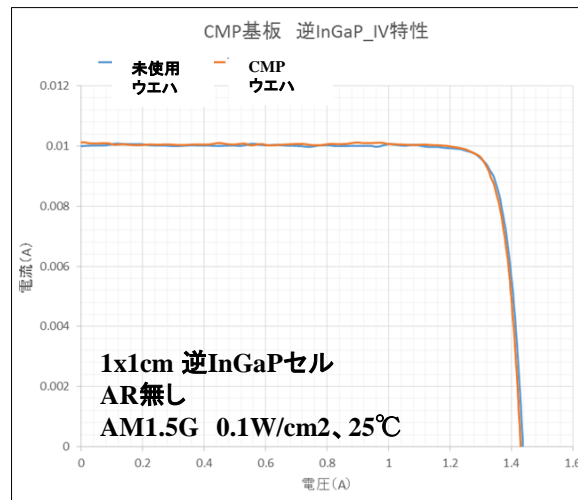


図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-23 剥離後基板の異常点観察例 (洗浄実施前)

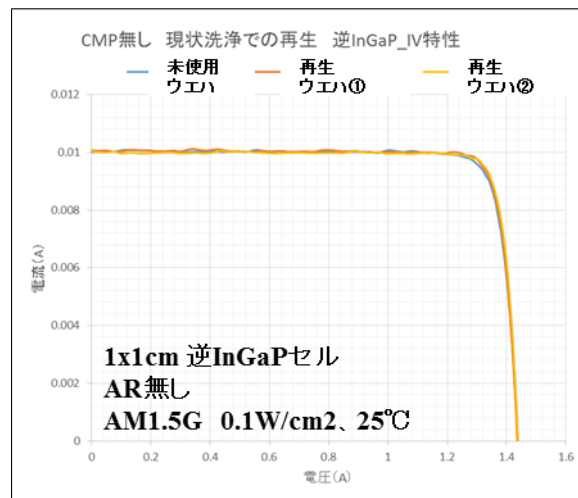


図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-24 PL (Phot Luminessens) 法による剥離後エピ層の観察例
(左: InGaP 層の PL 像 右: GaAs 層の PL 像)

・剥離後基板の再生方法の検討を行い CMP 法または化学エッチング法で処理した基板上へのエピ成長を実施し、両者とも正規品と同等の電気特性を得た。



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-25 再生 (CMP 法) 基板上に作製した太陽電池セルの電気特性



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-a-26 再生 (化学エッチング法) 基板上に作製した太陽電池セルの電気特性

III-2- (ロ) -1 -②-b シリコン上 III-V エピ成長 豊田工業大学

ヘテロエピ成長によるモノリシック型 III-V/Si セルの高効率化のためには、大きな格子不整合率と熱膨張係数差により生じる III-V 化合物成長層での転位密度を低減する必要がある。本プロジェクトでは、転位密度を 10^6cm^{-2} 以下に低減することを中間目標にして取り組んだ。

GaAs 層の低温成長 (280°C) により、熱膨張係数差により生じる残留応力を低減し、転位密度 $5 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ を得た。本成膜装置での標準試料 (2 段階成長、成膜温度 570°C) の転位密度 $3.5 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ から大きく減少した。GaAs 成長初期での低温成長 MEE 層挿入を試み、初期的結果として、上記標準試料の 29% に転位密度が減少した。さらに、不純物による転位ピンング効果として、N ドープ GaAs 層挿入による転位密度低減を、格子不整合 InGaAs/GaAs 膜で検証し、N ドープ GaAs 層未挿入の試料と比較して、62% の転位密度を得た。これらの手法を低温成長 GaAs 膜に適用することにより、さらなる転位密度低減が期待できる。(表 1)

表 III-2- (ロ) -1 -②-b-1 成長膜表面付近の転位密度の比較

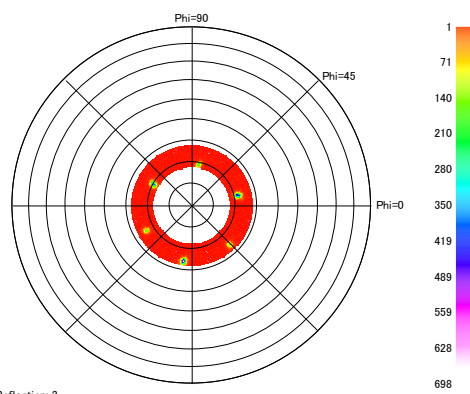
手法	構造	転位密度 (cm^{-2}) (エッチピット法)
2 段階成長 ($570^\circ\text{C}/300^\circ\text{C}$) (70nm) (標準試料①)	GaAs/Si sub.	3.5×10^8
低温成長 (280°C)	GaAs/Si sub.	5.0×10^7 (標準試料①との比 0.14)
初期成長層に MEE 層挿入 ($570^\circ\text{C}/\text{MEE 挿入}$ バッファー (70nm))	GaAs/Si sub.	1.0×10^8 (標準試料①との比 0.29)
InGaAs/GaAs (標準試料②)	InGaAs/GaAs sub.	1.3×10^6
N ドープ GaAs 層 挿入	InGaAs/InGaAsN(7nm) /InGaAs/GaAs sub.	8.1×10^5 (標準試料②との比 0.62)

二次元層状半導体である $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{Se}_3$ は、単位層内の結晶構造は GaAs と同じ閃亜鉛鉱構造を持ち、層間はファンデルワールス力により結合している。本材料を GaAs/Si 間のバッファー層に用いることにより、層状構造のファンデルワールス・ギャップが、格子不整合、熱膨張係数差により生じる歪を有効に緩和することが期待できる。これまでに、本材料を Si 基板上にエピタキシャル成長した報告例、さらに $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{Se}_3$ 上に GaAs を成膜した報告例がないことから、本プロジェクトにおいて、GaAs および Si 基板上で層状 In_2Se_3 をエピタキシャル成長する成膜技術を確立した。さらに、GaAs 上に成膜した層状 In_2Se_3 上に、結晶方位を揃えて GaAs がエピタキシャル成長できることを初めて実証した。加えて、層状化合物はファンデルワールス界面で劈開できることから、成膜した GaAs エピタキシャル層を簡便に基板から剥離することが可能であり、劈開による GaAs 層の剥離とガラス基板上移載を初めて実証した。本技術は、基板の再利用による低コスト化にも適用が可能である。

移載されたGaAs層 GaAs層が一部剥がれたGaAs基板



図 III-2- (ロ) -1 -②-b-1 GaAs/ In_2Se_3 /GaAs(111) 試料から、GaAs エピ層をガラス基板上に移載 (上) 移載された GaAs 層、(下) GaAs 層が一部剥がれた GaAs 基板



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-b-2 上図でガラス基板に移栽した GaAs エピ層の XRD 極点図 (GaAs (331) 面)。層状 In₂Se₃ 上 GaAs のエピタキシャル成長を実証。

Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-b シリコン上 III-V エピ成長 宮崎大学

シリコン上に GaAs 膜を作製するにあたり Ge バッファー層の導入が効果的と言われており、安全で取り扱いの容易な新規 Ge 原料 tBGe に注目し、Ge バッファー層の作製に取り組んだ。tBGe の各種基板上での基礎的な反応過程を明らかにし、高品質な Ge バッファー層作製条件を明らかにした。

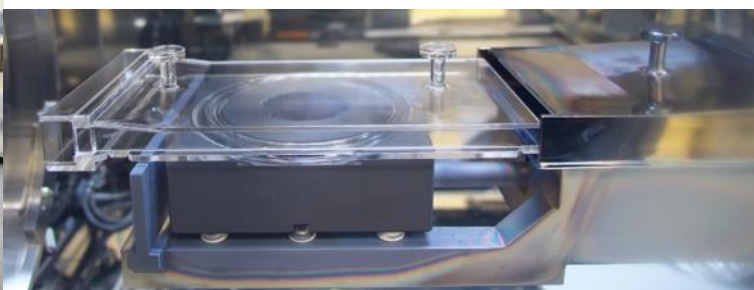
高指数シリコン基板を利用し、表面に微細なナノ構造を形成した後に GaAs を作製し、結晶性の大きな低下無く、表面平坦性を向上できることを見出した。

シリコン基板上に低温で GaAs を堆積し、成長後にレーザーアニールを行なった。場所依存性が大きい問題はあるが、30-45 秒程度のレーザー照射で結晶性の向上を見出した。

Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c 低コスト III-V 化合物半導体製膜技術：MOCVD 大陽日酸㈱

・多接合 III-V 族化合物半導体セルに用いるガリウムヒ素及びインジウムガリウムリン等の MOCVD プロセスにおいて、原料利用効率とスループットを向上させる装置技術開発を行い、成長条件最適化指針を獲得することを目的として開発を行った。装置設計に当たっては、原料利用効率の向上を目的とした装置改造が容易であること、スループット向上を目的として将来実施予定である In-situ クリーニングに適した装置設計である点を考慮して検討を行った。本装置は製作および出荷前調整を完了し、H-VPE 装置同様、2016 年 3 月に産業技術総合研究所に設置した。

- ・MOCVD 装置の立上を 2016 年 6 月末までに完了。
- ・GaAs 製膜を開始。正常に製膜できることを確認した。
- ・GaAs 製膜速度 90 μm/h を達成。
- ・InGaP 製膜も正常に製膜できることを確認した。



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c-1 導入した高速製膜用 MOCVD 装置

Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c 低コスト III-V 化合物半導体製膜技術：MOCVD 東京大学 (中野・杉山 G)

大陽日酸と協力して、産業技術総合研究所に設置した MOCVD 装置による GaAs 高速成長の実現と、それを用いた GaAs 単接合セルの効率評価を進めた。リアクターのフローチャンネルを極力薄くするという当初の設計指針が有効に機能し、90 μm/h までの GaAs 高速成長が達成できた。高速製膜においては、

GaAs の表面モフォロジーが悪化する傾向がみられたが、製膜温度を若干上げ (650→680°C)、微傾斜基板を利用することで、90 $\mu\text{m}/\text{h}$ の高速製膜においてもステップフロー成長を実現できた。この際、高速製膜用に気相原料濃度を増大すると、気相でクラスタリングが起きて表面モフォロジーを悪化させることが懸念されたため、高速製膜条件では全圧を若干低く設定した。

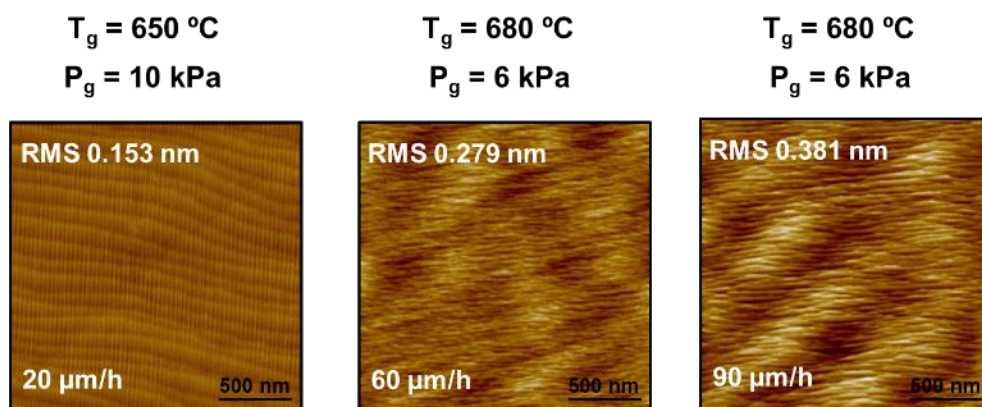
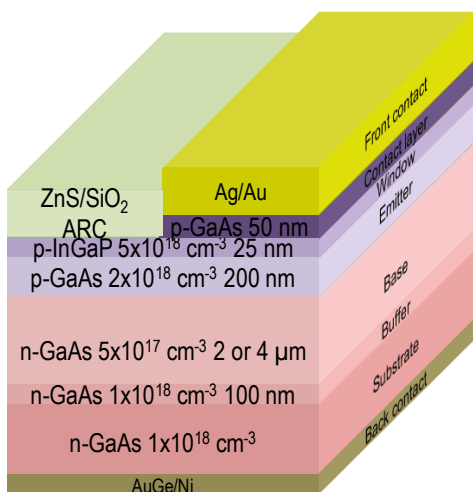


図 III-2- (ロ) -1 -②-c-2 各速度で成長した GaAs の表面モフォロジー

成長速度 90 $\mu\text{m}/\text{h}$ において作製した GaAs 単接合太陽電池の性能は、低速で作製したセルに比べて遜色ないことが示された。図 III-2- (ロ) -1 -②-c-3 に示す GaAs 単セル構造のベース層に高速製膜条件を適用した結果、ベース層厚が 2 μm の場合、2 インチウエハから作製した 20 チップの平均として効率 22.8% を得た。ベース層厚を 4 μm まで増大させると効率は増大し、また 2 μm のベースでも下部に BSF 層を挿入することで平均効率はほぼ 25% に達した。ベース層厚の増大によるセルの特性を検討すると、キャリア回収領域の中で光吸収がほぼ 100% 行われるようになり、内部量子効率はほぼ 1 となっている。一方で、曲線因子が若干低下しており、順バイアス下でのキャリア回収効率が若干悪化している。2 μm のベース+BSF 層では曲線因子が改善し、効率 25% が得られた。これらの傾向は一般的な製膜速度で作製された GaAs セルでも同様であり、GaAs 太陽電池の低コスト化に向けた高速成長が十分可能であることが示された。



Layer	GR. ($\mu\text{m}/\text{h}$)	V/III	T_g ($^{\circ}\text{C}$)	P_g (kPa)
Contact	5	20	600	10
Window	1.9	100	600	10
Emitter	20	20	680	10
Base	90	40	680	6
Buffer	5	20	680	10

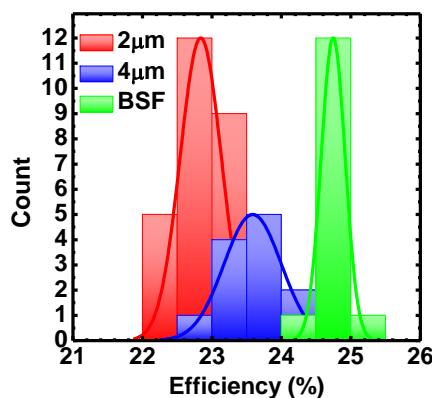
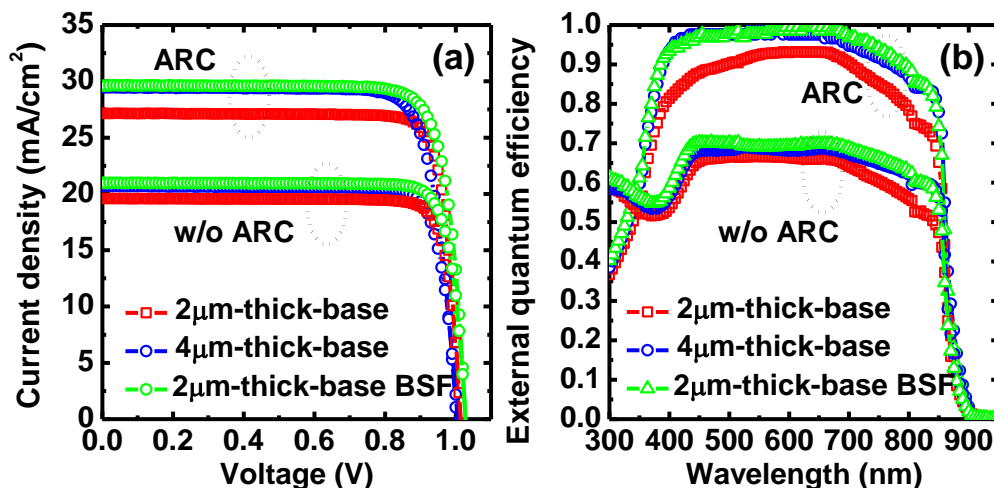


図 III-2- (ロ) -1 -②-c-3 GaAs 単セルの構造と 2 インチウエハから作製した 20 個のセルの効率分布



図III-2- (ロ) -1 -②-c-4 上図 GaAs 単セルの I-V 特性および内部量子効率

ただし、ウエハの一部にセル特性を著しく悪化させる結晶欠陥が存在することが明らかになっており、これはフローチャンネルにおける流れの乱れと、それに起因する原料の気相反応原因であると考えられた。今後、フローチャンネルの設計を改良し、この問題を改善する予定である。

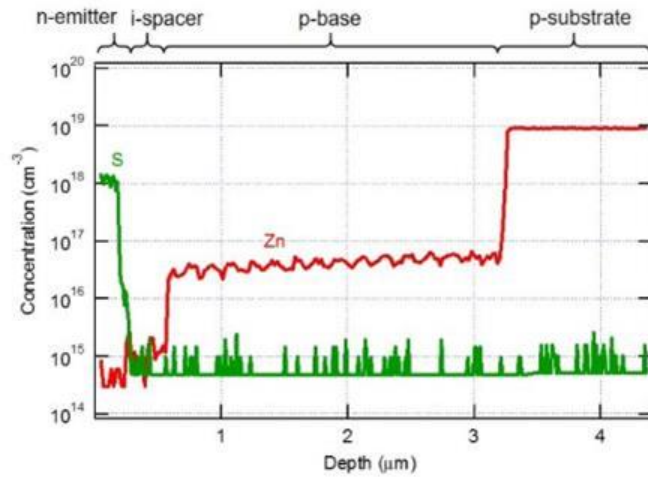
III-2- (ロ) -1 -②-c 低コストIII-V化合物半導体製膜技術：HVPE 大陽日酸株

III-V族化合物半導体太陽電池作成に、超高速・低コストエピタキシャル結晶成長法であるハイドライド気相成長法(H-VPE法)を応用することを目的として、装置の設計及び製作を行った。具体的には、当社で以前に製作実績のあるGaN(窒化ガリウム)向けH-VPE装置の設計を基に、GaAs(ガリウムヒ素)及びInGaP(インジウムガリウムリン)を一度の成長運転で連続的に成長できることを達成できるように設計を行った。本装置は製作および出荷前調整を完了し、2016年3月に産業技術総合研究所に設置した。

- ・H-VPE装置の立上を2016年6月末までに完了。
- ・H-VPE装置によるGaAs製膜を開始。正常に製膜できることを確認した。
- ・GaAs製膜速度約30 μm/hを確認。
- ・InGaP製膜速度約16 μm/hを確認。

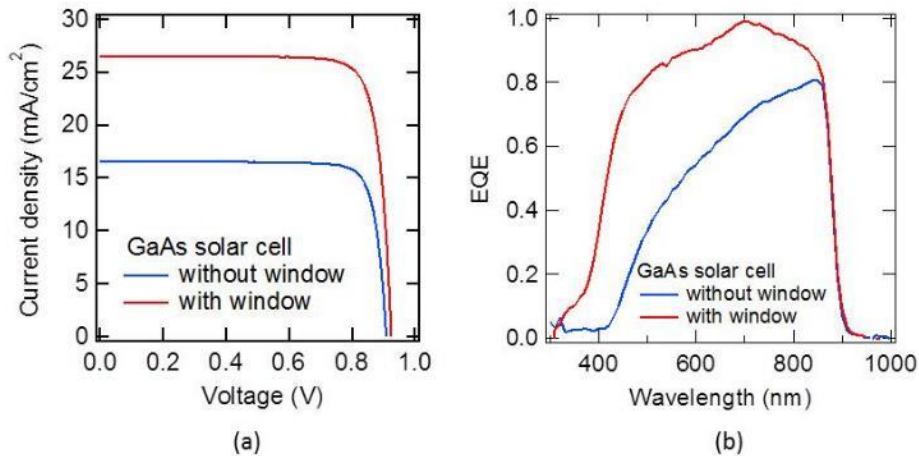
III-2- (ロ) -1 -②-c 低コストIII-V化合物半導体製膜技術：HVPE 産業技術総合研究所

大陽日酸株、東京農工大と共同で新規にH-VPE装置を設計、産業技術総合研究所に導入し、低コストGaAs、InGaP結晶成長の初期検討を行った。熱力学計算に基づいて原料部温度を850℃に加熱した。GaAs結晶成長では、基板部温度を680から750℃に加熱して系統的な評価を行い、基板部温度750℃、HCl流量30 sccm、低V/III比2.5の条件で40 μm/hまでの高速結晶成長を実現した。30 μm/hの高速成長でp型にZn、n型にSを用いたGaAs p-i-n構造のSIMS分析において、ドーパントは結晶成長中に内部拡散せず、遷移領域は40 nm以下であることを見出した(図III-2-(ロ)-1-②-c-5)。当初は原料ガスフローが基板に不均一に照射されることに起因してGaAs膜の不均一性が30.1%と高かったが、ノズルの改良や基板回転を行うことにより、面内不均一性が3.2%に改善した。InGaPの成長に関しては、In、Gaの取り込み効率の違いを熱力学計算で算出し、その計算結果を基に、基板部温度680℃、16 μm/hの成膜速度においてGaAsと格子整合したInGaP結晶を成長することに成功した。

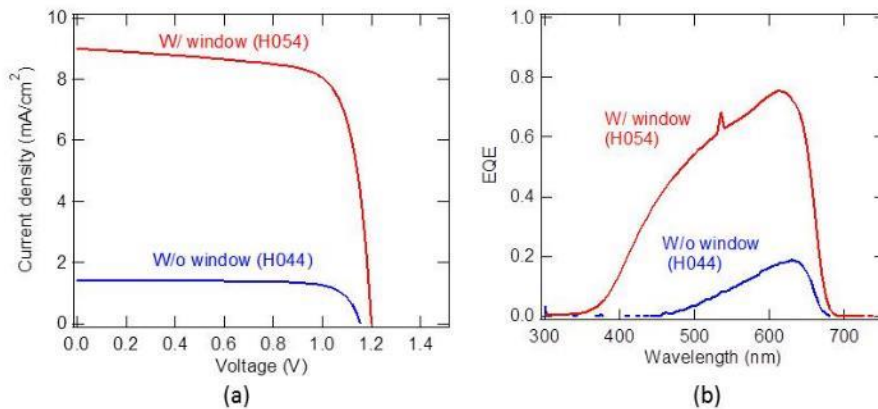


図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c-5 GaAs p-i-n 構造の SIMS プロファイル

図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c-6 (a) 及び(b)は、GaAs 太陽電池の電流電圧特性と外部量子効率 (EQE) を、InGaP 窓層の有無で比較したものである。InGaP 窓層を形成した場合は EQE 特性が向上し、短絡電流密度 26.4 mA/cm^2 、開放電圧 0.93V 、曲線因子 83.3% 、変換効率 20.3% が得られた。これは、中間目標の 15% を大きく超える値である。また、InGaP 太陽電池成長では、Ga 組成を増やした歪 InGaP 窓層を形成することにより、短絡電流密度が改善した。比較の電流電圧特性と EQE 特性を図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c-7 (a)、(b) に示す。InGaP 太陽電池の V_{oc} は 1.2V 、変換効率 8.1% であった。この値も中間目標 8% を達成した。



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c-6 GaAs 太陽電池の (a) 電流電圧特性と (b) 外部量子効率



図Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c-7 InGaP 太陽電池の (a) 電流電圧特性と (b) 外部量子効率

H-VPEにより GaAs 太陽電池、InGaP 太陽電池を作製した例は、国内では初となる。世界的には NREL に次ぎ 2 例目であるが、我々の装置は大型化、大口径化に有利な水平置き構造を取っており、NREL の研究用小型システムに比べて商用化に有利である。高均一で高効率な太陽電池が得られ、商用化を後押しする成果が得られたため、産業技術総合研究所から 6 月 13 日付けでプレスリリースを行っている。

一方、もう一つの間目標、Al 系成長の問題点の抽出、InGaP/GaAs タンデムセル試作に関して、Al 系の成長は AlCl₃ にすることで、石英管の腐食を防止できることがわかった。タンデムセルに関しては、今年度後半に試作予定であり、達成見込みである。

Ⅲ-2- (ロ) -1 -②-c 低コストⅢ-V化合物半導体製膜技術：HVPE 東京農工大

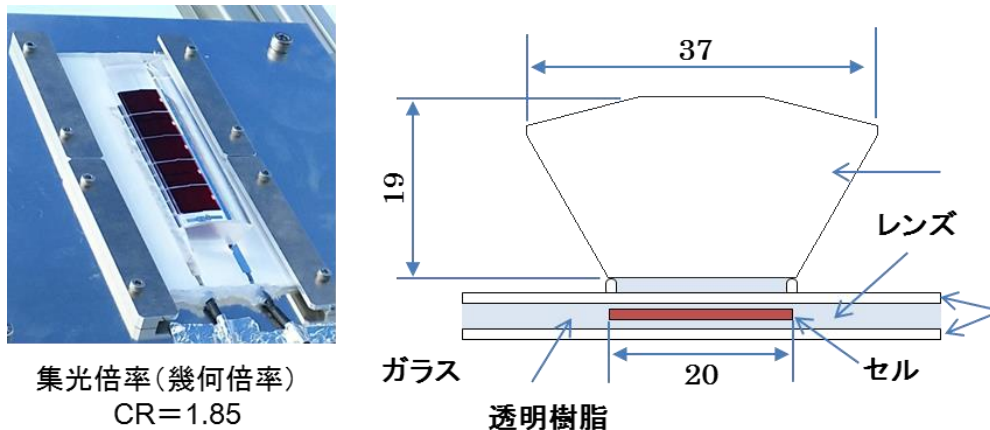
高速成長および高品位結晶の成長が可能な HVPE 成長法をⅢ-V 族化合物半導体太陽電池作成に応用するために、熱力学解析を用いて GaAs および InGaP 三元混晶の成長系の設計を行った。その結果、GaAs では Ga-HCl-AsH₃ 系、InGaP では、In-HCl-Ga-HCl-PH₃ 系により、GaAs および InGaP 混晶の成長が可能であることを見出した。

これらの結果を、太陽日酸と共有し、太陽日酸の装置製造を支援した。その結果、太陽日酸製 HVPE 装置により GaAs および InGaP エピタキシャル成長が可能なることを明らかにし、GaAs 製膜速度約 30 μm/h および InGaP 製膜速度約 16 μm/h を達成した。

《チーム③. 低コストモジュール開発》

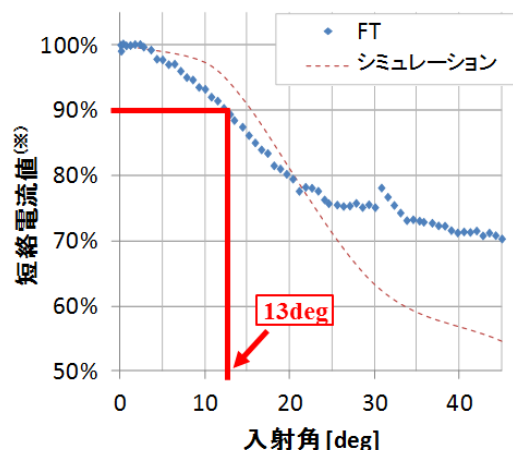
Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a 低コストモジュール開発 シャープ㈱

・低倍集光モジュール（原理確認用試作）を作製し、評価を実施し、太陽と正対したときの集光倍率 1.9 倍、および、屋外測定で許容角約 ±13° の結果を得た。

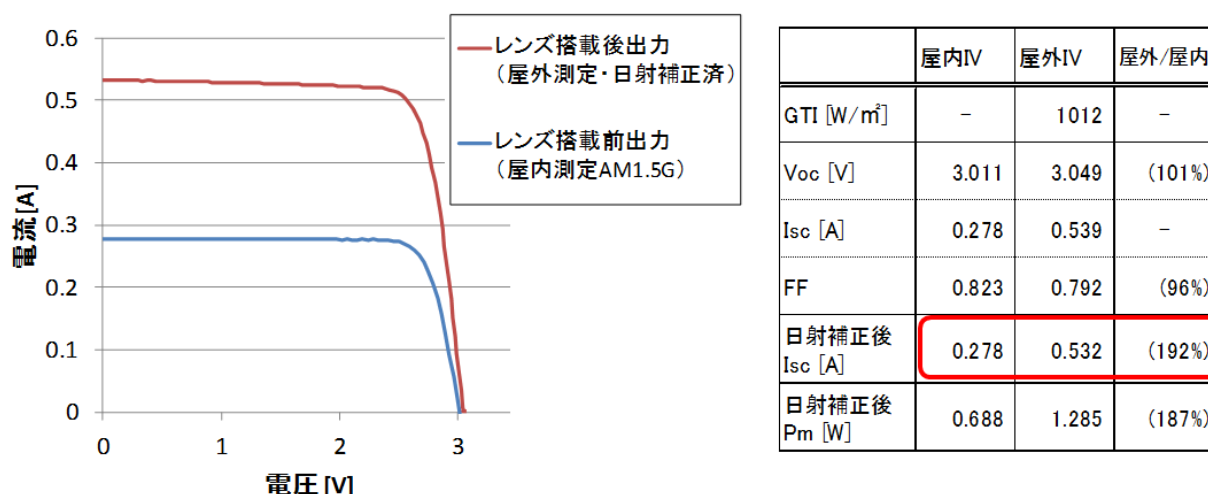


集光倍率(幾何倍率)
CR=1.85

図Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-1 試作した低倍集光モジュール



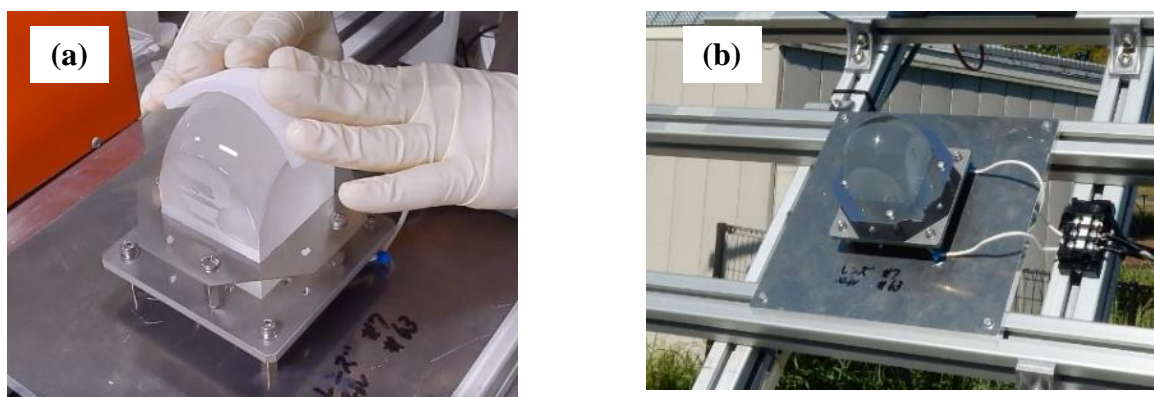
図Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-2 試作したモジュールの許容入射角測定結果



図Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-3 試作したモジュールの電気特性

Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a 低コストモジュール開発 宮崎大学

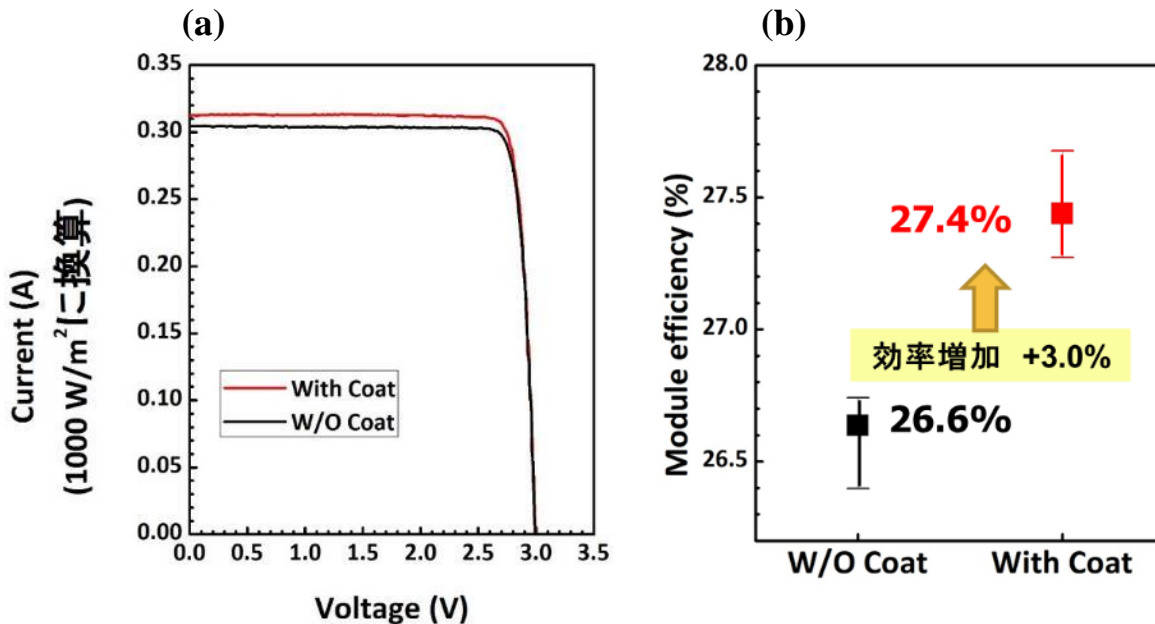
簡便に形成できるシリカベースの反射防止兼防汚コートを広角モジュール(豊田工業大学作製)にコートし、屋外環境下において発電電力の測定を行った。下図に、広角モジュールへの反射防止兼防汚コートの塗布方法および屋外設置状況を示す。



図Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-4 (a)広角モジュールへの反射防止兼防汚コートの塗布方法および(b)屋外設置状況

Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-5 (a)に、反射防止兼防汚コートの塗布前後の IV 特性を示す。短絡電流は測定時の直達日射量で規格化した。コートを塗布することで短絡電流が 2.9%増加した。同図(b)に、屋外評価期間中の平均変換効率を示す。平均変換効率も反射防止膜を塗布することで 26.6%から 27.4%に増加した。反射防止膜による平均変換効率の増加率は+3.0%であり、発電効率の増加分は短絡電流の増加分と一致していることを屋外評価によって確認した。

また、広角モジュールに用いられるレンズ材料(S-TIM2)のガラス基板上に反射防止兼防汚コートを塗布し、分光光度計を用いて透過率の評価を行った。反射防止兼防汚コートを塗布することで、透過率が増加し、反射防止膜として効果的に作用することを確認した。簡便なコートをモジュールに塗布するだけで、変換効率を約 3%増加させることに成功し、またその原理についても確認できた。



図III-2- (ロ) -1-③-a-5 (a)反射防止兼防汚コートの塗布前後のIV特性および(b)屋外評価期間中の平均変換効率

III-2- (ロ) -1 -③-a 低コストモジュール開発 豊田工業大学

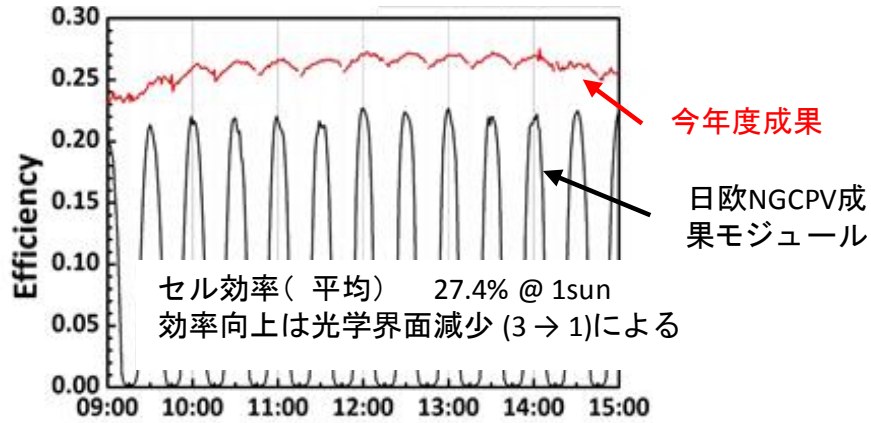
III-V型セルの低コスト化は従来高集光で行われてきたが、追尾架台などへの要求精度が高くSiセルと互角に戦える市場競争力は得られていない。障害になっているのは追尾架台であり、要求精度を緩和する(間欠追尾)、および無追尾で動作するモジュールを研究開発した。

モンテカルロ法を用いて、精度と性能との関係を明らかにし、これに基づき新型光学系を開発した。従来15秒に1回の追尾が必要であった集光型太陽光発電で、二桁の精度緩和に相当する30分に1回(目標10分に1回)の追尾間隔で動作するモジュールの開発に成功した。また、効率も28.5%が得られた(中間目標27%)。

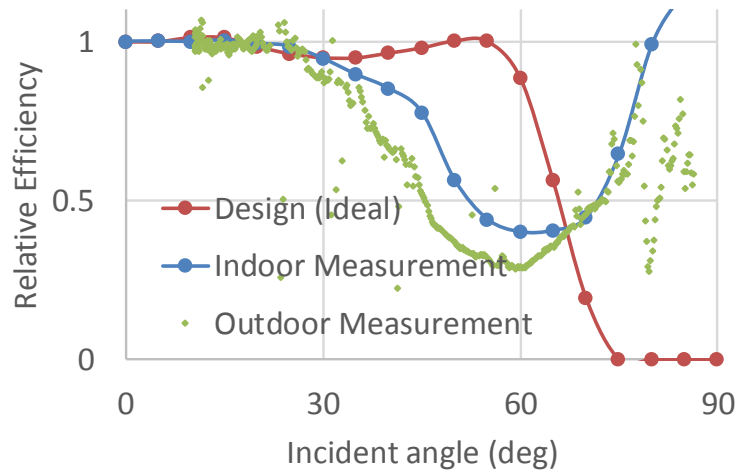
さらに、今後の車載応用を視野に入れ、CAD/CAMベースの数値設計による無追尾光学系の設計技術開発を行った。3倍集光(目標1.5倍)、傾斜面設置設計で、許容入射角(効率が90%以上を維持する半角)が±33°(目標±15°)が得られた。

上記無追尾低倍集光モジュールの性能をさらに上げるため、部分集光モジュールの研究開発を行った。セルコストダウンと許容入射角増大を両立することにより、発電コストの低減が可能であることを見いだした。

上記一連の成果は国際的に高く評価され、43rd IEEE PVSC、44th IEEE PVSC、26th PVSECにて3回連続でポスターアワードを受賞した。また、査読付き論文も合計12件出版された。



日欧NGCPV成果のモジュールとの比較
 (同一架台に搭載し、30分間歇追尾をフィードフォワードにて制御)

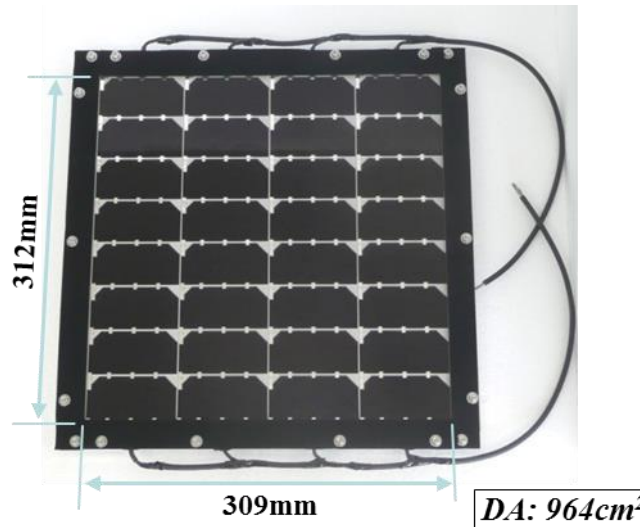


- 予備試作した無追尾モジュール(99セル接続、4倍集光)の評価結果
- 高い入射角で効率が上昇しているのは側面から入射した光で発電したため(見かけの効率向上)。
 - 試作段階で加工容易な形状に変更したため、試作品の光学特性は理想形状よりも悪くなっている。
 - 予備試作であるので、傾斜面設置に対して最適設計をしていない。

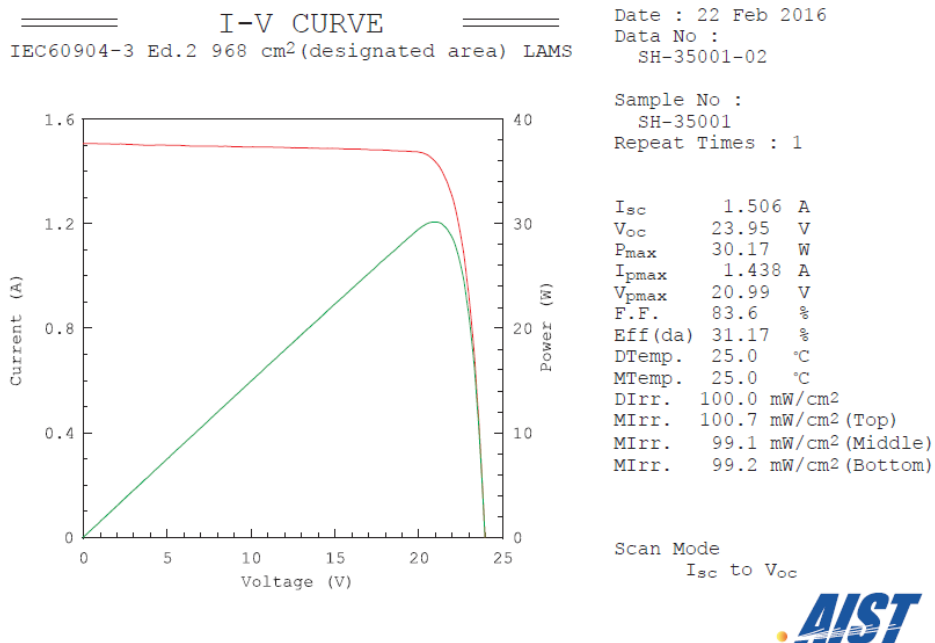
図III-2- (ロ) -1-③-a-6 30分に1回(目標10分に1回)の追尾間隔で動作するモジュール

Ⅲ-2- (ロ) -1 -③-a 低コストモジュール発電量試算・屋外評価 シャープ㈱

・実用セルサイズでの逆積み3接合型モジュール（非集光）の試作を実施し、産業技術総合研究所で標準条件下でのモジュール変換効率測定を実施し、31.2%の効率を得た。



図Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-7 実用サイズセルを使用した化合物太陽電池モジュール

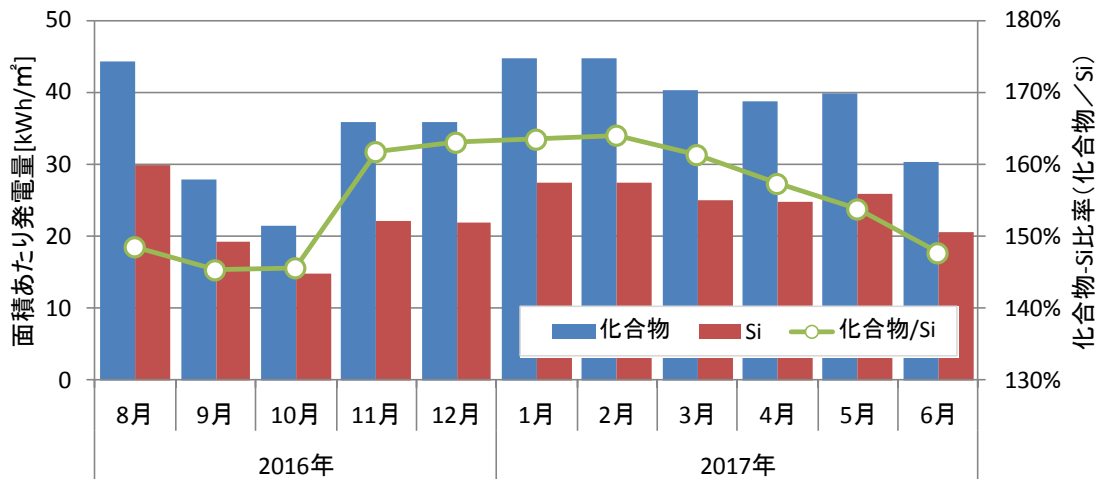


図Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-8 実用セルサイズ化合物太陽電池モジュールの電気特性（産業技術総合研究所測定）

・低倍集光モジュールおよび非集光モジュールの屋外発電評価を、結晶 Si セル・モジュールと比較しながら実施し（宮崎大学と協力）、非集光モジュールは、結晶 Si モジュールと比較して、定格出力あたりの発電量（Wh/W）で 96.1%、モジュール単位面積当たり（枠部を除く）の発電量で、156.2%の結果を得た。また、低倍集光モジュールでは非集光モジュールに対し、定格出力あたりで 83.2%、モジュール面積当たりで 92.4%の発電量が得られた。



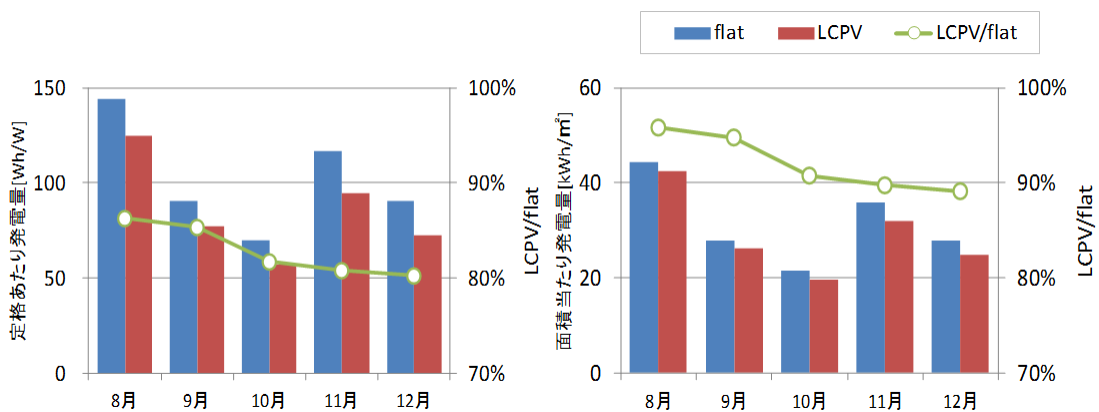
図III-2- (ロ) -1-③-a-9 フィールドテスト概況 (宮崎大学)



	定格 W	モジュール 面積 cm ²	発電量 kWh	定格あたり発電量		モジュール面積あたり発電量	
				kWh/W	(対Si比)	kWh/m ²	(対Si比)
化合物非集光	30.17	983	39.71	1.316	96.1%	403.9	156.2%
結晶 Si	147.0	7786	201.33	1.370	-	258.6	-

(モジュール面積はアパーチャ面積で計算)

図III-2- (ロ) -1-③-a-10 化合物モジュール (非集光) のフィールドテスト結果

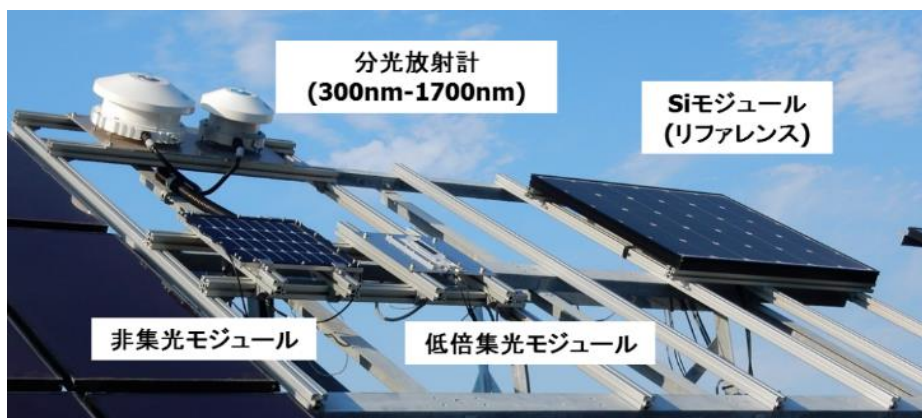


図III-2- (ロ) -1-③-a-11 低倍集光化合物モジュール (LCPV) のフィールドテスト結果 (非集光化合物モジュール (flat) との比較)

III-2- (ロ) -1-③-a 低コストモジュール発電量試算・屋外評価 宮崎大学

非集光 III-V 太陽電池モジュールの屋外評価を行った。下図に非集光 III-V 太陽電池モジュールの設置状況を示す。非集光 III-V 太陽電池モジュールは、宮崎大学構内に設置した。傾斜角 35° の南向き架台に、非集光 III-V 太陽電池モジュール、Si 太陽電池モジュール(リファレンス)、分光放射計 (MS711、MS712、EK0、波長範囲：300-1700 nm) および全天日射計を設置した。分光放射計によって

測定された全天日射スペクトルから平均光子エネルギー(Average Photon Energy: APE)を求めた。測温抵抗体(Pt100)を太陽電池裏面に直接設置し、モジュール温度(T_{mod})を測定した。非集光 III-V 太陽電池モジュールは、屋外動作において 30.79%の変換効率を達成した。



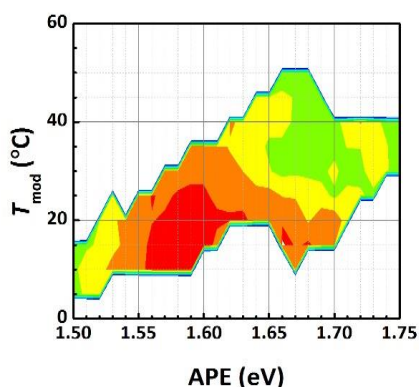
図Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-12 非集光 III-V 太陽電池モジュールの設置状況

非集光 III-V 太陽電池モジュールの発電動作を、IV 測定による太陽電池出力の他に全天日射スペクトル、太陽電池動作温度を用いて詳細に解析した。評価期間は、2016 年 8 月 1 日から 2017 年 2 月 28 日である。測定した全天日射スペクトルから式(Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-1)を用いて APE を求めた。

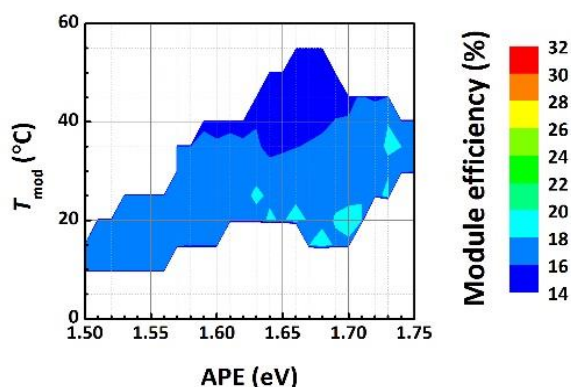
$$APE = \frac{\int_{300}^{1700} Irr(\lambda)}{q \int_{300}^{1700} \phi(\lambda)} \quad (Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-1)$$

Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-13 に、(a)非集光 III-V 太陽電池モジュール、(b)Si 太陽電池モジュールの変換効率の APE とモジュール温度(T_{mod})依存性を示す。非集光 III-V 太陽電池モジュールの変換効率の分布は、Si 太陽電池モジュールと比べ高い変換効率を示した。また、非集光 III-V 太陽電池モジュールの変換効率は、基準太陽光スペクトル(AM1.5G)から求めた APE(1.60eV)付近で最も高くなり、APE が増加する(ブルーリッチスペクトル)および低下する(レッドリッチスペクトル)ことで変換効率は低下した。これは、III-V 太陽電池を構成する各サブセルで発生する光電流の整合性が太陽光スペクトルの変化により損なわれたことに起因する。一方、Si 太陽電池モジュールでは、太陽スペクトル(APE)の変化よりも、太陽電池の動作温度の上昇が変換効率の低下に大きく影響した。屋外での発電データをもとに、非集光 III-V 太陽電池モジュールへのスペクトルの影響を世界で初めて明らかにした。

(a) 非集光III-V太陽電池モジュール



(b) Si太陽電池モジュール

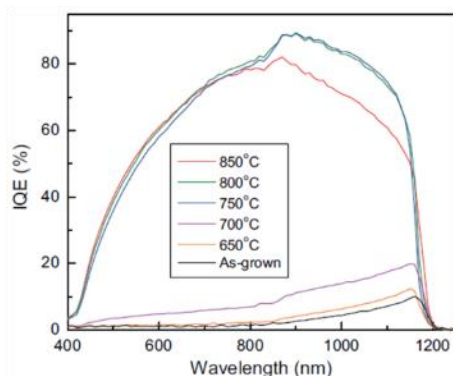


図Ⅲ-2- (ロ) -1-③-a-13 (a)非集光 III-V 太陽電池モジュール、(b)Si 太陽電池モジュールの変換効率の APE とモジュール温度依存性

《チーム④. 超高効率セル開発》

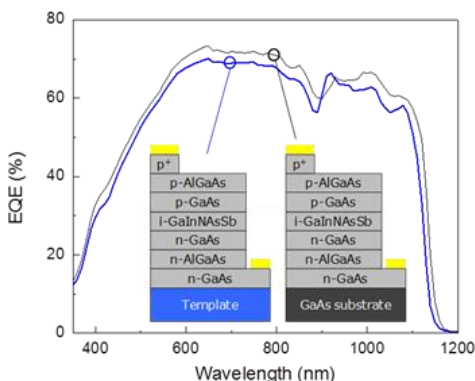
Ⅲ-2- (ロ) -1-④-a エピタキシャル多接合：希釈窒化物-MBE 東京大学 (岡田 G)

これまでに、MBE 法で作製した GaInNAs:Sb セルの高品質化には窒素雰囲気中のアニールが有効であることを明らかにしてきた。一方、ウエハシャトルによる多接合化プロセスにおいては、①高温アニールによる他サブセルの劣化、②MBE 成長後の MOCVD プロセスによる GaInNAs:Sb セルの劣化が課題となる。H27 年度は Ge ボトムセル上の高品質 GaInNAs:Sb セル作製に向け、水素 MBE により製膜した GaInNAs:Sb 1.0eV セルへのポストアニール条件の最適化を実施した。アニール温度の GaInNAs:Sb セル特性への改善効果を調べ、従来より 100°C 低い 750°C までアニール温度を低下させることに成功した (図Ⅲ-2- (ロ) -1-④-a-1)。このことから、アニールによる他サブセルの特性劣化を抑制しつつ高品質の GaInNAs:Sb セルが実現できることが示唆される。



図Ⅲ-2- (ロ) -1-④-a-1 ポストアニール温度と GaInNAs:Sb 太陽電池の分光感度特性との関係。750°C 以上において太陽電池特性が大幅改善

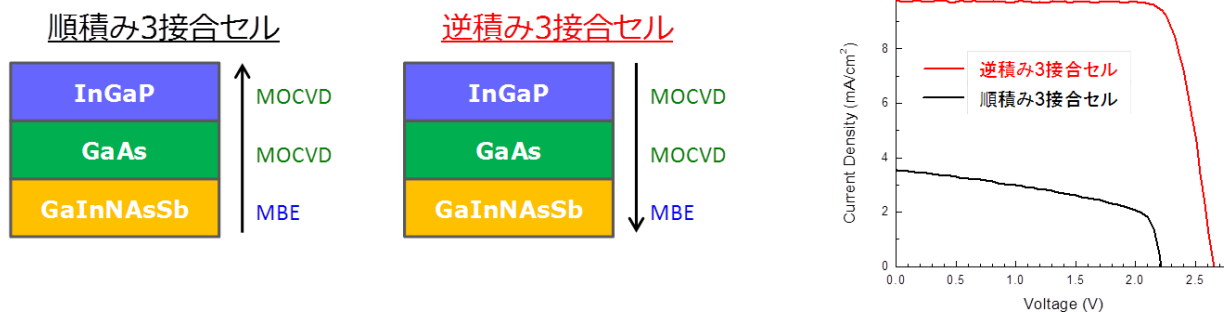
一般に Ge 基板上への III-V ヘテロエピの際のアンチフェーズドメイン発生を抑制するためオフ基板が用いられる。そこで H28 年度は、オフ基板上への GaInNAs:Sb セルの製膜を実施し、条件の最適化を進めた。ここでは、GaAs オフ基板上に MOCVD で GaAs 層を製膜したテンプレート基板を用い、GaInNAs:Sb 太陽電池の成長を行った。比較用として、エピレディのオフ基板上にも同様の製膜を行った。その結果、図Ⅲ-2- (ロ) -1-④-a-2 に示すように従来と同水準の GaInNAs:Sb 単接合セルの再成長に成功した。このことから、オフ基板の使用によるデメリットはなく、また MOCVD のテンプレート上への GaInNAs:Sb の再成長に関しても問題なく実施できる見通しを立てることができた。



図Ⅲ-2- (ロ) -1-④-a-2 GaAs オフ基板上に MOCVD で GaAs 層を製膜したテンプレート基板を用い、成長した GaInNAs:Sb 太陽電池の分光感度特性。

H29 年度は GaInNAs:Sb 1.0eV セルの多接合化を進めている。シャープ(株)との共同により、これまでにウエハシャトルによって順積み 3 接合、および順積み 4 接合セルの試作を行っているが、GaInP/GaAs 上層セルの再成長後に GaInNAs:Sb セル特性が劣化することが分かっている。この主因の一つとして、MOCVD 製膜工程において発生する水素原子が GaInNAs:Sb 層中に混入することを明らかにした。今回この影響を排除すべく、『チーム II. エピ層移載技術開発』の成果を転用し、シャープ(株)で製

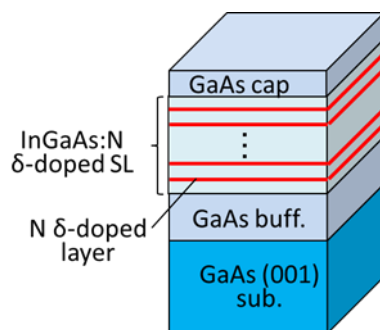
膜した GaInP/GaAs セル上へ GaInNAs:Sb 1.0eV セルを製膜したウエハシャトル・逆積み3 接合セルの開発を行った。その結果、GaInNAs:Sb セルの劣化なく電流整合に十分な電流生成を実現し、図III-2-(ロ) -1-④-a-3 に示すように良好な I-V 特性を達成した。現在プロセスの最適化、並びに反射防止膜形成を進めており、その結果として特性の大幅改善が得られる見込みである。また、ウエハシャトルに加え、ウエハ接合技術を用いることにより 4 接合、5 接合セル化手法の検討を進めている。



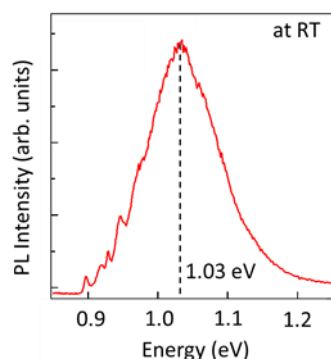
図III-2- (ロ) -1-④-a-3 GaInNAs:Sb ボトムセル (1eV) セルを用いた 3 接合太陽電池の I-V 特性。「順積みセル」において GaInNAs:Sb セル劣化を確認。「逆積みセル」プロセスにより劣化影響を克服。

III-2- (ロ) -1-④-a エピタキシャル多接合：希釈窒化物-MBE 埼玉大 (東京大学から再委託)

超格子構造による疑似混晶膜の作製にあたり、MBE セルシャッター開閉機構の空圧制御化および制御プログラムの作成を行い、原料供給シーケンスの自動化を行った。これにより、ナノメートルオーダーの積層構造を持つ作製試料の精密制御と効率的な作製が可能となった。RF プラズマ MBE 法により、In 組成や基板温度などの条件を様々に変えて InGaAs 中へ窒素 δ ドープ層を形成し、試料中の窒素分布を評価することで、窒素 δ ドープ層の形成条件と窒素添加量の間関係を明らかにした。また図III-2-(ロ) -1-④-a-4 に示すような窒素 δ ドープ層を約 6 nm の InGaAs スペースャー層とともに周期積層した超格子構造を作製し、構造評価および光学特性を評価することで、格子歪およびバンドギャップ制御ができることを実証した。この結果を基に成長条件の検討を進めることで、GaAs 基板にほぼ格子整合したバンドギャップ約 1 eV の材料を実現した (図III-2- (ロ) -1-④-a-5)。

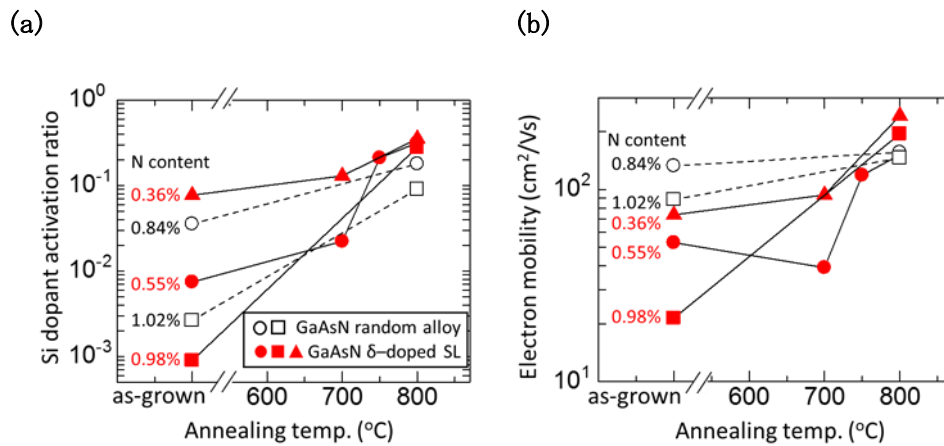


図III-2- (ロ) -1-④-a-4 作製した InGaAs:N δ ドープ超格子の試料構造



図III-2- (ロ) -1-④-a-5 300KにおけるInGaAs:N δドープ超格子のフォトルミネッセンススペクトル

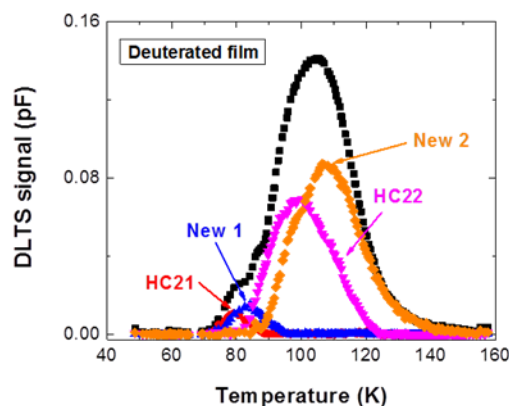
さらにSi添加n-GaAs:N δドープ超格子の作製と電気特性評価を実施した結果、800度のアニールによりSiが活性化するとともに電子移動度が増大し、同程度の窒素組成のGaAsNランダム混晶に比べ高い移動度 (~250 cm²/Vs) が得られることを示した (図III-2- (ロ) -1-④-a-6)。今後Inとの混晶化により移動度は増大することが予想され、中間目標である400 cm²/Vsの達成が期待できる。



図III-2- (ロ) -1-④-a-6 GaAs:N δドープ超格子の (a)Si ドーパント活性化率のアニール温度依存性、および (b)電子移動度のアニール温度依存性

III-2- (ロ) -1-④-a エピタキシャル多接合：希釈窒化物-CBE 豊田工業大学

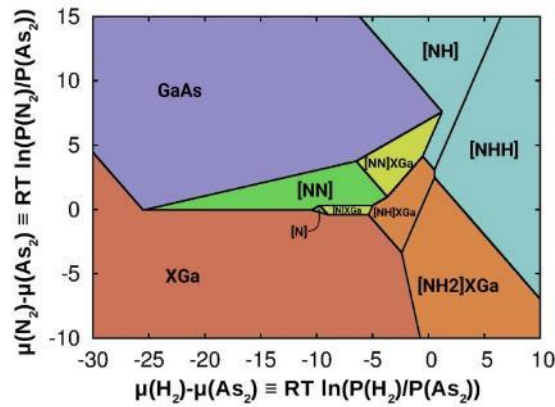
GaInNAs材料の欠陥制御として、GaAs基板の面方位の検討を行った。GaAs(111)B微傾斜基板を用いると、表面の原子ステップでのみNが取り込まれ、高品質なGaAsN膜を成膜できる可能性があることを示した。重水素化原料を用いて成膜したGaAsNの赤外吸収測定、過渡容量分光(DLTS)測定等での欠陥解析により、残留アクセプターN-H複合欠陥の形成は、As原料であるTDMAAsの-CH₃とN原料であるMMHyのN-HのHが形成に寄与していることを明らかにした。また、N-H複合欠陥の形成するエネルギー準位を解析し、ダブルアクセプターの特性を示す可能性を示した。



図III-2- (ロ) -1-④-a-7 重水素化原料を用いて成膜したGaAsNのアクセプター起源と考えられる欠陥のDLTS信号。ダブルアクセプター(0.11, 0.19eV)の特性を示す可能性を示した。

III-2- (ロ) -1-④-a エピタキシャル多接合：希釈窒化物-CBE 九州大(豊田工業大学から再委託)

GaAsN薄膜中の複合欠陥の電子構造解析および格子振動数解析を完了した。また、それぞれの複合欠陥の形成エネルギーを解析し構造安定性を明確化した。いくつかの文献結果と比較し、膜中の複合欠陥構造の絞り込み・分類に成功した。

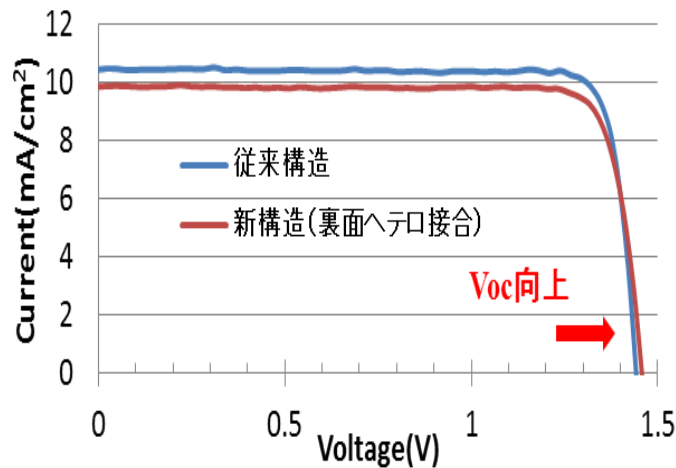


図III-2- (ロ) -1-④-a-8 表面相図の作図法を応用して薄膜成長条件と欠陥構造の安定性に関する相図を作成

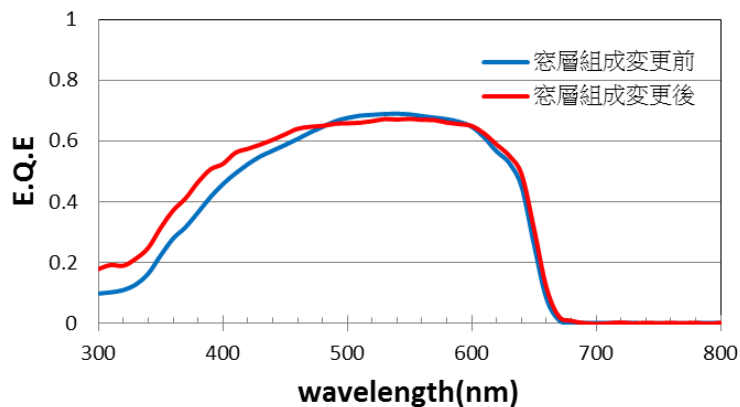
III-2- (ロ) -1-④-a エピタキシャル多接合:既存構造 シャープ(株)

pn 接合の改良検討 (裏面ヘテロ構造) を順積み構造で実施し、従来のものと比較して 0.02V の開放電圧の向上を確認した。

- ・トップセルの短絡電流向上を目的として、窓層の改良を行った。
- ⇒組成比変更、厚さ変更で短波長領域の量子効率が向上する結果を得た。トップセルが感度のある全波長域では約 3 % の短絡電流の上昇を確認した。



図III-2- (ロ) -1-④-a-9 裏面ヘテロ構造セルの電気特性

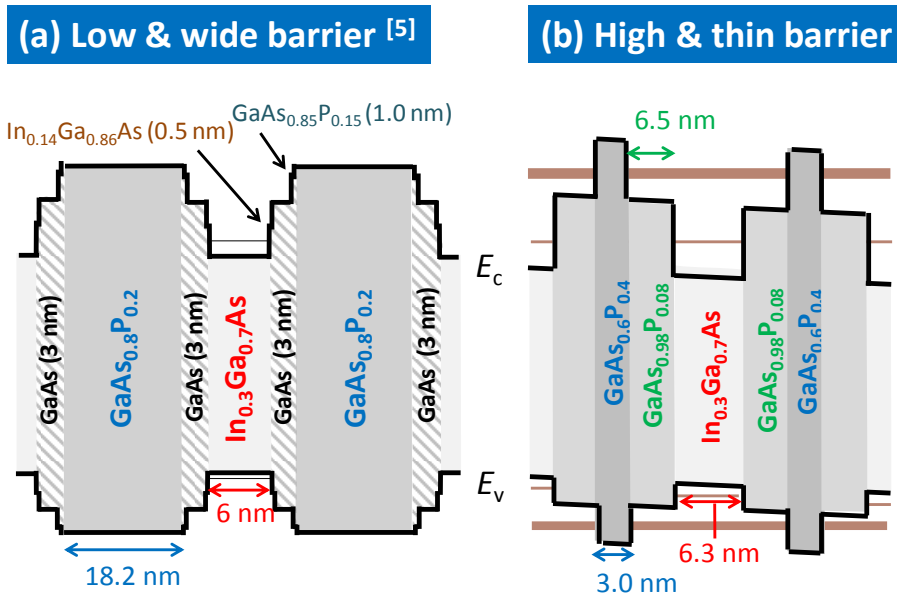


図III-2- (ロ) -1-④-a-10 トップセル窓層変更前後の分光感度測定結果

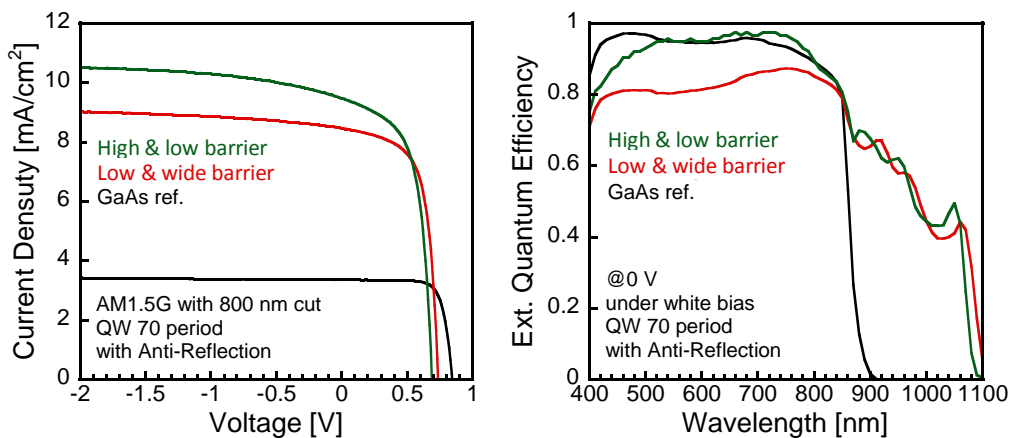
III-2- (ロ) -1-④-a エピタキシャル多接合：量子構造 東京大学（中野・杉山 G）

4 接合セルの電流整合を満たす第3セルとして 1.15 eV の光吸収端を有する量子井戸太陽電池の開発を進めた。これまでに量子井戸挿入太陽電池に関して得られた知見をもとに、歪み補償のために不可欠な GaAsP 障壁層によるバンドオフセット（障壁高さ）に関して、低く厚い障壁と高く薄い障壁を有する構造をそれぞれ吸収端が 1.15 eV になるように構造最適化し、GaAs 単セルに挿入して特性を評価した。後者の場合は、キャリアのトンネルに不可欠な厚さ 3 nm 以下を満たすために、長波長吸収用の井戸層と歪み補償用の障壁層の間に P 組成の小さい GaAsP 中間層を挿入して、障壁層と中間層の両方で歪み補償する新たな設計指針を開発して採用した。

量子井戸を 70 層含む GaAs 単セルを作製し、吸収端 1.15 eV、 $W_{oc} = 0.35$ V を達成した。また、キャリア輸送に関しては高く薄い障壁を有する構造のほうが有利であり、800 nm のフィルタ下で開放電圧 0.77V、短絡電流約 10 mA/cm²（反射率補正後）、曲線因子 0.69 を得た。曲線因子以外は第3セルの目標値をほぼクリアしているが、曲線因子の改善にはもう一段の構造・成長法最適化が必要であり、引き続き開発を進める。



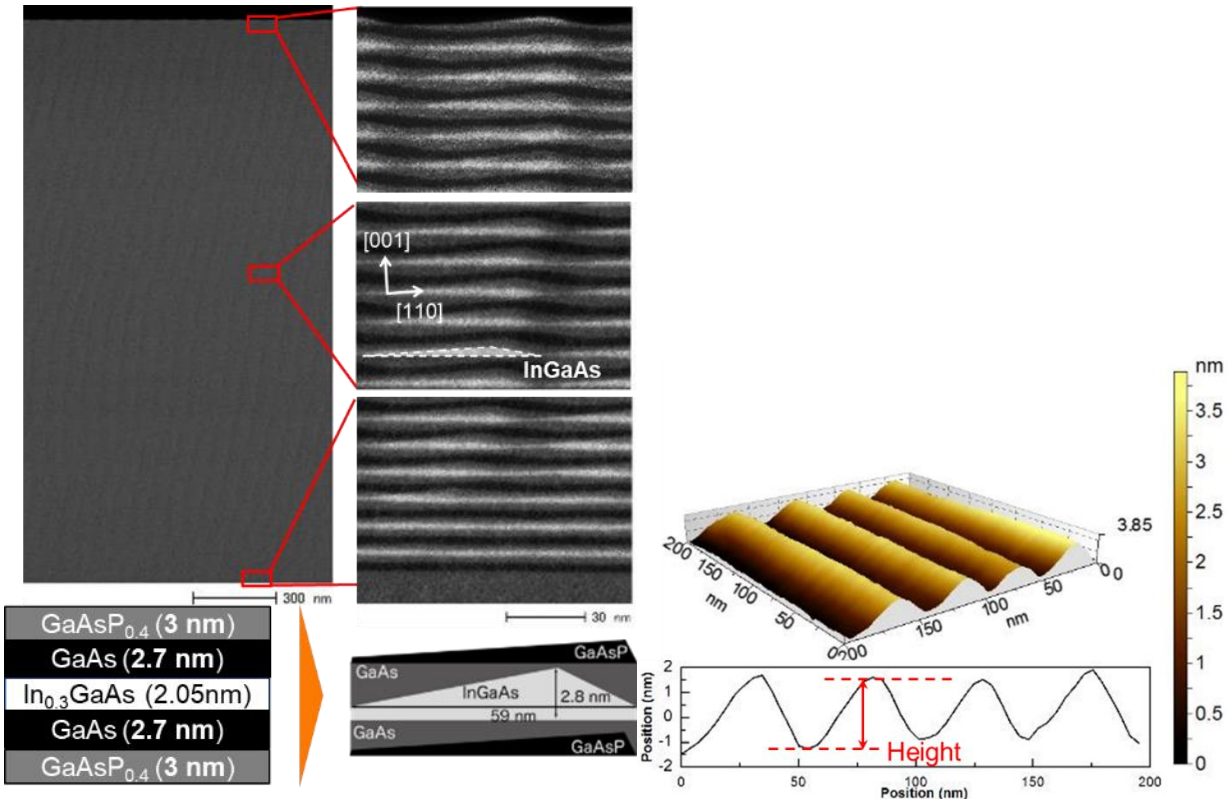
図III-2- (ロ) -1-④-a-11 吸収端 1.15 eV を達成する量子井戸構造。吸収端を 1.15 eV にまで長波長化するために約 6 nm 厚の In_{0.3}Ga_{0.7}As 層が必要であり、GaAs マトリックスに対して歪み補償するための GaAsP 層を 18.2 nm の GaAsP_{0.2} 層（バンドオフセットが小さく厚い障壁）にする場合と、3.0 nm の GaAsP_{0.4} 層と 6.5 nm の GaAsP_{0.2} 層（バンドオフセットが大きく薄い障壁：ステップトンネル構造）で歪み補償する場合の 2 つの構造を試みた。



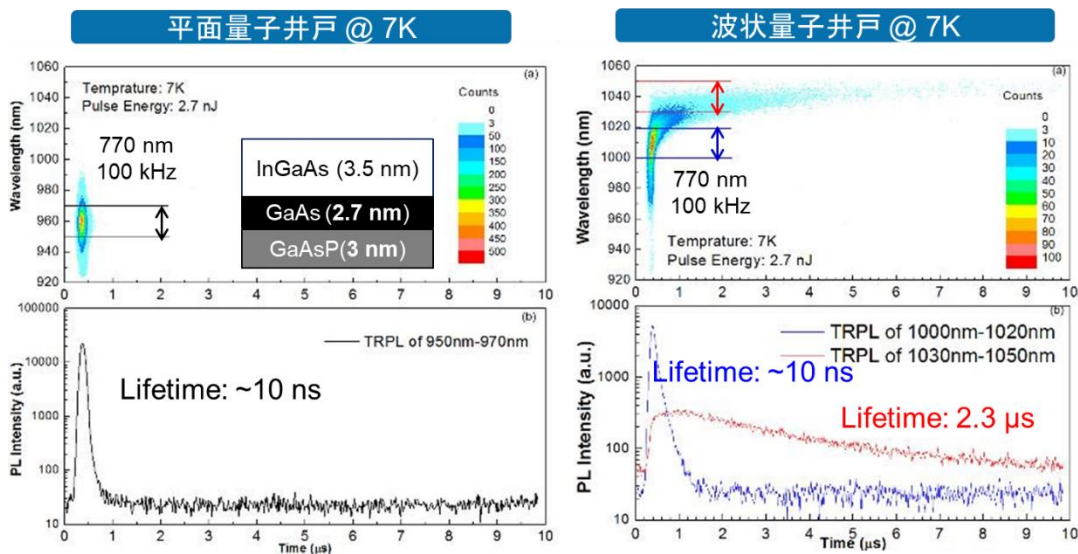
図III-2- (ロ) -1-④-a-12 上図に示す 2 つの量子井戸構造 70 層を挿入した GaAs 単セルの 1 sun 下での特性。電流電圧特性は、4 接合セルにおける第3セルの特性評価として、吸収端 800 nm のフィルタ下で評価している。両構造ともに量子井戸吸収領域の外部量子効率同等であるが、バンドオフセットが小さく厚い障壁の場合には GaAs バルクの波長領域での量子効率が低く、厚い量子井戸構造を横断

するキャリア輸送にボトルネックがあることを示している。トンネル効果によるキャリア輸送を併用したステップトンネル構造では、キャリア輸送が効率化されて電流増大に寄与している。

また、微傾斜基板上に形成される波状量子井戸構造に関して、各層の成長時間などを制御することにより、波の山が形成する細線構造の断面サイズ、横・縦方向の周期を制御することに成功した。これにより、波状量子井戸によっても吸収端 1.15 eV を得ることに成功し、第 3 セルに挿入する量子構造として有望であると結論できた。さらに、本構造は平面量子井戸に比べて結晶歪みの開放が容易であるらしく、多数の積層を行っても格子緩和による結晶の劣化が起きにくいという、太陽電池に適した特性が示された。



図III-2- (口) -1-④-a-13 200層積層した歪み補償波状量子井戸構造の断面 TEM 像 (左) と再表面 InGaAs 層の表面 AFM 像。200層積層しても面内・積層方向の両方に規則性が保たれたまま結晶成長が可能であることが示された。



図III-2- (口) -1-④-a-14 平面量子井戸と波状量子井戸の光励起キャリア寿命比較

波状量子井戸は、光励起キャリア寿命が極端に長いという興味深い特徴を有している。上図に示すように、平面量子井戸とは異なり、7K におけるキャリア寿命はマイクロ秒のオーダーに達している。ストリークカメラのイメージからは、時間とともに発光ピークが長波長方向へシフトする傾向がみられており、細線構造の断面積が長手方向で微妙に変化していることによる、量子細線内部の電子・正孔の空間分離が起きている可能性が考えられる。この長寿命は、中間バンド太陽電池の実現にも有望な性質である。実際、まだ量は小さいものの、波状量子井戸を挿入した GaAs 単セルにおいて量子ドット太陽電池と同様の 2 段階光子吸収による電流が観測された。

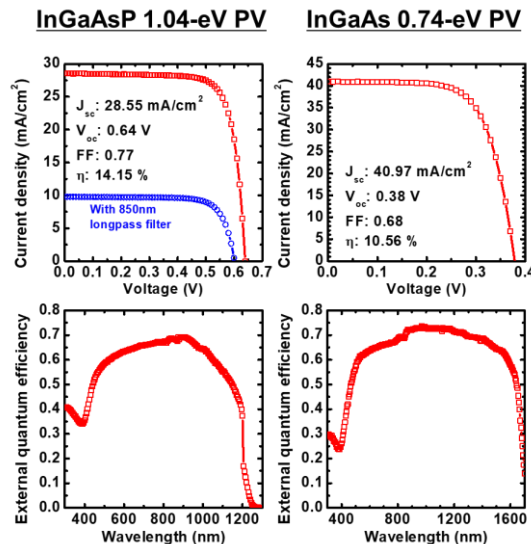
III-2- (ロ) -1-④-a エピタキシャル多接合：多接合動作解析 宮崎大学

光吸収層に多重量子井戸 (MQW) を挿入し光吸収領域を長波長側へ拡張させる手法が超高効率セル実現に有効であるが、同時に MQW でのキャリア再結合損失も発生する。歪み補償 InGaAs/GaAsP-MQW 太陽電池の MQW 内で生じる 3 つのキャリア動的振る舞いを、3 つの非破壊評価法である PL (発光再結合損失)、PPT (非発光再結合損失)、SPV (MQW からの熱脱出) を用いてそれぞれ高感度に検出することに成功した。更に、各信号強度の温度変化測定と速度方程式に基づく信号解析から、熱脱出 ΔE_{ES} および非発光再結合の活性化エネルギー ΔE_{NR} をそれぞれ算出できた。また、MQW スタック数の増加で ΔE_{NR} が増加することを明らかにし、フォトンリサイクル効果の存在を実験的に示した。

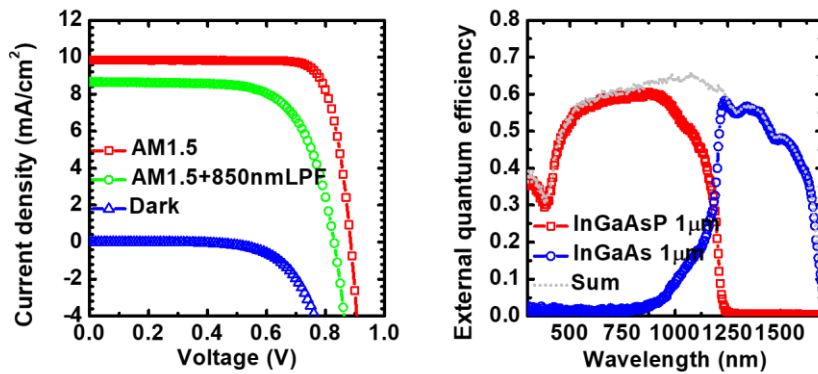
MQW の欠点を補うために、障壁層を薄くして超格子 (SL) 化し形成されるミニバンド中を量子トンネル効果でキャリア輸送させる手法が提案されている。GaAs p-i-n 太陽電池に挿入した InGaAs/GaAsP-SL 構造の障壁層幅を 1.9 から 7.3 nm まで変化させた試料に対し、PR、SPV、PPT 法を適用したところ二つの遷移エネルギーを算出できた。nextnano ソフトウェアによる理論計算と比較したところ、実験値と理論値は非常によく一致した。また、そのエネルギー差からミニバンド幅を評価できることを初めて実験的に示した。理論計算では電界も考慮した計算も実施し、一般的な太陽電池の内部電界 1 $\mu\text{V}/\text{m}$ 程度でも、SL 構造中のミニバンドが部分的に局在化することが分かった。これは量子ナノ構造太陽電池におけるキャリア回収効率を改善する際に非常に重要な知見である。

III-2- (ロ) -1-④-b ハイブリッド多接合：ウエハ接合 東京大学 (中野・杉山 G)

4 接合セルの実現に向けて、InP 基板上の InGaAsP (吸収端 1.05 eV) および InGaAs (吸収端 0.75 eV) ナローギャップセルの結晶成長条件を検討した。従来の成長においては結晶層におけるヒロック生成が問題であったが、成長温度を低温化することでその抑制に成功し、かつドーピング条件もほぼ確立することができた。これらの成果により、吸収端 1.05 eV および 0.75 eV の単セルを InP 基板上に作製し、単セル特性としては 4 接合セルに必要な性能をほぼ得ることができた。つぎに、これらのセルをトンネル接合を介して 2 接合化し、ウエハ接合 4 接合のボトム 2 接合セルを作製した。2 接合動作は得られたものの、単セル特性に比較して開放電圧および曲線因子の悪化がみられた。これは、トンネル接合における抵抗が大きく、電圧損が 0.1 V 程度あるためである。現在 n 型ドーパントとして S を用いているため高濃度ドーピングが困難であることから、ドーパントを Te に変更して低抵抗化を進める。



図Ⅲ-2- (ロ) -1-④-b-1 ウエハ接合 4 接合セルの第 3・4セルの単セル特性。MOCVD により InP 基板上に作製した。

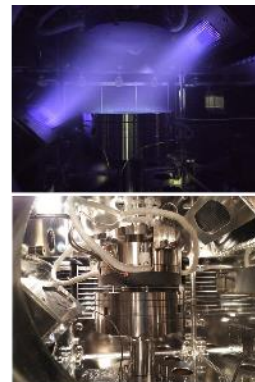


図Ⅲ-2- (ロ) -1-④-b-2 上図に示した 2セルをトンネル接合を介して接続した 4 接合用ボトム 2 接合セルの特性。

これと並行して、2-4 インチサイズウエハ対応表面活性化接合装置を立ち上げ、Si、GaAs ウエハに対して機械的接合が成立する条件を求めた。装置導入前のウエハ前処理条件を改善した結果、GaAs//Si ウエハの接合について、ポイドレスで均一な接合面が得られた。本装置を用いた多接合太陽電池の作製可能性を検証するため、エピタキシャル成長で形成した GaAs トップセルと拡散法で形成した Si ボトムセルの接合試験を実施、一部ポイドがみられるが接合自体は成立することが確認できた。また、作製した GaAs//Si 2 接合セルの特性は各サブセルの特性を足し合わせたものにほぼ等しく、接合界面はほぼ良好であることが確認できた。

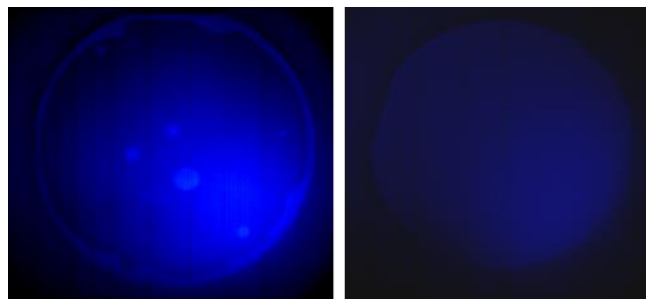


• Wafer bonding equipment
(φ2"-4", AYUMI Industry co. ltd.)



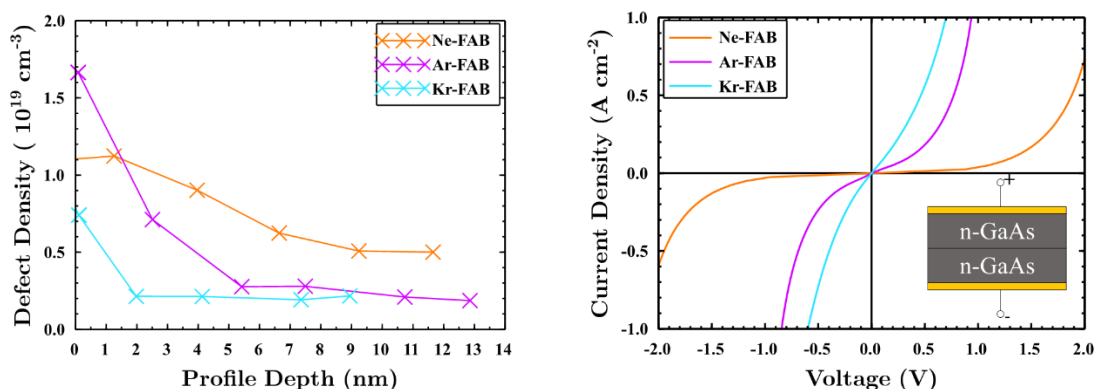
• Ar fast atom beam (FAB)
• Vacuum chamber 5×10^6 Pa

図Ⅲ-2- (ロ) -1-④-b-3 導入した 2-4 インチ対応表面活性化ウエハ接合装置



図Ⅲ-2- (ロ) -1-④-b-4 GaAs//Si 2 インチ接合ウエハの赤外透過像。表面処理法改善前 (左) と改善後 (右) 導入した 2-4 インチ対応表面活性化ウエハ接合装置。表面処理改善により、接合面の空隙をなくすことに成功した。

一方、ウエハ接合界面の低抵抗化をメカニズムの観点から検討するため、ウエハ接合による4接合セルに最も多く用いられるGaAs/GaAs界面に関して、表面活性化ウエハ接合によりn-GaAs同士の接合界面を形成し、その電気伝導特性を評価した。接合前の表面クリーニングに用いる希ガス原子を変えて接合界面を形成したところ。原子半径の大きいKr、Ar、Neの順で低抵抗の界面が得られた。この原因を解明するため希ガス原子照射により基板表面に導入される欠陥を、照射後のGaAs表面にショットキー電極を形成してアドミタンス測定を行うことで評価した。その結果、基板深部への欠陥導入はNeがもっとも多く、Krの場合は表面2-3 nm程度に欠陥が留まることが判明し、電気伝導特性と合致する結果が得られた。今後同様な欠陥評価法を指標として表面クリーニングプロセスの最適化と界面抵抗の低減を進める予定である。



図III-2- (ロ) -1-④-b-5 高速原子ビーム照射によってGaAs表面に導入された希ガス原子の深さ方向分布(左)と、対応する表面処理を行ったn-GaAs基板同士の接合界面のI-V特性。原子が深さ方向に浸透するほど結晶欠陥が増えて接合界面が高抵抗化する様子が見られる。

III-2-(ロ) -1-④-b ハイブリッド多接合：窒化物 名古屋大

c面上と(1-101)GaN面での太陽電池シミュレーションにより、(1-101)面を用いることで、電流整合可能なInGaN膜の可能性を見出した。(1-101)面上へInGaN厚膜結晶の作製が行った結果、190nmの高品質InGaNの成長が可能であった。一方で、400nm程度の膜厚が必要であり、更なる高品質化の技術開発が必須である。

III-2-(ロ) -1-④-b ハイブリッド多接合：窒化物 名城大

本研究課題では、InGaNトップセルの有用性を実証するために、ウエハ接合技術を中心に研究を進めており、名古屋大学の天野・本田G、東京大学の藤岡Gと連携して研究を進めてきた。ウエハ接合技術においては加圧・加温によってGaNとGaAsにおいて、一般的なAu/Au接合同程度という高い接合強度を持つ接合技術の開発を進めた。さらに、本接合を用いて4接合太陽電池を試作し、開放電圧の向上を確認し、InGaN材料がトップセル材料に有用であることを実証した。

III-2-(ロ) -1-④-b ハイブリッド多接合：窒化物 東京大学(藤岡G)

パルススパッタ法と呼ばれる低温結晶成長技術を用いて、ハイブリッド多接合セル用のInGaN薄膜の高速成長技術やGaN薄膜の高濃度ドーピング技術を開発した。

III-2-(ロ) -1-④-c 量子ドット・マルチバンド 東京大学(岡田G)

- 高ギャップ材料で埋め込んだ量子ドット構造の作製

電界減衰型InGaAs/AlGaAs量子ドット太陽電池のキャリア収集効率を改善するために、高ギャップ材料のAlAsSbを用いてInGaAs量子ドットを埋め込む構造を作製した。AlAsSb層がバリアとなりInGaAs量子ドットへのキャリアの捕獲が抑制され、明瞭に太陽電池特性が改善される結果が得られた。

- タイプII型量子ナノ構造の形状制御と2段階光吸収特性の評価

GaSb/GaAsタイプII型量子ナノ構造の高品質化に向けて成長条件の検討を行い、S-K成長法によってGaSb結晶を3次元状に形成した後、Asを照射して形状を制御することでPL発光寿命が長寿命化さ

れることを見出した。また GaSb 結晶に As を照射した試料では、量子ナノ構造中に生成されたキャリアが光励起によって取り出される割合が高くなることを明らかにした。

- デバイスシミュレーションによる閉じ込め準位間電子トンネル効果の解析

量子ドットを用いた中間バンド型太陽電池に対するデバイスシミュレータへ量子ドットの閉じ込め準位間での連続トンネル伝導を導入した。トンネリングにより中間バンドを介した再結合が抑制され特性向上に寄与することを明らかにした。

- デバイスシミュレーションによるフォトンラチェット機構の検討

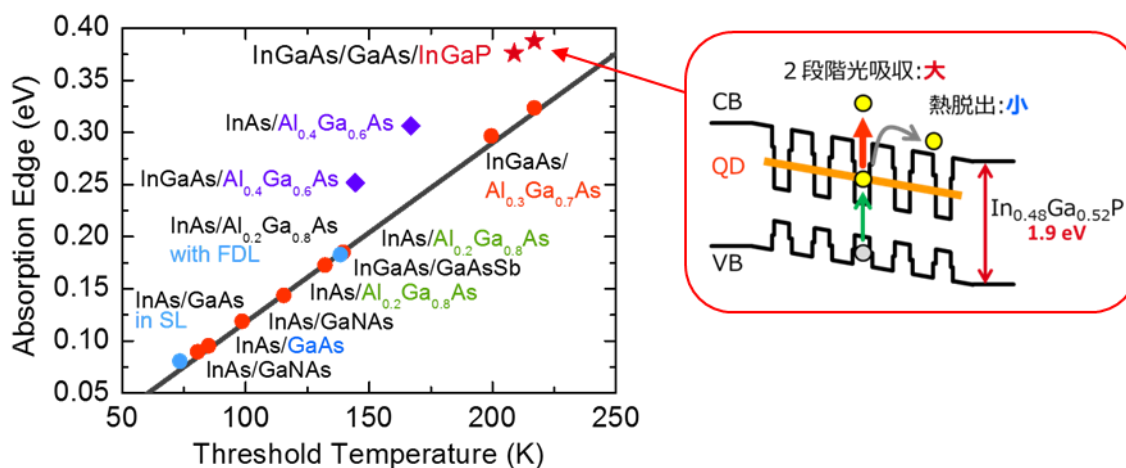
効率的な 2 段階光吸収過程の実現を目的としたフォトンラチェット機構を量子ドット中間バンド型太陽電池デバイスシミュレータへと実装した。ラチェット機構が太陽電池特性に与える影響についてシミュレーションにより考察を行い、量子ドット準位とラチェット機構との依存性を明らかにし、高効率動作に向けた指針を得た。

- デバイスシミュレーションによる光バイアス下での量子効率の解析

実験で得られる光バイアス下での量子効率測定をデバイスシミュレーションにより解析を行うため、バイアス光を導入した量子効率計算プログラムを実装した。この実装により、二段階光吸収プロセスと競合するキャリア緩和、再結合過程の影響について解析を行うことを可能とした。

- 2 段階吸収メカニズム解明と高効率化に向けた最適セル設計

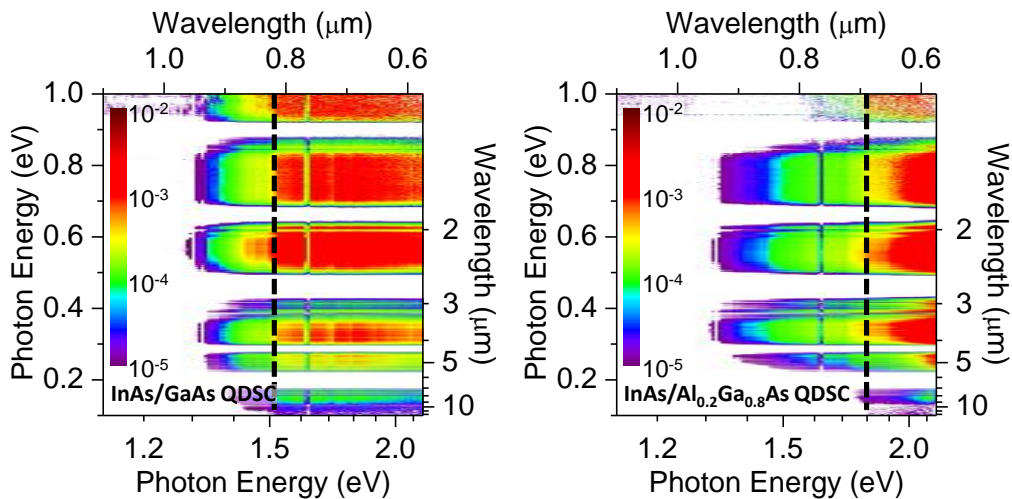
多重積層 In(Ga)As 量子ドット太陽電池について、異なるバリア層材料を用いて伝導帯バンドオフセットを系統的に制御し、フーリエ変換分光法を用いて 2 段階光吸収による赤外光電流スペクトルの評価・解析を行った。2 段階目の赤外光電流スペクトルの吸収端エネルギーと赤外光電流応答の閾値温度は普遍的な線形関係を示し、室温 2 段階光吸収の高効率動作に向けた光キャリア閉じ込めの最適化設計値「0.46 eV 以上」を明らかにした。また産業技術総合研究所との共同で InGaAs/InGaP 量子ドットセルの検討を開始し、現時点で最高閾値温度 230 K を得た(図III-2-(ロ)-1-④-c-1)。



図III-2-(ロ)-1-④-c-1 量子ドットセルにおいて、異なるバリア層材料を用いて伝導帯バンドオフセットを系統的に制御し、フーリエ変換分光法を用いて 2 段階光吸収による赤外光電流スペクトルの評価結果。2 段階目の赤外光電流スペクトルの吸収端エネルギーと赤外光電流応答の閾値温度は普遍的な線形関係を示す。

- 2 段階光吸収による光電流生成の定量評価

多重積層 InAs 量子ドット太陽電池において、フーリエ変換光電流分光法 (FTPS) を用いて 2 段階光吸収過程の 1 段階目と 2 段階目を詳細にスペクトル分解した量子効率スペクトルマップを得た。量子効率スペクトルマップと太陽光スペクトル (AM1.5D) との重なり積分から、2 段階光吸収による光電流生成について定量的な解析を行い(図III-2-(ロ)-1-④-c-2)、高効率化に向けた定量的な設計指針を明らかにした。



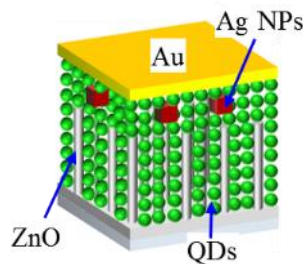
図III-2- (ロ) -1-④-c-2 InAs/GaAs 量子ドットセル(左図)、InAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As 量子ドットセル(右図)の 9 Kにおける AM1.5D 下での光電流マッピング(mA/cm²/eV)。破線：ホストのバンドギャップエネルギー。2段階光吸収による電流増大を実用レベルに向上させるための定量的な指針を解明した。

・ Type-II 型量子ドット太陽電池における高効率2段階光吸収の実現

Type-II 型 GaSb/GaAs 量子ドット太陽電池において、絶対値校正したフーリエ変換光電流スペクトルより求めた赤外外部量子効率の温度依存性から、Type-I 型 InAs/GaAs 及び電子閉じ込め Type-II 型 InGaAs/GaAsSb 量子ドット太陽電池より高温動作となる、250 Kにおける2段階光吸収による有意な電流増大を確認した。バリア層のワイドギャップ化により室温高効率動作につながると期待される。

III-2- (ロ) -1-④-c 量子ドット・マルチバンド 東京大学 (久保・立間 G)

本テーマでは、吸収領域の調整が容易なコロイド量子ドットと ZnO ナノワイヤとで構築するハイブリッド構造に、光増強効果が期待できる金や銀の金属ナノ粒子を導入した太陽電池(図III-2- (ロ) -1-④-c-3)で、赤外領域での光電変換の高効率化を目指している。



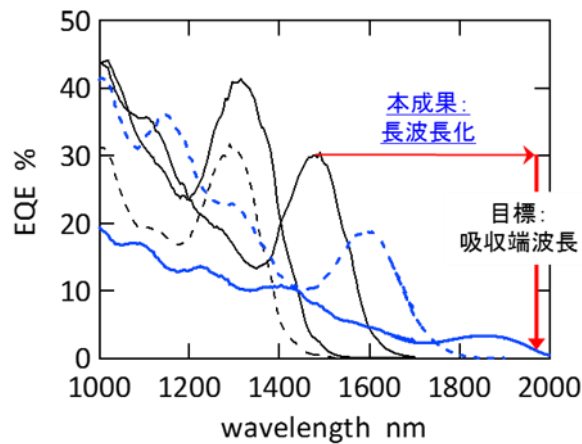
図III-2- (ロ) -1-④-c-3 コロイド量子ドット・ZnO ナノワイヤと金属ナノ粒子を組み合わせた太陽電池

これまでの研究で、コロイド量子ドットの合成条件を整えることで、当初の目標である 2.0 μm 程度まで光吸収帯を拡張し、ZnO ナノワイヤと組み合わせて太陽電池を構築することで、太陽光スペクトルの幅広い領域で光電変換を実現した(図III-2- (ロ) -1-④-c-4)。特に、低温溶液プロセスで構築でき、2 μm 帯で発電可能なセルとしては、報告例のない高い外部量子効率(30% @1520 nm：図III-2- (ロ) -1-④-c-4：青破線)を達成した。このセルの開放電圧は、250 mV 程度であり、Ge 太陽電池セルと同等の値を示すことも明らかになった。一方、EQE スペクトル(図III-2- (ロ) -1-④-c-4：青実線)から推察できる通り、短絡電流密度のさらなる向上が必要である。短絡電流密度の向上に対しては、金属ナノ粒子の形状やサイズを整えることで、コロイド量子ドットの吸収が低い近赤外から短波長赤外領域における光捕集効率の向上を狙っている(図III-2- (ロ) -1-④-c-5)。

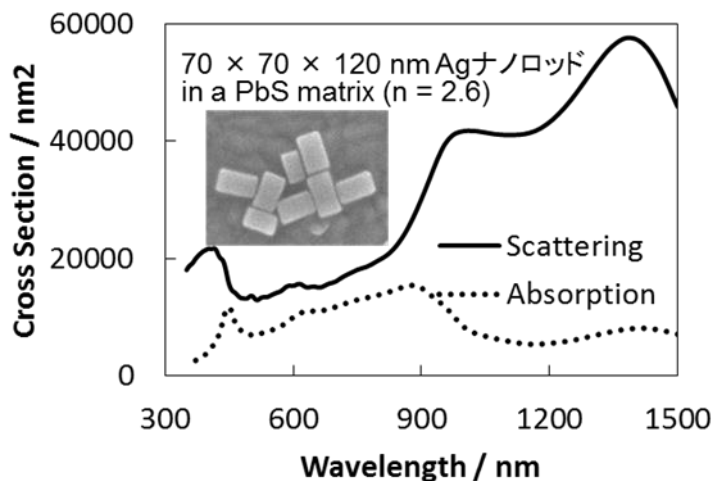
本テーマで検討を行っているコロイド量子ドットを用いた太陽電池に関しては、長波長領域での光電変換が確認できた段階であり、高効率化やデバイス作製技術の構築など克服すべき課題が残って

いる。また、基本性能の向上研究と並行して、実用化を行う上で重要な耐久性試験を行っているが、これまでに耐熱性や耐湿性、耐光性などの試験において、良好な結果を得ている。

本事業で開発を進めているコロイド量子ドット太陽電池は、短波長赤外領域での光電変換を、低温湿式プロセスで実現できる極めて少ない太陽電池の一つと考えられる。



図III-2- (ロ) -1-④-c-4 コロイド量子ドットを用いたセルの EQE スペクトル当初目標の 1900nm 付近からの光電変換を達成した。EQE の向上が課題。



図III-2- (ロ) -1-④-c-5 Ag ナノロッドの光散乱および吸収スペクトル

III-2- (ロ) -1-④-c 量子ドット・マルチバンド 産業技術総合研究所

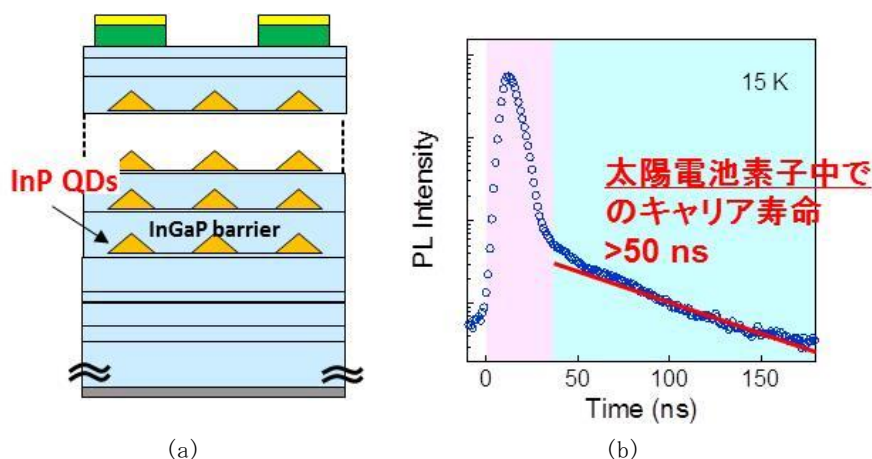
本テーマでは、InGaP 系ワイドギャップホストを用いた光吸収の最適化と、タイプ II 型量子ドットによるマルチバンド中のキャリア長寿命化を兼ね備えた量子ドット太陽電池の作製が目標である。

In_{0.48}Ga_{0.52}P 中にタイプ II 型 InP 量子ドットを形成することにより、ワイドギャップホストを用いた太陽光スペクトルの高効率利用に加え、電子と正孔を空間的に分離して閉じ込めるタイプ II 型ポテンシャル中のキャリア長寿命化のため、2 段階光吸収過程の高効率化が期待できる。

タイプ II 型 InP 量子ドット太陽電池作製の要素技術として、MBE 装置を用いたタイプ II 型 InP 量子ドットのエピタキシャル成長技術の開発を進めた。InP 量子ドットの結晶成長においては、結晶成長速度に依存してタイプ I 型およびタイプ II 型の異なるポテンシャル構造を有した量子ドットが生成されることが知られていた。そこで、本研究では、タイプ II 型 InP 量子ドットを成長するための結晶成長条件の検討を進めた。結晶成長に用いる基板の比較を行い、タイプ II 型 InP 量子ドットを高い割合で生成する条件の検討を進めた。さらに、量子ドット層を多数層積層する技術の研究開発を進めた。

これと並行して、InP 量子ドットを実装した太陽電池セルの作製技術の開発を進めた。図III-2- (ロ) -1-④-c-6(a)の模式図に示すような、InGaP 太陽電池セルに InP 量子ドットを挿入した試料を作

製した。量子ドットによる光吸収を増大させるために、10層の InP 量子ドット層を InGaP 層で覆うことにより形成した。分光感度特性より InP 量子ドット層による光電流生成を確認し、10%以上の量子効率を得られた。また、InGaP ホスト量子ドット太陽電池中の InP 量子ドットについて、キャリアの寿命評価を行った。量子ドットの発光について時間分解測定を行い、タイプ II 型量子ドットが 50 ナノ秒以上の長い蛍光寿命を示すことを確認した。50 ナノ秒以上のキャリアの寿命は、GaAs 中の InAs 量子ドット等のタイプ I 型量子ドットにおける典型的なキャリア寿命 1 ナノ秒と比較して、10 倍以上も長い。量子ドット中のキャリア寿命が 10 倍以上に長くなるため、太陽光照射下における量子ドット中のキャリア数が 10 倍以上に増大し、これによって 2 段階光吸収による光電流生成の効率も 10 倍以上に増大することが期待される。一方で、タイプ II 型 InP 量子ドットの面内密度が従来の InAs 量子ドットと比べ小さい値であることがわかった。今後、これを改善することによって、量子ドットによる光電流生成の更なる高効率化の実現が期待される。しかしながら現状においては、まだ 2 段階光吸収による大幅な変換効率の向上には結びついていない。中間目標である変換効率 30%は、東京大学と協力し、新たな構造中に InAs 量子ドットを形成する太陽電池構造により、実現する予定である。



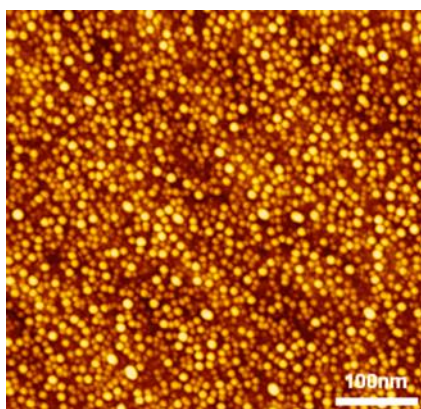
図III-2- (ロ) -1-④-c-6 InGaP ホスト InP 量子ドット太陽電池の断面模式図とキャリア寿命

III-2- (ロ) -1-④-c 量子ドット・マルチバンド 電気通信大学

■超高密度量子ドットの作製技術の開発

分子線エピタキシー(MBE)を用いた Sb 導入法により、面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (世界最高) の InAs 量子ドットを GaAs 基板上へ自己形成する成長技術を開発し(図III-2- (ロ) -1-④-c-7)、その低コスト化について検討した。これまでの液体窒素で MBE チャンバーのシュラウド冷却を行う方式に対して、本研究テーマでは、ランニングコストを抑えた水冷式の MBE チャンバーにて、面内密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の InAs 量子ドットの自己形成技術を開発した。また、GaAs 基板面方位についても通常よく使用される低価格の(001)面の GaAs 基板の使用により面内超高密度化を実現している。

さらに、中間バンド型太陽電池の高効率化に重要な量子ドットの総密度(計算によれば $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 以上)を達成するのに、本研究により開発した面内超高密度量子ドットの成長技術により、量子ドット層の積層数も従来に比べて大幅に減らすことができ、超高密度量子ドットセルの作製におけるスループットを上げることも可能である。しかも、量子ドット層間のスペーサ層膜厚も厚くできるために結晶品質の向上も期待される。

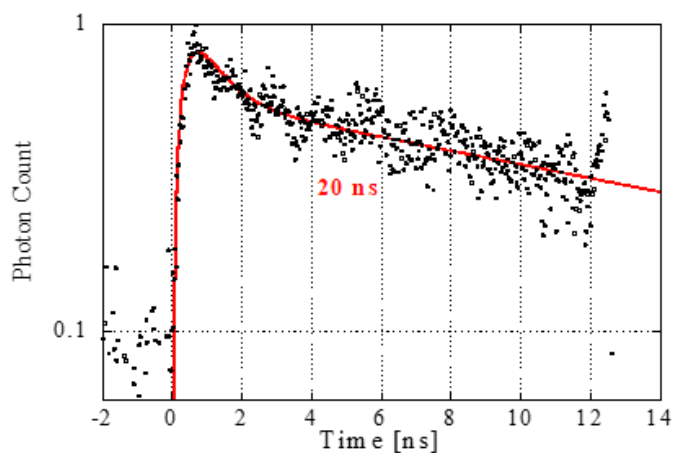


図Ⅲ-2- (口) -1-④-c-7 InAsSb/GaAs (001) 上の超高密度 InAs 量子ドット (QD 密度 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)

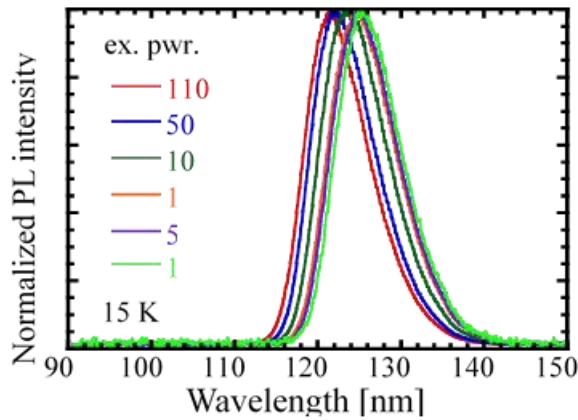
■Type-II バンド構造によるキャリアの長寿命化

中間バンド型太陽電池における 2 段階光励起効果の促進は重要な課題の一つである。本研究では、InAs 量子ドットと GaAsSb 層との type-II 型ヘテロ界面を利用したキャリア分離によるキャリアの長寿命化について検討している。中間評価までの成果としては、上記ヘテロ界面の間に GaAs スペーサ層を導入することにより、キャリア分離効果を強め、蛍光寿命時間を 20 ns (15 K) まで長くできることを示した (図Ⅲ-2- (口) -1-④-c-8)。室温での長寿命化が次の課題となるが、この GaAs スペーサ層導入 type-II 型構造では、従来の構造に比べて高温でも長い蛍光寿命を保持できる特性を示すことも確認しており、今後の進展にも期待が持たれる。

また、光励起波長依存性についても検討を加え、ホスト材料の GaAs の禁制帯以下での長波長側の光励起により生成されたキャリアの励起子状態について調査を行った。その結果、強励起 (集光条件に相当) では、InAs 量子ドット内電子のドット間面内輸送による基底準位の filling 効果 (連続的短波長シフト) が観測され (図Ⅲ-2- (口) -1-④-c-9)、さらに GaAsSb 層内正孔との交差遷移過程を観測し、キャリア分離状態での 2 段階光励起効果が期待されることを示した。



図Ⅲ-2- (口) -1-④-c-8 GaAsInAsSb スペーサ層を導入した InAs QD/GaAsSb type-II 構造の時間分解 PL 測定 (20 ns)

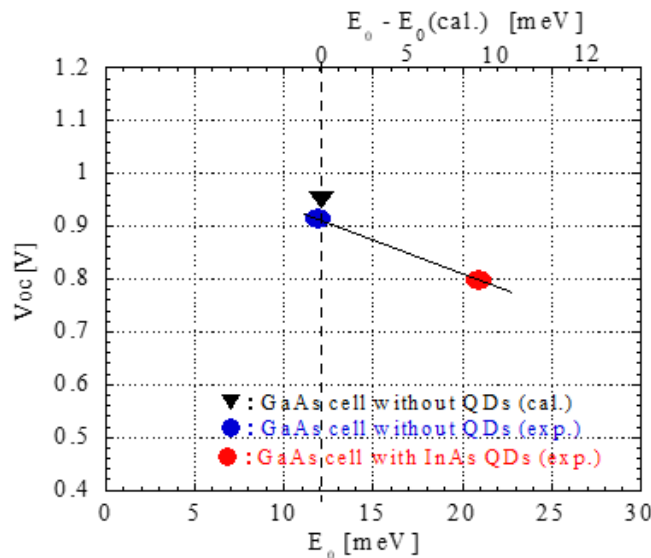


図III-2- (ロ) -1-④-c-9 GaAsSb cap/InAs QDs/InAsSb/GaAs 層の PL スペクトルの光励起強度依存性

■超高密度量子ドットセルの試作と特性評価

中間バンド型太陽電池における開放端電圧の低下現象は、高効率化の大きな障壁となっている。この開放端電圧の低下の要因の一つとして、Urbach Tail（結晶の無秩序性に伴う禁制帯内の状態密度）が挙げられ、試作した超高密度量子ドットセルについて検討した。Urbach tail の指標となる Urbach エネルギーを、外部量子効率スペクトルから解析し、この Urbach エネルギーと試作セルの基本特性との関係を調べた結果、量子ドットの無い GaAs セルに比べて量子ドット層を導入することにより Urbach エネルギーは増大し、開放端電圧の低下とも関係していることが分かった（図 4）。また、量子ドット層のフォトルミネッセンススペクトルの励起波長依存性および温度依存性から Urbach tail に関係した発光を確認した。この発光の起源については現在調査中である。

水冷 MBE におけるセル構造の成長条件の見直しを検討し、セルの基本特性の向上が見られた。特に量子ドットセルの開放端電圧が 0.8 V となり、これまでの本研究におけるセル特性に比べて 0.2 V 向上した。



図III-2- (ロ) -1-④-c-10 開放端電圧の Urbach エネルギー依存性 (QD の有無、実験と計算)

III-2- (ロ) -1-④-c 量子ドット・マルチバンド 神戸大学

単接合セルの変換効率限界を超えて変換効率 30%以上の超高効率太陽電池を実現するために、バンドギャップ中の中間バンドを介した 2 段階光励起によって太陽光スペクトルを広くカバーする中間バンド型太陽電池を開発する。中間バンド型太陽電池の課題は、中間バンド→伝導バンド（サブバンド間）遷移強度を価電子バンド→伝導バンド（バンド間）遷移と同程度にまで増強する必要がある。しかし、中間バンドを介した光吸収が十分でなく、その効果はいまだ変換効率においては顕在化していない。バンド間遷移を増強するためには、中間バンド中の電子の寿命を長くする必要がある。そのためには、InAs/GaAs 量子ドット構造を基盤とするヘテロ構造を駆使して第 1 段光吸収と第 2 段階光励起に関わる中間バンドを分離することによって電子と正孔のキャリアダイナミクスを制御することが、

キャリア寿命を制御した中間バンド型太陽電池の実現に極めて重要な課題である。中間バンドの電子充足率は中間バンドにおける電子の寿命によって決まり、中間バンドから伝導バンドへのサブバンド間光吸収係数は電子充足率に比例する。すなわち、電子寿命が長いとサブバンド吸収係数が大きくなる。喜多グループ（神戸大学）は中間バンド型太陽電池の変換効率と電子寿命の関係を理論的に予測した。これによると、電子の長寿命化によって変換効率は劇的に向上し、中間目標とする 10ns 以上の電子寿命であれば集光下で 40% を超えるセルが実現できる。一方、中間バンド中の電子は光だけでなく熱によっても励起され脱出する。熱によるキャリア脱出は擬フェルミレベルを下げ、出力電圧を低下させる。中間目標では光によるキャリアの引き出し効率 50% を目指した。

(1) QDSL 中間バンド型太陽電池における中間バンド電子の長寿命化

量子 (QD) ドット太陽電池において中間バンドに励起された電子を長寿命化するために、われわれは励起された電子と正孔のキャリア分離に注目した。キャリア寿命は再結合によって主に支配されるため、再結合を抑制する仕組みを導入することが重要である。そのためには、励起した電子と正孔を再結合する前に分離する必要がある。QD を多層に積層して超格子構造 (SL) を作製すると、励起した電子と正孔は SL の自由次元 (今の場合積層方向) に伝導できるため、内部電界によって分離することができる。

本研究では InAs/GaAs QDSL を作製する成長条件を明らかにし、波長制御と超格子化を同時実現する技術を構築した。波長制御は中間バンドのエネルギー位置制御において重要であり、InAs QD の成長の後の GaAs キャップ成長によって図 III-2- (ロ) -1-④-c-11 のように制御できる。一方、超格子を形成するための多層積層は GaAs キャップ層の厚さで精密に制御できる。図 III-2- (ロ) -1-④-c-11 右図に代表的な多層積層した QDSL の断面透過電子顕微鏡写真を示す。われわれは制御できるいずれの波長においても、GaAs キャップ層成長の膜厚と温度の制御によって QDSL を作製できるユニバーサルなルールを見出すことに成功した。

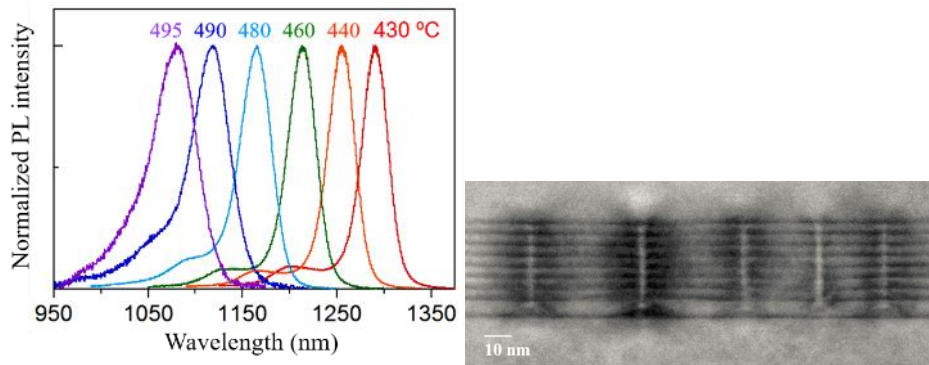


図 III-2- (ロ) -1-④-c-11 InAs/GaAs QD の波長制御と多層積層による超格子化

本研究では、図 III-2- (ロ) -1-④-c-12 のように QDSL を SC 活性層内に挿入した IBSCs を作製し、QDSLs によって形成された IB (ミニバンド) を介した 2 段階光励起による光電流特性の内部電界依存性を精密に解析し、キャリア分離による電子寿命の変化と 2 段階光励起効率の関係を明らかにした。

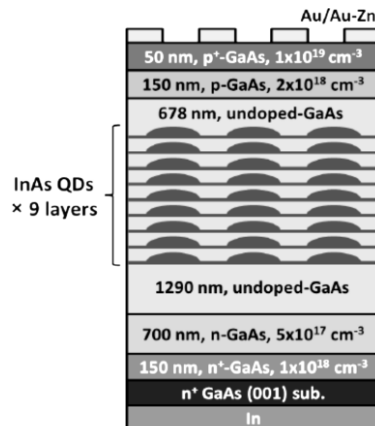


図 III-2- (ロ) -1-④-c-12 評価に使用している QD-IBSC 試料構造。

QDSL-IBSCs の外部量子効率 (入射した光子数に対する光電流として外部回路へ取り出された電子の割合、EQE) の分光特性と 2 段階光励起による電流増加分 ΔEQE のスペクトルを図 III-2- (ロ) -1-④-c-13 に示す。測定は熱活性によるキャリア脱出を抑制して理想的な 2 段階光励起を実現するため、9K の極低温で実施した。挿入図に、サブバンドギャップ領域の EQE スペクトルとフォトルミネッセンス (PL) スペクトルを示す。PL スペクトルには波長 1054nm (1.18eV) に QDSLs 基底準位の発光ピークが現れている。EQE スペクトルは、波長 880 nm 付近に QDSLs 中の InAs むれ層 (WL) 準位でのサブバンド間光吸収に起因する hump 構造を示しており、そこから QDSLs 基底準位による吸収が生じる波長 1050 nm 付近まで EQE は緩やかに減少している。この波長域には QDSL 励起準位が分布し、ミニバンドの効果がより顕著に現れる。図 III-2- (ロ) -1-④-c-13 (右) に 2 段階光励起による電流増加分 ΔEQE のスペクトル、挿入図にサブバンドギャップ領域の ΔEQE スペクトルの拡大図を示す。1 段階目のハロゲンランプ白色光源によって、VB から IB へのインターバンド間励起によって IB に電子を生成し、2 段階目の波長 2480 nm (0.5 eV) のレーザ光源によって IB から CB へのインターサブバンド間光励起を行った。インターサブバンド間の励起エネルギー (0.5 eV) は、QD 基底準位の障壁ポテンシャルエネルギーよりも十分大きいので、IB 内の電子をバリアよりも高いエネルギー位置に励起することができる。InAs むれ層に起因するシグナルと QDSLs 準位に起因するテイル構造が観測されている。このサブバンドギャップの波長域では、インターバンド間励起によって IB 内に直接電子を生成し、それを CB へ光励起していることから、2 段階光吸収による光電流生成が生じている。

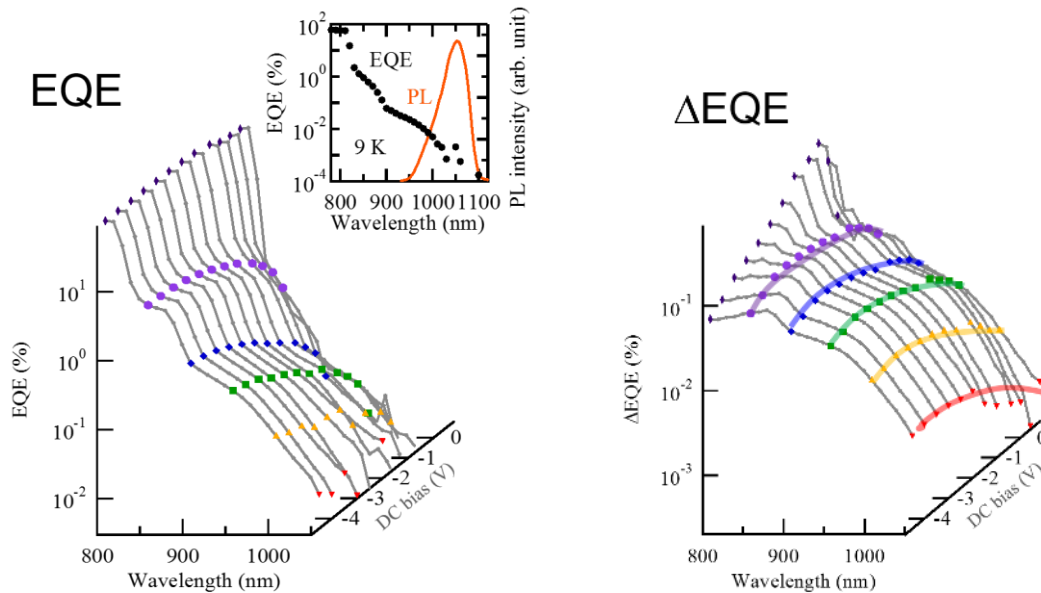
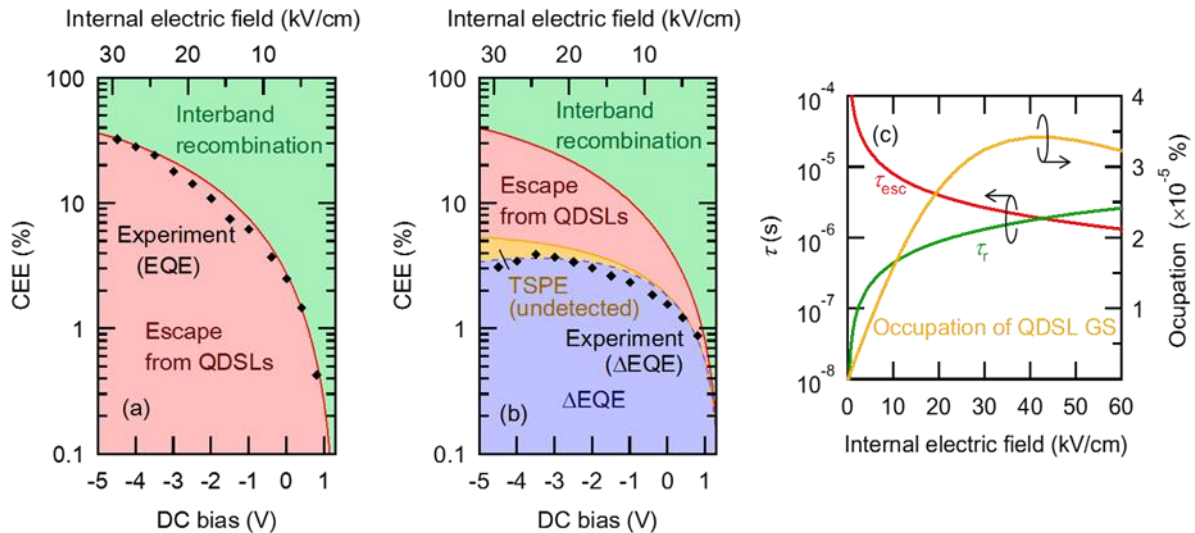


図 III-2- (ロ) -1-④-c-13 (左)EQE スペクトル、(右) ΔEQE スペクトルの DC バイアス依存性。

QDSLs 準位に励起されたキャリアダイナミクスは、QDSLs の埋め込まれている活性層の内部電界で変化するため、QDSL 内のキャリア分離が電界によって変化し、段階光吸収特性もこの影響を受ける。図 III-2- (ロ) -1-④-c-13 にサブバンドギャップ領域の(左)EQE スペクトルと(右) ΔEQE スペクトルの DC バイアス依存性を示す。各バイアスに対して EQE スペクトルは異なる形状を示している。EQE は、光励起キャリアの生成確率と生成したキャリアの外部への取出し確率の積であるが、インターバンド間の励起効率、すなわち光励起キャリアの生成確率は内部電界に依存しないので、バイアスによる EQE の変化は光励起キャリアの取出し確率の変化に相当する。一方、 ΔEQE のバイアス依存性は IB 内のキャリア密度の変化に相当する。

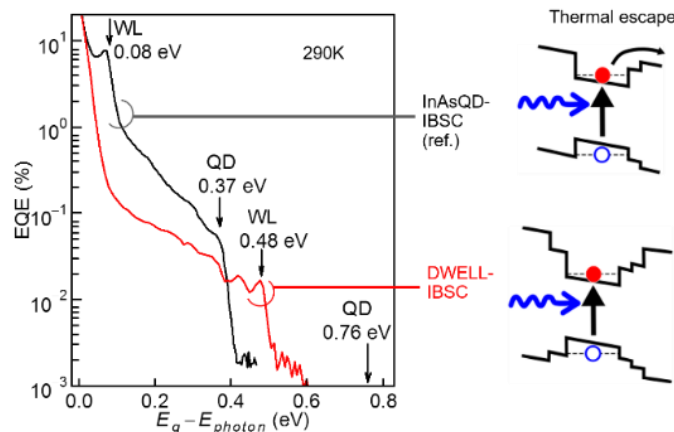
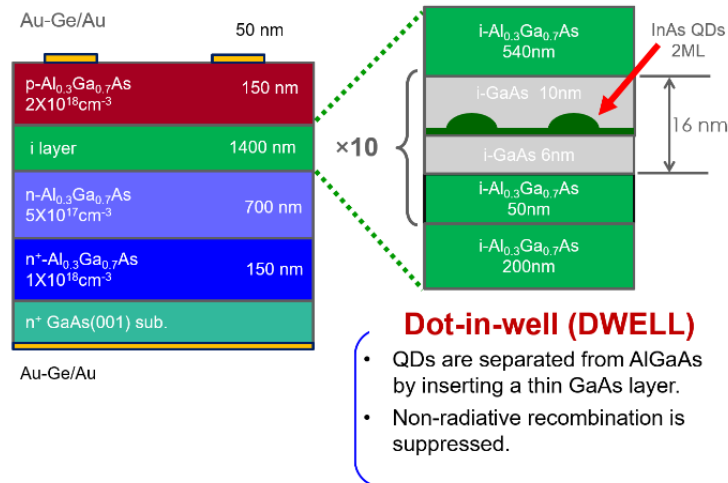


図III-2- (ロ) -1-④-c-14 EQE スペクトル (左) と Δ EQE スペクトル (中) の DC バイアス依存性のシミュレーションと実験結果。シミュレーションで使用したキャリア再結合寿命と脱出時間の太陽電池セル内部電界依存性 (右)。

IBSC で最も重要な Δ EQE のバイアス依存特性を明らかにするため、シミュレーションを実施した。シミュレーションでは、量子ドットにおけるキャリア再結合速度、量子ドットからのキャリア脱出速度、内部電界をパラメータとして用いた。図III-2- (ロ) -1-④-c-14 にシミュレーション結果と実験結果を比較した図を示す。実験結果は図III-2- (ロ) -1-④-c-13 (右) の 950nm 励起の時のデータを◆印で示している。赤色のエリアの赤色境界線は電界脱出による電流に相当し、実験結果をよく再現できている。緑色のエリアは再結合損失を示す。再結合するキャリアの割合は、内部電界の増大とともに低下している。一方、インターサブバンド励起を追加した条件下での結果である図III-2- (ロ) -1-④-c-14 中の青色破線は観測される Δ EQE に相当し、これも実験結果を大変良く再現している。黄色の部分は、インターサブバンドの励起光がなければ電界で脱出していた電流分に相当するため Δ EQE の増分としては実験ではカウントされない。実験結果とシミュレーションは大変良い一致を示している。このときに使用した再結合寿命とキャリアの脱出速度を図III-2- (ロ) -1-④-c-14 右に示す。この解析から、キャリア再結合寿命は逆バイアスが大きくなるにつれて著しく長くなり、 Δ EQE が最大のバイアスでは $1\mu\text{s}$ 程度にもなっていることがわかった。また、量子ドット超格子ミニバンド中のキャリア分離によってキャリア引出が最大で2倍以上向上することを見出した。このことは、キャリア分離による電子の長寿命化が2段階光励起効率を向上するカギを握っていることを示しており、中間バンド型太陽電池動作における課題を突破する点であることが明確になった。

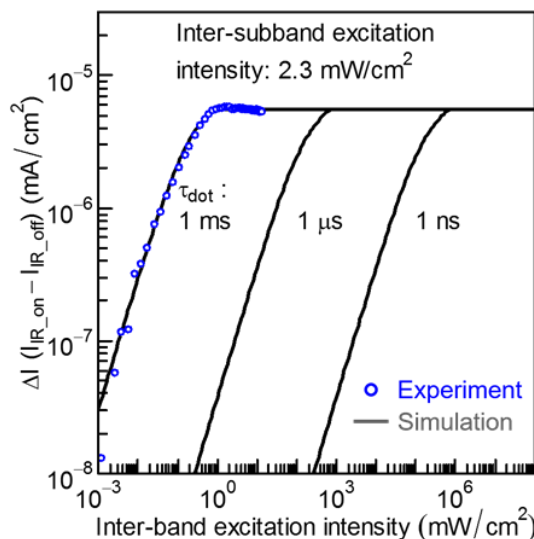
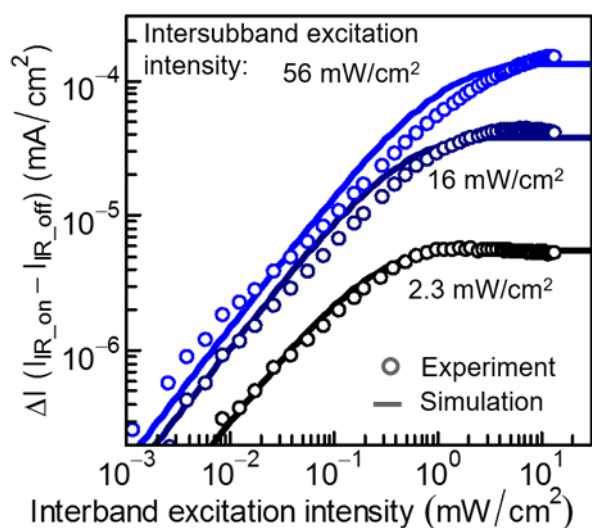
(2) ワイドギャップ材料導入による室温2段階光励起電流の観測と特性解析

電子寿命の制御は中間バンド型太陽電池動作における2段階光励起を顕在化させる重要である。これまで実施してきた InAs/GaAs 系の中間バンド型太陽電池では太陽電池が実施に動作する室温において熱励起により IB にある電子が励起して CB に移動するため、2段階光励起電流は室温では非常に小さくなってしまふ。室温における IB 中にある電子の熱励起脱出を抑制するには閉じ込めバリアを高くするのが最も直接的である。本研究では図III-2- (ロ) -1-④-c-15 のような AlGaAs 極薄層で InAs/GaAs をサンドイッチした dot-in-well (DWELL) 構造を採用した。この構造により QD の品質を維持しながら高い閉じ込めバリアを導入できる。



図III-2- (ロ) -1-④-c-15 DWELL 構造を導入した IBSC 構造 (左) と室温で観測した EQE スペクトル (右)。EQE スペクトルは DWELL IBSC のスペクトル (赤) を従来の InAs/GaA QD-IBSC (黒) のものと比較した。

DWELL IBSC の EQE のスペクトルは室温でも QD からの信号が観測されず、熱励起によるキャリア脱出を極めて小さく抑えることに成功した。図III-2- (ロ) -1-④-c-16 は 2 段階光電流を室温で観測した結果である。1 段目の励起は 780nm で GaAs 量子井戸準位を励起し、2 段目は 1300nm で GaAs 量子井戸準位から QD 準位に緩和した電子を CB に励起した。1 段目の励起光強度を強めると 2 段階光電流はほぼ線形に増加し、飽和傾向を示す。この電流飽和特性は IB の電子充足率が 100% になったことを示している。この飽和点は 2 段目の赤外励起光強度増加とともに大きくなる。すなわち集光条件では特性はどんどん良くなることを意味している。これらの実験結果を解析するために DWELL でのキャリアの緩和励起過程をモデル化してシミュレーションしたのが図III-2- (ロ) -1-④-c-16 の実線である。シミュレーション結果は観測した 2 段階光電流特性を非常によく再現している。ここで注目するデータは電子の寿命である。シミュレーションでは電子寿命は 1ms に達していることを示した。これは従来から知られている寿命と比べて桁違いに長い値であり、IBSC 動作実現のために非常に魅力的な結果である。また、このシミュレーションによって、2 段階励起電流が全光電流の 70%、すなわち、赤外光によるキャリア引き出し効率が 70% に達していることを確認した。このことは、熱励起プロセスによる出力電圧降下を抑制できることを示しており、実際、100 倍集光程度で開放端電圧が顕著に増加することを見出した。



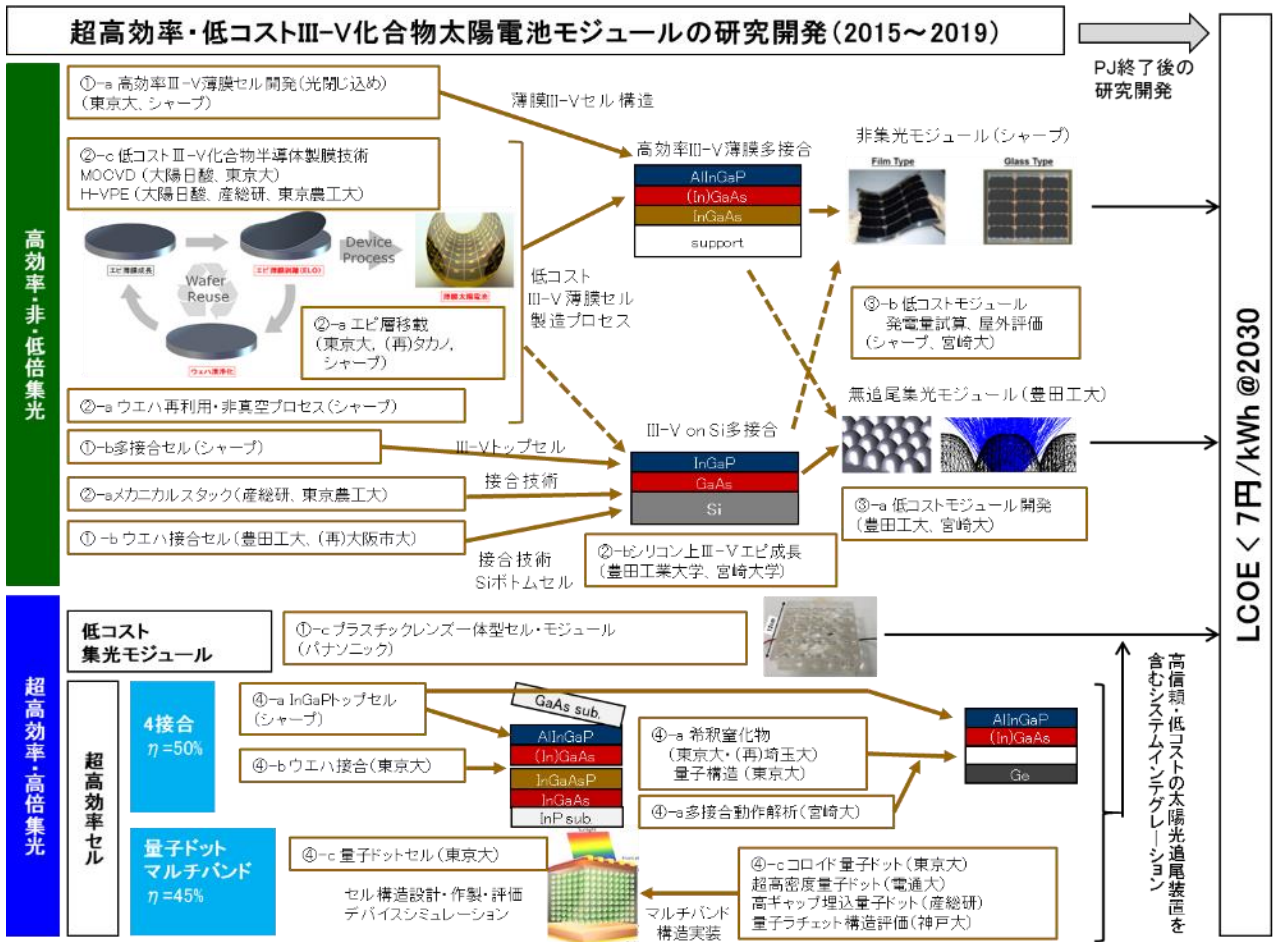
図III-2- (ロ) -1-④-c-16 DWELL-IBSC の室温における 2 段階光電流特性。○が実験結果、実線がシミュレーション結果。

2. 実用化・事業化見通し

本事業の最終目標は、2030年において7円/kWhの発電コストを達成することである。2020年、本研究開発終了時点においては、目標達成へのアプローチを実証し、システム価格125円/W実現のための技術確立の指針を得ることが重要である。本事業終了後に実用化・事業化に発展させるためのターゲットとして、2つの用途を想定している。(図III-2-(ロ)-2-1)

第1の用途は、非集光もしくは光線の許容角が非常に大きい(主に低倍)集光を用いたパネル型太陽電池である。すでに効率に関して、シャープがIII-V族化合物半導体3接合セルを利用して制作したモジュールにより、産業技術総合研究所での測定においてモジュール効率31.1%を達成した。これは、パネル型モジュールの効率最高記録である。本モジュールをベースに、ゼロエネルギービル等の面積制約の中で多くの発電量を得たい用途、電気・ハイブリッド自動車の車体への搭載、無人飛行船舶の動力源など既存のシリコンパネルがカバーできない新用途を開拓する(図III-2-(ロ)-2-2)。そのための最大のハードルが発電のワット単価低減であり、本事業で得られた成果をすべて活用してコスト低減に継続して取り組む。とくに、変換効率をキープしつつ太陽電池電池に必要な半導体結晶の量を減らすための薄膜化技術(光閉じ込め技術を含む)、エピタキシャル層剥離(ELO)の高スループット化、単結晶ウエハの再利用、結晶層のエピタキシャル成長のコスト低減技術がコア技術として重要である。

第2の用途は、躯体の全プラスチック化により大幅な軽量化を図った高倍集光モジュールである。従来の集光モジュールは光学効率や信頼性向上の観点からガラスや金属フレームを用いており、モジュールの重量低減には限界があった。そのため、高倍集光に不可欠な高精度の太陽追尾を行う追尾架台やモジュール実装のためのフレームが大規模になり、受光面積が100m²級で数十kWの発電を得る大型ユニットが商用モジュールの典型的な形態となっている。本事業でパナソニックが開発しているプラスチックレンズ一体型セル・モジュールは、大幅な軽量化により追尾架台の簡略化、ユニットの小型化を図る新概念の集光モジュールである。すでに、12cm角のプロトタイプモジュールにおいて効率30%以上を達成、定格あたりの重量(kg/kW)でシリコンパネルの半分以下を実現している。3kg程度の超軽量なモジュールを、望遠鏡の追尾架台など安価かつ高精度な追尾機構と組み合わせることで、従来の重厚・大型の集光太陽電池とまったく異なるユビキタス分散電源用の新たな太陽電池モジュールとして新たな用途を拡大できると考えている。今後は、電柱の上などに簡便に設置できる約1メートル角で300W級の出力を有する太陽追尾機構つき高効率・軽量太陽光発電モジュール(図III-2-(ロ)-2-3)を開発し、災害時にも動作可能な情報・安全モニタリングインフラ(たとえば、基地局や河川監視など)を維持するための自立電源などを最初のターゲットとして商用化を目指す。その後は、量産による一層のコストダウンを踏まえて、面積あたりの電力消費量が多い商用施設やデータセンターの再生可能電源としての用途も開拓する。



図Ⅲ-2- (ロ) -2-1 サブテーマと実用を目指すデバイスイメージの関係

小面積への大容量導入



軽量・小面積・大容量による太陽電池の用途拡大



図Ⅲ-2- (ロ) -2-2 超高効率・低コスト太陽電池の用途拡大



図Ⅲ-2- (ロ) -2-3. 社会インフラ用独立無停電電源・街灯・セキュリティカメラ付きシェアサイクル充電システム



図Ⅲ-2- (ロ) -2-4 小面積商用施設用太陽光発電モジュール

上記2大実用化イメージについて、さらに詳しく述べる。

【高効率・非集光モジュール（シャープ）】

本プロジェクトの目標である7円/kWhは2030年をターゲットとした長期にわたる取り組みとなっている。その実現のためには本プロジェクトで取り組んで内容だけではなく、量産効果による原料費低減、製造工場の効率的運用等の本プロジェクトでは直接的に取り組んでいない要素も大きな要素となる。したがって、本プロジェクトの目標（7円/kWh、2030年）は成果を2030年に初めて量産に適用することでは達成できる可能性は低く、開発が完了した技術から、順に市場に展開し量産効果を高めていく必要がある。

シャープでは、本委託業務で開発した技術を短期（3年内）、中期（5-10年）、長期（2030年）のステージ毎に市場展開していく計画としている。

具体的には、

○短期：宇宙用として開発中のIMM-3接合型への要素技術展開を行っていく。主にはエピ層の薄層化技術でミドルセル、ボトムセル間のバッファ層の薄層化。本技術の適用による製造コストダウンで宇宙用太陽電池のシェア拡大を目指す。

○中期：現実的に大きく低コスト化が見込める化合物2接合とSiセルのメカニカルスタック構造のモジュールで、宇宙用以外の市場、特に車載用途への展開を行っていく。今後市場が大きく拡大することが期待される電気自動車（EV）への搭載を行うことで数量増を実現していく。本委託業務で開発の化合物エピタキシャル層薄層化、基板再利用、メカニカルスタックの技術を適用する。

○長期：新規の高効率生産設備の導入による低コスト化に加えて、コスト低減による生産数量増のスパイラルでユーティリティー用途を視野に販路拡大を進めていく。

表Ⅲ-2- (ロ) -2-1 非集光・III-V 族化合物半導体高効率太陽電池の事業化イメージ

		短期	中期	長期 (2030年)
事業化イメージ		3年	5-10年	
	セル	IMM-3接合	化合物(2接合)+Si	化合物 (3接合 and/or 2接合)
	モジュール	薄型・フレキシブル	リジッド	薄型・フレキシブル リジッド
	集光に関して	非集光	非集光/低倍集光	
	用途	宇宙	新応用-車載	ユーティリティ-
	製造コスト (宇宙用途(短期)を100 とした場合の相対値)	100	5~10	1 (¥7/kWh)
適用要素技術	薄層化	○	○	○
	メカニカルスタック		○	○
	基板再利用	△	○	○
	新規成長装置		△~○	○
	低倍モジュール		△~○	△~○

↑
現実的に低コスト化が見込める
薄層2接合(1-2um)+Si ⇒ 33%

現状の多接合太陽電池は宇宙用で使用されているが、コストが現状の1/2~1/3に低下できれば、国内市場のみならず、海外市場で大きなシェアを獲得できる可能性がでてくる。海外市場は国内市場の10倍以上であり、トータルで1MW程度になると思われるが、現行からの大きな事業拡大が期待される。また、特殊用途に必要な電源用に、高効率で軽量な太陽電池モジュールが必要とされている。特殊用途の緊急度、必要度に応じて、要求されるコストが異なってくるものの、宇宙用太陽電池の1/3~1/5のコスト低減が図れれば様々な特殊用途への展開が可能となり、宇宙用の10~100倍以上の市場拡大が期待される。

電気自動車の車載電源としては、現状、自動車の屋根部に搭載されている太陽電池モジュールの出力は180W以下で、一日の走行距離は6.1km程度にとどまっており、駆動用電源としては不十分である。変換効率30%のモジュールを、屋根とボンネット両方に取り付ければ3.3m²に搭載可能で、1kW程度の出力が達成できる。電費を17km/kWhとすると発電量は1.76kWh/日になり、30km走行可能となる。これは、通勤等の日常用途には十分な走行距離であり、ソーラーハイブリッド車、ソーラー電気自動車として、10GW以上の大規模導入が期待できる。

【プラスチックレンズ一体型セル・モジュール：PIC（パナソニック株）】

本委託事業で開発した技術を基礎に、製品化したPICモジュールを社会インフラ用非常用電源として、2020年以降に市場投入することを目指している。販売金額としては、例えば水道用非常用電源として年間約60億円（市場200億円）を想定しており、実績をつくと共に社会的認知を得る。次いで、2020年以降に、集合住宅・商業施設など中規模発電としての独立電源市場に展開する。販売金額としては、年間約120億円を想定しコスト低減を進める。これらの事業を進める中で、東京オリンピック・パラリンピックなどのイベントもあるので、街灯・セキュリティカメラ付きシェアサイクル充電システムといった、PICシステムとしての応用商品を生み出す可能性が出てくる。

最終的には、2023年頃からIT用巨大ファシリティ向け省エネ・バックアップ電源として、世界市場に展開することで、販売規模も数百億円規模（市場1700億円）に拡大して事業を安定させる。

非常用電源は、特に我が国における大規模災害の際に、社会インフラを最低3日間は止めずに維持させる¹⁾ことに貢献する。また、IT用巨大ファシリティは、コストの2割は電力²⁾で、世界の全電力の2%を消費する社会問題となっている³⁾。このIT用巨大ファシリティの代表としてデータセンターに

着目した国内の具体的な予測が報告されている⁴⁾。この報告によると、国内におけるデータセンターで消費される電力量は2025年には527億kWhに達すると予測されている。このような需要の増加に対応して、大規模電源である発電所ではなく、太陽光発電と蓄電池を組み合わせた分散型電源によりこの需要増加に対応する方向性が現れている。2017年7月に開催された太陽光発電見本市「PV JAPAN」では米国テスラ社が家庭用蓄電池(14kWh)を出展したが、機器総額で約56千円/kWhと低価格である^{5,6)}。車載用の蓄電池の普及⁷⁾とあいまって今後急速に低価格化することが予想され、2030年前後には太陽光発電と蓄電池を利用した方が、電力会社から電気を買うよりも安い時代が来る可能性が報告されている⁶⁾。これら蓄電池で蓄積する電力を、小面積で高効率な発電性能を有するPICで供給するシステムを構築することにより、夜間・曇天時にも電力を供給でき、省エネ・バックアップ電源における国内だけでなく地球規模での社会貢献となる⁸⁾。

1) 土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol. 69, No. 1, 1-19, 2013

2) 日本フルーフ(株) : <http://www.ip-core.jp/doc/14/interop/04.pdf>

3) FUJITSU JOURNAL : <http://journal.jp.fujitsu.com/2016/11/24/02/>

4) J. IEIE Jpn, Vol. 29 No. 12, pp973-976, 2009

5) 日本経済新聞 : http://www.nikkei.com/article/DGXLASDZ05HU0_V00C17A7T11000/

6) JCAST ニュース : https://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20170716-00000001-jct-bus_all

7) (株) 矢野経済研究所 : <https://www.yano.co.jp/press/pdf/1598.pdf>

8) 経済産業省 : <http://www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g80619b08j.pdf>

9) 荒木 等、「集光型太陽光発電(CPV)の最新動向～集光型太陽電池技術と市場の概要から、集光セル、集光光学系、集光モジュール、追尾架台、発電システムの実際まで～」セミナー資料、2012、(株)情報技術セター

チームIV「超高効率セル開発」において開発する効率50%のセルは、PICの発電素子として実用化を目指す。本事業期間においては、市場調達可能な多接合太陽電池を用いたPICの有用性検証と、高効率セル開発を並行して行う。PICの有用性が実証された事業期間後に、効率50%セルをPICに組み込むための素子化工程や量産化技術の検討に入る。基本的には、すでに市場投入されている集光型太陽電池に用いられる多接合太陽電池の素子化工程と同様であるが、PICにおいては多接合セルの素子サイズが1mm²程までに小型化して素子端面のパッシベーション技術が効率ロスを防ぐために重要であること、PICの組み立て工程における多接合セル素子の自己組織化位置合わせに適合する素子構造に仕上げる必要項目となる。いずれも、本事業中に市販の多接合セルを用いてプロセスの基礎構築を終え、効率50%セルへのプロセス移植を行う。

事業化に際して重要となるのは効率50%セルを安定して生産・供給できる企業の存在である。本事業におけるPICの性能確認・低コストかつポテンシャルの実証が終了した後に、PICの市場規模や事業成立性を確認し、すでに集光用多接合セル作製に実績を持つシャープなどが事業主体となってセルの供給に取り組むことが期待される。

効率50%セルに関して、多接合セルの開発については格子整合系(希薄窒化物および量子構造)、ウェハ接合による4接合ともに要素技術の開発が順調に進んでおり、本事業期間中に効率50%達成の技術的目途が立つ予定である。その後、実用化へのハードルは生産性の向上である。希薄窒化物に関してはMBEとMOCVDという2つの成長手法を併用して多接合化することによる結晶欠陥生成が問題となっており、リン系トップセルも含めてすべてMBEで成長する技術の構築が望まれる。一方、量子構造に関しては基礎開発を行った大学のMOCVD装置から量産に向けて企業のMOCVD装置へのプロセス移植と、大面積結晶成長における面内均一性の確保が課題となる。

PICの初期製品は多接合セルを発電素子として用いることになろうが、将来的には中間バンドセルが多接合セルを置き換えると期待される。本事業の成果として得られた高効率量子ドット中間バンドセルの構造を、本事業終了後の取り組みにおいてMOVPEにより作製可能にすれば、多接合セルに比べて層厚が小さい分、生産性の高い低コストな作製プロセスを構築可能である。すなわち、量子ドット中間バンドセルは、その完成形態において、変換効率および太陽光スペクトルの変動に対する耐性の強さにおいて既存の多接合セルを凌駕するのみならず、多接合セルに比べて十分低コストなセルとして市場に普及できる可能性を持っている。

さらに、上記実用化に貢献できる技術として、モジュールの表面コーティングが重要である。本事業のチームIII「低コストモジュール開発」にて開発中の表面防汚技術は、塗布にて形成可能な簡便な反射防止兼防汚コートにより太陽電池モジュールの変換効率を約3%向上させることができるため、実用化につながる。また、非集光III-V太陽電池の屋外環境下での高い発電効率を実証したことで、設置面積に限られる車載用途など小面積高発電量が必要な新たな用途が開拓された。

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。

【シリコン基板への化合物半導体のヘテロエピタキシャル成長】

III-V 族化合物半導体のシリコンプラットフォームへの集積は、発光・高感受光機能を持つエレメントをシリコン集積回路に混載することを可能にし、CPU チップ内の光クロック分配やコンピュータボード間の光通信、さらにインターネットのバックボーンである光ネットワーク素子の高速・小型化など情報通信分野を中心に大きな需要がある。チーム II 「低コスト化プロセス技術開発」で開発しているヘテロエピタキシャル成長による III-V 化合物半導体/Si 構造が高品質で実現できれば、これらの応用への、波及効果は極めて大きい。

さらに、本事業で注力している層状半導体バッファを用いるシリコン基板上の III-V 族化合物半導体成長は、ファンデルワールス界面で劈開できることから、成膜した GaAs エピタキシャル層を簡単に基板から剥離することを可能とする。III-V 族化合物半導体を機能部位として集積したフレキシブルデバイスなどへの応用が考えられる。また、大口径のシリコン基板が繰り返し利用可能であることで、本事業の主要技術として開発している犠牲層エッチングを用いた GaAs 基板からの III-V 族化合物半導体層の剥離 (ELO) よりも、将来的にスループットの向上、低コスト化が期待できる。

【ウエハ全面表面観察装置の開発】

チーム II 「低コスト化プロセス技術開発」で開発している基板表面全面観察評価機は、レーザや光変調器などの III-V 族化合物半導体製品に対する製造工程内の検査を可能とする。ラインセンサとライン状照明を用いたフォトルミネッセンス画像化および異常診断技術を応用する。

【高スループット III-V 族化合物半導体結晶成長技術】

MOCVD プロセスは、III-V 族化合物半導体デバイスの結晶成長プロセスとして広く用いられている。したがって、チーム II 「低コスト化プロセス技術開発」で開発している GaAs および InGaP の超高速 MOCVD 装置は、現在までに達成できている高効率太陽電池クオリティーの高品位結晶層の高速成長と、開発主体である大陽日酸が有する窒化物半導体 MOCVD における高速ウエハハンドリング技術を組み合わせ、高スループットの GaAs および InP 系 III-V 族化合物半導体製膜装置として市場展開が可能である。

【新たな非接触太陽電池評価法】

太陽電池のキャリア回収効率の評価手法としては分光感度装置を用いた量子効率(QE)の算出が一般的であるが、チーム IV 「超高効率セル開発」では電極形成を必要としない評価手法 (PL, PPT, SPV, PR) を採用しており、新たな非破壊多面的評価手法として実用化が期待できる。

【希薄窒化物半導体・量子ドットの光デバイス応用】

チーム IV 「超高効率セル開発」でミドルセル材料として開発している希釈窒化物半導体は、高効率太陽電池のみならず単一光子発生源や温度特性に優れた半導体レーザなど、多様なデバイスへの応用が期待されており、学術的観点からも研究開発の過程で得られる知見が光デバイス分野全体に及ぼす影響は大きい。

同じくチーム IV で中間バンド太陽電池の高効率化を目指して開発されている積層量子ドット、面内超高密度量子ドットの作製技術は、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。中でも面内結合系量子ドットネットワークとしての応用は量子情報処理デバイスなどへの展開も期待される。また、量子ドットの埋め込み材料として AlAsSb を用いることで実現できる 3 次元形状を有したバリア構造は、これまで課題となっていた量子ドットによるキャリアの再捕獲を抑制することが可能であり、高効率量子ドット太陽電池開発への大きなブレイクスルーになり得ると共に、フォトディテクタなどの受光デバイスへの応用も期待される。

【量子ドット太陽電池用分光評価手法の横方向展開】

チーム IV 「超高効率セル開発」で開発した、量子ドット太陽電池における広帯域スペクトル測定や絶対値発光分光測定など様々な分光測定手法を駆使することで、太陽電池内部で生じる複雑なキャリ

アダインクスを可視化することが可能となってきた。従来の太陽電池特性評価だけでは明らかにできなかった、光電変換メカニズムの物理過程を明らかにすることにより、高効率化に向けた具体的な設計指針を得ることができる。これは次世代太陽電池に限らず、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る。

【窒化物半導体結晶成長・デバイス技術】

チーム IV「超高効率セル開発」で窒化物半導体サブセル開発に用いたパルススパッタ法は、低温結晶成長が特徴であり、従来の高温 MOCVD 法では実現困難であった高 In 組成の InGa_N 薄膜を成長できることや、高濃度ドーパ GaN 薄膜の作製が可能であることが明らかになった。これらの技術を用いることで、InGa_N 系薄膜トランジスタの作製や、低抵抗コンタクト層形成が可能になると見込まれ、既存デバイスを凌駕する性能を有した光・電子デバイスの開発が期待できる。

4. 今後の展開

【非集光・低倍集光多接合モジュール】

シャープを事業化主体として、高効率・低コストモジュールをいち早く実現し、パイロット的な市場開拓につなげることを目指す。固定パネル型では、すでに非集光効率 30%以上を実現する目途がついた III-V 族化合物半導体 2 接合型セルと高効率 Si セルのメカニカルスタック構造のモジュールの実用化を主眼に、低コスト化に向けた要素技術の開発を継続する。また、宇宙用フレキシブル 3 接合モジュールを基本とした非集光高効率モジュールを実際に自動車に搭載して実条件での発電量を評価し、車載用途の開拓を目指す。

低コスト化技術として、とくに下記に注力する。

(多接合セル薄膜化)

ボトムセル裏面に光散乱テクスチャ構造を導入することによる大幅なセル薄膜化の可能性がルミネッセンスカップリング (LC) を考慮したシミュレーションにより示されているので、異方性ウエットエッチングなどにより実際の多接合セルに適用して効果を検証、構造改良につなげる。また、車載など高温用途も考慮して、セルの温度が LC 効果に及ぼす影響を評価解析し、設計改良に取り入れる。

(エピ層移載技術開発)

現状、2 インチウエハサイズで、10 mm/h の剥離速度を達成しており、今後、20 mm/h 以上の剥離速度 (4 インチウエハで 3~5 時間程度) と 4 インチウエハサイズに向けた大面積化に注力する。その際、犠牲層エッチングが進んでいる剥離の最前面を局所加熱することや、ナノバブルなどを援用したエッチング生成物の物質移動促進など、新たなメカニズム導入を試みる。

(基板再利用技術開発)

剥離後の基板表面の再処理を低コスト化する試みを続ける。コストのかかる化学機械研磨 (CMP) 無しで、表面保護層の化学エッチングのみによる基板表面の清浄化と 1 回目の再成長によるセル作製で特性劣化がないことを確認しており、今後再成長回数の増大と面内の均一性の向上 (自動洗浄装置の導入など) を進める。また、研磨幅を最小限にしたソフト CMP の検討も同時に進める。

(高速結晶成長技術)

MOCVD による GaAs 製膜の高速化はすでに最終目標を上回り、100 $\mu\text{m}/\text{h}$ の製膜速度による GaAs 単セル効率 25%を達成した。今後は、ウエハ内でのパーティクル等による不良箇所低減など高信頼性を達成するための装置形状の改良と、InGaP の特性向上を進める。また、生産性向上にはこれ以上の製膜高速化は貢献が小さく、リアクターのクリーニング技術、ウエハの高速搬送技術など統合的な取り組みが必要である。限られた予算の中でこれらをすべて盛り込んだ MOCVD 装置を新規作製することは難しいので、窒化物半導体成長などで培われた既存技術の応用可能性など基礎的な検討を進める。

一方、H-VPE に関しては、GaAs 単セル効率 20.3 %を実現したものの、原料利用効率は 10%程度にとどまっており、目標とする 50%を達成するためには装置形状を根本的に改造する (図 III-2- (ロ) -4-1) これにより、製膜速度 100 $\mu\text{m}/\text{h}$ の達成が期待される。

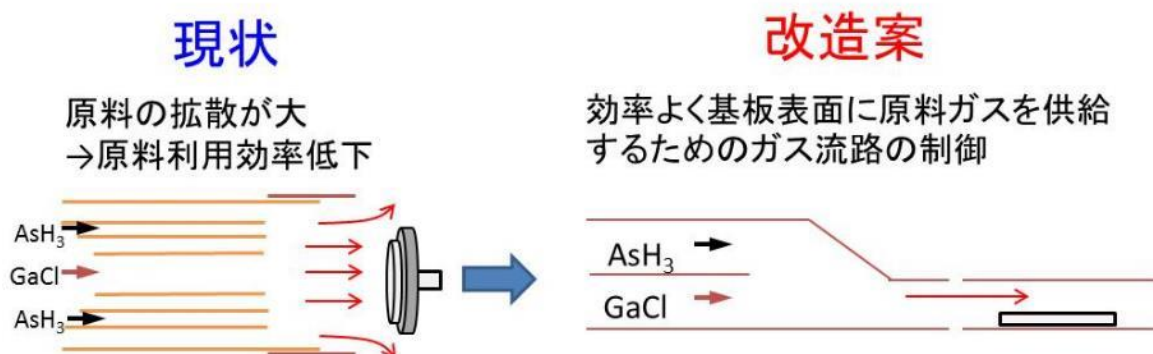


図 III-2- (ロ) -4-1 H-VPE 装置改造の模式図

また、上述のように中心的に取り組む III-V 薄膜/シリコンメカニカルスタックモジュールを、III-V 薄膜多接合の軽量・フレキシブルモジュールの他、シリコンパネルへの III-V 族化合物半導体セルの部分集光型メカニカルスタックなど、新概念のモジュールを試作して効果を検証する。シリコン

セルのコーナー部の隙間に部分集光した III-V セルを配置するラテラル型部分集光モジュールは、試算ではモジュール効率 26.6 %が見込まれる。

【プラスチックレンズ一体型セル・モジュール】

モジュールの更なる低コスト化を目指してレンズ、発電素子サイズ、集光倍率等を最適化する技術の開発を進めると共に、IEC 規格をベースとした信頼性評価を継続して行ない、低コストと長期信頼性を両立させる技術開発を進める。

このモジュールに搭載する効率 50%のセルとしては、格子整合系エピタキシャル成長およびウエハ接合による多接合の検討が順調に進んでおり、これまでの要素技術開発の成果をもとに多接合セルの作製し、高効率を実証する。

希薄窒化物ミドルセルに関しては、GaInNAs:Sb 1.0eV セルを高品質のまま多接合セル中に適用することが可能となっており、『④-b ハイブリッド多接合：ウエハ接合』や、『②-a 低コスト実装プロセス：メカニカルスタック』の成果を積極的に取り入れ連携して早期に 4 接合、5 接合セルの開発を目指す。

集光モジュールに実装する高効率セルの最終形態になると期待される中間バンドセルに関しては、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る。具体的には、光マネジメント技術や超高密度量子ドットの成長技術を駆使して光吸収量の増大を図り、同時にワイドギャップ母体材料とタイプ II 量子構造を組み合わることで、室温での 2 段階光吸収レートを向上させる。また、これらの技術を低電流高電圧型量子ドット太陽電池に応用することで、変換効率 45% (最終目標) の達成を目指す。

量子ドット型太陽電池での効率的な二段階光吸収、開放電圧低下の抑制を進めるため、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ことが必須である。そこで、開発を行っている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電流電圧特性の測定で得られるデータに基づいて解析を進め、超高効率実現への設計指針を明らかにしていく。

量子ドット・マルチバンド太陽電池において、これまでの研究開発から赤外透過損失を低減させる 2 段階光吸収による電流増大について、評価・解析技術の確立とともに、要件達成に向けた定量的かつ具体的な目標が明らかとなってきた。一方で、高効率化に向けたもう一方の要件である電圧維持に関しては計測・解析手法を含めてまだ確立されていない。絶対値発光分光による擬フェルミレベル分裂の直接計測により、電圧維持の定量評価と要件達成に向けたデバイス設計指針を明らかにする。

ラチェット機構を利用した中間バンド型太陽電池は、本プロジェクトの中間評価までの時点で大きく進展させることができた。今後、顕在化した 2 段階光励起過程を変換効率向上に結び付けていくための集中した取り組みが必要であると考えている。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	1(1)	1(0)	4(0)	6 件
論文	30	49	23	102 件
研究発表・講演（うち国際会議）	195(97)	232(131)	66(1)	493 件
新聞・雑誌等への掲載	10(8)	12(6)	3(2)	25 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

(特許)

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	パナソニック 株	特 願 2017- 127734	国内	2017/6/29	出 願	電子部品の実装方 法及び実装基板	金山 他
2	パナソニック 株	特 願 2017- 127314	国内	2017/6/29	出 願	太陽電池モジュ ール	西谷
3	パナソニック 株	特 願 2017- 127726	国内	2017/6/29	出 願	レンズアレイ及び レンズアレイの製 造方法	綾
4	産業技術総合 研究所	特 願 2016- 023482	国内	2016/2/10	出 願	光電変換素子及び 太陽電池	太野垣健、 菅谷武芳
5	大阪市立大学	特 願 2017- 116079	国内	2017/6/13	出 願	太陽電池作成方法 及び太陽電池	重川直輝 等
6	東京農工大学 日新電機株式 会社	米国特許出願 第 14/964588 号	外国	2015/12/10	公 開	MULTI-JUNCTION SOLAR CELL AND METHOD FOR MANUFACTURING THEREOF	Sameshima, Toshiyuki 他

(論文)

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	K. Osada, T. Suzuki, S. Yagi, S. Naitoh, Y. Shoji, Y. Hijikata, Y. Okada and H. Yaguchi,	埼玉大学、東京大学	Control of intermediate band configuration in GaAs:N δ -doped superlattice	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KA04 (2015)	有	2015/07
2	T. Suzuki, K. Osada, S. Yagi, S. Naitoh, Y. Shoji, Y. Hijikata, Y. Okada and H. Yaguchi,	埼玉大学、東京大学	Molecular beam epitaxial growth of intermediate band materials based on GaAs:N δ -doped superlattices	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KA07 (2015)	有	2015/07
3	D. J. Farrell, H. Sodabanlu, Y. Wang, M. Sugiyama, and Y. Okada	東京大学	A hot-electron thermophotonic solar cell demonstrated by thermal up-conversion of sub-bandgap photons	NATURE COMMUNICATIONS 6, 8685 (2015)	有	2015/11
4	Chao-Yu Hung, T. Sogabe, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Growth of ErAs nanodots by molecular beam epitaxy for application to tunneling junctions in multijunction solar cells	Japanese Journal of Applied Physics 55, 021201 (2016)	有	2016/01
5	E. López, A. Datas, Ramiro, P.G. Linares, E. Antolin, I. Artacho, A. Martí, A. Luque, Y. Shoji, T. Sogabe, A. Ogura, Y. Okada	Instituto de Energia Solar - Universidad Plitecnica de Madrid ETSI Telecomunicacion, 東京大学	Demonstration of the operation principles of intermediate band solar cells at room temperature	Solar Energy Materials and Solar Cells 149, 15 (2016)	有	2016/01
6	N. Miyashita, N. Ahsan, Y. Okada	東京大学	Generation and collection of photocarriers in dilute nitride GaInNAsSb solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications 24, 28-37 (2016)	有	2016/01
7	N. Miyashita, N. Ahsan, Y. Okada	東京大学	Improvement of 1.0 eV GaInNAsSb solar cell performance upon optimal annealing	Physica Status Solidi A 214, 1600586 (2017)	有	2016/10
8	A. Julian, Z. Jeh, N. Miyashita, Y. Okada, Jean-Francois Guillemoles	東京大学	Insights on energy selective contacts for thermal energy harvesting using double resonant tunneling contacts and numerical modeling	Superlattices and Microstructures Vol. 100, pp. 749-756	有	2016/12
9	Z. Jehl, D. Suchet, A. Julian, C. Bernard, N. Miyashita, F. Gibelli, Y. Okada, Jean-Francois Guillemoles	東京大学、IRDEP	Modeling and characterization of double resonant tunneling diodes for application as energy selective contacts in hot carrier solar cells	Proc. SPIE Vol. 10099, pp. 100990N-1	有	2017/02
10	Y. Shoji, R. Tamaki, and Y. Okada	東京大学	Multi-stacked GaSb/GaAs type-II quantum nanostructures for application to intermediate band solar cells	AIP Advances 7, 065305 (2017)	有	2017/06
11	S. Naito, K. Yoshida, N. Miyashita, R. Tamaki, T. Hoshii, Y. Okada	東京大学	Effect of Si doping and sunlight concentration on the performance of InAs/GaAs quantum dot solar cells	Journal of Photonics for Energy 7, 025505 (2017)	有	2017/06

12	K. Toprasertpong, T. Tanibuchi, H. Sugiyama, T. Kada ² , S. Asahi ² , K. Watanabe, M. Sugiyama, T. Kita ² , Y. Nakano	東京大学、 ² 神戸大学	Comparison of Electron and Hole Mobilities in Multiple-Quantum-Well Solar Cells Using a Time-of-Flight Technique	IEEE J. Photovoltaics, Vol. 5, no. 8, pp. 1613 – 1620	有	2015/09
13	A. Delamarre, L. Lombez ² , K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, J.-F. Guillemoles ²	東京大学、 ² IRDEP, CNRS	Experimental Demonstration of Optically Determined Solar Cell Current Transport Efficiency Map	IEEE J. Photovoltaics, 6, p 528-531	有	2016/03
14	M. Sugiyama, H. Sugiyama, T. Katoh, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, D. Alonso-Álvarez ² , N. J. Ekins-Daukes ² and Y. Nakano	東京大学、 ² Imperial Collage London	Quantum Wire-on-Well (WoW) Cell with Long Carrier Lifetime for Efficient Carrier Transport	Prog. Photovoltaics Res. Appl., 24, 1606-14 (2016)	有	2016/04
15	H. Cho, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学	Stability and Controllability of InGaAs/GaAsP Wire-on-Well (WoW) Structure for Multi-junction Solar Cells	J. Crystal Growth, 464, 86-93 (2017)	有	2017/04
16	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, J.-F. Guillemoles ² , M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学、 ² IRDEP, CNRS	Electroluminescence-based quality characterization of quantum wells for solar cell applications	J. Crystal Growth, 464, 94-99 (2017)	有	2017/04
17	B. Kim, K. Toprasertpong, A. Paszúk ² , O. Supplie ² , Y. Nakano, T. Hannappel ² , M. Sugiyama	東京大学、 ² Tech. Univ. Ilmenau	Realistic prediction of efficiency gain by applying strain-balanced multiple quantum wells	Solar Energy Materials and Solar Cells, published online	有	2017/07
18	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada and Y. Nakano	東京大学	Design of free-barrier InGaAs/GaNAs multiple quantum well solar cells with 1.2 eV energy gap	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, no. 8S2, p. 08MA04	有	2017/07
19	Hao Xu, K. Toprasertpong, A. Delamarre, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano and M. Sugiyama	東京大学	Effect of low-V/III-ratio metalorganic vapor-phase epitaxy on GaAs solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, no. 8S2, p. 08MC06	有	2017/07
20	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama and Y. Nakano	東京大学	Effects of various dopants on properties of GaAs tunneling junctions and p-i-n solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, no. 8S2, p. 08MC11	有	2017/07
21	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Enhanced carrier transportation distance in colloidal PbS QD-based solar cells using ZnO nanowires.	J. Phys. Chem. C, 119, 27265-27274(2015).	有	2015/12
22	王海濱、久保貴哉、瀬川浩司	東京大学	量子ドットを用いた有機無機ハイブリッド太陽電池	色材協会誌, 89, 268-273(2016)	無	2016/08

23	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed hybrid solar cells using colloidal quantum dot molecules	Jpn J. Appl. Phys.(invited)	有	2017/09
24	Y. Arakawa, K. Ueno, H. Noguchi, A. Kobayashi, J. Ohta, and H. Fujioaka	東京大学	Low-temperature pulsed sputtering growth of InGaN multiple quantum wells for photovoltaic devices	Japanese Journal of Applied Physics, 56, 31002 (2017).	有	2017/02
25	N. Kamata, M. Suetsugu, D. Haque, S. Yagi, H. Yaguchi, F. Karlsson, and P. O. Holtz	埼玉大学, Linkoping University	Spectral change of intermediate band luminescence in GaP:N due to below-gap excitation: Discrimination from thermal activation	Phys. Stat. Solidi B 254, 1600566 (2017)	有	2016/11
26	林 他	パナソニック㈱	Thin Concentrator Photovoltaic Module with Micro-Solar Cells which are Mounted by Self-Align Method Using Surface Tension of Melted Solder	13th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems(CPV-13) AIP(American Institute of Physics) Publishing	有	2017/09
27	水野英範、牧田紀久夫、菅谷武芳、大島隆治、穂積康雄、高遠秀尚、松原浩司	産業技術総合研究所	Palladium Nanoparticle Array-Mediated Semiconductor Bonding That Enables High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physicsvol. 55, 025001, (2016)	有	2016/01
28	S. Kosar, Y. Pihosh, T. Ivan, K. Mawatari, J. Uemura, Y. Kazoe, 牧田紀久夫、菅谷武芳、松井卓也、D. Fujita, M. Tosa, Y. M. Struk, 近藤道雄、T. Kitamori	Chemivtsy National Univ.、東京大学、産業技術総合研究所、物材機構	Tandem photovoltaic-photoelectrochemical GaAs/InGaAsP-WO3/BiVO4 device for solar hydrogen generation	Japanese Journal of Applied Physicsvol. 55, 04ES01, (2016)	有	2016/02
29	小森和弘、菅谷武芳、天野建、五島敬史郎	産業技術総合研究所、愛知工業大学	Nanophotonic devices based on semiconductor quantum nanostructures	IEICE Transactions on Electronics, E99C-No.3, pp.346-357 (2016)	有	2016/03
30	太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究所	Carrier dynamics in type-II quantum dots for wide-bandgap intermediate-band solar cells	Proceedings of SPIE Vol. 9743, 974317 (2016).	有	2016/03
31	太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究所	Type-II InP quantum dots in wide-bandgap InGaP host for intermediate-band solar cells	Applied Physics Letters, vol. 108, 153901, (2016)	有	2016/04
32	太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	A Proposal for Wide-Bandgap Intermediate-Band Solar Cells Using Type-II InP/InGaP Quantum Dots	Proceedings of the 43rd IEEE PVSC 0160 頁~0162 頁	無	2016/6
33	川北史朗、今泉充、牧田紀久夫、菅谷武芳、西永滋郎、柴田肇、佐藤真一郎、大島武	JAXA、産業技術総合研究所、量子科学技術研究開発機構	High Efficiency and Radiation Resistant InGaP/GaAs//CIGS Stacked Solar Cells for Space Applications	2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference 2574 頁 ~ 2577 頁	無	2016/6

34	水野英範、牧田紀久夫、 太野垣健、望月敏光、高 遠秀尚、菅谷武芳、H. Mehrvarz、M. Green、A. Ho-Baillie	産業技術総合研究 所、オーストラリア ニューサウスウェー ルズ大学	A "Smart Stack" Triple-Junction Cell Consisting of InGaP/GaAs and Crystalline Si	2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference	無	2016/6
35	菅谷武芳、太野垣健	産業技術総合研究 所	Growth of Type-II InP Quantum Dots in InGaP Matrix by Using Solid-Source Molecular Beam Epitaxy for Intermediate- Band Solar Cells	Proceedings of 2016 CSW includes 28th IPRM and 43th ISCS, MoP-IPRM-004	無	2016/6
36	玉置亮、庄司靖、菅谷武 芳、岡田至崇	東大先端研、産業技 術総合研究所	Universal Linear Relationship on Two-Step Photon Absorption Processes in In(Ga)As Quantum Dot Solar Cells	Proceedings of PVSC43 0001 頁~ 0004 頁	無	2016/11
37	大島隆治、牧田紀久夫、 太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究 所	Enhanced open circuit voltage in inverted thin film solar cells lattice-matched to InP	Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialist Conference pp. 2354-2357	無	2016/11
38	大島隆治、牧田紀久夫、 太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究 所	Enhancement of open circuit voltage in InGaAsP inverted thin film solar cells grown by solid-source molecular beam epitaxy	Journal of Crystal Growth, https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2016.12.041	有	2016/12
39	馬場将亮、牧田紀久夫、 水野英範、高遠秀尚、菅 谷武芳、山田昇	長岡科学技術大学、 産業技術総合研究 所	Feasibility study of two-terminal tandem solar cells integrated with smart stack, areal current matching, and low concentration	Progress in Photovoltaics: Research and Applications vol. 25, p. 255 (2016)	有	2016/12
40	菅谷武芳、長門優喜、岡 野好伸、大島隆治、太野 垣健、牧田紀久夫、松原 浩司	産業技術総合研究 所、東京都市大学	Growth of InGaAsP solar cells and thier application to triple-junction top cells used in smart stack multijunction solar cell	Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 35, No. 2 02B103, (2017)	有	2017/03
41	相原健人、太野垣健、 長門優喜、岡野好伸、 菅谷武芳	産業技術総合研究 所、東京都市大学	InGaP-based InP quantum dot solar cells with extended optical absorption range	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 04CS06, (2017)	有	2017/03
42	太野垣健、牧田紀久夫、 水野英範、大島隆治、菅 谷武芳	産業技術総合研究 所	Investigation of the open-circuit voltage in mechanically stacked InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs solar cells	Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 08MC01, (2017)	有	2017/06
43	水野英範、牧田紀久夫、 太野垣健、望月敏光、菅 谷武芳、高遠秀尚	産業技術総合研究 所	High-efficiency III-V//Si tandem solar cells enabled by the Pd nanoparticle array- mediated "smart stack" approach	Applied Physics Express vol. 10, No. 7, 072301 (2017)	有	2017/06
44	後藤和泰、大島隆治、太 野垣健、菅谷武芳、松原 浩司、近藤道雄	東京工業大学、産業 技術総合研究所	Fabrication of strain-compensated heterojunction Ge/Si1-xCx quantum dots solar cells	Proceedings of EU- PVSEC 2016 pp. 28- 31	無	2016/7
45	水野英範、牧田紀久夫、 太野垣健、望月敏光、木 田康博、菅谷武芳、高遠 秀尚	産業技術総合研究 所	Al-Back Surface Field-Type Crystalline Si- Based Smart Stack Triple-Junction (InGaP/GaAs/Si) Cells	EU PVSEC Proceedings pp. 73- 75	無	2016/7

46	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、西永滋郎、柴田肇、馬場将亮、山田昇、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所、長岡科学技術大学	Low Concentration GaAs/CuInGaSe and GaAs/Si Multi-junction Solar Cells with Smart Stack Technology	Proceeding of EU PVSEC 2016 pp. 1390-1392	無	2016/7
47	O. Elleuch, Li Wang, Kan-Hua Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Double acceptor in p-type GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Journal of Crystal Growth 432:45-48	有	2015/09
48	M. Yamaguchi, Kan-Hua Lee, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工業大学	Potential and Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	ECS Journal of Solid State Science and Technology 5(2):Q68-Q73	有	2015/12
49	山口真史	豊田工業大学	(解説)太陽電池市場の現状と将来展望	WEB Journal 21(9):2-9	無	2016/01
50	M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, N. Kojima	豊田工業大学	(解説) Recent results for concentrator photovoltaics in Japan	Japanese Journal of Applied Physics 55:04EA05	無	2016/03
51	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Optimization of Land Use for a Multitracker System Using a Given Geometrical Site Condition	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS 6(4):960-966	有	2016/07
52	K. Araki, H. Nagai, Kan-Hua Lee, K. Ikeda, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Design and Development of Dome-Shaped Fresnel Lens	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS 6(5):1339-1344	有	2016/09
53	K. Araki, H. Nagai, R. Herrero, I. Anton, G. Sala, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Off-Axis Characteristics of CPV Modules Result From Lens-Cell Misalignment- Measurement and Monte Carlo Simulation	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS 6(5):1353-1359	有	2016/09
54	K. Araki, H. Nagai, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Study on tolerance control for optical alignment of CPV modules using a Monte Carlo simulation	AIP Conf. Proc. 1766:090003-1-090003-6	有	2016/09
55	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Analysis of impact to optical environment of the land by CPV	AIP Conf. Proc. 1766:090002-1-090002-6	有	2016/09
56	K. Araki, H. Nagai, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Possibility of solar station to EV	AIP Conf. Proc. 1766:080001-1-080001-6	有	2016/09
57	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Which is optimum tracker allocation, checkerboard or rectangular grid?	AIP Conf. Proc. 1766:070001-1-070001-5	有	2016/09
58	K. Araki, Y. Ota, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Intermittent tracking (30 minutes interval) using a wide acceptance CPV module	AIP Conf. Proc. 1766:050001-1-050001-6	有	2016/09

59	K. Araki, Y. Ota, K. Ikeda, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Possibility of static low concentrator PV optimized for vehicle installation	AIP Conf. Proc. 1766:020001-1-020001-5	有	2016/09
60	Kan-Hua Lee, K. Araki, Li Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Assessing material qualities and efficiency limits of III-V on silicon solar cells using external radiative efficiency	Prog. Photovolt: Res. Appl. 24:1310-1318	有	2016/09
61	山口真史	豊田工業大学	(解説)太陽電池市場の現状と将来展望	WEB Journal 2017・1月号 pp.2-9	無	2017/01
62	山口真史, Kan-Hua Lee, 荒木建次, 小島信晃	豊田工業大学	(解説)次世代太陽電池の高効率化に関する考察	信学技報 116 巻 471 号 pp.67-72	無	2017/02
63	K. Araki, H. Nagai, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Analysis of impact to optical environment of the land by flat-plate and array of tracking PV panels	Solar Energy 144:278-285	有	2017/03
64	T. Masuda, K. Araki, K. Okumura, S. Urabe, Y. Kudo, K. Kimura, T. Nakado, A. Sato, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Static concentrator photovoltaics for automotive applications	Solar Energy 146:523-531	有	2017/04
65	K. Araki, H. Nagai, R. Herrero, I. Anton, G. Sala, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	1-D and 2-D Monte Carlo simulations for analysis of CPV module characteristics including the acceptance angle impacted by assembly errors	Solar Energy 147:448-454	有	2017/05
66	O. Elleuch, Li Wang, Kan-Hua Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	N-H related defect playing the role of acceptor in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	Journal of Crystal Growth 468:581-584	有	2017/06
67	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Bandgaps of multi-junction solar cells potentially determined at the sun height of the culmination on the winter solstice	Solar Energy 153:445-453	有	2017/09
68	Li Chai, et al.	大阪市立大学	Effects of annealing on the electrical characteristics of GaAs/GaAs junctions by surface-activated bonding	Jpn. J. Appl. Phys. 55, 068002-1-068002-3 (2016).	有	2016/05
69	S. Hisamoto, et al.	大阪市立大学	Effects of Ar beam irradiation on Si-based Schottky contacts	Extended Abstracts of IEEE 2016 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, pp. 40-41 (2016)	無	2016/07
70	N. Shigekawa, et al.	大阪市立大学	Surface-activated Bonding of III-V Compound Semiconductors and Si for Fabricating Hybrid Tandem Solar Cells	2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2017) Proc. pp. 229-231	無	2017/06

71	H. Valencia, Y. Kangawa, K. Kakimoto	九州大学	Ab initio study of GaAs(100) surface stability over As ₂ , H ₂ and N ₂ as a model for vapor-phase epitaxy of GaAs _{1-x} N _x	Journal of Crystal Growth, 432 (2015) 6	有	2015/09
72	A. Kusaba, Y. Kangawa, Y. Honda, H. Amano, K. Kakimoto	九州大学	Theoretical approach to surface reconstruction of InN(0001) during raised-pressure metalorganic vapor-phase epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics, 55 (2016) 05FM01	有	2016/02
73	H. Valencia, Y. Kangawa, K. Kakimoto	九州大学	Ab initio model for GaAs _{1-x} N _x chemical beam epitaxy using GaAs(100) surface stability over As ₂ , H ₂ , and N ₂	Japanese Journal of Applied Physics, 56 (2017) 060306	有	2017/05
74	H. Valencia, Y. Kangawa, K. Kakimoto	九州大学	Chemical beam epitaxy of GaAs _{1-x} N _x using MMHy and DMHy precursors, modeled by ab initio study of GaAs(100) surfaces stability over As ₂ , H ₂ and N ₂	Journal of Crystal Growth, 468 (2017) 557.	有	2017/06
75	K. Sameshima, T. Sano and K. Yamaguchi	電気通信大学	Self-Formation of Ultrahigh-Density (10 ¹² cm ⁻²) InAs Quantum Dots on InAsSb/GaAs(001) and Their Photoluminescence Properties	Appl. Phys. Express, 9, (2016) pp.075501 1-4	有	2016/07
76	T. Sogabe, Q. Shen and K. Yamaguchi	電気通信大学	Recent Progress on Quantum Dot Solar Cells: a review	J. Photonics for Energy, 6, pp.040901 1-27	有	2016/10
77	K. Toprasertpong, et al.	神戸大学	Microscopic Observation of Carrier-Transport Dynamics in Quantum-Structure Solar Cells Using a Time-of-Flight Technique	Applied Physics Letters Vol. 107, 043901-1~5	有	2015/07
78	T. Kada, et al.	神戸大学	Two-Step Photon Absorption in InAs/GaAs Quantum-Dot Superlattice Solar Cells	Physical Review B Vol. 91, 201303-1~6	有	2015/07
79	T. Kaizu, et al.	神戸大学	Broadband Control of Emission Wavelength of InAs/GaAs Quantum Dots by GaAs Capping Temperature	Journal of Applied Physics Vol. 118, 154301-1~6	有	2015/10
80	Y. Harada, et al.	神戸大学	Nanosecond-Scale Hot-Carrier Cooling Dynamics in One-Dimensional Quantum Dot Superlattices	Physical Review B Vol. 93, 115303-1~5	有	2016/03
81	S. Asahi, et al.	神戸大学	Saturable Two-Step Photocurrent Generation in Intermediate-Band Solar Cells Including InAs Quantum Dots Embedded in Al _{0.3} Ga _{0.7} As/GaAs Quantum Wells	IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 6, No. 2, 465~472	有	2016/03
82	T. Kaizu, et al.	神戸大学	Emission-Wavelength Tuning of InAs Quantum Dots Grown on Nitrogen-d-Doped GaAs(001)	Journal of Applied Physics Vol. 119, 194306-1~8	有	2016/05
83	加田智之 他	神戸大学	量子ドット超格子太陽電池における2段階光励起電流生成ダイナミクスの電界依存特性	日本材料学会会誌「材料」Vol. 65, No. 9, 647~651	有	2016/09
84	T. Tanibuchi, et al.	神戸大学	Photocurrent Transport Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells Using Time-of-Flight Spectroscopy	Physical Review B 94, 195313-1~9	有	2016/11

85	朝日重雄 他	神戸大学	半導体材料・デバイスの最新の進展 3. 太陽電池の変換効率限界を引き上げる半導体材料設計	日本材料学会会誌「材料」別冊 Vol. 66, No. 3, 244~249	有	2017/03
86	S. Asahi, et al.	神戸大学	Two-step photon up-conversion solar cells	Nature Communications	有	2017/04
87	S. Watanabe, et al.	神戸大学	Two-Step Photocurrent Generation Enhanced by Miniband Formation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Intermediate-Band Solar Cells	Applied Physics Letters Vol. 110, 193104-1~5	有	2017/05
88	T. Hirohata, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大学	Anti-soiling coating based on silica for Fresnel lens of concentrator photovoltaics	Japanese Journal of Applied Physics	有	2015/08
89	K. Nomura, K. Imai, Y. Ota, T. Minemoto, K. Nishioka	宮崎大学、立命館大学	Effect of aerosols on performance of concentrator photovoltaics	Japanese Journal of Applied Physics	有	2015/08
90	H. Al Husna, Y. Ota, T. Minemoto, K. Nishioka	宮崎大学、立命館大学	Field test analysis of concentrator photovoltaic system focusing on average photon energy and temperature	Japanese Journal of Applied Physics	有	2015/08
91	Y. Yokoyama, A. Fukuyama, T. Haraguchi, T. Yamauchi, T. Ikari and H. Suzuki	宮崎大学	Control of hydrogen and carbon impurity inclusion during the growth of GaAsN thin film by atomic layer epitaxy	Japanese Journal of Applied Physics	有	2015/12
92	H. Suzuki, Y. Nakata, M. Takahasi, K. Ikeda, Y. Ohshita, O. Morohara, H. Geka, Y. Moriyasu	宮崎大学、兵庫県立大学、日本原研、豊田工業大学、旭化成	Real-time observation of rotational twin formation during molecular-beam epitaxial growth of GaAs on Si (111) by x-ray diffraction	AIP Advances	有	2016/03
93	T. Usuki, K. Matsuuchi, T. Nakamura, K. Toprasertpong, A. Fukuyama, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Ikari	宮崎大学、東京大学	Observation of miniband formation in the ground and high-energy electronic states of superlattice solar cells	Proceedings of SPIE	有	2016/04
94	Y. Hidaka, K. Imai, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大学	Outdoor Performance Comparison of Concentrator Photovoltaic and FlatPlate Photovoltaic Systems	MATEC Web of Conferences	有	2016/07
95	Y. Ota, N. Ahmad, K. Nishioka	宮崎大学	A 3.2% output increase in an existing photovoltaic system using an anti-reflection and anti-soiling silica-based coat	Solar Energy	有	2016/10
96	T. ikari, A. Fukuyama, T. Nakamura, M. Sugiyama, and Y. Nakano	宮崎大学、東京大学	Piezoelectric photothermal detention of the miniband edge energies of strain-balanced InGaAs/GaAsP superlattice structure	Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics	無	2016/11
97	T. Nakamura, K. Matsuuchi, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, A. Fukuyama	宮崎大学、東京大学	Effect of built-in electric field on miniband structure and carrier nonradiative recombination in InGaAs/GaAsP superlattice investigated using photoreflectance and photoluminescence spectroscopies	Energy Procedia	有	2016/12

98	N. Ahmad, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大学	Temperature reduction of solar cells in a concentrator photovoltaic system using a long wavelength cut filter	Japanese Journal of Applied Physics	有	2017/01
99	A. Fukuyama, K. Matsuuchi, T. Nakamura, H. Takeda, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Suzuki and T. Ikari	宮崎大学、東京大学	Investigation of miniband formation and optical properties of strain-balanced InGaAs/GaAsP superlattice structure embedded in p-i-n GaAs solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, no. 8S2, p. 08MC07	有	2017/07
100	A. Fukuyama, K. Matsuuchi, T. Nakamura, H. Takeda, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Suzuki, T. Ikari	宮崎大学、東京大学	Investigation of miniband formation and optical properties of strain-balanced InGaAs/GaAsP superlattice structure embedded in p-i-n GaAs solar cells	Japanese Journal of Applied Physics	有	2017/07
101	S. Yoshidomi, S. Kimura, M. Hasumi, and T. Sameshima	東京農工大学	Indium-gallium-zinc-oxide layer used to increase light transmittance efficiency of adhesive layer for stacked-type multijunction solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 54 (2015) 112301-1-5.	有	2015/10
102	T. Sameshima, T. Nimura, T. Sugawara, Y. Ogawa, S. Yoshidomi, S. Kimura, M. Hasumi	東京農工大学	Indium gallium zinc oxide layer used to decrease optical reflection loss at intermediate adhesive region for fabricating mechanical stacked multijunction solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 54 (2017) 012302-1-7.	有	2016/12

(学会発表)

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	T. Hoshii, S. Naitoh and Y. Okada	東京大学	Photo-assisted impedance spectroscopy for quantum dot solar cell 光刺激インピーダンス分光法による量子ドット太陽電池の評価	第34回電子材料シンポジウム(EMS)	2015/07
2	R. Tamaki, Y. Shoji, Y. Okada and K. Miyano	東京大学	Bandgap engineering for efficient two-step photon absorption in InGaAs quantum dot solar cells バンドギャップ制御による InGaAs 量子ドット太陽電池における高効率2段階光吸収	第34回電子材料シンポジウム(EMS)	2015/07
3	K. Yoshida, Y. Okada and N. Sano	東京大学	Effects of sequential tunneling between intermediate states on performance of intermediate band solar cells Sequential Tunneling による中間バンド太陽電池特性への影響	第34回電子材料シンポジウム(EMS)	2015/07
4	S. Naitoh, N. Miyashita, T. Hoshii and Y. Okada	東京大学	Effect of infrared light concentration on Si-doped InAs quantum dot solar cell Siドープした InAs 量子ドットへの赤外光集光効果	第34回電子材料シンポジウム(EMS)	2015/07
5	M. Mori, A. Ogura, K. Yoshida, T. Sogabe, Y. Okada	東京大学	Device simulation of thin film solar cell characteristics considering Fabry-Perot cavity effect	International Nano-Optoelectronics Workshop	2015/08
6	S. Naitoh, N. Miyashita, K. Toprasertpong, R. Tamaki, T. Hoshii, M. Sugiyama, and Y. Okada	東京大学	Effect of Si Doping on Performance of Quantum Dot Solar Cells	The 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC)	2015/09
7	K. Yoshida	東京大学	(Invited) Sequential Tunneling Effect on Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	18th International Workshop on Computational Electronics	2015/09
8	T. Hoshii, S. Naitoh and Y. Okada	東京大学	Photo-Assisted Impedance Spectroscopy for Quantum Dot Solar Cells	2015 年国際固体素子・材料コンフェレンス (SSDM2015)	2015/09
9	T. Sogabe, Akio Ogura, Y. Okada, Q. Shen, Y. Kuga, T. Toyoda, S. Tomić, Paul D. McNaughten, and Paul O'Brien	東京大学、電気通信大学、マンチェスター大学	Experimental analysis of hot state multiple exciton generation in PbSe quantum dots and its transportation modelling	SemiconNano2015	2015/09
10	R. Tamaki, Y. Shoji, K. Miyano and Y. Okada	東京大学	Effect of external biases on infrared photo-response in InAs/AlGaAs quantum dot solar cell	SemiconNano2015	2015/09
11	K. Yoshida, Y. Okada, N. Sano	東京大学	Effect of Sequential Tunneling on Quantum-Dot Intermediate-band Solar Cells	SemiconNano2015	2015/09
12	Chao-Yu Hung, T. Sogabe, R. Tamaki, N. Miyashita, and Y. Okada	東京大学	Light absorption via discrete states in GaAs solar cell embedded with Er complex	SemiconNano2015	2015/09

13	N. Miyashita, N. Ahsan, Y. Okada	東京大学	Evaluation of 1.0 eV GaInNAsSb Solar Cells for Multi-Junction Applications and Annealing Effects	The 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC)	2015/09
14	N. Ahsan	東京大学	基調講演、Emerging semiconductor materials and nanostructures for high efficiency intermediate band solar cells	3rd International Conference on Green Energy and Technology (Dhaka)	2015/09
15	玉置 亮、庄司 靖、岡田 至崇	東京大学	赤外光電流スペクトル計測による2段階光吸収の最適化設計	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
16	庄司 靖、吉田 勝尚、岡田 至崇	東京大学	電界減衰型量子ドット太陽電池のキャリア収集効率の改善	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
17	吉田 勝尚 ¹ 、岡田 至崇 ¹ 、佐野 伸行 ²	¹ 東京大学、 ² 筑波大学	量子ドット中間バンド型太陽電池における連続インネルの影響	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
18	森 瑞希、小倉 暁雄、曾我部 東馬、岡田 至崇	東京大学	光干渉効果を考慮した薄膜太陽電池のデバイスシミュレーション	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
19	Y. Okada	東京大学	Quantum Dot Growth Technology by MBE for Advanced Photovoltaics	ケンブリッジ大学・東京大学合同シンポジウム	2015/11
20	R. Tamaki	東京大学	Photocurrent Kinetics in Quantum Dot Superlattice	ケンブリッジ大学・東京大学合同シンポジウム	2015/11
21	T. Sogabe	東京大学	Fingerprint of Kondo Resonance in Co-TPP Molecule Coupled to CuN Atomic Layer: A Combined LT-STs and DFT-NEGF Study	ケンブリッジ大学・東京大学合同シンポジウム	2015/11
22	Y. Okada	東京大学	Challenges and Advances in Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	2015 MRS Fall Meeting	2015/11
23	庄司 靖	東京大学	InAs 量子ドット中間バンド太陽電池におけるAlAsSb キャップ層の導入効果	第11回量子ナノ材料セミナー	2015/11
24	N. Ahsan	東京大学	Characterization of transition metal-doped chalcopyrite thin films for photovoltaic application	EMN meeting on Photovoltaics	2016/01
25	R. Tamaki, Y. Shoji, and Y. Okada	東京大学	Design optimization for two-step photon absorption in quantum dots by infrared photocurrent spectroscopy	SPIE Photonics West OPTO 2016	2016/02
26	A. Ogura, M. Mori, K. Yoshida, T. Sogabe, and Y. Okada	東京大学	Device simulation of thin-film intermediate-band solar cell using drift-diffusion model and FDTD method	SPIE Photonics West OPTO 2016	2016/02

27	岡田 至崇、庄司 靖、玉置 亮、吉田 勝尚、曾我部 東馬	東京大学	量子ドット中間バンド太陽電池の高効率化メカニズム	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
28	玉置 亮 ¹ 、庄司 靖 ¹ 、菅谷 武芳 ² 、岡田 至崇 ¹	¹ 東京大学、 ² 産業技術総合研究所	フーリエ変換赤外光電流分光による量子ドット太陽電池における室温2段階光吸収の最適化設計	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
29	庄司 靖、玉置 亮、アーサン ナズムル、岡田 至崇	東京大学	中間バンド型太陽電池に向けたInAs/InAlAsSb 量子構造の作製と評価	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
30	宮下直也 ^{1,2} 、Benoit Behaghel ^{1,2} 、J.-F. Guillemoles ^{1,2} 、岡田至崇 ^{1,2}	¹ 東京大学、 ² NextPV	エピタキシャルリフトオフにより作製したGaInNASb 薄膜太陽電池評価	第63回応用物理学会春季学術講演会(東工大)	2016/03
31	Akio Ogura, Y. Okada, T. Sogabe	東京大学	Analysis of Multijunction Solar Cells Under High Concentrations	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic System	2016/04
32	庄司靖、岡田至崇	東京大学	電界減衰型近接積層 InGaAs/AlGaAs 量子ドット太陽電池の作製評価	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05
33	玉置亮 ¹ 、庄司靖 ¹ 、菅谷武芳 ² 、岡田至崇 ¹	¹ 東京大学、 ² 産業技術総合研究所	In(Ga)As 量子ドット太陽電池の2段階光吸収特性における普遍的線形関係	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05
34	宮下直也、岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフによる薄膜 GaInNASb 太陽電池の作製	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム(長岡)	2016/05
35	N. Ahsan, N. Miyashita, Kin Man Yu ² , W. Walukiewicz ² , Y. Okada ¹	¹ 東京大学、 ² Lawrence Berkley National Laboratory, USA	Designing III-V dilute nitride alloys for IBSC application	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
36	R. Tamaki, Y. Shoji, Takeyoshi Sugaya, Y. Okada	東京大学	Universal Linear Relationship on Two-Step Photon Absorption Processes in In(Ga)As Quantum Dot Solar Cells	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
37	B. Mae Yu Jeco, T. Sogabe, Akio Ogura, N. Miyashita, R. Tamaki, Y. Okada	東京大学	Laser Beam Induced Current (LBIC) Mapping of InGaP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells with Luminescence Coupling	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
38	Y. Okada	Research Center for Advanced Science and Technology (RCAST), The University of Tokyo	(Invited) Current Trends in High-Efficiency III-V Nanostructured Solar Cells	Compound Semiconductor Week 2016(CSW)	2016/06
39	Y. Shoji, N. Ahsan, R. Tamaki, Y. Okada	東京大学	InAs/InAlAsSb quantum nanostructures grown on InP substrate for intermediate band solar cell application	Compound Semiconductor Week 2016(CSW)	2016/06
40	N. Miyashita, N. Ahsan, Y. Okada	東京大学	招待講演、Enhancement of carrier collection in GaInNASb solar cells	EMN Prague Meeting (Prague)	2016/06

41	N. Miyashita, N. Ahsan, Y. Okada	東京大学	Improvement of 1.0 eV GaInNAsSb solar cell performance upon annealing	The 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (Toyama)	2016/06
42	Y. Okada	東京大学	(Contributed talk) Improvements in Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	19th International Conference of Superlattices, Nanostructures and Nanodevices	2016/07
43	玉置 亮, 庄司 靖, 岡田 至崇	東京大学	InAs 量子ドット中間バンド型太陽電池における2段階光吸収の2次元光電流分光	第35回電子材料シンポジウム(EMS-35)	2016/7
44	Y. Okada	東京大学	High-Efficiency Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	5th International Conference & Exhibition on Clean Energy	2016/8
45	玉置 亮, 庄司 靖, 岡田 至崇	東京大学	InAs/AlGaAs 量子ドット太陽電池における量子効率スペクトルマップ	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9
46	吉田 勝尚, 岡田 至崇	東京大学	不純物バンドを利用した量子ドット中間バンド型太陽電池の提案とデバイスシミュレーションによる解析	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9
47	木村大希, 宮下直也, 渡辺健太郎, ソダーバンル ハッサネット, 中田達也, 杉山正和, 岡田至崇	東京大学	エピタキシャルリフトオフ法により分離した GaAs 基板の表面清浄化手法の検討	第77回応用物理学会秋季学術講演会(新潟)	2016/09
48	Y. Okada	東京大学	(Invited) Progress of Quantum Dot Intermediate-Band Solar Cells	Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10
49	K. Yoshida	東京大学	Simulation Analysis of Impurity-Band assisted Quantum-Dot Intermediate-Band Solar Cells	Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10
50	Z. Jehl	東京大学	Selective contacts for Hot Carrier Solar Cells using asymmetric double resonant tunnelling barriers	Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10
51	Y. Shoji	東京大学	Multi-stacked GaSb/GaAs type-II quantum nanostructure for application to intermediate band solar cells	Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10
52	B. Mae YU JECO	東京大学	Spatial Distribution of Temperature Dependent luminescence coupling Current in InGaP/GaAs/Ge Triple Junction Solar Cells	Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10
53	B. Mae YU JECO ¹ , R. Vergil Doma ² , M. Anthony Morales ² , E. Grace Tarroza ² , M. Fatima Villaflores ² , A. dela Cruz ² , E. Guevara ² , R. Rhay Vicerra ² , M. Luisa Asilo ²	¹ 東京大学, ² University of Santo Tomas	Acquisition and Analysis of Electrocardiogram Waveforms with Diagnosis Transmission through Short Message Service Communication System	IEEE TENCON 2016	2016/11

54	N. Miyashita, B. Behaghel, J-F. Guillemole, Y. Okada	東京大学, LIA-NextPV	Enhancement of Photocurrent in Epitaxial Lift-Off Thin Film GaInNAsSb Solar Cells By The Light Confinement Structure	PVSEC-26(シンガポール)	2016/11
55	H. Xu, K. Toprasertpong, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学	GaAs Solar Cells with Low-V/III-Ratio MOVPE for Low-Cost Power Generation	PVSEC-26(シンガポール)	2016/11
56	玉置 亮	東京大学	InAs 量子ドット太陽電池における室温高効率2段階光吸収の実現に向けて	第12回量子ナノ材料セミナー	2016/11
57	N. Ahsan ¹ , N. Miyashita ¹ , T. Hoshii ² , Kalainathan Sivaperuman ³ , Y. Okada ¹	¹ 東京大学、 ² 東京工業大学、 ³ VIT University	(Invited) Multiband semiconductors for next generation PV applications	Materials Processing and Applications 国際会議 (ICMPA2016)	2016/12
58	N. Ahsan ¹ , N. Miyashita ¹ , T. Hoshii ² , Kalainathan Sivaperuman ³ , Y. Okada ¹	¹ 東京大学、 ² 東京工業大学、 ³ VIT University	(Invited) Emerging semiconductors for highly efficient PV Applications	Modern Materials Research 国際会議 (ICMMR2016)	2016/12
59	N. Miyashita ¹ , N. Ahsan ¹ , Y. Okada ¹	東京大学	(招待講演) Improvement of dilute nitride GaInNAsSb thin films and photovoltaic characteristics	International Conference on Material Processing and Applications (Vellore)	2016/12
60	N. Miyashita, N. Ahsan, Y. Okada	東京大学	(招待講演) Characterization of Dilute Nitride Based Photovoltaics for Multi-junction Solar cell Applications	International Conference on Modern Materials Research (Uthangrai)	2016/12
61	Z. Jehl, D. Suchet, A. Julian, C. Bernard, N. Miyashita, F. Gibelli, Y. Okada, J.-F. Guillemolles	東京大学, IRDEP	Modeling and characterization of double resonant tunneling diodes for application as energy selective contacts in hot carrier solar cells	SPIE Photonics West	2017/1
62	N. Ahsan, N. Miyashita, Kin Man Yu, W. Walukiewicz, Y. Okada	東京大学、香港市立大学、Lawrence Berkeley National Laboratory	Multiband modification of III-V dilute nitrides for IBSC application	SPIE Photonics West (San Francisco)	2017/01
63	S. Naito, R. Tamaki, N. Miyashita, K. Yoshida, Y. Okada	東京大学	Two-step photon absorption in intermediate band solar cells controlled by the electron filling ratio of quantum dots	ISPlasma 2017	2017/3
64	N. Ahsan, N. Miyashita, Kin Man Yu, W. Walukiewicz, Y. Okada	東京大学、香港市立大学、Lawrence Berkeley National Laboratory	招待講演、III-V Dilute Nitrides for Intermediate Band Solar Cell	Global Photovoltaic Conference (GPVC) 2017 (Gwangju)	2017/03
65	岡田 至崇, 庄司 靖, 吉田 勝尚, 内藤 駿弥, 玉置 亮	東京大学	Recent Progress of Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
66	玉置 亮, 庄司 靖, 岡田 至崇	東京大学	GaSb/GaAs 量子ナノ構造太陽電池における赤外量子効率スペクトル	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3
67	庄司 靖, 玉置 亮, 岡田 至崇	東京大学	GaSb/AlGaAs 中間バンド型太陽電池における量子ナノ構造形状の影響	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3

68	宮下直也, 岡田至崇	東京大学	Enhancement of photocurrent in thin film dilute nitride cells separated by epitaxial lift-off technique	第64回応用物理学会春季学術講演会(横浜)	2017/03
69	何 軼倫, 宮下 直也, 岡田至崇	東京大学	原子状水素援用 MBE による Ga(In)NAs 薄膜の残留キャリアと水素照射効果	第64回応用物理学会春季学術講演会(横浜)	2017/03
70	Y. Okada, Y. Shoji, R. Tamaki	東京大学	(Invited) Challenges and Progress on the Development of Quantum Dot Intermediate Band Solar Cells	2017 MRS Spring Meeting	2017/04
71	Y. Shoji and Y. Okada	東京大学	Effect of thin InAlAs buffer layer on InAs/InGaAs quantum dots grown on InP (311)B substrate	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW 2017)	2017/05
72	Y. Okada, Y. Shoji, Chao-Yu Hung, D. J. Farrell, T. Sogabe	東京大学	High Density Quantum Dot Solar Cells for Concentrating Photovoltaics(CPV)	17th International Conference on Environment and Electrical Engineering	2017/05
73	N. Miyashita, Y. He, Y. Okada	東京大学	Effect of hydrogen annealing for dilute nitride GaInNAsSb solar cells	Compound Semiconductor Week 2017 (Berlin)	2017/05
74	N. Ahsan ¹ , S. Kalainathan ² , N. Miyashita ¹ , T. Hoshii ³ , Y. Okada ¹ .	¹ 東京大学, ² IT University, Vellore, India, ³ 東京工業大学	Multiband Formation in Cr doped CuGaS ₂ Thin Films Synthesized by Chemical Spray Pyrolysis	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
75	R. Tamaki, Y. Shoji, Y. Okada	東京大学	Type-II Quantum Dots for Application to Photon Ratchet Intermediate Band Solar Cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/06
76	R. Tamaki	東京大学	Full spectrum quantum efficiency on III-V quantum dot solar cells	International Workshop on Advanced Smart Materials and Engineering for Nano- and Bio-Technologies	2017/07
77	S. Naito, K. Yoshida, R. Tamaki, N. Miyashita, Y. Okada	東京大学	High-Efficiency Quantum Dot Intermediate Band Solar Cell (IBSC): Effect of Carrier Occupancy Ratios in IB	International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment (SEEME)	2017/07
78	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) Design and growth of strain-balanced superlattice for efficiency enhancement of multi-junction solar cells	17th U.S. Biennial Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE-17) (Aug. 2-7, 2015, Montana, USA)	2015/08
79	井上 智之, トーブラサート ボン カシディット, アモリ デウラマレー, 渡辺 健太 郎, ジャンフランソワ ギル モー, 杉山 正和, 中野 義 昭	東京大学, IRDEP CNRS	EL スペクトルを用いた集光条件下における開放電圧の評価	第76回応用物理学会秋季学術講演会 14p-2M-7	2015/09

80	宇宿 孝則、中村 翼、松落高輝、倉留 弘憲、相原 健人、トープラサートポン カシディット、藤井 宏昌、杉山 正和、福山 敦彦、碓 哲雄	東京大学、宮崎大学	矩形および階段状超格子太陽電池におけるミニバンド形成の評価	第76回応用物理学会秋季学術講演会 14p-2M-1	2015/09
81	M. Sugiyama, H. Sugiyama, T. Katoh, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, D. Alonso-Álvarez, N. J. Ekins-Daukes and Y. Nakano,	東京大学、Imperial Collage London	Quantum Wire-on-Well (Wow) Cell with Long Carrier Lifetime for Efficient Carrier Transport	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 13-18, 2015, Hamburg, Germany) 1AO.3.1	2015/09
82	A. Delamarre, J.F. Guillemoles, Y. Wang, Y. Nakano and M. Sugiyama	東京大学、IRDEP CNRS	Influence of the Host pin Diode Material in Multi-Quantum Well Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 13-18, 2015, Hamburg, Germany) 1AO.3.3	2015/09
83	D. Yamashita, G. Kono, T. Hoshii, K. Watanabe, M. Sugiyama, T. Suga, Y. Okada and Y. Nakano	東京大学	The Effect of Fast-Atom-Beam Ion Species in the Surface Activated Bonding Process for Multi-Junction Solar Cells	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 13-18, 2015, Hamburg, Germany) 4BO.10.1	2015/09
84	K. Watanabe, T. Inoue, H. Sodabanlu, M. Sugiyama and Y. Nakano	東京大学	Self-Organized Texture of GaAs by Wet Etching for Light Trapping in MQW Solar Cell	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 13-18, 2015, Hamburg, Germany) 1BV.7.5	2015/09
85	N. Vandamme, J. Goffard, B. Behaghel, A. Cattoni, A. Lemaitre, S. Collin, A. Delamarre, M. Sugiyama and J.F. Guillemoles	東京大学、LPN, IRDEP CNRS	Ultrathin GaAs Solar Cells with a Nanostructured Silver Mirror	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) (Sep. 13-18, 2015, Hamburg, Germany) 1BV.7.40	2015/09
86	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) Embedded InGaAs lateral nanowires for high-efficiency solar cells	SemiconNano2015 (September 6- 11, 2015 Hsinchu, Taiwan), I-7	2015/09
87	A. Delamarre, L. Lombez, K. Watanabe, M. Sugiyama, J.-F. Guillemoles	東京大学、IRDEP CNRS	Spatial carrier collection efficiency imaging by luminescence	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25) (November 15-20, 2015, Busan, Korea) GAS-O-03	2015/11
88	A. Fukuyama, T. Nakamura, T. Usuki, K. Matsuochi, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Ikari	宮崎大学、東京大学	Carrier collection mechanism in the strain-balanced InGaAs/GaAsP super-lattice solar cells by investigating the temperature changes of the surface photovoltage, photoluminescence, and piezoelectric photothermal signals	Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices V, SPIE Photonics West (Feb. 13-18, 2016, San Francisco, USA) 9743-13.	2016/02

89	T. Usuki, K. Matsuochi, T. Nakamura, K. Toprasertpong, A. Fukuyama, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Ikari	東京大学, 宮崎大学	Observation of mini-band formation in the ground and high-energy electronic states of super-lattice solar cells	Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices V, SPIE Photonics West (Feb. 13-18, 2016, San Francisco, USA) 9743-36	2016/02
90	K. Toprasertpong, K. Watanabe, T. Kita, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学	Effective drift mobility approximation in multiple quantum-well solar cells	Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices V, SPIE Photonics West (Feb. 13-18, 2016, San Francisco, USA) 9743-39.	2016/02
91	T. Inoue, K. Toprasertpong, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Paire, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学, IRDEP CNRS	Quasi-Fermi level splitting evaluation based on electroluminescence analysis in multiple quantum-well solar cells for investigating cell performance under concentrated light	Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices V, SPIE Photonics West (Feb. 13-18, 2016, San Francisco, USA) 9743-40.	2016/02
92	渡辺 健太郎, 井上 智之, トーブラサートポン カシディット, アモリ デラマール, ソダーバンル ハッサネット, 杉山 正和, 中野 義昭	東京大学	太陽電池応用 InGaAs/GaAsP 多重量子井戸への緩和層導入効果	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 21p-H112-3	2016/03
93	長岡 恵里奈, 井上 智之, トーブラサートポン カシディット, 山下 大之, 渡辺 健太郎, 杉山 正和, 中野 義昭	東京大学	GaAs/Si 太陽電池における変換効率・発電コストの GaAs 層厚依存性	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 20p-P14-2	2016/03
94	趙 博文, トーブラサートポン カシディット, ソダーバンル ハッサネット, 渡辺 健太郎, 杉山 正和, 中野 義昭	東京大学	低温での量子井戸および波状量子井戸太陽電池におけるキャリア回収効率の評価	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 20a-S011-7	2016/03
95	井上 智之, トーブラサートポン カシディット, デウラマレー アモリ, 渡辺 健太郎, ギルモア ジャンフランソワ, 杉山 正和, 中野 義昭	東京大学, IRDEP CNRS	EL 測定を用いた GaAs 太陽電池の構造評価と効率向上	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 19p-S011-5	2016/03
96	山下 大之, 渡辺 健太郎, 藤野 真久, 星井 拓也, 杉山 正和, 岡田 至崇, 須賀 唯知, 中野 義昭	東京大学	超高効率多接合太陽電池作製に向けた表面活性化接合界面の評価	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 20p-S011-6	2016/03
97	トーブラサートポン カシディット, 谷淵 泰三, 加田 智之, 朝日 重雄, 渡辺 健太郎, 杉山 正和, 喜多 隆, 中野 義昭	東京大学, 神戸大学	量子井戸太陽電池における電子と正孔の走行時間および実効移動度の評価	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 20a-S011-6	2016/03
98	M. Sugiyama	東京大学	Strain-balanced superlattice for high-efficiency solar cells	International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC 2016) (May 29 - June 3, Graz, Austria)	2016/05

99	A. Cattoni, Hung-Ling Chen, N. Vandamme, J. Goffard, A. Lemaitre, A. Delamarre, B. Behaghel, K. Watanabe, M. Sugiyama, J.-F. Guillemoles, S. Collin	LPN, 東京大学	200nm-thick GaAs solar cells with a nanostructured silver mirror	IEEE 43th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2016 (June 5-10, 2016, Portland, USA) 929	2016/06
100	D. Yamashita, K. Watanabe, M. Fujino, T. Hoshii, Y. Okada, Y. Nakano, T. Suga, M. Sugiyama	東京大学	Admittance Spectroscopy Analysis on the Interfacial Defect Levels in the Surface-Activated Bonding of GaAs	IEEE 43th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2016 (June 5-10, 2016, Portland, USA) 628	2016/06
101	K. Watanabe, T. Inoue, K. Toprasertpong, A. Delamarre, H. Sodabanlu, J.-F. Guillemoles, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学	Optical analysis of the photon recycling effect in InGaAs/GaAsP multiple quantum well solar cell with light trapping structure	IEEE 43th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2016 (June 5-10, 2016, Portland, USA) 321	2016/06
102	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学	Photocurrent Collection Mechanism and Role of Carrier Distribution in p-i-n Quantum Well Solar Cells	IEEE 43th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2016 (June 5-10, 2016, Portland, USA) 48	2016/06
103	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama and Y. Nakano	東京大学	Growth of C-Doped GaAs in Planetary MOVPE Reactor Using Tertiarybutyl-Arsine and Carbon-Tetrachloride	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-18) (July 10-15, 2016, San Diego, USA) PS-1.6	2016/07
104	K. Toprasertpong, T. Inoue, A. Delamarre, K. Watanabe, M. Paire, L. Lombez, J.-F. Guillemoles, M. Sugiyama and Y. Nakano	東京大学, IRDEP CNRS	Electroluminescence-Based Quality Characterization of Quantum Wells for Solar Cell Applications	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-18) (July 10-15, 2016, San Diego, USA) 3A-2.2	2016/07
105	H. Cho, K. Toprasertpong, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama and Y. Nakano	東京大学	Stability and Controllability of InGaAs/GaAsP Wire-on-Well (WoW) Structure for Multi-Junction Solar Cells	18th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-18) (July 10-15, 2016, San Diego, USA) 5A-2.2	2016/07
106	M. Sugiyama, H. Cho, Toprasertpong Kasidit, H. Sodabanlu, K. Watanabe and Y. Nakano	東京大学	(Invited) InGaAs/GaAsP Quantum Wells and Wires for High-Efficiency Photovoltaic Applications	16th International Conference On Nanotechnology (IEEE Nano 2016) (Aug 22-26, 2016, Sendai, Japan) p 519-520	2016/08
107	M. Sugiyama, T. Kasidit, H. Fujii, H. Cho, H. Sodabanlu, K. Watanabe and Y. Nakano	東京大学	(Invited) "Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy of InGaAs/GaAsP Quantum Wells and Wires for High-Efficiency Photovoltaic Applications	18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18) (Aug 7-12, 2016, Nagoya, Japan)	2016/08
108	M. Sugiyama, D. Yamashita, K. Watanabe, M. Fujino, T. Suga, Y. Nakano	東京大学	(Invited) Analysis of Defect Levels at GaAs/GaAs Surface-Activated Bonding Interface for Multi-Junction Solar Cells	ECS Transactions 75(9):33-38, Sep. (2016)	2016/09

109	トープラサートボン カンディット、井上 智之、渡辺 健太郎、喜多 隆、杉山 正和、中野 義昭	東京大学、神戸大学	多重量子井戸太陽電池における実効移動度近似の妥当性検証	第77 応用物理学会秋季学術講演会 15p-A34-8	2016/9
110	趙 博文、齊藤 昌太、トープラサートボン カンディット、田尻 祐介、小川 泰弘、ソダーバシル ハッサネット、渡辺 健太郎、喜多 隆、杉山 正和、中野 義昭	東京大学、神戸大学	InGaAs/GaAsP 波状量子井戸におけるキャリア寿命の評価	第77 応用物理学会秋季学術講演会 15p-A34-9	2016/9
111	A. Delamarre, P. Verdier, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, J. F. Guillemole	東京大学, IRDEP CNRS	Optical mapping of the transport efficiency in multi-junction solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26) (Oct. 24-28, 2016, Singapore) 1.3.1e	2016/10
112	W. Yanwachirakul, N. Miyashita, H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Okada and Y. Nakano	東京大学	Design of free-barrier InGaAs/GaNAs multiple quantum well solar cells with 1.2 eV energy gap	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26) (Oct. 24-28, 2016, Singapore) 1.1.3e	2016/10
113	K. Matsuuchi, T. Nakamura, H. Takeda, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Suzuki, T. Ikari, A. Fukuyama	宮崎大学、東京大学	Investigation of miniband formation and optical properties of strain-balanced InGaAs/GaAsP superlattice structure embedded in p-i-n GaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26) (Oct. 24-28, 2016, Singapore) 3.4.2d	2016/10
114	Hao Xu, K. Toprasertpong, A. Delamarre, H. Sodabanlu, K. Watanabe, Y. Nakano and M. Sugiyama	東京大学	Effect of low-V/III-ratio metalorganic vapor-phase epitaxy on GaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26) (Oct. 24-28, 2016, Singapore) 3.4.2e	2016/10
115	H. Sodabanlu, K. Watanabe, M. Sugiyama and Y. Nakano	東京大学	Effects of various dopants on properties of GaAs tunneling junctions and p-i-n solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26) (Oct. 24-28, 2016, Singapore) 3.4.2b	2016/10
116	A. Delamarre, J. Jia, P. Verdier, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, J. F. Guillemoles	東京大学, IRDEP CNRS	Characterisation of multi-junction solar cells by mapping of the carrier transport efficiency using luminescence emission	Proceedings of the SPIE, v 10099, p 100990Z (6 pp.)	2017/02
117	トープラサートボン カンディット、渡辺 健太郎、中野 義昭、杉山 正和	東京大学	多重量子井戸太陽電池のキャリア回収モデル	第64 応用物理学会春季学術講演会 14p-B6-7	2017/03
118	ソダーバシル ハッサネット、渡辺 健太郎、生方 映徳、菅谷 武芳、杉山 正和、中野 義昭	東京大学、大陽日酸樹、産業技術総合研究所	Extremely high growth rate MOVPE: GaAs growth for low-cost PV application	第64 応用物理学会春季学術講演会 16p-304-4	2017/03
119	中田 達也、渡辺 健太郎、ソダーバシル ハッサネット、木村 大希、宮下 直也、杉山 正和、岡田 至崇、中野 義昭	東京大学	エピタキシャルリフトオフにより分離した GaAs 基板上の堆積物分析	第64 応用物理学会春季学術講演会 14p-B6-13	2017/03

120	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V nano-epitaxial MOVPE for high-efficiency and low-cost solar cells	MRS Spring meeting 2017 (Apr. 17-21, 2017, Phoenix, USA) ES11.7.01	2017/04
121	B. Kim, O. Supplie, T. Watanabe, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, Tech. Univ. Ilmenau	Double-layer step formation on Si (100) surfaces by moderate-temperature annealing coupled with TBA exposure	Compound Semiconductor Week 2017 (May 14-18, 2017, Berlin, Germany) P1.24	2017/05
122	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau, 東京大学	In-situ control over dimer orientation on Si(100) surfaces in arsenic ambient and its impact on the sublattice orientation of subsequently grown GaP	Compound Semiconductor Week 2017 (May 14-18, 2017, Berlin, Germany) D6.6	2017/05
123	K. Watanabe, E. Nagaoka, D. Yamashita, K. Toprasertpong, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Development of GaAs//Si current-balanced dual junction solar cell integrated by surface-activated bonding	5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration, LTB-3D 2017, p 53 (June 13, 2017, Tokyo)	2017/06
124	T. Nakata, K. Watanabe, H. Sodabanlu, D. Kimura, N. Miyashita, Y. Okada, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Analysis of Deposited Residues and Its Cleaning Process on GaAs Substrate after Epitaxial Lift-Off	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 238	2017/06
125	K. Toprasertpong, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学	Carrier Collection Model and Design Rule for Quantum Well Solar Cells	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 626	2017/06
126	H. Sodabanlu, K. Watanabe, A. Ubukata, T. Sugaya, M. Sugiyama, Y. Nakano	東京大学, 大陽日酸株	Extremely high-speed GaAs growth by MOVPE for low-cost PV application	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 650	2017/06
127	B. Kim, K. Toprasertpong, O. Supplie, A. Paszuk, T. Hannappel, Y. Nakano, M. Sugiyama	東京大学, Tech. Univ. Ilmenau	Efficiency of GaAsP/Si Two-junction Solar Cells with Multi-Quantum Wells: a Realistic Modeling with Carrier Collection Efficiency	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 722	2017/06
128	A. Paszuk, O. Supplie, S. Brückner, M. M. May, A. Dobrich, A. Nägelein, B. Kim, Y. Nakano, M. Sugiyama, P. Kleinschmidt, T. Hannappel	Tech. Univ. Ilmenau, 東京大学	In situ control over the sublattice orientation of heteroepitaxially grown single-domain GaP/Si:As virtual substrates for tandem absorbers	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 726	2017/06
129	Lin Zhu, A. Reddy, K. Watanabe, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Akiyama	東京大学	Design of InGaP/GaAs/InGaAs multi-junction cells with reduced layer thicknesses using light-trapping rear texture	IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017 (June 25-30, 2017, Washington DC, USA) 980	2017/06

130	M. Sugiyama	東京大学	(Invited) III-V Compound Semiconductor Nano-Epitaxial Structures for High-Efficiency Photovoltaic and Solar-to-Chemical Energy Conversion	The International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT) 2017 (June 18-12, 2017, Singapore) F08-3	2017/06
131	A. Ubukata, H. Sodabanlu, K. Watanabe, S. Koseki, Y. Yano, T. Tabuchi, T. Sugaya, K. Matsumoto, Y. Nakano, M. Sugiyama	太陽日酸株, 東京大学	Extremely Rapid GaAs Growth by MOVPE for Low-Cost PV Applications	18th US Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy (OMVPE-18) (July 30-Aug. 4, 2017, Santa Fe, USA)	2017/08
132	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS colloidal quantum dot/ZnO nanowires-based solar cells with high efficiency in the near infrared region and long-term stability	招待講演 The International Conference on Fundamental Processes in Semiconductor Nanocrystals (Spain)	2015/09
133	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region and long-term stability	研究発表 TOEO-9	2015/09
134	王海濱, 久保貴哉, 中崎城太郎, 瀬川浩司	東京大学	近赤外高効率PbS量子ドット/ZnOナノワイヤ太陽電池の光電変換特性に与える量子ドット表面の影響	研究発表 第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
135	T. Tatsuma	東京大学	Photoelectrochemistry of Metal Nanoparticles	2015年度光化学討論会	2015/09
136	T. Tatsuma	東京大学	Plasmon-Induced Photoelectrochemistry	上海師範大学講演会	2015/10
137	T. Tatsuma	東京大学	Plasmon-induced charge separation at two-dimensional metal semishell arrays on SiO ₂ @TiO ₂ colloidal crystals	第5回CSJ化学フェスタ2015	2015/10
138	T. Tatsuma	東京大学	金属ナノ粒子の光機能 - 光電変換、プラズモンセンサ、機能性色材 -	日本電気計測器工業会関西支部・戦略的基盤技術検討委員会	2015/11
139	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region and long-term stability	研究発表 The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015)	2015/12
140	T. Tatsuma	東京大学	Applications of Plasmon-Induced Charge Separation	The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2015)	2015/12
141	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS quantum-dot/ZnO nanowire solar cells yielding high efficiency in the near-infrared region and long-term stability	2015MRS Fall meeting	2015/12
142	立間徹	東京大学	ナノ粒子による光エネルギーの捕捉と光機能の発現	近畿大学第6回エネルギーセミナー	2016/01

143	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed hybrid solar cells using lead sulfide colloidal quantum dots and zinc oxide nanowires	研究発表 AP-HOPV 2017	2016/02
144	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum dot / ZnO nanowire solar cells in the near-infrared region and long-term stability	研究発表 AP-HOPV 2017	2016/02
145	T. Tatsuma	東京大学	Plasmonic Nanomaterials	PITTCON 2016	2016/03
146	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット太陽電池への ZnO ナノワイヤ導入によるキャリア拡散距離の伸長効果	研究発表 日本化学会第96 春季年会、京都	2016/03
147	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO 太陽電池の光電変換特性の温度依存	研究発表 第63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
148	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	溶液プロセスで構築する量子ドット太陽電池	第7 回薄膜太陽電池セミナー	2016/03
149	立間徹	東京大学	プラズモン誘起電荷分離を利用した金-銀合金ナノ粒子の光誘起脱合金化	研究発表 日本化学会第96 春季年会	2016/03
150	T. Tatsuma	東京大学	Photoelectrochemistry of plasmonic two-dimensional halfshell arrays and their applications	研究発表 電気化学会第83 回大会	2016/03
151	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution processed solid state PbS quantum dot/ZnO nanowires solar cells with enhanced efficiency in the near infrared region	招待講演 E-MRS (Warsaw Poland)	2016/09
152	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution Processed Solar Cells Based on PbS Colloidal Quantum Dot / ZnO Nanowire Bulk Heterojunctions	研究発表 ICFPE 2016	2016/09
153	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficiency Enhancement of PbS Colloidal Quantum Dot/ZnO Nanowire Solar Cells in the Near-Infrared Region	招待講演 10th ACNSE	2016/09
154	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficiency Enhancement of PbS Colloidal Quantum Dot/ZnO Nanowire Solar Cells in the Near-Infrared Region	招待講演 SIEMM 22	2016/09
155	T. Tatsuma	東京大学	Optical and Photoelectrochemical Properties of Plasmonic Nanomaterials	招待講演 CEMS Topical Meeting 2016	2016/09
156	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	コロイド量子ドットのパシベーションと光電変換特性	研究発表 第77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09

157	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Efficiency enhancement of PbS colloidal quantum-dot/ZnO nanowire heterojunction solar cells	研究発表 2016年度光化学討論会	2016/09
158	T. Tatsuma	東京大学	Photoelectrochemical and photovoltaic properties of plasmonic two-dimensional halfshell arrays	研究発表 2016年度光化学討論会	2016/09
159	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Organic Inorganic Hybrid Solar Cells based on Colloidal Quantum Dots towards High-Efficiency Near-Infrared Photovoltaics	招待講演 ICMNE2016(高分子学会、神戸)	2016/09
160	T. Tatsuma	東京大学	Plasmon-Induced Charge Separation: Mechanisms and Applications	招待講演 PRIME2016	2016/10
161	T. Tatsuma	東京大学	Optical and Photoelectrochemical Applications of Plasmonic Nanomaterials	招待講演 International Workshop on Novel Photo-Induced Phenomena and Applications	2016/11
162	T. Kubo, H. Wang, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	PbS colloidal quantum dot based solar cells with high external quantum efficiency in the near infrared region	研究発表 MRS(Boston USA)	2016/12
163	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	近赤外吸収 AgBiS ₂ ナノ粒子/ZnO ナノワイヤ太陽電池の作製と光電変換特性	研究発表 第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
164	王海濱、久保貴哉、中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	PbS 量子ドット/ZnO ナノワイヤ太陽電池の短波長赤外域での光電変換特性	研究発表 第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
165	T. Tatsuma	東京大学	Plasmonic Photovoltaic Cells Based on Two-Dimensional Metal Halfshell Arrays	研究発表 第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
166	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Quantum dot size dependent photovoltaic characteristics of PbS quantum dot / ZnO nanowire solar cells	研究発表 日本化学会第97春季年会	2017/03
167	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Photocurrent Enhancement of Perovskite Solar Cells by a Plasmonic Waveguide Mode	研究発表 電気化学会第84回大会	2017/03
168	T. Tatsuma	東京大学	Plasmon-Induced Charge Separation and Electric Field Localization	招待講演 231st ECS Meeting	2017/05
169	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	Solution Processed Quantum Dots-based Solar Cells Operating in a Wide Range of the Solar Spectrum	招待講演 ICMA-2017(Singapore)	2017/06
170	T. Kubo, H. Wang, and H. Segawa	東京大学	Solution-processed hybrid solar cells using colloidal quantum dot molecules	招待講演 9th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics	2017/06

171	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Near and Short-wavelength Infrared PbS Quantum Dot / ZnO Nanowire Solar Cells	10th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics	2017/07
172	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Quantum Dot-based Solar Cells with Highly Transparent Conductive Oxides for Enhanced Photocurrent in the Short-wavelength Infrared Region	招待講演 IUMRS-ICAM2017	2017/08
173	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution Processed Quantum Dots-based Solar Cells Operating in a Wide Range of the Solar Spectrum	招待講演 SSDM2017 (2017 International Conference on Solid State Devices and Materials)	2017/09
174	H. Wang, T. Kubo, J. Nakazaki, and H. Segawa	東京大学	Solution Processed Quantum Dots-based Solar Cells Operating in a Wide Range of the Solar Spectrum	MRS(Boston)	2017/12
175	T. Tatsuma	東京大学	Plasmon-Induced Photoelectrochemical and Photovoltaic Properties of Two-Dimensional Metal Halfshell Array	研究発表 9th Asian Photochemistry Conference 2016 (APC2016)	2017/12
176	藤岡洋	東京大学	Characteristics of nitride films and devices prepared on bulk GaN substrates by pulsed sputtering	9th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-IX)	2015/11
177	藤岡洋	東京大学	Preparation of III-Nitride Devices for Large Area Light Emitting Devices and Solar Cells	Collaborative Conference on Crystal Growth (EMN 3CG 2015)	2015/12
178	藤岡洋	東京大学	Basic characteristics of GaN prepared by pulsed sputtering deposition	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2016)	2016/10
179	上野耕平、荒川靖章、今別府秀行、太田実雄、藤岡洋	東京大学	PSD 法による GaN への n 型ドーピング技術の開発	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/10
180	上野耕平、荒川靖章、小林篤、太田実雄、藤岡洋	東京大学	PSD 法による高濃度高移動度 n 型 GaN の開発	第 64 回 応用物理学会春季学術講演会	2017/03
181	S. Mori, S. Yagi, M. Orihara, K. Takamiya and H. Yaguchi	埼玉大学	Lateral alignment of InN nano-scale dots grown on 4H-SiC(0001) vicinal substrates	11th International Conference on Nitride Semiconductors	2015/09
182	T. Ikarashi, M. Orihara, S. Yagi, S. Kuboya, R. Katayama and H. Yaguchi	埼玉大学	Epitaxial relationship of GaN grown on GaAs (110) by RF-molecular beam epitaxy	11th International Conference on Nitride Semiconductors	2015/09
183	Shuhei Yagi, Y. Sato, N. Ueyama, T. Suzuki, K. Osada, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学, 東京大学	Optical and Structural Characterization of GaAs:N δ -Doped Superlattices Grown by Molecular Beam Epitaxy	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano 2015)	2015/09

184	吉川 洋生、八木 修平、矢口 裕之	埼玉大学	第一原理計算による GaAs:N δ ドープ超格子における光学遷移に関する研究	第76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
185	宮崎 貴史、八木 修平、矢口 裕之	埼玉大学	第一原理計算による InAsN 混晶の伝導帯の解析	第76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
186	八木修平	埼玉大学	希釈窒化物混晶の結晶成長制御とマルチバンド太陽電池への応用	第11 回量子ナノセミナー	2015/12
187	米倉 成一、高宮 健吾、八木 修平、上田 修、矢口 裕之	埼玉大学、金沢工業大学	レーザ照射による GaInNAs 混晶半導体の発光効率への影響	第77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
188	T. Suzuki, S. Yagi, Y. Okada, H. Yaguchi	埼玉大学, 東京大学	Effect of Carrier Blocking Layer on Carrier Collection in Intermediate-Band Solar Cells using GaAs:N d-Doped Superlattice	Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10
189	八木修平	埼玉大学	窒素 δ ドーピングによる希釈窒化物混晶の成長と評価	第12 回量子ナノセミナー	2016/11
190	S. Yagi, Y. Okada and H. Yaguchi	埼玉大学, 東京大学	Properties of dilute nitride pseudo-alloys grown using a nitrogen delta-doping technique	SPIE Photonic West 2017	2017/01
191	加藤 諒、八木 修平、岡田 至崇、矢口 裕之	埼玉大学、東京大学	n型 GaAs:N δ ドープ超格子の電気的特性評価	第64 回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
192	R. Kato, S. Yagi, Y. Okada, and H. Yaguchi	埼玉大学, 東京大学	Electrical characterization of n-type GaAs:N δ -doped superlattices	Compound Semiconductor Week 2017	2017/05
193	高本達也	シャープ(株)	III-V 族系超高効率太陽電池の高効率化技術	学振 175 委員会「化合物薄膜太陽電池分科会」第5 回研究会 “夏の学校 2015”	2015/09
194	高本達也	シャープ(株)	III-V 多接合型太陽電池の技術動向	東京理科大学太陽光発電技術研究部門シンポジウム「太陽電池・発電技術の現状と課題」(東京理科大学)	2016/01
195	高本達也	シャープ(株)	超高効率太陽電池の技術動向	第7 回 薄膜太陽電池セミナー(山形大学)	2016/03
196	高本達也	シャープ(株)	III-V 族多接合型太陽電池の動向について	2016 年第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (東京工業大学)	2016/03

197	十楚博行	シャープ(株)	III-V 化合物太陽電池の未来予想図	第34回PVTEC技術交流会	2016/05
198	高本達也	シャープ(株)	III-V PV Activities at SHARP	PV Industry WS 2016 (Korea)	2016/09
199	高本達也	シャープ(株)	高性能・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III. 低コストモジュール開発	平成28年度NEDO新エネルギー成果報告会(ポスター)	2016/10
200	高本達也	シャープ(株)	Cost-reduction technologies for High-efficiency III-V Multijunction Solar Cells	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
201	綾 他	パナソニック(株)	New Concept of Thinner CPV Module with High Performance at Low Cost	応用物理学会春季学術講演会 S28 Photovoltaic 4.0 - 高効率・低コスト太陽光発電がもたらす次世代再生可能エネルギーシステム-	2017/03
202	綾 他	パナソニック(株)	Thin Concentrator Photovoltaic Module with Micro-Solar Cells which are mounted by Self-alignment method using Surface tension of melted solder	The 13th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-13)	2017/05
203	野中翔一郎、古川昭雄、牧田紀久夫、水野英範、菅谷武芳、仁木栄	東京理科大学、産業技術総合研究所	スマートスタック構造における接合界面の詳細分析II	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
204	望月透、菅谷武芳、太野垣健、牧田紀久夫、大島隆治、松原浩司、岡野好伸	東京都市大学、産業技術総合研究所	スマートスタック多接合太陽電池に向けたMBEによるInGaAsPセカンドセルの作製	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
205	五島敬史郎、犬飼圭裕、津田紀生、菅谷武芳	愛知工業大学、産業技術総合研究所	歪み補償を用いない多重積層半導体量子ドットの電子構造	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
206	山田昇、牧田紀久夫、馬場将亮、平井大貴、菅谷武芳	長岡技術科学大学、産業技術総合研究所	Fabrication of low concentration multi-junction solar cells with smart stacking and areal current matching technique	31st European Photovoltaics Solar Energy Conference	2015/09
207	川北史朗、今泉充、舛分宏昌、牧田紀久夫、菅谷武芳、西永慈郎、佐藤真一郎、大島武	JAXSA、産業技術総合研究所、量子科学技術研究開発機構	Radiation Resistance in High-Efficiency III-V/CIGS Mechanical Stacking Solar Cells	31st European Photovoltaics Solar Energy Conference	2015/09
208	菅谷武芳	産業技術総合研究所	III-V 族化合物半導体を用いた革新的太陽電池開発の進展	学振光エレクトロニクス第130委員会	2015/10
209	中村徹哉、今泉充、佐藤真一郎、菅谷武芳、望月透、岡野好伸、大島武	JAXSA、産業技術総合研究所、東京都市大学、量子科学技術研究開発機構	Measurement of Ion Beam Induced Current in Quantum Dot Solar Cells	The 11th Inter-national Workshop on Radiation Effects on Semiconductor	2015/11

				Devices for Space Applications	
210	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、齋均、野中翔一郎、古川昭雄、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京理科大学	Development of Smart Stacking Technology for Multi-junction Solar Cells	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11
211	馬場将亮、牧田紀久夫、菅谷武芳、山田昇	長岡技術科学大学、産業技術総合研究所	Light management for mechanically stacked dual-junction solar cells with areal current matching techniques	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11
212	菅谷武芳、望月透、太野垣健、牧田紀久夫、大島隆治、松原浩司、岡野好伸	産業技術総合研究所、東京都市大学	Fabrication of InGaAsP (1.65eV) second cells for smart stack multijunction solar cells grown using solid-source MBE	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11
213	後藤和泰、大島隆治、坂田功、松原浩司、菅谷武芳、近藤道雄	東京工業大学、産業技術総合研究所	Studies on highly stacked Ge/Si quantum dot heterojunction solar cells grown with up to 100 stacked layers	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11
214	野中翔一郎、古川昭雄、牧田紀久夫、水野英範、菅谷武芳、仁木栄	東京理科大学、産業技術総合研究所	スマートスタック技術による多接合太陽電池の接合界面の評価	電子情報通信学会研究会	2015/11
215	菅谷武芳、牧田紀久夫、水野英範、望月透、大島隆治、西永慈郎、岡野好伸、松原浩司	産業技術総合研究所、東京都市大学	Smart stacked heterogeneous multijunction solar cells fabricated by advanced bonding using metal nanoparticle arrays	The 2015 International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology	2015/12
216	太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究所	Carrier dynamics in type-II quantum dots for wide-bandgap intermediate-band solar cells	SPIE Photonics West 2016 (招待講演)	2016/02
217	菅谷武芳、牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健	産業技術総合研究所	スマートスタック異種多接合太陽電池	第63会応用物理学会春季学術講演会(招待講演)	2016/03
218	大島隆治、牧田紀久夫、太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究所	逆積み 1.0 eV 帯 GaInAsP 薄膜太陽電池における暗電流の低減	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
219	水野英範、牧田紀久夫、菅谷武芳、太野垣健、望月敏光、高遠秀尚	産業技術総合研究所	ボトムに単結晶 Si を用いたスマートスタック多接合セル	第63会応用物理学会春季学術講演会	2016/03
220	水野英範、牧田紀久夫、菅谷武芳、大島隆治、高遠秀尚、松原浩司、仁木栄	産業技術総合研究所	スマートスタック技術:金属ナノ粒子配列を用いた高効率多接合太陽電池の開発	日本化学会 第96 春季年会	2016/03
221	馬場将亮、牧田紀久夫、菅谷武芳、山田昇	長岡科学技術大学、産業技術総合研究所	スマートスタック/面積電流整合/低倍率集光を組み合わせた多接合太陽電池 (SMAC モジュール) の設計試作	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05
222	菅谷武芳、望月透、長門優喜、太野垣健、牧田紀久夫、大島隆治、松原浩司、岡野好伸	東京都市大学、産業技術総合研究所	MBE による InGaAsP(1.65eV)太陽電池とスマートスタック用3接合トップセルの試作	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05

223	太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	A Proposal for Wide-Bandgap Intermediate-Band Solar Cells Using Type-II InP/InGaP Quantum Dots	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
224	水野英範、牧田紀久夫、太野垣健、望月敏光、高遠秀尚、菅谷武芳、H. Mehrvarz、M. Green、A. Ho-Baillie	産業技術総合研究所、オーストラリアニューサウスウェールズ大学	A "Smart Stack" Triple-Junction Cell Consisting of InGaP/GaAs and Crystalline Si	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
225	大島隆治、牧田紀久夫、太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究所	Enhanced open circuit voltage in inverted thin film solar cells lattice-matched to InP	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
226	川北史朗、今泉充、牧田紀久夫、菅谷武芳、西永滋郎、柴田肇、佐藤真一郎、大島武	JAXA、産業技術総合研究所、量子科学技術研究開発機構	High Efficiency and Radiation Resistant InGaP/GaAs//CIGS Stacked Solar Cells for Space Applications	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
227	後藤和泰、大島隆治、太野垣健、菅谷武芳、松原浩司、近藤道雄	東京工業大学、産業技術総合研究所	Fabrication of strain-compensated heterojunction Ge/Si1-xCx quantum dots solar cells	32nd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2016/06
228	水野英範、牧田紀久夫、太野垣健、望月敏光、木田康博、菅谷武芳、高遠秀尚	産業技術総合研究所	Al-Back Surface Field-Type Crystalline Si-Based Smart Stack Triple-Junction (InGaP/GaAs/Si) Cells	32nd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2016/06
229	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、西永滋郎、柴田肇、馬場将亮、山田昇、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所、長岡科学技術大学	Low Concentration GaAs/CuInGaSe and GaAs/Si Multijunction Solar Cells with Smart Stack Technology	32nd European Photovoltaics Solar Energy Conference	2016/06
230	菅谷武芳、太野垣健	産業技術総合研究所	Growth of Type-II InP Quantum Dots in InGaP Matrix by Using Solid-Source Molecular Beam Epitaxy for Intermediate-Band Solar Cells	28th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials	2016/06
231	大島隆治、牧田紀久夫、太野垣健、菅谷武芳	産業技術総合研究所	Enhancement of open circuit voltage in InGaAsP- inverted thin-film solar cells grown by solid-source molecular beam epitaxy	19th international Conference on Molecular Beam Epitaxy	2016/09
232	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所	スマートスタック技術を用いた低倍集光異種接合型多接合太陽電池の検討	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
233	太野垣健、牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、菅谷武芳	産業技術総合研究所	スマートスタック InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs4接合太陽電池の光学特性評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
234	長門優喜、菅谷武芳、大島隆治、岡野好伸	東京都市大学、産業技術総合研究所	MBE法を用いたInGaP太陽電池における基板オフ角度の検討	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
235	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	InP/InGaP 量子ドット太陽電池の光学特性評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09

236	菅谷武芳、望月透、長門優喜、太野垣健、牧田紀久夫、大島 隆治、松原浩司、岡野好伸	産業技術総合研究所、東京都市大学	Growth of InGaAsP (1.65eV) Solar Cells and its Application to 3-Junction Top Cells for Smart Stack Multijunction Solar Cells	32nd North American Conference on Molecular Beam Epitaxy	2016/09
237	相原健人、太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Demonstration of InP/InGaP quantum dot solar cells	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials	2016/09
238	馬場将亮、牧田紀久夫、菅谷武芳、山田昇	長岡科学技術大学、産業技術総合研究所	Relative Properties of SMAC solar cell	11th Asian Thermophysical Properties Conference	2016/10
239	牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、太野垣健、馬場将亮、山田昇、高遠秀尚、菅谷武芳	産業技術総合研究所、長岡科学技術大学	Low Concentration InGaP/GaAs/Si 3-Junction Solar Cells with Smart Stack Technology	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
240	太野垣健、相原健人 長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	Wide-bandgap InGaP-based InP quantum dot solar cells for intermediate-band solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
241	大島隆治、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	The role of substrate miscut on the properties of InGaP solar cells grown on GaAs(001) by solid source molecular beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
242	五島敬史郎、津田紀生、犬飼圭裕、小森和弘、菅谷武芳	愛知工業大学、産業技術総合研究所	Intermediate band in multi stacked InGaAs quantum dots without strain compensation techniques	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
243	太野垣健、牧田紀久夫、水野英範、大島隆治、菅谷武芳	産業技術総合研究所	Optical characterisation of smart stack four junction InGaP/GaAs//InGaAsP/InGaAs solar cells	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
244	相原健人 太野垣健、長門優喜、岡野好伸、菅谷武芳	産業技術総合研究所、東京都市大学	InP/InGaP 量子ドット太陽電池における開放電圧の温度依存性	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
245	水野英範、牧田紀久夫、太野垣健、菅谷武芳、高遠秀尚	産業技術総合研究所	Progress of Smart Stack Technology towards Practical Applications	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
246	大島隆治、牧田紀久夫、生方映徳、菅谷武芳	産業技術総合研究所、大陽日酸株	Fabrication of p-i-n GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
247	佐藤真一郎、菅谷武芳、中村徹也、大島武	量子科学技術研究開発機構、産業技術総合研究所、JAXA	Defect Characterization of III-V Quantum Structure Solar Cells Using Photo-Induced Current Transient Spectroscopy	IEEE photovoltaics specialist conference 44	2017/06
248	大島隆治、牧田紀久夫、生方映徳、菅谷武芳	産業技術総合研究所、大陽日酸株	Characterization of GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy in a horizontal reactor	IEEE photovoltaics specialist conference 44	2017/06
249	馬場将亮、牧田紀久夫、水野英範、高遠秀尚、菅谷武芳、山田昇	長岡科学技術大学、産業技術総合研究所	Optical design for 2-terminal III-V/Si SMAC module	IEEE photovoltaics specialist conference 44	2017/06

250	荒木建次、山口真史	豊田工業大学	CPV を応用した EV ステーションの動作解析	豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター第6回シンポジウム、愛知県名古屋市	2015/09
251	荒木建次、山口真史、太田靖之、西岡賢祐	豊田工業大学	車載用無追尾集光高効率ソーラーパネル	豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター第6回シンポジウム、愛知県名古屋市	2015/09
252	Kan Hua Lee, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Criteria of 1-eV InGaAsN sub-junction to achieve over 45% multi-junction solar cells	豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター第6回シンポジウム、愛知県名古屋市	2015/09
253	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) Present and Future of R&D for Solar Cells	The 6th International Symposium of Advanced Energy Science~Towards the Realization of Zero-Emission Energy~, Kyoto, Japan	2015/09
254	M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki, N. Kojima	豊田工業大学	(招待講演) Recent Results for Concentrator Photovoltaics in Japan	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2015), Sapporo, Japan	2015/09
255	M. Yamaguchi, Kan Hua Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工業大学	(招待講演) Potential and Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	228th ECS Meeting, Phoenix, AZ, USA	2015/10
256	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) Present and future of III-V/Si tandem solar cells	PV Asia Scientific Conference 2015, Singapore	2015/10
257	Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) Present And Future of III-V Compound Multi-Junction And Concentrator Solar Cells	The 20th International Conference on Semiconductor Photocatalysis & Solar Energy Conversion, San Diego, CA, USA	2015/11
258	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Possibility of compact stand-alone power system using CPV and Tracking PV hybrid.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
259	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Analysis of Impact to Optical Environment of the Land by Flat-plate and Tracking PV Panels Using METPV-11 Database.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
260	S. Naito, K. Araki, K-H. Lee, K. Ikeda, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Optimization of ARC for Si concentrator cells used to wide aperture reflector concentrators	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
261	O. Elleuch, Li Wang, H. Kowaki, Kan-Hua Lee, K. Ikeda, T. Aihara, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Study of the recombination center in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11

262	M. Yamaguchi, Kan Hua Lee, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工業大学	(招待講演) Potential and Recent Results of High-Efficiency III-V/Si Tandem Solar Cells	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
263	Kan-Hua Lee, K. Ikeda, O. Elleuch, Li Wang, K. Araki, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Criteria of 1-eV InGaAsN Solar Cell for Achieving over 45% Multi-Junction Solar Cells	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
264	Li Wang, H. Nakamura, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Optical properties of layered (In _x Ga _{1-x}) ₂ Se ₃ buffer material deposited on GaAs(111) substrate for III-V/Silicon solar cell	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
265	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(プレナリー) Present and Future of Super-High Efficiency III-V Multi-junction, Concentrator Solar Cells and Modules	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
266	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Optimization of Land Use for Multi-trackers System by Given Geometrical Site Conditions.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
267	K. Araki, H. Nagai, K. Ikeda, K-H Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Design and Development of Dome-shaped Fresnel Lens.	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
268	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Katsumata	豊田工業大学	(招待講演) Overview of Photovoltaic R&D in Japan	25th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-25), Busan, Korea	2015/11
269	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) Present and Future of R&D for Solar Cells	The Second International Symposium of Integrated Research and Education Center for Energy Conversion, Storage, Saving, and Transport Technologies, Fukuoka, Japan	2015/11
270	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) Defect Engineering for Super High Efficiency III-V Compound Multi Junction Solar Cells	2015 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, MA, USA	2015/12
271	山口真史	豊田工業大学	(招待講演) 太陽電池の研究開発の現状と将来展望	第23回次世代自動車公開シンポジウム「太陽光エネルギー利用の最新技術」, 名古屋大学東山キャンパス	2016/01
272	Y. Ohshita, H. Suzuki, I. Kamiya, K. Ikeda, T. Sasaki, M. Takahashi	豊田工業大学	Real time study of strain relaxation in lattice mismatched InGaAs/GaAs for future tandem III-V solar cells	EMN Meeting on Photovoltaics 2016, Hong Kong, China	2016/01
273	山口真史	豊田工業大学	(特別講演) 太陽電池の研究開発動向と将来展望	新学術領域研究「人工光合成による太陽光エネルギーの物質変換: 実用化に向けての異分野融合」,	2016/01

				東京理科大学葛飾キャンパス	
274	O. Elleuch, Li Wang, Kan-Hua Lee, T. Aihara, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	A Double acceptor in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	CREST「太陽光を利用した独自のクリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域平成27年度第4回公開シンポジウム/豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター第7回シンポジウム、愛知県名古屋	2016/02
275	Kan-Hua Lee, K. Araki, Li Wang, N. Kojima, Y. Ohshita M. Yamaguchi	豊田工業大学	Assessing Material Qualities and Efficiency Limits of III-V on Silicon Solar Cells Using Radiative Efficiency	12th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-12), Freiburg, Germany	2016/04
276	K. Araki, H. Nagai, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Study on tolerance control for optical alignment of CPV modules using a Monte Carlo simulation	12th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-12), Freiburg, Germany	2016/04
277	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Analysis of impact to optical environment of the land by CPV	12th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-12), Freiburg, Germany	2016/04
278	K. Araki, H. Nagai, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Possibility of solar station to EV	12th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-12), Freiburg, Germany	2016/04
279	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Which is optimum tracker allocation, checkerboard or rectangular grid?	12th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-12), Freiburg, Germany	2016/04
280	K. Araki, Y. Ota, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Intermittent tracking (30 minutes interval) using a wide acceptance CPV module	12th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-12), Freiburg, Germany	2016/04
281	K. Araki, Y. Ota, K. Ikeda, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Possibility of static low concentrator PV optimized for vehicle installation	12th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-12), Freiburg, Germany	2016/04
282	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史, 太田靖之, 西岡賢祐	豊田工業大学	車載用無追尾低倍集光パネルの研究開発	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05

283	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史, 太田靖之, 西岡賢祐	豊田工業大学	高倍集光を30分毎の間歇追尾で動作させるのは可能か?	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05
284	荒木建次, Kan-Hua Lee, 山口真史	豊田工業大学	複数追尾架台の最適配置問題	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05
285	Kan-Hua Lee, K. Araki, Li Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Assessing Material Qualities and Efficiency Limits of III-V on Silicon Cells Using External Radiative Efficiency	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05
286	Li Wang, O. Elleuch, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	In-diffusion of Nitrogen in GaAsN films after the soft-annealing process	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05
287	O. Elleuch, Li Wang, Kan-Hua Lee, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Acceptors related to N-H in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05
288	山口真史, 高本達也, 峯元高志, 山本憲治	豊田工業大学	タンデム太陽電池(パネルディスカッション)	第13回次世代の太陽光発電シンポジウム(学振175委員会)新潟県長岡市	2016/05
289	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) Science and Technology of High Efficiency Solar Cells and Materials	229th ECS Meeting, San Diego, USA	2016/05
290	Kan-Hua Lee, K. Nakamura, T. Kamioka, N. Kojima, Hyunju Lee, Li Wang, K. Araki, Y. Ohshita, A. Ogura, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Fabrication and performance analysis of a mechanical stack InGaP/GaAs//Si solar cell	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, OR, USA	2016/06
291	T. Masuda, K. Araki, K. Okumura, S. Urabe, Y. Kudo, K. Kimura, T. Nakado, A. Satou, M. Yamaguchi	豊田工業大学	(ポスターアワード受賞) Next environment-friendly cars: Application of solar power as automobile energy source	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, OR, USA	2016/06
292	Kan-Hua Lee, K. Araki, Li Wang, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Assessing material qualities and efficiency limits of III-V on silicon solar cells using external radiative efficiency	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, OR, USA	2016/06
293	K. Ikeda, K. Araki, Y. Ota, Kan-Hua Lee, K. Nishihoka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	An innovative design approach for static concentrators with large aperture area suitable to automobile application	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, OR, USA	2016/06
294	K. Araki, Y. Ota, K. Ikeda, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Possibility of CPV for automobile energy source	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, OR, USA	2016/06
295	K. Araki, R. Herrero, I. Anton, G. Sala, H. Nagai, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Why are acceptance angle of Pm and Isc different in spite of uniform illumination onto concentrator solar cells?	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (43rd IEEE PVSC), Portland, OR, USA	2016/06

296	O. Elleuch, Li Wang, Kan-Hua Lee, K. Ikeda, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	N-H related defect playing the role of acceptor in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18), Nagoya, Japan	2016/08
297	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) Radiation Effects on Space Solar Cells and Materials	International Symposium on Radiation Effects of Semiconductor Optoelectronic Materials and Devices (OPTO-RAD 2016), Urumqi, China	2016/08
298	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) Recent Activities of III-V/Si Tandem Solar Cells	20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-20), Halle, Germany	2016/09
299	M. Yamaguchi, Kan-Hua Lee, K. Araki, K. Nakamura, N. Kojima, Y. Ohshita	豊田工業大学	Efficiency Potential of Future Generation Solar Cells	PRIME 2016, Honolulu, HI, USA	2016/10
300	K. Araki, Y. Ota, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Is it possible to track the 100 x CPV module with 30 minutes intervals?	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
301	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	A 2-D Monte Carlo Simulation for Analysis of the Acceptance Angle of CPV	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
302	K. Araki, K. Nakamura, Kan-Hua Lee, T. Kamioka, S. Naito, M. Morimura, M. A. Bareque, M. Aoki, T. Okumura, Hyunju Lee, N. Maeda, Li Wang, Y. Hayashi, Yu-Cian Wang, N. Kojima, A. Ogura, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Beyond the limit of Si solar cells - III-V on Si cell and its PCSC module concept	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
303	K. Araki, Y. Ota, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	(ポスターアワード受賞) Design optimization on static low concentrator PVs installed to various non-optimized locations including the car-roof	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
304	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Hypothesis: Optimization of the Bandgaps Combination at the Specific Site, Considering Ever-changing Spectrum, May Be Determined by the Matching Condition to the Sun Height at the Culmination on the Winter Solstice	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
305	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) R&D activities of super high efficiency III-V multi-junction and concentrator solar cells in Japan	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10

306	Yu-Cian Wang, H. Suzuki, Y. Yokoyama, T. Ikari, A. Fukuyama, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	(ポスターアワード受賞) Selective-area growth of GaAs on patterned Si substrates by using chemical beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
307	O. Elleuch, H. Kowaki, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Study of recombination center in GaAsN grown by chemical beam epitaxy	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
308	R. Katayama, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	N incorporation at the surface step in CBE grown GaAsN film on GaAs(111) vicinal substrate	26th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore	2016/10
309	O. Elleuch, H. Kowaki, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Recombination Center in GaAsN Grown by Chemical Beam Epitaxy	豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター第8回シンポジウム、愛知県名古屋市	2016/11
310	M. Yamaguchi	豊田工業大学	(招待講演) High-efficiency III-V triple junction solar cells and silicon solar cells	7th Korea Si PV Workshop, Busan, Korea	2016/11
311	山口真史	豊田工業大学	(招待講演) 次世代太陽電池の高効率化の可能性	平成28年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会、福島県郡山市	2016/12
312	K. Araki, K. Nakamura, Kan-Hua Lee, T. Kamioka, S. Naito, M. Morimura, M. A. Bareque, M. Aoki, T. Okumura, Hyunju Lee, N. Maeda, Li Wang, Y. Hayashi, Yu-Cian Wang, N. Kojima, A. Ogura, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	>28% III-V/Si ハイブリッドソーラーパネル	豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター第9回シンポジウム、愛知県名古屋市	2017/01
313	Yu-Cian Wang, H. Suzuki, Y. Yokoyama, T. Ikari, A. Fukuyama, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Selective-area growth of GaAs on patterned Si substrates by using chemical beam epitaxy	豊田工業大学スマートエネルギー技術研究センター第9回シンポジウム、愛知県名古屋市	2017/01
314	山口真史, Kan-Hua Lee, 荒木建次, 小島信晃	豊田工業大学	次世代太陽電池の高効率化に関する考察	電子情報通信学会「電子デバイス研究会/シリコン材料・デバイス研究会共催」北海道札幌市	2017/02
315	K. Araki	豊田工業大学	(プレナリー) The New and Third Wave of CPV Not Relying on Perfection of Trackers	Global Photovoltaic Conference 2017 (GPVC2017), Gwangju, Korea	2017/03
316	M. Yamaguchi, H. Yamada, Y. Katsumata	豊田工業大学	(招待講演) Efficiency Potential and Recent Activities of High Efficiency and Si Tandem Solar Cells	2017 MRS Spring Meeting & Exhibit, Phoenix Convention Center, Phoenix, AZ, USA	2017/04
317	K. Araki, Y. Ota, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Outdoor Validation of the 30 Minutes Intermittent Tracking of 100 x CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-13), Ottawa, Canada	2017/05

318	K. Araki, Y. Ota, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Design of the Partial Concentrator Lens for III-V on Si Static Low Concentrators	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-13), Ottawa, Canada	2017/05
319	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Impact of the atmospheric conditions to the bandgap engineering of multijunction cells for optimization of the annual energy yield of CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-13), Ottawa, Canada	2017/05
320	K. Araki, Y. Ota, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Is It CPV? Yes, But It Is a Partial CPV	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-13), Ottawa, Canada	2017/05
321	Kan-Hua Lee, K. Araki, Y. Ota, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Quantifying the Potential of III-V/Si Partial Concentrator by a Statistical Approach	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-13), Ottawa, Canada	2017/05
322	Kan-Hua Lee, K. Araki, O. Elleuch, N. Kojima, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Pypvcell –“LEGO” of CPV Solar Cell Modeling in Python Language	13th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-13), Ottawa, Canada	2017/05
323	M. Yamaguchi, Kan-Hua Lee, K. Araki, N. Kojima	豊田工業大学	Efficiency Potential of Future Generation Solar Cells	E-MRS 2017 Spring Meeting, Strasbourg, France	2017/05
324	Yu-Cian Wang, K. Araki, K. Nakamura, Kan-Hua Lee, T. Kamioka, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Enhancement of Si Photovoltaic Module by Introducing III-V/Si Hybrid Configurations and Cost Evaluations under Various Cost Ratios of III-V/Si Photovoltaics	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC), Washington DC, USA	2017/06
325	K. Araki, K. Nakamura, Yu-Cian Wang, N. Kojima, A. Ogura, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Design Arithmetic of the Lateral III-V / Si Hybrid Module	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC), Washington DC, USA	2017/06
326	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Generalized Numerical Design of Axially-asymmetrical and Grid- arranged Static CPV array for Maximizing Annual Energy Generation	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC), Washington DC, USA	2017/06
327	D. Sato, N. Yamada, Kan-Hua Lee, K. Araki, M. Yamaguchi	豊田工業大学	(ポスターアワード受賞) Design and Evaluation of Partial Concentration III-V/Si Module with Enhanced Diffuse Sunlight Transmission	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC), Washington DC, USA	2017/06
328	K. Araki, Kan-Hua Lee, K. Nishioka, M. Yamaguchi	豊田工業大学	CPV Technologies Not Relying on Perfection of Trackers	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC), Washington DC, USA	2017/06
329	K. Araki, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Proposal of the Bandgap Design Using the Sun Height of the Culmination on the Winter Solstice	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC), Washington DC, USA	2017/06
330	Kan-Hua Lee, K. Araki, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Analyzing the Cost Reduction Potential of III-V/Si Hybrid Concentrator Photovoltaic Systems	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC), Washington DC, USA	2017/06

331	Kan-Hua Lee, K. Araki, O. Elleuch, N. Kojima, M. Yamaguchi	豊田工業大学	Pyvpcell: An Open-Source Solar Cell Modeling Library in Python	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (44th IEEE PVSC), Washington DC, USA	2017/06
332	S. Hisamoto, et al.	大阪市立大学	Effects of Ar beam irradiation on Si-based Schottky contacts	IEEE 2016 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai	2016/06
333	重川 直輝	大阪市立大学	InGaP/GaAs/Si 3 接合太陽電池における III-V/Si サブセル間カップリング特性	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
334	久本 昇平	大阪市立大学	Si ショットキー接合に対する Ar 原子ビーム照射時間の影響と熱処理による回復	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
335	小川 智輝	大阪市立大学	Si 基板/ITO 薄膜表面活性化接合の形成	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
336	尹 翔至	大阪市立大学	GaAs 薄層/Si 接合の硬 X 線光電子分光 - バンドオフセットの評価	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
337	山條 翔二	大阪市立大学	GaAs 薄層/Si 接合の硬 X 線光電子分光 - 電子状態への熱処理効果	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
338	N. Shigekawa, et al.	Osaka City Univ.	Electrical Characterisation of Coupling Properties in InGaP/GaAs/Si Triple-Junction Cells	PVSEC-26	2016/10
339	重川 直輝	大阪市立大学	InGaP/GaAs/Si 3 接合セルにおける Bonding 界面抵抗評価	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
340	原 智也	大阪市立大学	表面活性化ボンディング法による GaAs/ITO/Si 接合のアニール温度依存性	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
341	N. Shigekawa, et al.	Osaka City Univ.	Surface-activated Bonding of III-V Compound Semiconductors and Si for Fabricating Hybrid Tandem Solar Cells	2017 International Conference on Electronics Packaging (ICEP 2017)	2017/04
342	N. Shigekawa, et al.	Osaka City Univ.	Impacts of Bonding-Layer Resistance of Si Bottom Cells on Interface Resistance In InGaP/GaAs/Si Hybrid Triple-Junction Cells	2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration	2017/05
343	J. Liang, et al.	Osaka City Univ.	Electrical Conduction of Si/ITO/Si Junctions Fabricated by Surface Activated Bonding	2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration	2017/05
344	N. Shigekawa, et al.	Osaka City Univ.	InGaP/GaAs/ITO/Si Hybrid Triple-Junction Cells with GaAs/ITO Bonding Interfaces	2017 IEEE PVSC-44	2017/06

345	N. Shigekawa, et al.	Osaka City Univ.	Measurements of Potentials at Tap Contacts and Estimation of Resistance across Bonding Interfaces in InGaP/GaAs/Si Hybrid Triple-Junction Cells	2017 IEEE PVSC-44	2017/06
346	草場彰、寒川義裕、柿本浩一	九州大学	InN 加圧 MOVPE 成長における成長形と異相混入: 表面エネルギーの理論解析	第7回窒化物半導体結晶成長講演会	2015/05
347	A. Kusaba, Y. Kangawa, S. Krukowski, T. Kimura, T. Tanikawa, R. Katayama, T. Matsuoka, K. Kakimoto	九州大学	Surface Energy and Facet Formation in InN films grown by Pressurized-Reactor MOVPE	34th Electronic Materials Symposium (EMS-34)	2015/07
348	寒川義裕	九州大学	【招待講演】窒化物半導体結晶成長用基板表面の第一原理計算による考察	日本学術振興会「ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会」第94回研究会	2015/07
349	A. Kusaba, Y. Kangawa, S. Krukowski, K. Kakimoto	九州大学	Relationship between stability of facet surfaces and incorporation of zinc-blende phase in InN during pressurized reactor MOVPE: A theoretical approach	Fifth European Conference on Crystal Growth (ECCG-5)	2015/09
350	寒川義裕、柿本浩一	九州大学	【招待講演】InN 加圧 MOVPE におけるファセット面制御によるポリタイプ制御	第45回結晶成長国内会議	2015/10
351	A. Kusaba, Y. Kangawa, Y. Honda, H. Amano, K. Kakimoto	九州大学	Ab initio-based approach to surface reconstruction on InN(0001) during induced-pressure MOVPE	The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6)	2015/11
352	寒川義裕	九州大学	【招待講演】半導体材料の結晶成長～表面反応に関して第一原理計算と熱力学解析の視点から～	第29期CAMPフォーラム本例会	2016/01
353	H. Valencia, Y. Kangawa, K. Kakimoto	九州大学	MOCDV and CBE of GaAs _{1-x} N _x modeled by ab initio stabilities of (100) surfaces under As ₂ , H ₂ , and N ₂	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE18)	2016/08
354	Y. Kangawa	九州大学	【招待講演】First Principles Based Simulation for Compound Semiconductor Growth Processes	2016 International Conference on Solid State devices and Materials (SSDM 2016) Short Course	2016/09
355	Y. Kangawa	九州大学	【招待講演】Ab Initio-Based Approach to Crystal Growth of Nitride Semiconductors: Contribution of Growth Orientation and Surface Reconstruction	International Workshop on Nitride Semiconductors 2016 (IWN 2016)	2016/10
356	生方 映徳 他	大陽日酸株	Fabrication of p-i-n GaAs solar cells grown by hydride vapor phase epitaxy	2017 年春季応用物理学会	2017/03
357	生方 映徳 他	大陽日酸株	Extremely high growth rate MOVPE: GaAs growth for low-cost PV application	2017 年春季応用物理学会	2017/03

358	生方 映徳 他	太陽日酸株	Extremely high-speed GaAs growth by MOVPE for low cost PV application	太陽電池専門国際会議 (PVSC2017)	2017/06
360	N. Akimoto, S. Uchida and K. Yamaguchi	University of Electro-Communications	Photo-Conductance Properties of Ultrahigh-Density InAs/GaAsSb Quantum Dots	The 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, A3-731	2015/06
361	山口浩一	電気通信大学	(依頼講演)「量子ドット利用デバイス技術動向	平成 27 年度 JEITA 先端電子材料・デバイス技術フォーラム～IT・エレクトロニクスが支える将来～	2015/07
362	山口浩一	電気通信大学	(招待講演)「自己形成量子ドットの作製技術とデバイス応用	第 49 回基礎科学部会セミナー「低次元形態セラミックスの機能と構造制御」, 日本セラミックス協会	2015/07
363	K. Yamaguchi	University of Electro-Communications	(Invited) Fabrication of Ultrahigh-Density InAs Quantum Dot Layers and Their In-Plane Carrier Transport Properties	The 5th Int. Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures, Hsinchu, Taiwan, I-12.	2015/09
364	秋元直己, 山口浩一	電気通信大学	面内高密度 InAs/GaAsSb 量子ドット層における光励起キャリア効果	2015 年(平成 27 年)第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集 15p-PB1-3 (2015) 12-299	2015/09
365	鮫島一樹, 山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs 層上の面内超高密度 InAs 量子ドットの発光特性	2015 年(平成 27 年)第 76 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集 14p-2W-3 (2015)13-171	2015/09
366	K. Yamaguchi, K. Sameshima, K. Sakamoto and K. Nii	電気通信大学	(Invited) Self-Formation of Ultrahigh-Density InAs Quantum Dots for Intermediate-Band Solar Cell Applications	SPIE Photonics West 2016, San Francisco, 9743-44	2016/02
367	秋元直己, 仁井皓大, 南裕太, 遠藤航介, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層を導入した太陽電池の熱処理効果	2016 年(平成 28 年)第 63 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 20a-S011-5 (2016)11-144	2016/03
368	南裕太, 秋元直己, 鮫島一樹, 山口浩一	電気通信大学	面内超高密度 InAs 量子ドット層における熱処理効果	2016 年(平成 28 年)第 63 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 20p-P16-8 (2016)12-184	2016/03
369	及川信吾, 鮫島一樹, 山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs(001)上の InAs 成長における 3 次元核形成機構	2016 年(平成 28 年)第 63 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 21a-H112-5 (2016)12-222	2016/03
370	K. Yamaguchi	電気通信大学	(Invited) Fabrication of Ultrahigh-Density GaAsSb/InAsSb Quantum Dots and Their Photovoltaic Applications	Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR) Incheon	2016/06

371	仁井皓大, 南裕大, 坂本克好, 曾我部東馬, 山口浩一, 岡田至崇	電気通信大学	InAs/GaAs 量子ドット太陽電池におけるホットキャリア輸送ダイナミクス	2016年(平成28年)第77回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集 14p-P21-27	2016/09
372	及川信吾, 馬飼野彰宜, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	InAsSb/GaAs(001)上へのInAs ₃ 次元島成長とその発光特性	2016年(平成28年)第77回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集 15p-P11-4	2016/09
373	T. Sogabe, K. Nii, Y. Minami, K. Sakamoto, K. Yamaguchi and T. Okada	電気通信大学	Investigation of Hot Carrier Transportation Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cell	The 26th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), Singapore, 1.2.3f	2016/10
374	K. Nii, Y. Minami, K. Sakamoto, T. Sogabe and K. Yamaguchi	電気通信大学	Photoluminescence and Photovoltaic Properties of Ultrahigh Density InAs Quantum Dots on InAsSb/GaAs(001)	The 26th Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26), (Oct. 24-28, 2016), Singapore, 1_1-0017	2016/10
375	山口浩一	電気通信大学	量子ドットデバイスと最先端太陽電池開発	第106回研究開発セミナー(電通大)「クリーンテック・水素社会への挑戦」講演集 pp.5-16.	2016/10
376	杉山涼, 秋元直己, 曾我部東馬, 山口浩一	電気通信大学	GaAsSb/GaAs(001)上の高密度InAs量子ドット層の発光特性	2017年(平成29年)第64回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 17p-P2-13	2017/03
377	馬飼野彰宜, 及川信吾, 坂本克好, 山口浩一	電気通信大学	Sb照射熱処理によるInAs量子ドット層の構造変化	2017年(平成29年)第64回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 17p-P2-12	2017/03
378	山口浩一	電気通信大学	(招待講演)量子ドットのデバイス応用	太陽光発電プロジェクト講演会(宮崎大学)	2017/03
379	S. Oikawa, A. Makaino, T. Sogabe and K. Yamaguchi	電気通信大学	Self-Formation of In-Plane Ultrahigh-Density InAs Quantum Dots and Their Photoluminescence Properties	Compound Semiconductor Week 2017 (CSW-2017), Berlin, P2-22	2017/05
380	R. Sugiyama, N. Akimoto, T. Sogabe and K. Yamaguchi	電気通信大学	Photoluminescence Properties of In-Plane Ultrahigh-Density InAs Quantum Dots on GaAsSb/GaAs(001) for Solar Cell Applications	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, A25	2017/06
381	T. Kada, et al.	神戸大学	Two-Step Photocarrier Generation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Intermediate Band Solar Cell	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
382	T. Tanibuchi, et al.	神戸大学	Ultrafast Photocarrier Transport Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cell	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
383	K. Toprasertpong, et al.	神戸大学	Comparison of Electron and Hole Mobilities in Multiple Quantum Well Solar Cells Using a Time-of-Flight Technique	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06

384	S. Asahi, et al.	神戸大学	Saturable Two-Step Photocurrent Generation in Intermediate-Band Solar Cells Including InAs Quantum Dots Embedded in Al _{0.3} Ga _{0.7} As/GaAs Quantum Wells	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
385	T. Thomas, et al.	神戸大学	Time-Resolved Photoluminescence of MBE-Grown InV GaAsSbN for Multi-Junction Solar Cells	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
386	小川泰弘 他	神戸大学	急速熱アニールによる GaAs 中のエピタキシャル窒素シートにおける 2 次元物性の制御	日本材料学会 半導体エレクトロニクス部門委員会 平成 27 年度第 1 回研究会	2015/07
387	Y. Ogawa, et al.	神戸大学	Annealing Effects on the Delocalized Electronic States of Epitaxial Two-Dimensional Nitrogen Atomic Sheet in GaAs	第 34 回電子材料シンポジウム	2015/07
388	S. Asahi, et al.	神戸大学	Excitation-Intensity Dependence of Two-Step Photoexcitation in InAs/GaAs/Al _{0.7} Ga _{0.3} As Intermediate-Band Solar Cells	第 34 回電子材料シンポジウム	2015/07
389	T. Tanibuchi, et al.	神戸大学	Carrier Time-of-Flight Spectroscopy with Infrared Assistance for Escaping Process in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells	第 34 回電子材料シンポジウム	2015/07
390	D. Watanabe, et al.	神戸大学	Hot-Carrier Distribution in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices and Its Application to Solar Cells	第 34 回電子材料シンポジウム	2015/07
391	Y. Harada, et al.	神戸大学	Enhancement of Two Dimensionality in Epitaxial Nitrogen Atomic Sheet in GaAs by Rapid Thermal Annealing	21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures	2015/07
392	T. Kaizu, et al.	神戸大学	Broadband Control of Emission Wavelength of InAs/GaAs Quantum Dots by Growth Temperature GaAs Capping Layer	21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems/17th International Conference on Modulated Semiconductor Structures	2015/07
393	Y. Harada, et al.	神戸大学	Epitaxial Nitrogen Atomic Sheet in GaAs Grown by Nitrogen δ -Doping Technique	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures	2015/09
394	T. Kita	神戸大学	Growth and Characterization of InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices for Photovoltaics	5th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures	2015/09

395	T. Kita	神戸大学	Carrier Dynamics in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices for Photovoltaics	High-efficiency materials for photovoltaics	2015/09
396	谷渕泰三 他	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子太陽電池における超高速時間分解キャリア走行過程	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
397	海津利行 他	神戸大学	GaAs キャップ層成長温度による InAs/GaAs 量子ドットのサイズ二項分布変化	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
398	朝日重雄 他	神戸大学	Dot-in-well 中間バンド型太陽電池のバイアス依存性	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
399	渡部大樹 他	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子を利用したホットキャリア型太陽電池	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
400	大橋知幸 他	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドット半導体光アンプの光導波モード解析	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
401	原田幸弘	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子におけるホットキャリア冷却過程	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
402	A. Datas, et al.	神戸大学	NGCPV: a New Generation of Concentrator Photovoltaic Cells, Modules and Systems	EU PVSEC 2015	2015/09
403	O. Kojima, et al.	神戸大学	Decrease in Photoluminescence Decay Rate in InAs Quantum Dots Coupling with In Nanoparticles Due to Increase in Excitation Power	2nd International Conference on Enhanced Spectroscopies	2015/10
404	朝日重雄 他	神戸大学	量子ドット中間バンド型太陽電池におけるキャリアの長寿命化と2段階光電流生成の増強	第26回光物性研究会	2015/12
405	田尻祐介 他	神戸大学	長波長発光近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの偏光フォトルミネッセンス特性	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
406	小川泰弘 他	神戸大学	急速熱アニールした GaAs 中のエピタキシャル窒素膜の輻射再結合寿命	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
407	渡辺翔 他	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子太陽電池におけるミニバンド形成が2段階光吸収に与える影響	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
408	朝日重雄 他	神戸大学	Dot-in-Well 中間バンド型太陽電池における中間順位内の長い電子寿命	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03

409	トープラサートボンカシ ディット 他	神戸大学	量子井戸太陽電池における電子と正孔 の走行時間および実効移動度の評価	第63回応用物理学会春 季学術講演会	2016/03
410	Y. Ogawa, et al.	神戸大学	Time-Resolved Photoluminescence of Thermally-Annealed Nitrogen Atomic Sheet in GaAs	17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Nara	2016/03
411	T. Kaizu, et al.	神戸大学	Polarized Photoluminescence Properties of Closely-Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Long-Wavelength Emission	17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Nara	2016/03
412	S. Asahi, et al.	神戸大学	Extremely Long Carrier Lifetime Due to Electron-Hole Separation in Quantum- Dot Intermediate-Band Solar Cells	17th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures, Nara	2016/03
413	S. Watanabe, et al.	神戸大学	Enhancement of Two-Step Photon Absorption Due to Miniband Formation in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cell	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2016/06
414	S. Asahi, et al.	神戸大学	Extended Electron Lifetime in Intermediate-Band Solar Cells Using Dot-in-Well Structure	32rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2016/06
415	Y. Tajiri, et al.	神戸大学	GaAs First-Spacer-Layer Thickness Dependence of Polarized Photoluminescence Properties of Closely- Stacked InAs/GaAs Quantum Dots with Long-Wavelength Emission	2016 Compound Semiconductor Week	2016/06
416	K. Hirao, et al.	神戸大学	Thermal Carrier-Escape Process from the Intermediate Band in InAs/GaAs Quantum Dot Solar Cells	第35回電子材料シンポジ ウム	2016/07
417	K. Toprasertpong, et al.	神戸大学	Investigation of Buck-Like Carrier Transport and Effective Mobility in Multiple Quantum Well Solar Cells	第35回電子材料シンポジ ウム	2016/07
418	Y. Harada, et al.	神戸大学	Polarization-Insensitive Intraband Transition in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattices	UK Semiconductors 2016	2016/07
419	R. Plantenga, et al.	神戸大学	Spatial Electronic Structure of an Isovalent Nitrogen Center in GaA	33rd International Conference on the Physics of Semiconductors	2016/07
420	T. Kaizu, et al.	神戸大学	Control In-Ga Intermixing in InAs Quantum Dot on Nitrogen d-Doped GaAs	19th International Conference on Molecular- Beam Epitaxy	2016/09
421	趙博文 他	神戸大学	InGaAs/GaAsP 波状量子井戸における キャリア寿命の評価	第77回応用物理学会秋 季学術講演会	2016/09

422	トープラサートボンカシ ディット 他	神戸大学	多重量子井戸太陽電池における実行移動度近似の妥当性検証	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
423	朝日重雄 他	神戸大学	ヘテロ界面を利用した光アップコンバージョン太陽電池の2段階光吸収による大幅な電流増加	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
424	海津利行 他	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの GaAs スペーサ層膜厚と成長温度による広帯域偏光特性制御	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
425	小川泰弘 他	神戸大学	Dot-in-Well 中間バンド型太陽電池における長い電子寿命の観測	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
426	平尾和輝 他	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット中間バンド型太陽電池における電子の熱脱出過程の解明	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
427	T. Kita	神戸大学	Carrier Dynamics in InAs Quantum Dot Solar Cell for Photon Ratchet	High-efficiency materials for photovoltaics	2016/09
428	喜多隆	神戸大学	量子ドット中間バンド型太陽電池のキャリアダイナミクス	平成28年度太陽光発電プロジェクト講演会～量子ナノ半導体のエネルギー交換デバイスへの応用について～	2017/03
429	海津利行 他	神戸大学	近接積層 InAs/GaAs 量子ドットの GaAs スペーサ層膜厚と成長温度による広帯域偏光特性制御(2)	第63回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
430	平尾和輝 他	神戸大学	InAs/GaAs 量子ドット超格子中間バンド型太陽電池特性のミニバンド形成の効果	第63回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
431	S. Asahi, et al.	神戸大学	Extremely-Long Electron Lifetime in InAs/GaAs/ Al _{0.3} Ga _{0.7} As Dot-in-Well Intermediate-Band Solar Cells	第63回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
432	久志本真希、本田善央、天野浩	名古屋大学	Si(001)基板上(1-10)高In 組成 InGa _N における積層欠陥の形成	第35回電子材料シンポジウム	2016/07
433	久志本真希、本田善央、天野浩	名古屋大学	異なる InGa _N 膜厚の(1-10)Ga _N 基板上太陽電池の作製 35	第9回ナノエピナノ構造・エピタキシャル成長講演会	2017/07
434	村松昇 他	名城大学	Semipolar (10-1-1) solar cells	The 5th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA`17), Pacifico Yokohama, Japan	2017/04

435	高橋一矢 他	名城大学	Optimization of GaN and GaAs wafer bonding technology for fabrication of GaInN/GaInP/GaAs/Ge 4-junction solar cell	The 5th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA'17), Pacifico Yokohama, Japan	2017/04
436	村松昇 他	名城大学	Fabrication of semipolar (10-1-1) solar cells	The 13th international conference of nitride semiconductors	2017/07
437	高橋一矢 他	名城大学	Fabrication of GaInN/GaInP/GaAs/Ge 4-junction solar cell using wafer bonding technology	The 13th international conference of nitride semiconductors	2017/07
438	徳田直樹、堀切将、丁文、李珪、鈴木秀俊、福山敦彦、碓哲雄、境健太郎	宮崎大学	表面光起電力法を用いた GaAs/Si 太陽電池におけるバッファ層の評価	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2015/05
439	堀切将、横山祐貴、原口智宏、山内俊浩、鈴木秀俊、福山敦彦、碓哲雄	宮崎大学	原子層エピタキシー成長 GaAsN における Si ドーピング供給順序変化が薄膜の結晶性・成長速度に与える影響	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2015/05
440	中村翼、松落高輝、村上匠、鈴木秀俊、碓哲雄、福山敦彦、K. Toprasertpong、杉山正和、中野義昭	宮崎大学、東京大学	レーザー変調反射分光法を用いた超格子太陽電池の内部電界がミニバンド幅に与える影響評価	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2015/05
441	西岡賢祐、太田靖之	宮崎大学	既設の PV システム出力を 4%向上させる反射防止兼防汚コーティング	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2015/05
442	Kenta Imai, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大学	Outdoor performance comparison of concentrator photovoltaic and flat-plate systems	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/06
443	Y. Yokoyama, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学	Control of thickness and residual impurity inclusion of GaAsN thin films grown by an atomic layer epitaxy	第34回電子材料シンポジウム	2015/07
444	横山祐貴、前田幸治、鈴木秀俊、碓哲雄、福山敦彦 他3名	宮崎大学	ALE 法を用いた GaAsN 薄膜成長における Si ドープが電气的特性へ及ぼす影響	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
445	宇宿 孝則、中村 翼、松落高輝、倉留 弘憲、相原 健人、トープラサートポンカシディット、藤井 宏昌、杉山正和、福山 敦彦、碓 哲雄	宮崎大学、東京大学	矩形および階段状超格子太陽電池におけるミニバンド形成の評価	第76回応用物理学会秋季学術講演会	2015/09
446	原田一徹、鈴木秀俊、福山敦彦	宮崎大学	MBE 法による Si(11L) 基板上の GaAs 成長と結晶性評価	第45回結晶成長国内会議	2015/10
447	今井健太、太田靖之、西岡賢祐	宮崎大学	集光型および平板型太陽電池システムの屋外性能比較	第7回半導体材料・デバイスフォーラム	2015/11

448	村上匠、中村翼、松落高輝、杉山正和、中野義昭、碓哲雄、福山敦彦	宮崎大学、東京大学	量子井戸型太陽電池における熱脱出および非発光再結合に必要な活性化エネルギーの積層数依存性	第7回半導体材料・デバイスフォーラム	2015/11
449	武田秀明、中村翼、松落高輝、村上匠、杉山正和、中野義昭、碓哲雄、福山敦彦	宮崎大学、東京大学	レーザー変調反射分光法を用いた超格子太陽電池の内部電界がミニバンド幅に与える影響評価	第7回半導体材料・デバイスフォーラム	2015/11
450	T. Nakamura, K. Matsuuchi, T. Murakami, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Ikari, and A. Fukuyama	宮崎大学、東京大学	Effect of internal electric field on the miniband formation of multi quantum well solar cell structures investigated by a photoreflectance and a photothermal spectroscopy	American Vacuum Society 62th Int. Symposium & Exhibition	2015/11
451	堀切将、横山裕貴、鈴木秀俊、碓哲雄、福山敦彦	宮崎大学	GaAsN 薄膜の原子層エピタキシー成長におけるドーパント Si 供給順序が電気特性に与える影響	平成 27 年度応用物理学会九州支部講演会	2015/12
452	A. Fukuyama, T. Nakamura, T. Usuki, K. Matsuuchi, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari	宮崎大学、東京大学	Carrier collection mechanism in the strain-balanced InGaAs/GaAsP super-lattice solar cells by investigating the temperature changes of the surface photovoltage, photoluminescence, and piezoelectric photothermal signals	SPIE Photonics West 2016	2016/02
453	T. Usuki, K. Matsuuchi, T. Nakamura, K. Toprasertpong, A. Fukuyama, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Ikari	宮崎大学、東京大学	Observation of mini-band formation in the ground and high-energy electronic states of super-lattice solar cells	SPIE Photonics West 2016	2016/02
454	橋本英明、前田幸治、横山祐貴、堀切将、鈴木秀俊	宮崎大学	原子層エピタキシー法により成長温度及び原料供給時間を変化させて作製した GaAsN 薄膜の X 線回折及びラマン分光法による結晶性の評価	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
455	横山祐貴、堀切将、鈴木秀俊、碓哲雄、福山敦彦 他 2 名	宮崎大学	GaAsN 薄膜の ALE 法による Si 供給順序が Si 吸着サイトに与える影響	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
456	Y. Ota, Y. Abiko, K. Imai, M. Inagaki, T. Iwasaki, K. Kitayama, S. Kurogi, R. Mikami, K. Nishioka	宮崎大学、住友電工㈱	Impact of Spectral Distribution and Module Temperature on CPV Systems with Lattice-Matched and Mismatched Solar Cell	12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	2016/04
457	T. Nakamura, K. Matsuuchi, T. Murakami, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano and A. Fukuyama	宮崎大学、東京大学	Effect of Built-in Electric Field on Miniband Structure and Carrier Nonradiative Recombination in InGaAs/GaAsP Superlattice Investigated by Using Photoreflectance and Photoluminescence Spectroscopies	The European Materials Research Society Spring Meeting 2016	2016/05
458	武田秀明、中村翼、松落高輝、碓哲雄、福山敦彦、K. Toprasertpong、杉山正和、中野義昭	宮崎大学、東京大学	フォトルミネッセンス法を用いた超格子構造中のキャリア輸送評価	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05

459	奥谷哲、原田一徹、福山敦彦、碓哲雄、鈴木秀俊	宮崎大学	MBE法を用いて高指数Si(11L)基板上に作製したGaAsの結晶評価	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05
460	河野将大、横山祐貴、堀切将、山内俊浩、原口智宏、碓哲雄、福山敦彦、鈴木秀俊	宮崎大学	Ga原料の違いがALE成長GaAsN薄膜の結晶性および電気特性に与える影響	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05
461	日高剛秀、太田靖之、西岡賢祐	宮崎大学	エアマスと散乱比を用いた集光型太陽光発電システムの出力解析	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05
462	太田靖之、西岡賢祐	宮崎大学	三接合型太陽電池モジュールへの反射防止膜の最適化設計	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/05
463	Y. Ota, K. Nishioka, K. Araki, K. Ikeda, Kan-Hua Lee, M. Yamaguchi	宮崎大学、東京大学	Optimization of Static Concentrator Photovoltaics with Aspherical Lens for Automobile	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/06
464	Y. Yokoyama, M. Kawano, M. Horikiri, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari and A. Fukuyama	宮崎大学	Effects of Si gas flow sequence on electrical characteristics of GaAsN films grown by atomic layer epitaxy GaAsN	第35回電子材料シンポジウム	2016/07
465	T. Usuki, K. Matsuuchi, T. Nakamura, K. Toprasertpong, T. Ikari, A. Fukuyama, M. Sugiyama and Y. Nakano	宮崎大学	Observation of mini-band formation in the ground and high-energy electronic states of super-lattice solar cells	第35回電子材料シンポジウム	2016/07
466	Y. Yokoyama, H. Horikiri, T. Haraguchi, T. Yamauchi, H. Suzuki, T. Ikari and A. Fukuyama	宮崎大学	Effects of Si Gas Flow Sequence on Electrical Characteristics of GaAsN Films Grown by Atomic Layer Epitaxy	The 18th International Conf. on Crystal Growth and Epitaxy	2016/08
467	横山祐貴、堀切将、原口智宏、山内俊浩、鈴木秀俊、碓哲雄、福山敦彦	宮崎大学	ALE成長SiドープGaAsN薄膜のアニール処理が比抵抗に与える影響	第77応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
468	M. Horikiri, W. Ding, Y. Yokoyama, H. Suzuki, T. Ikari, Y. Ohshita, M. Yamaguchi, A. Fukuyama	宮崎大学	The Influence of Substrate Orientation on Localized Nitrogen State in GaAsN films Grown on Vicinal GaAs (001) Substrates	2016 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials	2016/09
469	A. Fukuyama, K. Matsuuchi, T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, T. Ikari	宮崎大学、東京大学	Optical properties of miniband formed in the InGaAs/GaAsP quantum well solar cells by means of photoreflectance, photoluminescence, and photothermal spectroscopies	IEEE Nanotechnology Materials and Device Conference	2016/10
470	Y. Wang, H. Suzuki, Y. Yokoyama, T. Ikari, A. Fukuyama, N. Kojima, Y. Ohshita, M. Yamaguchi	宮崎大学、豊田工業大学	Nucleation layer grown by atomic layer deposition for selective-area growth of GaAs on patterned Si substrate by using chemical beam epitaxy	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10

471	H. Suzuki, T. Sasaki, M. Takahasi, Y. Ohshita, N. Kojima, I. Kamiya, A. Fukuyama, T. Ikari, M. Yamaguchi	宮崎大学、量子科学技術研究開発機構	The influence of substrate orientation on strain relaxation mechanisms of InGaAs layer grown on vicinal GaAs substrates measured by in situ X-ray diffraction	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
472	K. Matsuo, T. Nakamura, H. Takeda, D. Ohori, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano, H. Suzuki, T. Ikari, A. Fukuyama	宮崎大学、東京大学	Optical Evaluation of Miniband Formation in InGaAs/GaAsP Quantum Well Solar Cells	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
473	H. Suzuki, T. Sasaki, M. Takahasi, Y. Ohshita, N. Kojima, I. Kamiya, A. Fukuyama, T. Ikari, M. Yamaguchi	宮崎大学、豊田工業大学	In situ X-ray diffraction study of strain relaxation process of lattice-mismatched InGaAs grown on vicinal GaAs(001) substrates	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
474	中村翼、松落高輝、武田秀明、K. Toprasertpong、杉山正和、中野義昭、鈴木秀俊、碓哲雄、福山敦彦	宮崎大学、東京大学	フラットバンド構造内に挿入された超格子におけるミニバンド形成過程とキャリア輸送評価	2016年度レーザー・量子エレクトロニクス研究会	2016/10
475	Y. Hidaka, Y. Ota, M. Inagaki, R. Mikami, T. Iwasaki, K. Nishioka	宮崎大学、住友電工㈱	Influence of Silicone on Glass Lens Temperature on Concentrator Photovoltaic Modules with and without Secondary Optics	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
476	R. Sakamoto, S. Kurogi, Y. Ota, K. Nishioka	宮崎大学	Output Increase of Photovoltaic Module using Silica Based Coat Having Anti-Reflection and Anti-Soiling Effects	26th Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10
477	魯家男、武田秀明、中村翼、松落高輝、鈴木秀俊、碓哲雄、K. Toprasertpong、杉山正和、中野義昭、福山敦彦	宮崎大学、東京大学	フォトルミネッセンス法を用いた超格子構造中のキャリア輸送評価	第8回半導体材料・デバイスフォーラム	2016/11
478	碓哲雄、福山敦彦、中村翼、杉山正和、中野義昭	宮崎大学、東京大学	光熱変換法による InGaAs/GaAsP 超格子に形成されるミニバンド端エネルギーの測定	第37回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム	2016/11
479	H. Suzuki, T. Yamauchi, M. Kawano, Y. Ohshita, H. Machida, M. Ishikawa, H. Sudoh, A. Fukuyama	宮崎大学、気相成長㈱	Ge thin film growth on Si(001) substrates using tBGe for buffer layer of GaAs/Si structure	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials	2016/11
480	河野将大、山内俊浩、石川真人、須藤弘、町田英明、大下祥雄、鈴木秀俊	宮崎大学、豊田工業大学、気相成長㈱	新規 Ge 原料 t-C4H9GeH3 の Si もしくは GaAs 基板上における表面反応過程	2016 真空・表面科学合同講演会	2016/11
481	奥谷哲、結城正也、碓哲雄、福山敦彦、鈴木秀俊	宮崎大学	MBE 法を用いて作製した Ga 事前供給 GaAs on Si(113)の結晶性の評価	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
482	戒能賢治、吉留寛貴、前田幸治、碓哲雄、福山敦彦、鈴木秀俊	宮崎大学	Si 基板上 GaAs 薄膜のレーザーアニールによる結晶性への影響	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03

483	T. Ikari, K. Matsuuchi, T. Nakamura, H. Takeda, H. Suzuki, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano and A. Fukuyama	宮崎大学、東京大学	Excitons in InGaAs/GaAsP multi quantum well and super lattice solar cell structures investigated by a photothermal spectroscopy	The European Materials Research Society Spring Meeting 2017	2017/05
484	T. Nakamura, K. Matsuuchi, H. Takeda, H. Suzuki, T. Ikari, K. Toprasertpong, M. Sugiyama, Y. Nakano and A. Fukuyama	宮崎大学、東京大学	Effect of barrier thickness on formation of miniband in InGaAs/GaAsP superlattice structure for solar cells application	The European Materials Research Society Spring Meeting 2017	2017/05
485	S. Kimura, S. Yoshidomi, M. Hasumi, and T. Sameshima	東京農工大学	Reduction in Optical Reflection Loss at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	The 22nd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices	2015/07
486	M. Hasumi, T. Sameshima, T. Motoki, T. Nakamura and T. Mizuno	東京農工大学	Annihilation Properties of Photo-Induced Carrier in Silicon PN Junction	The 22nd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices	2015/07
487	木村駿介、吉富真也、蓮見真彦、鮫島俊之	東京農工大学	メカニカルスタック型多接合ソーラーセルの中間層における光反射ロス低減	薄膜材料デバイス研究会 第12回研究集会	2015/10
488	T. Sugawara, S. Kimura, S. Yoshidomi, S. Saito, M. Hasumi, T. Sameshima	東京農工大学	Low Optical Reflection at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
489	T. Sameshima, S. Kimura, S. Yoshidomi, T. Sugawara, S. Saito, M. Hasumi	東京農工大学	Low Optical Reflection at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	PhotoVoltaic Technical Conference 2016	2016/05
490	T. Sameshima, S. Kimura, S. Yoshidomi, T. Sugawara, M. Hasumi	東京農工大学	Reduction in Optical Reflection At Intermediate Adhesive Layer For Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	32nd International European Conference on Surface Science	2016/09
491	鮫島俊之、荷村毅、菅原崇、小川喜洋、吉富真也、木村俊介、蓮見真彦	東京農工大学	メカニカルスタック型多接合ソーラーセル作製のためのインジウムガリウムジnkオキシドを用いた中間接着層における光反射ロスの低減	薄膜材料デバイス研究会 第13回研究集会	2016/10
492	Y. Ogawa, M. Hasumi, T. Mizuno, T. Sameshima	東京農工大学	Reduction of Optical Reflection Loss at Intermediate Adhesive Layer for Mechanically Stacked Multi-Junction Solar Cells	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
493	T. Sameshima, Y. Ogawa and M. Hasumi	東京農工大学	Reduction in optical reflection at intermediate adhesive layer for mechanically stacked multi junction solar cells	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/05

(新聞雑誌)

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学先端科学技術研究センター	(科学の扉) 次世代太陽電池 発電量・コスト巡り競争激化	朝日新聞	2016/05
2	東京大学先端科学技術研究センター	太陽電池ナノテクで進化 研究中の次世代型「量子効果」で効率向上	読売新聞夕刊	2016/09
3	シャープ(株)	太陽電池モジュール世界最高効率 シャープが開発	日本経済新聞	2016/05
4	シャープ(株)	世界最高の変換効率 シャープ 31.17%達成	化学工業日報	2016/05
5	シャープ(株)	シャープ 化合物 3 接合型太陽電池 最高変換効率を達成	日刊産業新聞	2016/05
6	シャープ(株)	世界最高の変換効率達成 シャープの化合物系太陽電池セル	日刊工業新聞	2016/05
7	シャープ(株)	シャープ 化合物太陽電池モジュール 世界最高の変換効率達成	電波新聞	2016/05
8	シャープ(株)	シャープ 変換効率 31%の太陽電池	日経産業新聞	2016/05
9	シャープ(株)	太陽電池 変換効率 31% シャープ化合物系で世界最高	読売新聞 夕刊	2016/06
10	産業技術総合研究所	スマートスタック技術	ケミカルエンジニアリング 2016年5月号	2016/05
11	産業技術総合研究所	吸収波長域の異なるセルからなる多接合型太陽電池の「スマートスタック技術」による展開	月刊 Material Stage 9月号	2016/09
12	産業技術総合研究所	「貼り合わせで限界を超える」 p. 56	日経エレクトロニクス 2015年12月号	2016/12
13	産業技術総合研究所	ガリヒ素太陽電池 安価な材料で製造 HVPE 装置開発	化学工業日報、B版 1面	2017/06
14	産業技術総合研究所	高効率 GaAs 太陽電池 低コスト製造装置開発	日刊産業新聞、朝刊 11面	2017/06
15	産業技術総合研究所	効率 20.3%の「ガリヒ素太陽電池」を低コストで製造	日本経済新聞電子版	2017/06
16	産業技術総合研究所	「成膜のコストを 10 分の 1 に」 GaAs 太陽電池の普及へ、低コストな製造法を開発	Yahoo!ニュース	2017/06
17	産業技術総合研究所	「成膜のコストを 10 分の 1 に」 GaAs 太陽電池の普及へ、低コストな製造法を開発	スマートジャパン	2017/06
18	産業技術総合研究所	高効率太陽電池、用途広く 低コスト製造装置	日経産業新聞、朝刊 15面	2017/06
19	豊田工業大学	再生可能エネルギーの今 根付き始めた太陽光発電	「時局 1月号」 p. 54-57	2015/12
20	大阪市立大学・重川直輝	「貼り合わせで限界を超える」	日経エレクトロニクス 2015年12月号 p. 47	2015/11
21	大陽日酸(株)	「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」の受託並びに研究開始のお知らせ	大陽日酸(株)ホームページにてプレスリリース	2017/06

22	神戸大学	神戸大が新技術「理論上63%」発電コスト下げ実現を目指す	産経WEST	2017/04
23	神戸大学	変換効率50%以上に一太陽電池、波長長い光利用一	日経産業新聞	2017/04
24	神戸大学	変換効率50%超の太陽電池	日経産業新聞	2017/04
25	神戸大学	変換効率50%超の太陽電池提案	神戸新聞	2017/06

(ハ) ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

【A 塗布製造技術の開発】(パナソニック株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
塗布製造技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・小面積太陽電池(0.5 cm²)において変換効率 20% ・高温高湿試験(85℃, 85%, 1000h)で効率維持率 95%以上 ・5直列接続の集積モジュールで開放電圧 5V(セル単位で 1V)以上 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cs 置換ペロブスカイト膜を用いてセル変換効率 20.9%(面積: 0.04cm²)を達成 2. 高温曝露(85℃)による劣化要因を解明し、高温曝露試験 1000 時間で効率維持率 100%(変換効率 11.0%)を達成 3. 世界最大サイズの 20cm 角基板に 35 直列の集積型モジュールを作製し、変換効率 12.6%、セル単位の Voc=1.103V を達成 	<p>△</p> <p>○</p> <p>◎</p>	<p>セル面積拡大で達成見込み(H29年12月)</p> <p>目標を大幅に上回る35直列で平均1V以上達成</p>

*1 達成度: ◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【B 超軽量太陽電池モジュール技術の開発】(株式会社東芝)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
超軽量太陽電池用塗布印刷/モジュール化技術の開発	5cm 角程度の超軽量モジュールの変換効率 10%の達成。	フィルム基板の 5cm 角ミニモジュールで 13.7%達成	◎	フィルム基板モジュールで 13.7%は世界最高
超軽量太陽電池の耐久性向上技術の開発	・JIS 規格 C8938 準拠の耐久性試験の耐熱試験、光照射試験で、変換効率 12%の 1cm 角程度の超軽量セルの相対低下率 10%以下の達成。	<p>耐熱試験の相対低下率は、1cm 角フィルムセル 43%、1cm 角ガラス基板セル 8.3%(Au 電極の場合)、及び 1%(ITO/銀電極によるヨウ素拡散防止構造の場合)</p> <p>光照射試験の相対低下率は、1cm 角フィルム基板セル 49%、1cm 角ガラス基板セル 41%。</p>	<p>△</p> <p>(H29年12月までに達成予定)</p>	<p>耐熱試験は、ガラス基板セル構造を PEN 基板に適用。</p> <p>光照射試験は、ペロブスカイト層の結晶欠陥の減少で対応。</p>

*1 達成度: ◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【C低コストR2R太陽電池製造技術の開発】(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	備考
超軽量太陽電池の耐久性の向上	<ul style="list-style-type: none"> JIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目について、変換効率10%の1cm角程度の超軽量セルの相対低下率10%以下を達成する。 	<ul style="list-style-type: none"> 1cm角金属箔基板で変換効率12%を達成するとともに、JIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目達成 <耐久性試験5項目> 耐熱:85°C1000h 耐湿熱:85°C85%1000h 耐光:63°C50%1sun500h 温度サイクル:-40⇔90°C200cyc 湿熱サイクル:-40⇔85°C85%10cyc 	◎	低コスト化が可能な金属箔セルで効率12%達成。耐久性においてもダイレクトバリア膜等の効果を実証した。
R2Rプロセス・材料技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 10cm角程度の超軽量セルにて変換効率ばらつき$3\sigma < 1$を達成する。 太陽電池セル材料・構造に関する要素技術を開発し、量産時に超軽量モジュール製造コスト15円/Wに必要な条件を明確化する。 	<ul style="list-style-type: none"> 10cm角超軽量基板にペロブスカイト層を成膜したサンプルに対し、受光面積10mm角の変換効率ばらつき評価を行い、効率ばらつきとして$3\sigma = 0.98$を達成した。 超軽量太陽電池基板として金属箔を用いることが可能なことが分かり、基板材料として15円/W達成の見通しを得た。 	○	

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【D 高性能高信頼性確保製造技術の開発】

(アイシン精機株式会社(再委託先:アイシンコスモス研究所))

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
高性能高信頼性を確保する要素(材料)技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 金代替対極の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 対極として新規カーボン電極を開発。1Sunでは金に対し、出力が約7割、0.1Sunではほぼ同等の出力性能を確認した。 課題は、カーボンの抵抗低減であり、ペーストの添加剤で対処可能。 	△ (H30年3月達成予定)	カーボンの組成と膜厚見直しによる導電性向上効果により達成目処あり
高性能高信頼性を確保する要素(材料)技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 新規HTM(ホール輸送剤)材料の探索と絞込み 	<ul style="list-style-type: none"> 新規の亜鉛フタロシアニン誘導体はドーパントフリーで従来のspiro-OMeTADに匹敵する性能を確保。合成ステップがspiro-OMeTADに比べ半減する可能性がある。 	○	

高性能高信頼性を確保する要素(材料)技術開発	・非焼成材料で焼成材料(TiO ₂)と同等の出力確保	・非焼成 TiO ₂ 電極でも焼成した TiO ₂ 電極同等の変換効率 $\eta = 15.4\%$ のセルが得られることを実験で確認した。	◎	太陽電池製造法で連続スプレー工法への実現性が高まった。
低コスト化に向けた革新的モジュール製造技術の開発1	低コスト塗工技術開発：スプレー塗工法の開発	・塗工技術を調査比較し回転霧化式の精密スプレーを選択。従来 ALD で作成していたコンパクト TiO ₂ 層をスプレーで製膜することが出来た。ナノサイズで膜厚が制御可能で、太陽電池の革新工法の目処がついた	○	太陽電池製造法でキーとなるナノサイズ膜厚制御がスプレーで実現出来ることを証明した。
低コスト化に向けた革新的モジュール製造技術の開発2	100mm 角モジュールで小型セル変換効率の8割を達成する製造技術の確立	・100mm 角モジュールで小型セル変換効率の78%を達成。(回転霧化スプレーで作製するセルの性能はまだ低い(~11%)が、その原因はペロブスカイトのモルフォロジー制御。現在課題解決の最中で、性能は発展途上)	△ (H30年3月達成予定)	ペロブスカイト層の組成制御と結晶品質の確保(条件だし)により達成

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【E 高性能材料合成技術の開発】(富士フイルム株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
(1) 正孔輸送材料合成技術開発	HOMO レベル-5.3eV 以下と spiro-MeOTAD 以上の電流値または spiro-MeOTAD に対し同等以上の Jsc × Voc 及び耐湿性を可能とする正孔輸送材料設計を抽出する。	・耐湿性低下の原因となるドーパントを必要としない正孔輸送材料骨格を見出し、新規正孔輸送材料を用いたセルで spiro-MeOTAD を用いたセルと同等以上の変換効率に到達した。	△ (H30年3月達成予定)	高いFFが得られる材料を開発し、Spiro-MeOTAD 同等以上の効率を得ているが Jsc が低いいため Jsc × Voc では spiro-MeOTAD に劣る。改良余地のある HOMO レベルおよび製膜プロセスを最適化することで達成見込み。
(2) ペロブスカイト材料技術開発	長波長端 750nm 以上 且 つ、CH ₃ NH ₃ PbI ₃ 同等以上の Jsc × Voc と耐湿性を可能とするペロブスカイト材料設計を抽出する。	・吸収長波長端 750nm 以上を満たしつつ、変換効率の低下なくペロブスカイト膜の耐湿性が向上するペロブスカイト表面処理技術を見出した。	○	

(1)、(2) 共通項目	セル効率 20%以上	・新規材料を用いて最大変換効率 14.6%に到達。 (同条件における spio-MeOTAD (ドーパント有り) の変換効率 14.2%)	△ (H30 年 3 月達成 予定)	集中研等の指導を受けることで評価技術を向上させ、高効率セル作製を可能とする。その後、最適化を行う事で達成見込み。
--------------	------------	--	---------------------------	--

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【F 基盤材料技術と性能評価技術の開発】

(早稲田大学 (再委託先：物質・材料研究機構、神奈川県立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	備考
高性能基盤材料技術の研究開発	耐久性・歩留り高い最適なホール輸送材料 (HTM) を選定し HTM 材料コスト 250 円/m ²	簡便・低コストな酸化重合法により、単純な構造でかつ寿命見込める HTM を開発。層厚み 50nm として材料コスト 80 円/m ² となり中間目標を大きく上回り達成。高価市販品と同等またはそれ以上の耐久性を確認 (パナソニックと一部共同)。	◎	250 円/m ² の中間目標に対し 80 円/m ² 。
高性能基盤材料技術の研究開発	低コスト製造要素技術を検討し、ホール輸送層 (HTL) 製造コスト 500 円/m ² を試験	前駆体液またはペロブスカイトインキおよび HTM 液の引き塗りによる 1cm ² ペロブスカイト層、HTL 作製で、高い歩留り実証。大面積に向けダイコート法適用の要件を整理。	△ (H30 年 3 月達成 予定)	計画していた共蒸着法等は条件が極めて限定され歩留りに見込みなく開発中断。歩留り・耐久性高い高分子補強ペロブスカイト層形成を見出し、ダイコート法での工程簡易化に手応え。
高性能基盤材料技術の研究開発	高性能な HTM 材料での効率増大、小面積セル 20%	変換効率 20%超の要素技術を明らかにし、効率を達成。上記開発 HTM の 1cm ² セルで効率 18%超。高分子補強ペロブスカイト層形成を見出し、歩留り・耐久性を大巾に向上。	○	
基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発	①光照射 200 時間を目指すデバイス要素技術の開発	新規な傾斜接合した逆型セル構造を開発し効率 18.2%。さらに欠陥を低減した同 1cm ² セルで世界最高効率 19.2% (AIST 認証) を達成。85° C, 500 時間の耐熱、1 Sun 下 1000 時間連続照射試験も満足。メソポーラス構造セルでは、HTL に 2-ピリジン添加により、安定性の向上。	◎	1cm ² セルで効率 19.2% の世界トップ値で、光照射下 1000 時間の耐久性を実証。

基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発	②ヒステリシスを3%以内に抑える測定方法の開発	メソポーラス構造セルでは、双方向掃引の平均値とすることで精度向上。逆型セル構造では、印加電圧間隔の縮小により誤差3%以内。	○	
信頼性の高い性能評価手法の確立	測定手法の標準化、発電性能とセル構造の関連付け	大型セル固定具を設計・設置。環境制御した測定槽を完成。長期間の連続測定での性能変動因子を分析し、例えばセルの冷却や封止時期など指摘。	△ (H30年3月達成予定)	東大・京大ほか作製のセル特性を評価開始。

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【G 新素材と新構造による高性能化技術の開発】(東京大学(再委託先：産業技術総合研究所、九州工業大学、東京工業大学、京都大学、兵庫県立大学、熊本大学))

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度 *1	備考
新素材と新構造の開発	ガラス基板小面積セル(有効面積約0.03 cm ²)で変換効率20%を達成する。	目標効率達成に向けて、基礎的な要素技術を確立した。新規ペロブスカイト材料を用いたガラス基板小面積セル(有効面積約0.18 cm ²)で変換効率20.52%が得られた。また、新構造の構築に向けてペロブスカイト単結晶試料の構造と物性を検討し、励起子の特殊性を明らかにした	◎	目標より大きい面積で達成
1) 高性能化に向けたペロブスカイト材料の開発	1) 蒸着により10mm角でラフネスが±30nm以内となる高品位ペロブスカイト薄膜を作成する。	1) 真空蒸着膜における5μm四方での最大高低差は37nm(MAPbI ₃)と36nm(FAPbI ₃)。レーザー蒸着膜ではMAPbI ₃ 2μm四方の最大高低差は22nmで、後者を用いた逆構造型セルで効率16.0%を得た。	○	
2) 耐久性確保に向けた材料開発	2) ホール輸送材フリー構造セルを作製する。	2) 多孔質層にペロブスカイト材料を浸透させてセルを作製するプロセスでホール輸送材フリー構造セルを作製し、効率9%を得た。	○	
3) 低コスト対極材料の開発	3) カーボン対極を用いたセルを作製する。	3) カーボンを塗布したガラス基板を対極として貼り合せセルを試作した。	○	
4) セル出力の高電圧化と電圧損失メカニズムの解析	4a) ヨウ臭化ペロブスカイトを用いたセルでVoc 1.4Vを実現する。	4a) 臭化ペロブスカイトFAPbBr ₃ 層とHTM層の間にブロック層を配したセルでVoc 1.42Vを得た。	○	

5) ペロブスカイト太陽電池のセル構造の改良	4b) 電圧損失を決めるペロブスカイト結晶の質と電荷輸送材料の物性を明らかにする。 5) バックコンタクト構造セルを製作する。	4b) カチオン(MA/FA/Cs)ハロゲン(I/Br)混合ペロブスカイトのプラナー型セルで Voc 1.1 V とし、効率 20.8%を得た。アモルファス TiO _x 緻密層、ブルックライト TiO ₂ 高結晶多孔膜を用いた MAPbI ₃ ペロブスカイト太陽電池で Voc 1.16~1.18 V、効率 21.6%を得た。 5) 微細加工した電極の試作が完了し、その上にペロブスカイト層を製膜する条件を検討している。	○ ○	
界面制御技術	界面制御により、Jsc 23 mA/cm ² 以上、Voc 1.2 V 以上の条件で FF 75%以上を実現する。	プラナー型セルにて、酸化チタン/ペロブスカイト界面の加熱温度を制御した TiCl ₄ 処理で Jsc 21.8 mA/cm ² 、Voc 1.08 V、FF 76%、PCE 17.9%を達成。TiCl ₄ 処理+C60 系材料修飾によりヒステリシスを低減させて Jsc 21.8 mA/cm ² 、Voc 1.07 V、FF 74%、PCE 17.2%を達成。ペロブスカイト/ホール輸送剤界面へのピリジン系化合物塗布により Jsc 21.3 mA/cm ² 、Voc 1.02 V、FF 74%、PCE 16.0%。FA 系セルで Jsc 22.7 mA/cm ² 、Voc 1.078 V、FF 79%、PCE 19.2%。	△ (H29 年 12 月達成予定)	FA 系セルの電子輸送層ドーピングと界面修飾で高電圧化し、平成 29 年 12 月までに達成見込
高電流材料技術	Sn 系ペロブスカイト層の膜質を高めることにより Jsc 26 mA/cm ² を達成する。	金属混合 Sn/Pb ペロブスカイトの結晶性を高め、結晶欠陥を少なくすることにより、短絡電流 30.02 mA/cm ² を達成。Ti-O-Sn 結合が Voc 低下の原因となることを見出し、これを含まない逆構造セルを製作することで Voc を 0.69 V まで高め、PCE 12.36% (Jsc 24.78 mA/cm ²) を達成。その後の研究で Voc 0.77 V、Jsc 26.53 mA/cm ² 、FF 0.78、15.93%に効率向上。	◎	電流値達成に加え、電圧も改善
基板構造制御技術	基板構造制御により、4 mm 角セルで、変換効率面内ばらつき±0.5%以内に収める。	セル内のばらつきについて、市販 TiO ₂ 粒子(18NRT)を用いた場合の Jsc は 1σ 2.98%であったが、{001}面露出 TiO ₂ 粒子を用いた場合、1σ 1.7%以内に収まった。この{001}面露出 TiO ₂ 粒子を用いた変換効率 16~17%のセルにおいてφ1mm のピンホールを通した擬似太陽光照射下で、変換効率のばらつき標準偏差で 0.5%以下をデバイス内 4×4 点のデータから確認した。さらに{001}露	○	

		出板状酸化チタンを基板とする10×15mm 角のペロブスカイト層に3mm 角セルを8デバイス(4×2)配置し、それらの効率ばらつき0.5%以下(1σ)を確認した。		
電極材料技術	a) コスト250 円/m ² 無機系ホール輸送材で効率 20% (150 円/m ² の場合は 16%) を実現する。 b) 無機系ホール輸送材を用いた貼り合せ製造プロセスを開発する。	a) 無機系ホール輸送材として NiO を用いた逆構造型ペロブスカイト太陽電池で効率 16.1% を実現した。この NiO 層は膜厚 10nm 以下で、材料ロス等を考慮してもコストは約 100 円/m ² 以下。 b) FTO/TiO ₂ /ペロブスカイトを積層した基板と、FTO/NiO/ペロブスカイトを積層した基板を圧着させる貼合わせプロセスを開発した。	○ ○	
高純度材料技術	材料高純度化により、塗布型セルでの光電変換効率20%の達成に貢献する。	精製 PbI ₂ を用いてペロブスカイト層の作製法の最適化を進め、中間体構造と形成メカニズムの解明により、20%超の光電変換効率を達成した。MAPbI ₃ の前駆体材料を開発し市販化した。混合カチオン型 (Cs _x MA _y FA _z PbI ₃ Br _b) 用の前駆体材料FAPbI ₃ (dmf) ₂ を開発し、これを用いて Voc 1.21V(電圧ロス 0.38V)のセルや効率 21.2%のセルを得た。	◎	より高効率を得た
第一原理計算	第一原理計算シミュレーションと太陽電池デバイス・シミュレーターに関する要素技術を確立するとともに、モジュール変換効率 17% 以上を達成できる物質を予測する。	第一原理計算シミュレーションについて要素技術を確立。エネルギー変換効率改善のための材料設計を第一原理計算により実施。特に、元素置換効果、ペロブスカイト表面への炭素材料の積層効果、格子欠陥の影響を検討するとともに、ホール輸送材料の解析・開発のために独自のマテリアルズインフォマティクス手法を開発しており、現在変換効率 17%以上であるデバイスを更に高性能化する物質予測を行った。	○	

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

A 塗布製造技術の開発 (パナソニック株式会社)

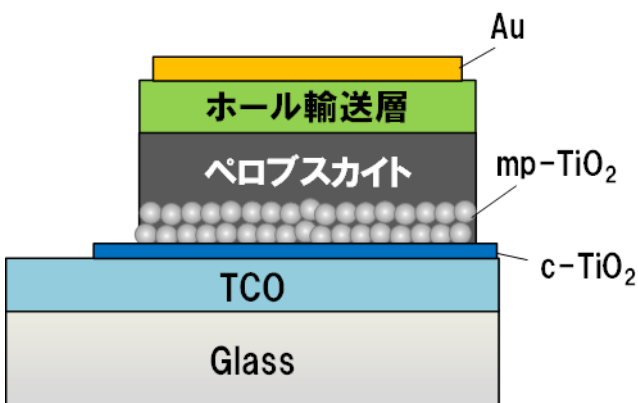
1. 成果詳細

2030年に太陽光発電コスト7円/kWhの実現に向け、革新的低コスト太陽電池「ペロブスカイト太陽電池」の実用化を目指すために、ペロブスカイト太陽電池モジュール変換効率20%、モジュール製造コスト15円/Wを実現しうる新コンセプト太陽電池の開発を進める。本研究開発では、上記目標達成のために、低コスト化が期待できる塗布製造技術をベースとして、ペロブスカイト太陽電池の高効率化技術、高耐久化技術、モジュール化技術の開発を行い、低コスト化技術を実証する。

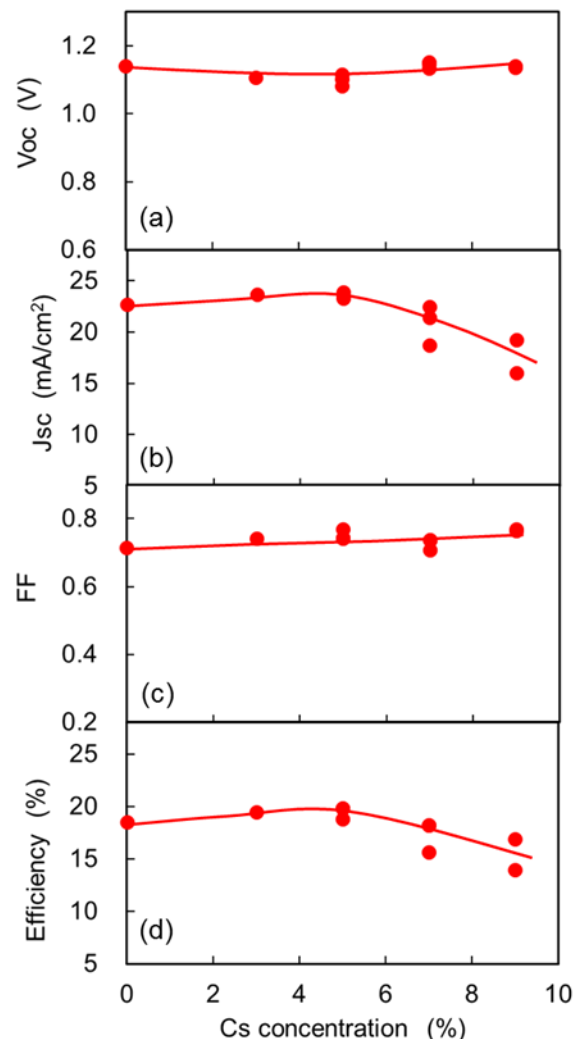
(1) 高効率化技術

有機無機ハライドペロブスカイト膜 ABX_3 の A サイトカチオンと X サイトアニオンに複数の元素を用いた多元系での組成制御による高効率化を検討した。研究開発の初期段階では、A サイトカチオンにメチルアンモニウム (CH_3NH_3 (MA)) とホルムアミジウム ($HC(NH_2)_2$ (FA)) を使い、X サイトアニオンに I と Br を用いた固溶系において、バンドギャップ制御と膜質の改善を行い、変換効率18.5%を達成した。しかしながら、この系の中の $FAPbI_3$ では、バンドギャップが大きく、光吸収係数が小さい結晶相の δ 相が低温で形成されやすいため、短絡電流密度 J_{sc} 低下の原因の一つとなっている。そこで、 δ 相の形成を抑制するために A サイトカチオンにさらに Cs を添加した $(Cs, MA, FA)Pb(I, Br)_3$ ペロブスカイト太陽電池を作製し、高効率化の開発を進めた。

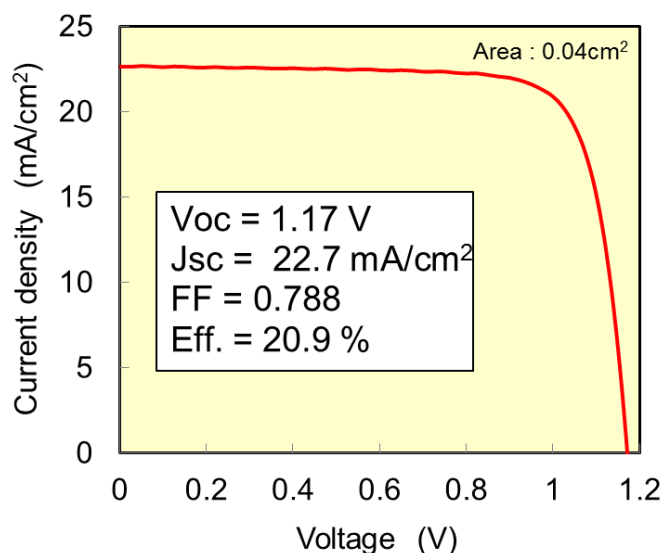
図Ⅲ-2-(ハ)-A-1 に作製したペロブスカイト太陽電池の断面構造を示す。太陽電池は下から、ガラス基板/透明導電膜 (TCO) /酸化チタン薄膜 (以下、 $c-TiO_2$) /酸化チタンナノ粒子膜 (以下、 $mp-TiO_2$) /発電層/ホール輸送層/電極の順に積層された構造となっている。ここで、Cs 添加ペロブスカイト膜を作製するために、 CsI 、 $HC(NH_2)_2I$ (FAI)、 CH_3NH_3Br (MABr)、 PbI_2 、 $PbBr_2$ を溶かした溶液を調製し、スピコートによりペロブスカイト膜を作製した。図Ⅲ-2-(ハ)-A-2 に Cs 添加比 ($Cs/(FA+MA)$) に対する太陽電池特性の変化を示す。図Ⅲ-2-(ハ)-A-2(a)、(c) に示すように Cs 添加比に対して、開放電圧 V_{oc} 、曲線因子 FF はほとんど変化しないが、図Ⅲ-2-(ハ)-A-2(b) に示すように短絡電流密度 J_{sc} は、Cs 添加比 3~5% で最大となり、5%以上では減少している。Cs の微量添加により、 δ 相の形成が抑制されるため J_{sc} が向上したと考えられる。また、Cs を過剰に添加すると J_{sc} が低下する理由は、バンドギャップの拡大 ($FAPbI_3$



図Ⅲ-2-(ハ)-A-1 ペロブスカイト太陽電池の断面構造



図Ⅲ-2-(ハ)-A-2 $(Cs, FA, MA)Pb(I, Br)_3$ 太陽電池の $Cs/(FA+MA)$ 組成比に対する特性の変化



図III-2-(ハ)-A-3 ペロブスカイト太陽電池の電流-電圧特性

のバンドギャップ 1.48eV に対し、CsPbI₃ のバンドギャップ 1.73eV) と、欠陥の増加によると考えられる。Jsc の Cs 添加比依存性を反映して、図III-2-(ハ)-A-2(d) に示すように変換効率は Cs 添加比 3~5% で最大となる。図III-2-(ハ)-A-3 に Cs 添加比 5% のペロブスカイト太陽電池の電流-電圧特性を示す。中間目標である変換効率 20.9% (Voc=1.17V, Jsc=22.7mA/cm², FF=0.788, 面積: 0.04cm², 自社測定) を達成した。ペロブスカイト膜だけでなく、酸化チタン膜やホール輸送層の改良により、さらなる高効率化を図るとともにセル面積を 0.5cm² に拡大した場合でも高効率化を達成する予定である。

(2) 高耐久化技術

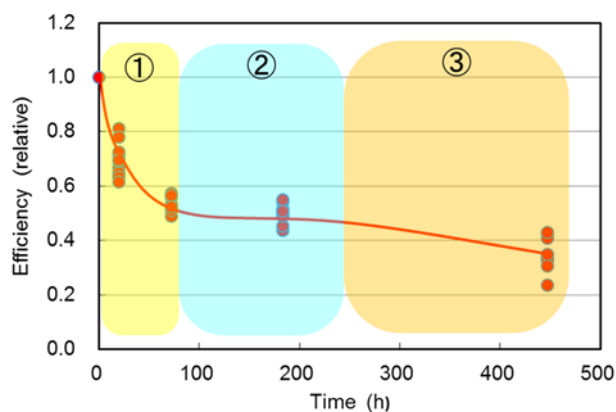
太陽電池に必要とされる信頼性には、「耐熱性」「耐湿性」「耐光性」など様々な項目があり、それら全ての課題について解決可能な材料・構造が要求される。本研究開発では高耐久化に向けた取り組みの第一段階として、これらの解決が必要な信頼性のうち、モジュール・セル構造等では回避不可能であり本質的な課題のひとつとなりうる「耐熱性」に焦点を絞り、劣化特性について調べた。

高温曝露試験は、85℃ 雰囲気内の恒温槽内に太陽電池を格納して実施した。ペロブスカイト膜は気相中の水分と反応するため、太陽電池をシリカゲルと一緒にラミネートパックする簡易な封止方法を用い、水分をできる限り除去した状態において高温曝露試験を実施した。試験した太陽電池の光吸収層には、(FA, MA)Pb(I, Br)₃ 膜を用いた。

図III-2-(ハ)-A-4 に高温曝露試験時間に対する変換効率の変化を示す。縦軸は試験前の値を 1 とした時の相対値を示している。図に示すように、3 段階のモードで劣化が進行することが確認できた。まず、①で示す初期<100h の領域 (以下、初期劣化領域と記述) において急激な劣化が発生した。②で示した 100~200h は効率を維持するが、③で示した 200h 以降の領域 (以下、後期劣化領域) では再度劣化が進行した。太陽電池の各パラメータ Voc, Jsc, FF と効率の劣化を比較した結果、効率低下は Jsc の低下が主因であることが確認できた。

劣化の要因を調べるために、初めにペロブスカイト層とホール輸送層の各々の単層膜を作製し、曝露試験前後での特性変化を分析することで、材料自身の本質的な変化について調べた。次に、ペロブスカイト層とホール輸送層を積層した構造の積層膜の高温曝露試験を実施し、デバイス化により発生する反応や各層間の相互作用による影響について調べた。

初期劣化領域でのペロブスカイト単層膜の X 線回折や吸光スペクトルを測定した結果、試験前後でほとんど変化は見られなかった。次に TOF-SIMS



図III-2-(ハ)-A-4 85℃高温曝露時間に対する効率の変化

を用いて高温曝露前後での積層膜内部の元素組成分布を分析した結果から試験前の組成分布では Co, S, F などのドーパント元素がホール輸送層に多く検出されていたのに対し、試験後では、これらの元素がホール輸送層では減少し、ペロブスカイト層および mp-TiO₂ 膜で増加していることが確認できた。つまり、高温曝露によりホール輸送層のドーパントがペロブスカイト層に拡散したと考えられる。次に、試験前後における積層膜の SEM 像を図 III-2-(ハ)-A-5 に示す。図 III-2-(ハ)-A-5(a), (b) は、ドーパントを添加した Spiro-OMeTAD を用いたペロブスカイト太陽電池の曝露試験前後の SEM 像をそれぞれ示し、図 III-2-(ハ)-A-5(c), (d) はドーパントを添加していない Spiro-OMeTAD を用いた太陽電池の曝露試験前後の SEM 像を示している。ドーパントを添加した Spiro-OMeTAD を用いた太陽電池では、高温曝露試験後の膜中にボイドや PbI₂ の析出が確認された。一方、図 III-2-(ハ)-A-5(c), (d) に示すようにドーパントを添加していない Spiro-OMeTAD を用いた太陽電池は、試験後ボイドの形成は確認されなかった。TOF-SIMS の結果と併せると、高温曝露によりホール輸送層のドーパントがペロブスカイト膜に拡散することで、ボイドの発生やワイドギャップの PbI₂ の析出が生じたため、光吸収量の低下やキャリア再結合の増加が引き起こされ、効率が低下したと考えられる。

同様に後期劣化領域における高温曝露試験でのペロブスカイト単層膜の吸光スペクトルと X 線回折を測定した。図 III-2-(ハ)-A-6 に示すように初期劣化領域 (19h) では吸光度はほとんど変化しなかったが、後期劣化領域 (447h) においては、吸光度のスペクトルが大きく低下していることが確認できた。また、図 III-2-

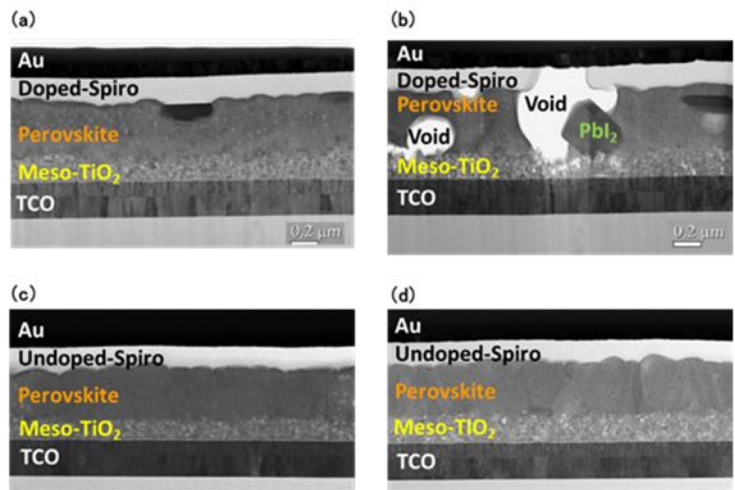


図 III-2-(ハ)-A-5 高温曝露試験前後の断面 SEM 像

- (a) ドーパント有りホール輸送層、高温曝露前
- (b) ドーパント有りホール輸送層、高温曝露後
- (c) ドーパント無しホール輸送層、高温曝露前
- (d) ドーパント無しホール輸送層、高温曝露後

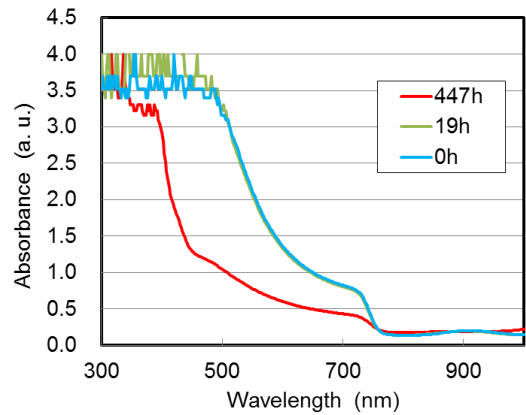


図 III-2-(ハ)-A-6 高温曝露前後での吸光度の変化

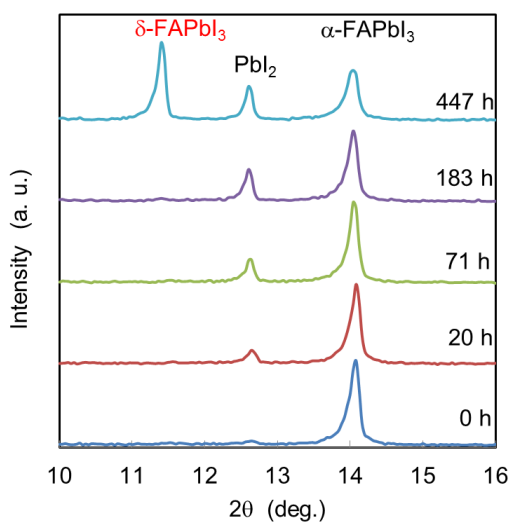


図 III-2-(ハ)-A-7 (FA, MA)Pb(I, Br)₃ 膜の高温曝露での X 線回折パターンの変化

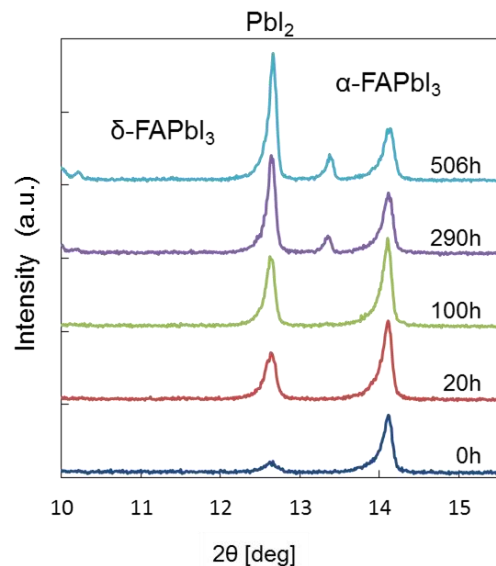


図 III-2-(ハ)-A-8 (Cs, FA, MA)Pb(I, Br)₃ 膜の高温曝露での X 線回折パターンの変化

(ハ)-A-7 に高温曝露前後のペロブスカイト層の X 線回折パターンの変化を示す。後期劣化領域においては 14.1° 付近の α 相が減少し、 11.6° 付近の δ 相のピークが増加していることが確認できた。したがって、後期劣化領域ではペロブスカイト膜において α 相から δ 相への相変化が起こり、これによる光吸収量の低下が変換効率の低下を引き起こしていると考えられる。

これらの劣化を抑制するためにホール輸送層とペロブスカイト膜の改善を行った。まず、初期劣化を抑制するために、ホール輸送層として分子量が大きくドーパントの移動を抑制できる PTAA (Poly(bis(4-phenyl)(2,4,6-trimethylphenyl)amine)) を用いた。さらに PTAA のドーパント Li-TFSI の添加量を 0.1ppm (Spiro-OMeTA では 0.5ppm) に低減することで、初期劣化を抑制することができた。次に、後期劣化要因となるペロブスカイト膜の相変化を抑制するために、高効率化技術で述べた δ 相の形成を抑制する Cs 添加を検討した。図 III-2-(ハ)-A-8 に (Cs, FA, MA)Pb(I, Br)₃ ペロブスカイト膜の高温曝露による XRD パターンの変化を示す。図 III-2-(ハ)-A-7 に比べ、Cs を添加することで高温曝露でも δ 相に相変化しないことが確認できる。ペロブスカイト膜に (Cs, FA, MA)Pb(I, Br)₃、ホール輸送層に PTAA 膜を用いた太陽電池の高温曝露試験による効率変化を図 III-2-(ハ)-A-9 に示す。85°C、1000 時間で効率低下がなく、中間目標である高温曝露試験 1000 時間で効率維持率 100% (変換効率 11.0%) を達成した。

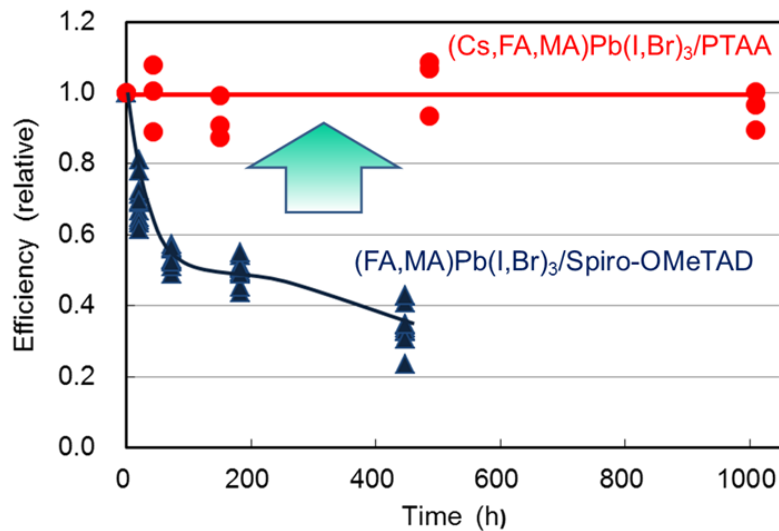


図 III-2-(ハ)-A-9 (Cs, FA, MA)Pb(I, Br)₃/PTAA 太陽電池での高温曝露における効率の劣化抑制

なお、ペロブスカイト膜の組成比やホール輸送層のドーパントの改良で耐熱性を維持しつつ効率の向上に目処が立ってきている。

(3) モジュール化技術

ペロブスカイト太陽電池は、他の薄膜太陽電池と同様に図 III-2-(ハ)-A-10 に示すような基板上で複数セルを直列接続する集積形モジュールを構成できる。そこで、ペロブスカイト太陽電池モジュール特有の課題を抽出するために、集積形モジュールの試作を行った。

モジュールは以下の製造工程で作製した。図 III-2-(ハ)-A-10 において、TiO₂ を被覆した透明電極 TCO を分割するパターニング P1 には、薄膜 Si や CdTe 太陽電池と同様に YAG レーザの基本波 (1.06μm) を用いた。ペロブスカイト膜とホール輸送層 Spiro-OMeTAD はスピコートで塗布した。その後、CIGS 太陽電池等で用いられるニードルで薄膜を剥離するメカニカル・スクライブによりペロブスカイト膜とホール輸送層をパターニング (P2) した。金属電極 Au 膜を蒸着した後、メカニカル・スクライブによりセルを分離するパターニング P3 を行った。図 III-2-(ハ)-A-11 に 20cm 角基板上で作製したペロブスカイト太陽電池モジュールの概観を示す。図 III-2-(ハ)-A-12 には、P1, P2, P3 の光学顕微鏡像を示す。

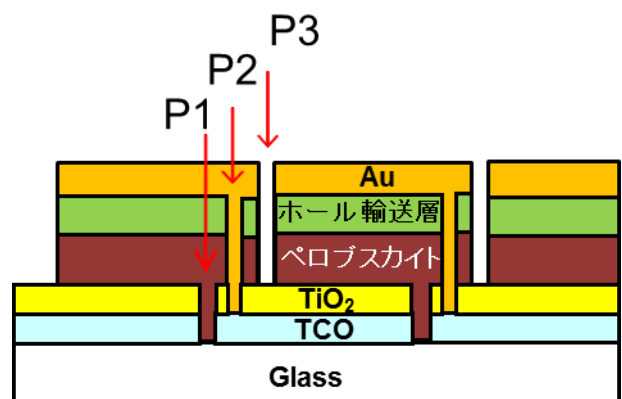
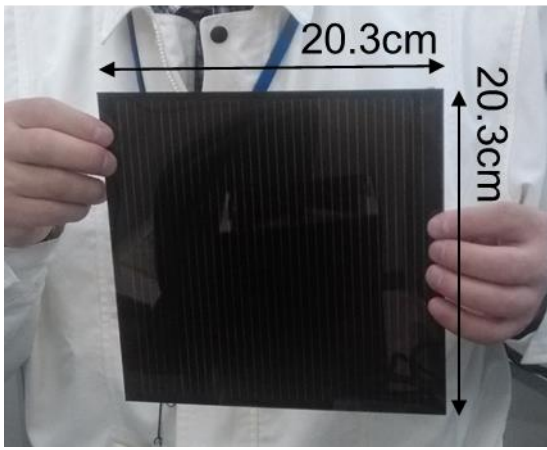
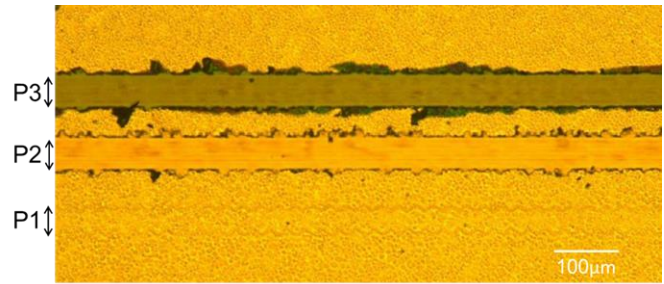


図 III-2-(ハ)-A-10 ペロブスカイト太陽電池モジュールの断面構造

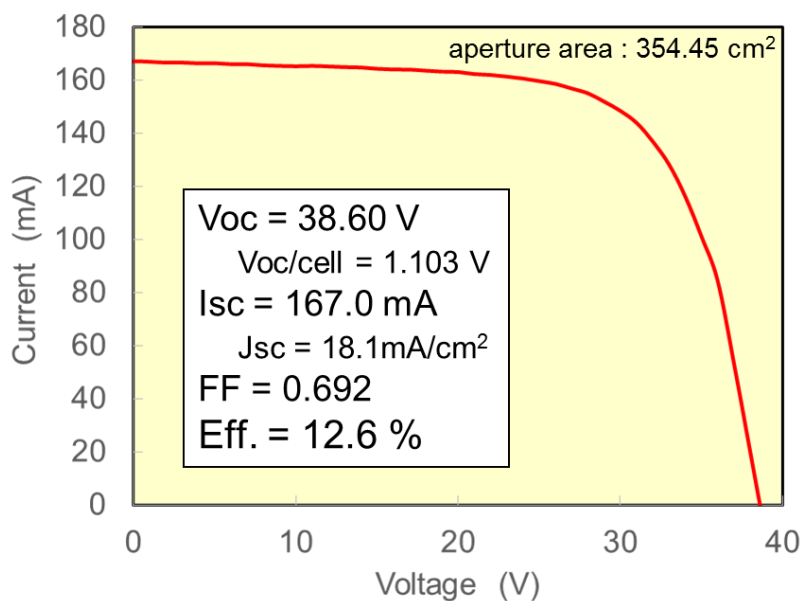


図Ⅲ-2-(ハ)-A-11 20cm角ペロブスカイト太陽電池モジュールの概観



図Ⅲ-2-(ハ)-A-12 パターニング箇所 P1, P2, P3 の光学顕微鏡像

P2, P3 のメカニカル・スクライブのラインは、チップング（パターニング幅からの余分な剥離）が少なく、直線的にパターニングされていることがわかる。安価なメカニカル・スクライブ装置がパターニングに使用可能であることは、プロセスの低コスト化に繋がる。ここで、P2 における透明電極 TCO と裏面電極 Au との接触において、c-TiO₂層が間に挿入されることになる。TCO/c-TiO₂/Au のコンタクト抵抗を測定したところ、0.5 Ω cm² であり、太陽電池の曲線因子 FF に影響を及ぼす値であることが確認された。そこで、P2 におけるコンタクト抵抗を低減するために、メカニカル・スクライブ後の TCO/c-TiO₂表面に YAG の 3 倍高調波のレーザー光（波長 355nm）を照射し、TCO と TiO₂ とのミキシングによる低抵抗化を図った。レーザー光のパワー密度 1J/cm² 以上を照射することで、TCO/c-TiO₂/Au のコンタクト抵抗は 0.1 Ω cm² に低下した。レーザー光照射による P2 のコンタクト抵抗を低減したモジュールの電流－電圧特性を図Ⅲ-2-(ハ)-A-13 に示す。20cm 角サイズのモジュールとして世界最高の効率 12.6%（Voc=38.60V, Isc=167.0mA, FF=0.692, 開口面積:354.45cm², 自社測定）を達成した。また、35 直列のセルの平均 Voc は 1.103V であり、小面積の太陽電池セルの Voc とほぼ同じであり、5 直列接続の集積モジュールで開放電圧 5V（セル単位で 1V）以上の中間目標を達成した。20cm 角基板にスピコートで製膜しているため膜厚分布は大きいですが、Voc に関しては、基板内でほぼ均一であることがわかった。これは、大面積モジュールにおけるプロセス許容度が大きいことが期待できる結果である。



図Ⅲ-2-(ハ)-A-13 20cm角ペロブスカイト太陽電池モジュールの電圧－電流特性

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、塗布工程で高効率を得られる利点を有しており、本研究開発において、小面積で効率 20%を達成した。塗布工程が常温・常圧プロセスであることによる設備投資の低減を図れるだけでなく、ペロブスカイト膜が 30 秒で製膜可能であることからプロセスのタクト向上が可能であり、圧倒的な低コスト化が期待できる。さらに、モジュール化においては、従来の薄膜太陽電池のパターニング技術の適用による高精細化（高効率化）や低コスト化が期待できると共に、直列接続構造における分割セルの平均開放電圧が小面積セルと同様であることから大面積モジュールのサイズ拡大でも高効率の確保の見通しも立ってきた。実用化に向けた課題としては、製造コストの低減に係わる大面積均一塗布での歩留り向上と発電コストの低減に係わる信頼性の確保が挙げられる。大面積均一塗布では、スピコートに替わる高速塗布プロセスの絞り込みが完了しており、大面積塗布への実証を進める予定である。ペロブスカイト太陽電池の信頼性向上では、従来の太陽電池の品質の規格試験、安全性の試験等をクリアする材料、デバイスの開発を進めると共に、複合試験等の加速試験を実施し長期信頼性を確保する予定である。これらの実用化技術を早期に確立することで事業化への道筋を明確化する。

3. 波及効果

本研究開発における塗布工程で製造する太陽電池は、曲面への形成が可能である。CO₂ の削減に向けたモビリティの電動化移行に対し、曲面形成が可能な高効率太陽電池として車載分野への展開が期待できる。また、ペロブスカイト太陽電池はバンドギャップの制御が可能であることから、タンデム太陽電池のトップセルへの応用が可能である。特に、ペロブスカイト太陽電池は約 100℃の低温形成が可能であることから、ボトムセルの結晶 Si や化合物薄膜 CIGS 太陽電池の上に形成する際に、ボトムセルにおける元素の相互拡散等の熱影響がなく、高品質なタンデム太陽電池を作製する可能性がある。また、これまで薄膜太陽電池でのタンデム化の課題であったトップセルの高効率化を実現する可能性があり、これまでにない高効率・低コストを両立するタンデム太陽電池として既存市場の拡大だけでなく、ソーラーシェアリング等の潜在的な導入可能量を有する未利用域への展開も期待できる。

4. 今後の展開

中間目標における小面積セルの変換効率、耐久性、モジュールの集積化における基盤技術の確立をほぼ達成した。これらの技術を基に、モジュールにおける高効率化と高耐久化の技術確立を図るとともに、大面積塗布の均一化や製膜速度の高速化の検証を行い、モジュール製造コストの破壊的な低コスト化の見通しを立てる。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	1(0)	0(0)	1 件
論文	0	0	1	1 件
研究発表・講演（うち国際会議）	2(0)	2(2)	2(0)	6 件
展示会への出展	0	0	1	1 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	パナソニック(株)	特願 2016-152616	国内	2016/8/3	出願	太陽電池モジュールおよびその製造方法	樋口洋、根上卓之

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	藤村慎也 他	パナソニック(株)	ペロブスカイト太陽電池の耐久性向上	Panasonic Technical Journal, Vol.63, p.66 (2017).	有	2017/5/15

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	根上卓之	パナソニック(株)	Progress and Challenges of Perovskite Solar Cells	2nd Int' l Symposium on Interactive Materials Science Cadet Program	2015/11/1
2	松下明生 他	パナソニック(株)	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	ペロブスカイト太陽電池の初期劣化モデルに関する考察	2016/3/22
3	松下明生 他	パナソニック(株)	Degradation Mechanism in High-temperature Exposure of Perovskite Solar Cells	26th Int' l Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/27
4	関本 健之 他	パナソニック(株)	Evaluation of energy level diagram of HC(NH ₂) ₂ PbI ₃ single crystal by electrical and optical analysis	Int' l Conference Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference (AP-HOPV)	2017/2/3
5	根上卓之	パナソニック(株)	応用物理学会 第 146 回結晶工学分科会研究会	化合物薄膜太陽電池 (CdTe、CIGS) とペロブスカイト太陽電池	2017/4/14

6	根上卓之	パナソニック (株)	日本学術振興会 薄膜 第 131 委員会 第 285 回研究会	CIGS 系,CdTe 系化合 物とペロブスカイト太 陽電池	2017/6/30
---	------	---------------	---------------------------------------	--------------------------------------	-----------

【展示会への出展】

番号	所属	会議名	内容	発表年月
1	パナソニック(株)	第 12 回再生可能エネ ルギー世界展示会	NEDO ブース内にてペロブス カイト太陽電池モジュール展 示	2017/7/5～ 7/7

B 超軽量太陽電池モジュール技術の開発（株式会社東芝）

1. 成果詳細

[概要]

本プロジェクトでは、超軽量のペロブスカイト太陽電池の開発を行っている。塗布条件を最適化し、変換効率は1cm×1cmのガラスセルで16.8%、5cm×5cmのガラスミニモジュールで14.0%、同サイズのPENミニモジュールで13.7%まで向上した。

耐久性向上に繋がるPENフィルム向けITOの改良を行った。耐熱性試験ではガラスセルにおいて1000時間で約1%の劣化率、フィルムセルにおいて、約43%の劣化率が得られた。照射試験ではガラスセルにおいて500時間で約41%、フィルムセルにおいては、約49%の劣化率が得られた。

1.1 超軽量太陽電池用塗布印刷/モジュール化技術の開発

本技術開発ではポリマーフィルムを基板として開発を進めるが、その基板材としてPENを選択した。基板にポリマーフィルムを用いると、高温プロセスを適用することができないため、ペロブスカイト太陽電池開発では大きな制約となる。しかし、PEN基板はその中でも比較的耐熱性が高く150℃程度までのプロセスが可能である。セル構造は、150℃以下の低温プロセスが可能な逆構造プレーナ型を選択した。

まず基板特性であるが、PEN基板は紫外から青色にかけて透過率が低く（図Ⅲ-2-(ハ)-B-1）、効率の点で不利となる。ただし、耐久性向上のための紫外線カットの役割を持っているとも言える。また、成膜時においてハンドリングし易い様、仮着層を

介して保持用のガラスをPENフィルムに固定した。本報告書で記載したI-V測定は保持ガラスをつけたまま測定した結果のため、PEN基板のみの値より低い特性となっている。

次に透明電極の開発について説明する。ポリマーフィルム向けのITOは通常アモルファスITOであり、シート抵抗が高めで耐薬品性が低い。そのため、ITOの

改良を試みた。ITO成分のIn:Snの比率を93wt%:7wt%から96wt%:4wt%へと変えて結晶化温度を下げ、150℃のアニールで結晶化を試みた。TEM分析で確認した結果、目論見通り結晶化がTEM像で

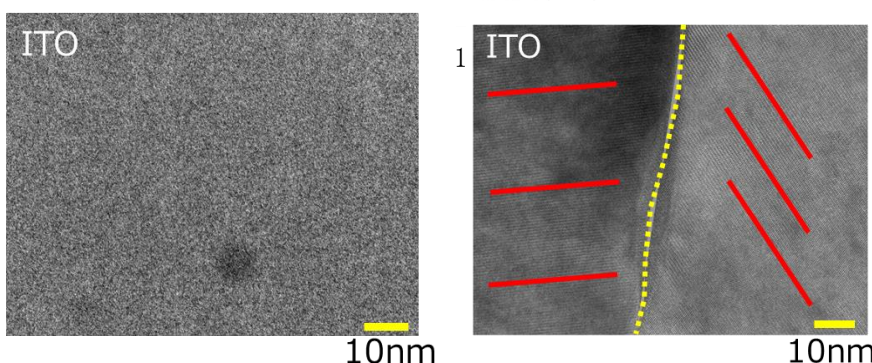
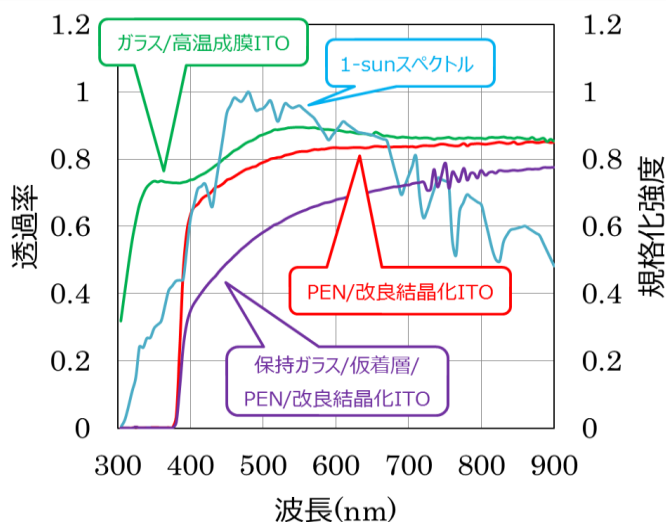


図. Ⅲ-2-(ハ)-B-2. アモルファスITO（左図）と改良したITO（右図）のTEM像を示す。右図中の赤線は結晶方位、点線は結晶方位の異なる境界を示している。

確認され、シート抵抗も 24Ω から 17Ω へ低減することができた。アモルファス ITO と改良した ITO の TEM 像を図. III-2-(ハ)-B-2 に示す。ホール輸送層に PEDOT 系材料を用いたセルの 85°C 耐熱性試験では、PEN 基板アモルファス ITO セルの 1000H 後の劣化率は 99% だったのに対し、PEN 基板改良 ITO セルでは劣化率 75% と、ガラス基板高温 ITO 結晶成膜セルの劣化率 76% と同等の結果まで向上した。

この ITO を用いてセルの開発を行った。本報告のセルサイズは全て $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ である。ペロブスカイト層には MAPbI_3 (Methylammonium Lead Iodide) を用いたが、この成膜方法では MAI と PbI_2 の混合溶液を塗布する 1-step 法

と、 PbI_2 成膜後に MAI を塗布して反応させ MAPbI_3 を形成する 2-step 法とがある。本開発では双方を試し、再現性に優れた 2-step 法を選択した。高効率化のポイントの1つは 2-step 目の反応であり、反応をできるだけ進めるようなプロセス条件を探索した。ホール輸送層は有機系、電子輸送層は有機系あるいは PCBM、金属電極は Ag を用いた。その結果、ガラス基板で 16.8%、PEN 基板で 15.6% の値が得られた (図 III-2-(ハ)-B-3)。

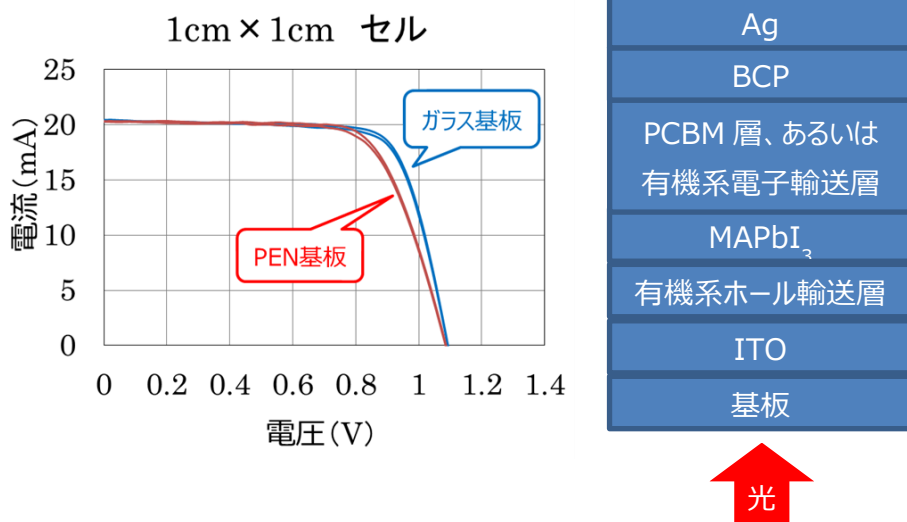


図. III-2-(ハ)-B-3 開発した $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ セルの I-V 特性と層構成。Ag : silver、BCP : bathocuproine、PCBM : [6, 6]-Phenyl-C61-Butyric Acid Methyl Ester、 MAPbI_3 : Methylammonium Lead Iodide、ITO : Indium Tin Oxide。

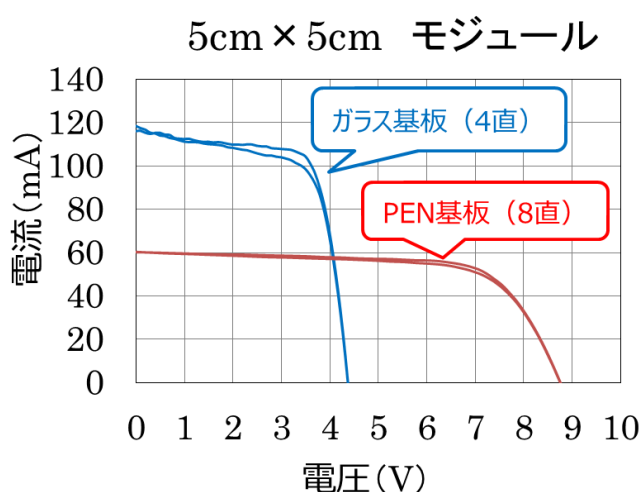
現時点でのガラス基板セルと PEN フィルム基板セルの効率の比は 1:0.93 である。この差は、ITO のシート抵抗や濡れ性の違いが原因であると考えているが、PEN 基板特有の突起構造が起因している可能性も考えられる。

次にモジュール開発について説明する。モジュールを作製する場合、直列セル構造を形成するスクライブプロセスが必要となる。我々はスクライブ法として、メカニカルスクライブを選択した。基板の透明電極を分離する P1 スクライブ、活性層とホール輸送層を分離する P2 スクライブ、金属電極を分離する P3 スクライブがあるが、P2 スクライブの開発を以下に説明する。P2 スクライブはセル間の補助電極上に塗布されたペロブスカイト層とホール輸送層を補助電極から剥離する工程である。PEN 基板はやわらかく、スクライブ時に刃圧を強くすると ITO 電極や PEN 基板が壊れることがあり、弱くするとスクライブすべきホール輸送層やペロブスカイト層が多く残ってこの部分の抵抗値が高くなる。この狭い適正刃圧領域でスクライブを可能とするには、補助電極とホール輸送材の組み合わせが重要であることが分かり、改善の結果、当初数~ 200Ω であったセルとセルの接続部分の抵抗が 0.3Ω まで小さくすることが出来た。

モジュール試作における成膜は、当初、スピンコートで行ったが、基本条件を取得後、メニスカス塗布にシフトした。メニスカス塗布とは、コーター塗布の一種であり、アプリケーションと基板との間のギャップに形成されるメニスカスの特性を活用して成膜する方法である。この手法は膜厚を精度良く、

適しているに塗布することができる印刷技術であり、スピコートより大面積塗布に適している。スピコートによるモジュール試作よりもメニスカス塗布によるモジュール試作の方が、塗布均一性が高いため、効率及び再現性は向上した。当初のスピコートで試作した6直ミニモジュールのセルごとのばらつきとメニスカス塗布で試作した8直ミニモジュールのセルごとのばらつきを測定し、その最大効率値に対する最小効率値の比率を調べた結果、それぞれ0.28と0.56であり、メニスカス塗布の優位性が確認できた。

メニスカス塗布で試作した5cm×5cmサイズのミニモジュールでは、4直列ガラス基板モジュール（開口率93.5%）で14.0%、8直列PEN基板モジュール（開口率89.5%）で13.7%が得られた（図. III-2-(ハ)-B-4）。比較するために開放電圧 V_{oc} と短絡電流 I_{sc} を規格化したところ、 V_{oc} 、 I_{sc} 、曲線因子 FF は全てほぼ同じという結果を得た。ガラスモジュールとPENモジュールの変換効率の比は、1:0.98、ガラス基板での1cm角セルと5cm角モジュールの比は1:0.83、PEN基板での1cm角セルと5cm角モジュールの比は1:0.88となった。5cm×5cmサイズの超軽量ミニモジュールの効率は、中間目標値を大きく上回る結果となった。モジュール写真を図. III-2-(ハ)-B-5に示す。



	ガラス (4直)		PEN (8直)	
	行き	戻り	行き	戻り
$I_{sc}(mA/cm^2)$	118.4	116.1	60.4	60.3
$V_{oc}(V)$	4.37	4.37	8.75	8.76
FF	0.667	0.719	0.676	0.702
PCE(%)	13.3	14.0	13.2	13.7
$R_s(\Omega \cdot cm^2)$	4.8	4.7	20.2	19.3
$R_{sh}(\Omega \cdot cm^2)$	363	639	1495	2039
開口率	93.5%		89.5%	

図. III-2-(ハ)-B-4 開発した5cm×5cmモジュールのI-V特性。行きは J_{sc} から V_{oc} への測定、戻りは V_{oc} から J_{sc} への測定。

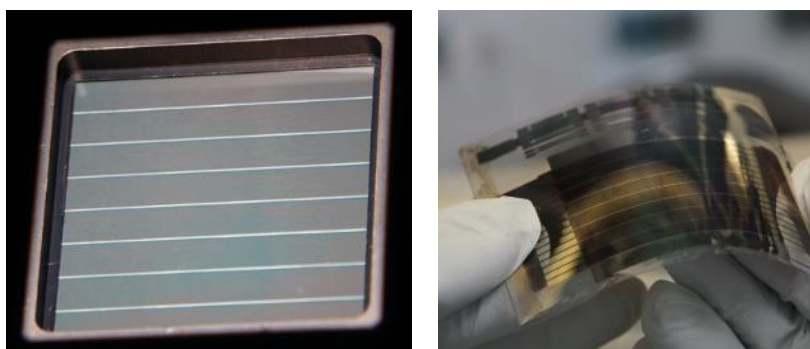


図. III-2-(ハ)-B-5 保持ガラスをつけた5cm×5cm超軽量モジュールと保持ガラスをはずした超軽量モジュールの写真。

同構造で別の超軽量ミニモジュールを電気安全環境研究所（JET）において特性測定を行った。電気安全環境研究所ではヒステリシスがある程度存在する場合は、行き（ J_{sc} から V_{oc} への測定）の特性値を採用するというこことで、本測定による変換効率は 10.52%であった。このミニモジュールを電気安全環境研究所測定の前後に自社測定した結果は、行きの測定値で、10.8%（測定前）、11.0%（測定後）とほぼ同等の値であった。

1.2 超軽量太陽電池の耐久性向上技術の開発

耐久性は JIS8938 に準拠した 85°C 耐熱性試験および光照射試験で評価した。1cm×1cm サイズの PEN 基板セルの耐熱試験結果は、1000 時間で約 43%の劣化率となった（図. III-2-(ハ)-B-6）。

分析の結果、耐熱性試験における劣化の要因は、 $MAPbI_3$ のヨウ素がハロゲンサイトから外れて拡散し、金属電極の銀とヨウ素が反応してヨウ化銀となることと判断し、その確認実験を行った。

ガラス基板セルにおいて、金属電極の銀を金に変えたところ、図. III-2-(ハ)-B-7 のように劣化率が 19%から 8.3%と減少した。また、Ag の下に ITO 層を挿入し、ヨウ化を抑制する構造にすると、劣化率は約 1%となった。このように、金属電極のヨウ化を防ぐと耐熱性が向上することが判明したため、PEN 基板セルへの適用を進める。しかしながら、PEN 基板セルとガラス基板セルの間には耐熱性の差異も見られる。この原因は PEN 基板にわずかに含まれる水分の影響が現れているのではないかと推測している。今回 85°C 耐熱性試験では、封止の影響を省くために、封止なし、窒素ガス雰囲気中で行ったがそれだけでは十分ではなく、ITO 層と PEN 基板の間にバリア層を挿入する必要があると考えている。今後はバリア膜付きの基板を用いて耐熱性向上を図る。一方、光照射試験において、PEN 基板セルでは劣化率 49%（図. III-2-(ハ)-B-8）、ガラス基板セルでは劣化率 41%（図. III-2-(ハ)-B-9）となった。光照射試験の効率低下傾向では、ガラス基板と PEN 基板の差は小さい。光照射試験前後の分光感度を調べた結果、300nm~800nm 全域にわたって量子効率が下がっており、 $MAPbI_3$ の劣化の影響が大きいと予想している。 $MAPbI_3$ の劣化を防ぐためには、ハロゲンサイトやカチオンサイトの欠陥を減少させ、結晶性の維持を高めることが有効と考えている。これは、変

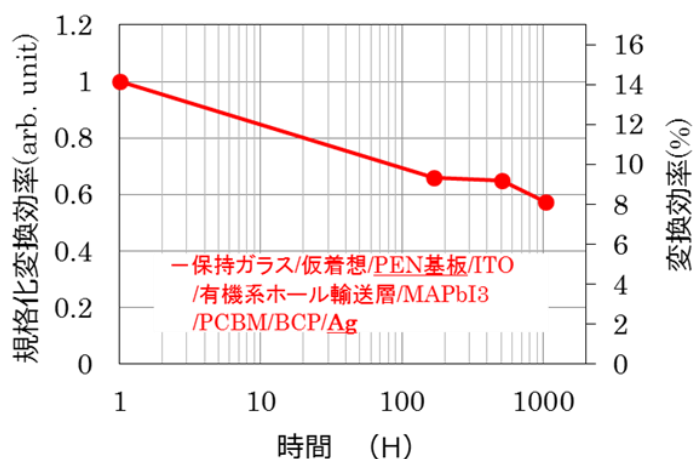


図. III-2-(ハ)-B-6 PEN 基板セルの 85°C 耐熱試験結果。

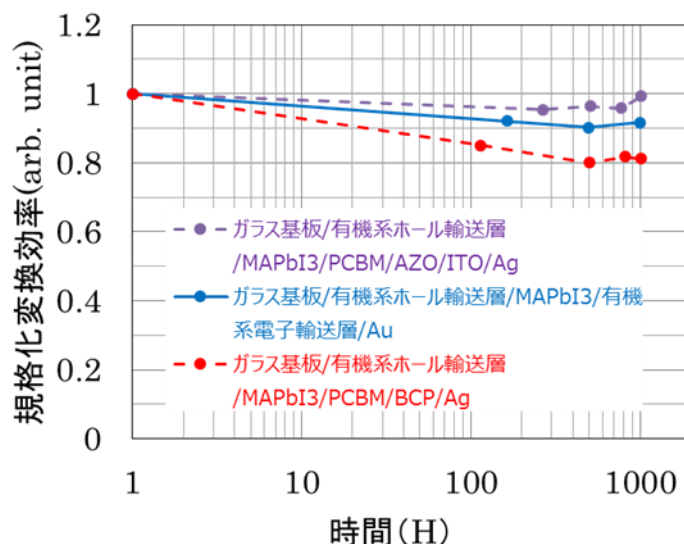


図. III-2-(ハ)-B-7 ガラス基板セルの 85°C 耐熱試験結果。

換効率の向上にも寄与する要素でもあるので、これを実現する成膜プロセスを開発する。特にペロブスカイト層の塗布が 2-step 法であるため、 PbI_2 と MAI との反応を今以上に膜全体で均一に行わせることがポイントと考えている。

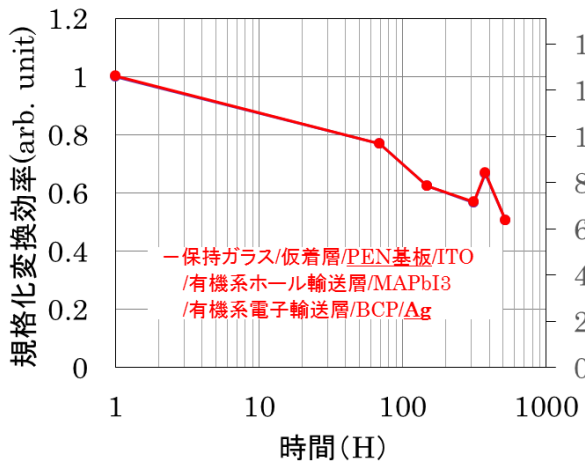


図. III-2-(ハ)-B-8 PEN 基板セルの光照射試験結果。

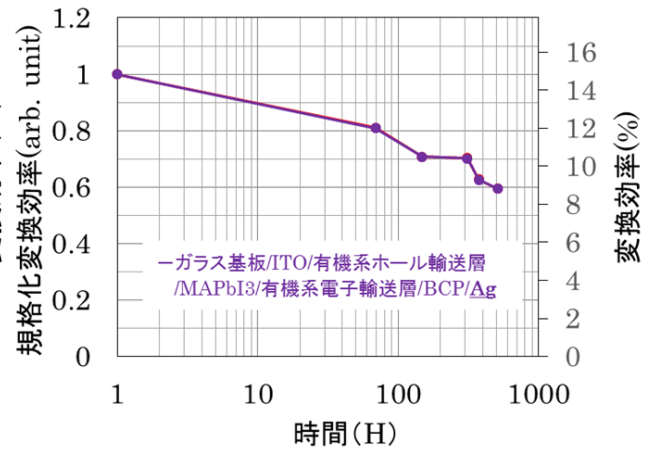


図. III-2-(ハ)-B-9 ガラス基板セルの光照射試験結果。

2. 実用化・事業化見通し

1. 実用化・事業化を行う製品・サービス等の概要

(1) 内容

住宅や工場、公共施設の屋根や屋上、ビル壁やビル窓（シースルー型）への設置を行う。超軽量モジュールの生産は、外部企業へ委託することを検討している。

(2) 用途

2030年までに7円/kWhを達成し、ボリュームゾーンでの設置を目指す。早めの上市を行うため、まず、結晶Si太陽電池とは異なる市場の開拓を狙う。

NEDO 調査報告書（平成 24 年度成果報告書「太陽光発電における新市場拡大等に関する検討」、NEDO 契約管理番号：12102792-0）からは、結晶Si太陽電池が重量制限・耐震制限で設置できない工場や公共施設が相当数あることが分かり、1兆円以上の市場規模に相当する。これは、結晶Si太陽電池と住み分けられる市場が存在することを意味している。弊社は結晶Si太陽電池販売事業を行っており、固定価格買い取り制度の廃止以降の影響を低減する必要があるが、新規市場創出として新たな製品投入を行いたい。性能が需要喚起可能な仕様に到達すれば、結晶シリコン太陽電池事業をすでに行っているメーカーでも、その事業を損なうことなく売り上げを伸ばすことができる。超軽量の太陽電池は、簡便な設置による設置コスト低減が可能であり、顧客の初期投資を抑えることができる。

2. 実用化・事業化への取組み

本Pj成果を活かし、Pj終了後、研究部門にて変換効率18%以上の超軽量大面積モジュール技術を開発し、これらの技術とビジネスモデル案を事業部門へ展開する。事業部門では想定するビジネスモデルと技術に対する精査・ジャッジを行う。弊社は、業界でも上位のシェアを占めており、製品に需要喚起可能な特性があれば、相応の事業化投資を行う。製造はアウトソーシングで行っており、本Pj成果もそのモデルに則って事業化を検討する。

3. 波及効果

本Pjの成果は将来の太陽電池市場における我国の覇権奪還につながると期待する。技術的には、単にペロブスカイト太陽電池技術に留まらず、周辺材料・周辺部材・システムにおいても技術革新を誘発するとともに、安全で低コストの発電システムの開発を促す。さらに、印刷による低コスト製造技術の開発は、他の電子デバイスの製造技術にも変革をもたらし、高機能・低コストデバイスの実現を可能にする。

経済的には、グリッドパリティを実現し再生可能エネルギーによる我が国の経済発展を促すとともに、化石燃料に依存しない安定な経済構造をもたらす。

社会的には、新規市場の創出によって雇用を回復すると共に、放射能等の危険性から国民を解放し、新たな活力ある社会を生み出す。

4. 今後の展開

2017 年度中に 1cm×1cm サイズのセルの耐熱、光照射に対する耐久性を確保する。一方、メニスカス塗布技術をさらに高めてモジュールの大面积化を進め、2019 年度には、30cm×30cm サイズの超軽量モジュール効率 15%、あるいは 15cm×15cm サイズの超軽量モジュール効率 17%を達成する。

本 Pj 終了後に、PEN 基板を PET 基板に変更する等の低コスト化を進め、市場調査、超軽量性を考慮し、建材一体型モジュール（BIPV）を含めたビジネスモデルの検討とモジュール仕様策定を行う。仕様と技術完成度を鑑み、事業化判断を行う。事業化にあたっては、結晶 Si とは異なる超軽量モジュールの市場開拓から開始する予定である。イニシャルコストは極力低く抑えて市場を立ち上げ、パネルの定期交換を含むメンテナンスやソリューションビジネスで適正な利潤を回収するモデルも検討する。この場合パネルの低コスト化が必須となるが、このようなビジネスモデルと組み合わせることによって他国に対して差別化を図り、P V 市場における我が国の覇権を奪還することを目指す。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0(0)	6(2)	0(0)	6 件
論文	0	1	0	1 件
研究発表・講演（うち国際会議）	0(0)	4(1)	1(1)	5 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許出願】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	(株) 東芝	P2016-178505	国内	2016/9/13	出願	光電変換素子	丁 香美;五反田 武志
2	(株) 東芝	P2016-185215	国内	2016/9/23	出願	光電変換素子、光電変換素子の製造方法、および光電変換素子の製造装置	五反田 武志;丁 香美
3	(株) 東芝	P2017-010525	国内	2017/1/24	出願	光電変換素子および光電変換素子の製造方法	森 茂彦;五反田 武志;大岡 青日;都鳥 顕司
4	(株) 東芝	15/436113	米国	2017/2/17	出願	PHOTOELECTRIC CONVERSION ELEMENT, AND METHOD AND APPARATUS FOR MANUFACTURING THE SAME	五反田 武志;丁 香美
5	(株) 東芝	15/439496	米国	2017/2/22	出願	PHOTOELECTRIC CONVERSION DEVICE	丁 香美;五反田 武志
6	(株) 東芝	P2017-042636	国内	2017/3/7	出願	半導体素子と製造方法	五反田 武志;大岡 青日

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	T. Gotanda, S. Mori, A. Matsui, H. Oooka	Toshiba Corp.	Effects of gas blowing condition on formation of perovskite layer on organic scaffolds	Chemistry Letters, Volume 45, Issue 7, 2016, Pages 822- 824	有	2016/7/5

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	五反田 武志、 森 茂彦、大岡 青日、丁香 美、都鳥 颯 司、中尾 英之	(株) 東芝	有機を下地層とする ペロブスカイト形成 過程におけるガスブ ローの影響	2016年 第77回応 用物理学会秋季学 術講演会	2016/9/16
2	都鳥 颯司、中 尾 英之、大岡 青日、森 茂 彦、丁香美、 五反田 武志	(株) 東芝	ペロブスカイト系革 新的低製造コスト太 陽電池の研究開発 (超軽量太陽電池モ ジュール技術の開 発)	NEDO 新エネルギー 部成果報告会	2016/10/31
3	T. Gotanda , S. Mori , H. Oooka, H. Jung, K. Todori, H. Nakao	Toshiba Corp.	Effects of Gas Blowing on the Formation of a Mixed Halide Perovskite Layer on Organic Scaffolds	2016 MRS Fall Meeting	2016/12/2
4	森 茂彦、五反 田 武志、丁 香美、大岡 青 日、中尾 英 之、都鳥 颯 司、中井 豊	(株) 東芝	ポリマー/ITO 基板を 用いたペロブスカイ ト太陽電池の耐熱性 評価	2017年 第64回応 用物理学会春季学 術講演会	2017/3/17
5	H. Jung, H. Oooka, S. Mori, H. Nakao, T. Gotanda, K. Todori, Y. Nakai	Toshiba Corp.	Development of low temperature solution-processed perovskite photovoltaic cells and modules	International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics 2017	2017/5/23

C 低コストR2R太陽電池製造技術の開発（積水化学工業株式会社）

1. 成果詳細

①超軽量太陽電池の耐久性の向上

超軽量基板を用いたペロブスカイト太陽電池について、JIS規格C8938準拠の耐久性試験5項目（耐熱、耐湿熱、耐光、温度サイクル、湿熱サイクル）における性能低下率10%未満を達成するために、次のような順番にて検討を行った。

まず、ガラス基板を用いた一般的なペロブスカイト太陽電池の耐熱試験を行い、課題抽出・改善検討を行う。そして耐熱試験を達成し得る材料・構成を決定させる。次にその材料・構成を用いて耐湿熱性をクリアできる封止技術を構築する。その後、それらの技術を超軽量基板に適用することにより、上記耐久性5項目達成を目指す。

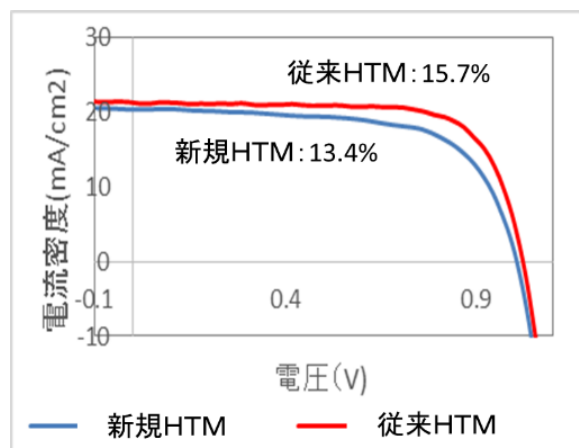
①-1 ペロブスカイト太陽電池の耐熱性向上検討

まず一般的な構成のペロブスカイト太陽電池として、FTO ガラス／緻密 TiO_2 ／多孔質 TiO_2 ／ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ ／ホール輸送材／Au という構成の評価用セルを作成した。なお $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は2段階法にて作成し、ホール輸送材としては、一般的に用いられている有機系のホール輸送材料（HTM）である Spiro-OMeTAD（添加剤として Li-TFSI（リチウムヘキサフルオロリンゲート）を含む）を用いた。耐熱試験としてN2グローブボックス中にて90℃での耐熱試験を実施した。

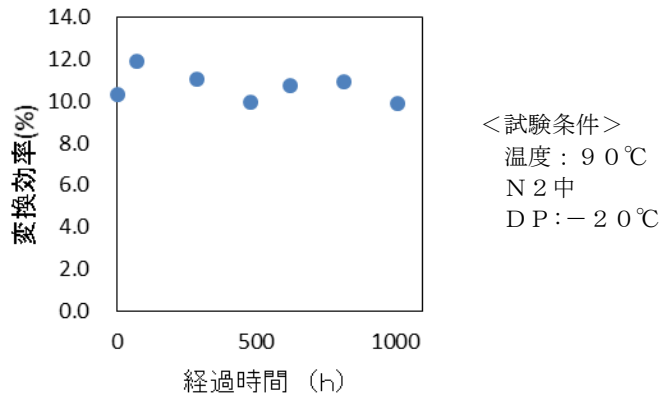
上記一般的な構成のペロブスカイト太陽電池は耐熱試験数十時間にて性能低下が発生することが確認できた。性能低下の詳細を調べたところ、上記添加剤が課題であることを解明した。この結果に基づき、耐熱性と変換効率の両立を目指してホール輸送材料（HTM）の改良を行った。

その結果、図III-2-(ハ)-C-1にI-V曲線を示すように、従来HTMを用いた変換効率が15.7%（受光面積4mm²）であるのに対し、新規HTMでは13.4%（受光面積4mm²）となったが、新規HTMを用いた耐熱試験では図III-2-(ハ)-C-2に示すように、90℃1000時間後に変換効率低下率10%未満を達成することができた。

なお、図において測定ごとに変換効率の値がばらついているが、初期の変換効率の上昇（10%付近から12%付近までの上昇）はエージング効果によるものであると考えられる。それ以降の変換効率の変動については、詳細は分かっていないが、測定ばらつきによる可能性が高いと考えている。



図III-2-(ハ)-C-1 新規HTMを用いたペロブスカイト太陽電池のI-V曲線

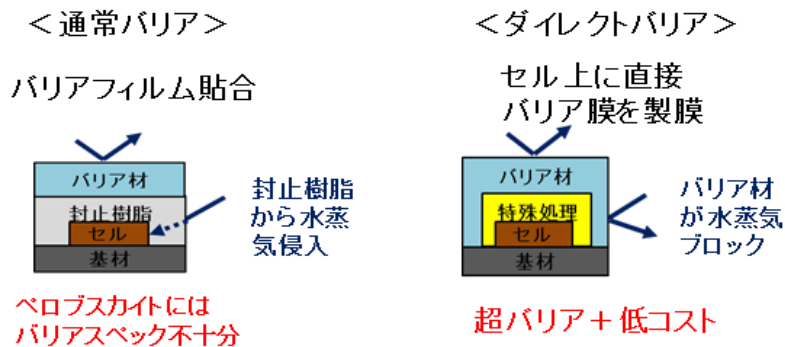


図Ⅲ-2-(ハ)-C-2 新規ホール輸送層での耐熱試験結果

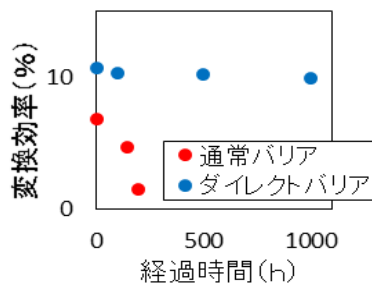
①-2 ペロブスカイト太陽電池の耐湿試験向上検討

ペロブスカイト太陽電池は非常に水分の影響を受けやすく、従来の封止方法では十分な耐湿熱性を得ることはできない。そこで平成26年度までのNEDO共同研究「太陽エネルギー技術研究開発／太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」において開発してきた新規封止方法（ダイレクトバリア）を採用することにより、ペロブスカイト太陽電池の耐湿熱性保持可能性について検証を行った。ダイレクトバリアのイメージ図を図Ⅲ-2-(ハ)-C-3 に示す。通常のバリア封止では封止樹脂から水蒸気が侵入するのに対し、ダイレクトバリアではバリア材が終端しているため水蒸気を高いレベルでブロックすることができる可能性がある。

①-1にて耐熱性を達成できたものと同じガラス基板上セルを用いてダイレクトバリアの効果を検証した結果、図Ⅲ-2-(ハ)-C-4 に示すように85℃85%の試験条件にて、1000時間後性能低下率10%以下を達成することに成功した。



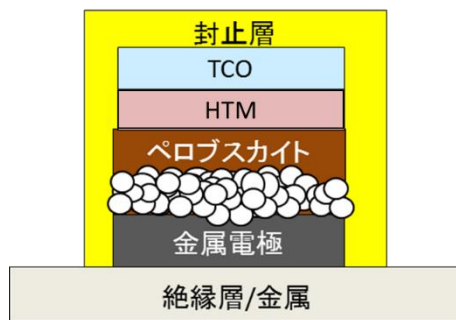
図Ⅲ-2-(ハ)-C-3 通常バリアとダイレクトバリアのイメージ図



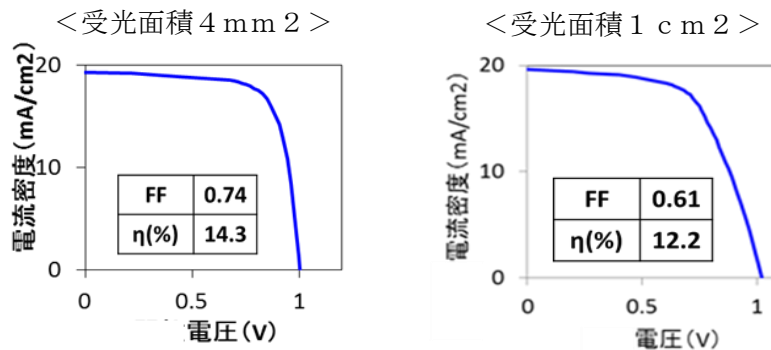
図Ⅲ-2-(ハ)-C-4 新規封止方法での耐湿熱試験結果

①-3 超軽量セルでの J I S 規格 C 8 9 3 8 準拠の耐久性試験 5 項目検討

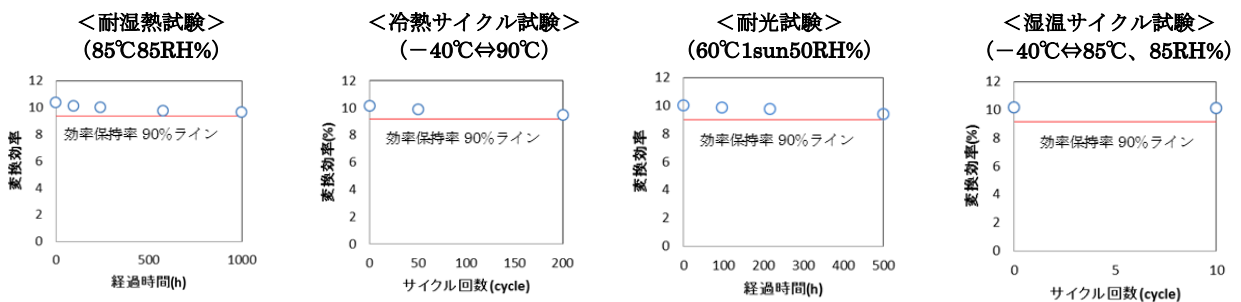
コスト、耐久性の観点から超軽量セルの基板として金属箔を選定し、図Ⅲ-2-(ハ)-C-5 に示すようなセル構成のペロブスカイト太陽電池を選定した。まず金属箔表面を絶縁化し、その後陰極として金属電極を成膜した。その後、多孔質 $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /ホール輸送層の順に積層し、最後に透明電極 (TCO) として ITO をスパッタリングにて成膜した。なお $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ は①-1 と同様に、2 段階法にて作成し、ホール輸送材は①-1 で得られた新規 HTM を用いた。その結果、受光面積 4 mm^2 にて 14.3% (図Ⅲ-2-(ハ)-C-6(左))、及び受光面積 1 cm^2 にて変換効率 12.2% (図Ⅲ-2-(ハ)-C-6(右)) の金属箔セルを得ることができた。この受光面積 1 cm^2 で変換効率 10% 以上の金属箔セルに①-2 で構築した新規封止方法を適用し、J I S 規格 C 8 9 3 8 準拠の耐湿熱、耐光、冷熱サイクル、湿熱サイクル試験を行った結果、それぞれに関して変換効率低下率 10% 未満を達成することに成功した。



図Ⅲ-2-(ハ)-C-5 金属箔セル構成



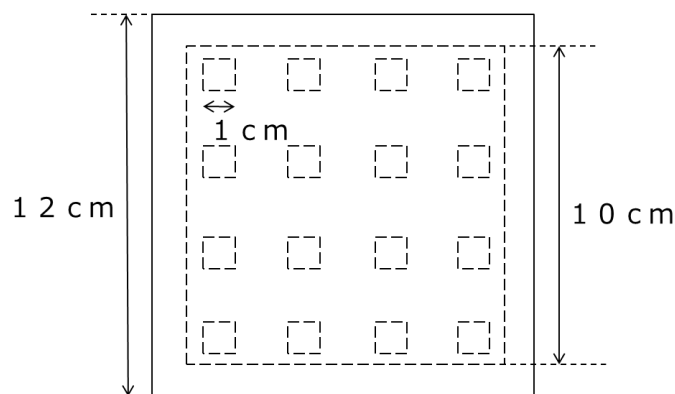
図Ⅲ-2-(ハ)-C-6 金属箔セルの I - V 曲線



図Ⅲ-2-(ハ)-C-7 金属箔 1 cm^2 セルでの耐久性評価結果

②-1 10cm角超軽量セルにおける面内の変換効率のばらつき低減

図Ⅲ-2-(ハ)-C-8 に示ように、12cm角のアルミ箔からなる超軽量基板上的10cm角のエリアに1cm角の発電エリアを16個有する構造の超軽量太陽電池セルを作成した。まず金属箔表面を絶縁化し、その後陰極として金属電極を成膜した。その後、多孔質TiO₂/CH₃NH₃PbI₃/ホール輸送層の順に積層し、最後に透明電極(TCO)としてITOを成膜した。



図Ⅲ-2-(ハ)-C-8 ペロブスカイト層の塗工サンプル外観

表Ⅲ-2-(ハ)-C-1 ダイ成膜素子の性能評価 (対スピンコート)

	改善前	改善後
MAX	12.5	12.3
MIN	6.9	11.2
Ave	10.7	11.7
3σ	5.04	0.98

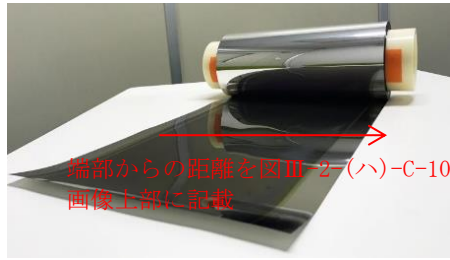
表Ⅲ-2-(ハ)-C-1 にダイ成膜した素子の性能評価結果を示す。通常のプロセスにて成膜したものについては、10cm角エリアのうちエッジ部分での変換効率が極端に低くなる傾向にあった。この原因について、中心とエッジ部での成膜プロセスの差異を検証したところ、溶媒が乾燥するスピードが中心部とエッジ部で異なることが判明した。

そこで溶媒の乾燥プロセスを改良することにより、面内での溶媒乾燥状態の均一化を試みた。その結果、表Ⅲ-2-(ハ)-C-1 に示す通り、変換効率の面内バラつきは低減し $3\sigma = 0.98$ を達成することに成功した。今後は今回得られたプロセス技術をR2Rプロセスへと適用していく。

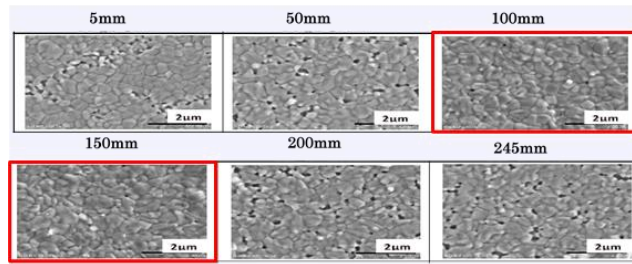
②-2 R2R塗布装置による塗工検討

平成27年度は②-1に示した通り、卓上ダイコーターを用いた塗工プロセスにより、スピンコート同等のセル特性が確認できた。平成28年度はより大面積での成膜を実証するべく、平成27年度に導入したR2R塗工機を用いてペロブスカイト層成膜検討を進めた。

図Ⅲ-2-(ハ)-C-9 に超軽量基材上にR2Rを用いて成膜したペロブスカイト層の外観写真を、また図Ⅲ-2-(ハ)-C-10 にその表面SEM観察結果を示す。中央部は緻密な膜が形成されており、スピンコート膜や卓上ダイコーター塗工膜に類似の表面状態であることがわかる。一方、端部では一部粒子間に隙間がみられる部分が存在する。これは溶媒の揮発スピードが中央部と端部で異なることに起因すると考えられ、加熱工程の最適化が必要であると考えられる。



図Ⅲ-2-(ハ)-C-9 R 2 Rで形成したペロブスカイト膜

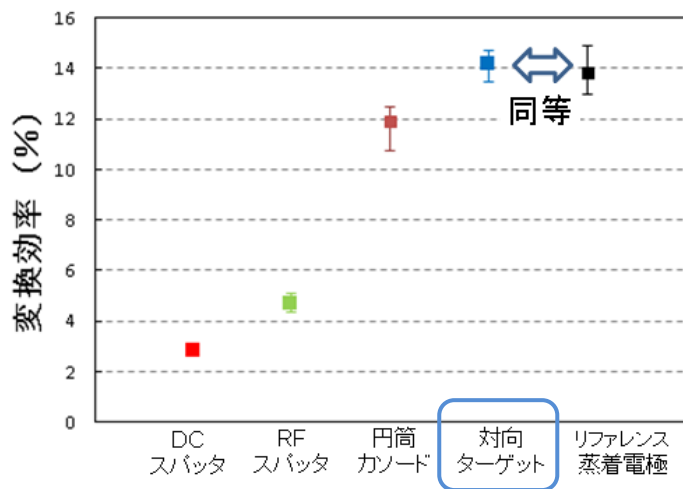


図Ⅲ-2-(ハ)-C-10 R 2 Rによるペロブスカイト塗工膜表面SEM像

②-3 ドライ成膜プロセスの検討

金属箔基板を用いた超軽量太陽電池セルの場合、ガラス基板の場合とは異なり、基板と反対側から光を入射する必要があるため、HTM層上に透明導電膜を形成する。その際、HTMを劣化させないプロセスを用いる必要がある。図Ⅲ-2-(ハ)-C-11 に種々のスパッタリングプロセスにおける発電性能への影響を評価した結果を示す。対向ターゲットスパッタにより、リファレンス（蒸着Au電極）セルと同等の性能を得られることが分かったため、インターバック式スパッタ装置に搭載するカソードとして対向ターゲット方式を選択した。

今後は今回導入した装置にて条件確立し、その後R 2 R化することにより、オールR 2 Rプロセスでのペロブスカイト太陽電池作成を目指す。

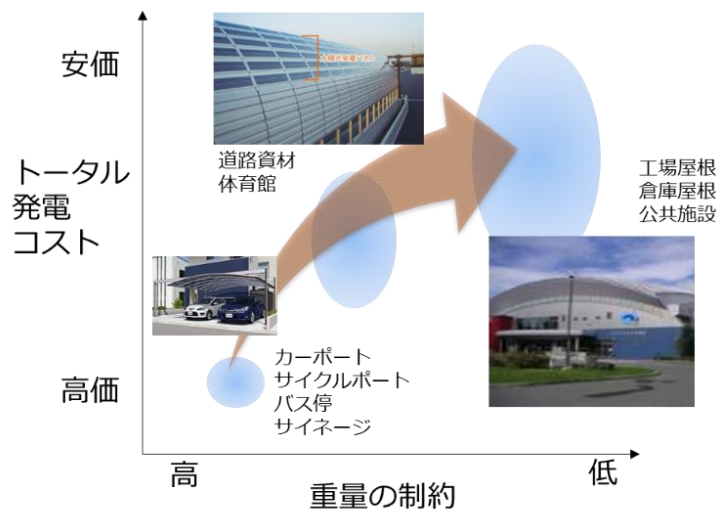


図Ⅲ-2-(ハ)-C-11 各種スパッタリングプロセスによる発電性能への影響

2. 実用化・事業化見通し

事業化に至るまでの当社のシナリオについて、事業化計画および製品ロードマップとして図Ⅲ-2-(ハ)-C-12に示す。

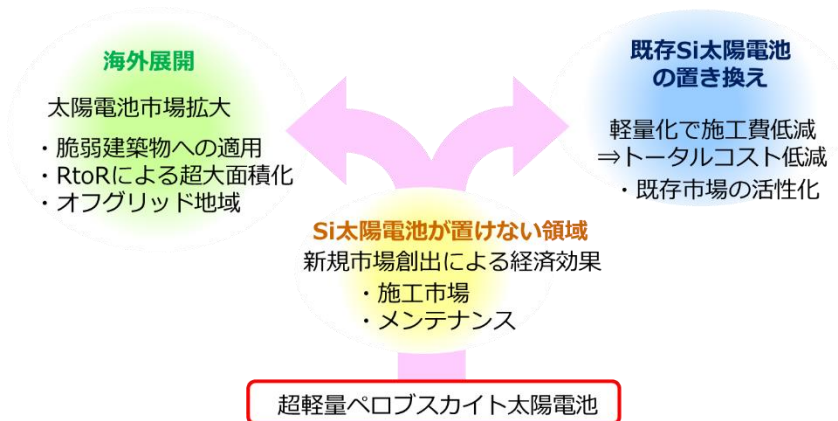
まずは超軽量の特徴を活かして、結晶シリコン太陽電池が設置できない領域にて事業化を目指していく。その後は超軽量・フレキシブルの特徴を活かすことにより、用途によっては結晶シリコン太陽電池と比較して施工費が低減できると考えている。。そのような領域にて事業拡大を目指していく。最終的にはロール状の超軽量太陽電池による超安価施工方法を開発することにより、トータルコストとして現状の結晶シリコン太陽電池以下の発電コストを狙い、市場拡大を目指していく。



図Ⅲ-2-(ハ)-C-12 事業化計画および製品ロードマップ

3. 波及効果

本テーマで開発した超軽量ペロブスカイト太陽電池の波及効果については、図Ⅲ-2-(ハ)-C-13に示す。前述の通り、超軽量を活かしてまずはSi太陽電池が設置できない用途の市場開拓を目指す。新規市場創出のため、それに付随する新規施工方法やメンテナンス等のマーケット創出に寄与する。また軽量化による太陽電池施工費低減が期待できるため、太陽電池システムトータルコスト低減することができる。これにより現在停滞が懸念されている太陽電池既存市場の活性化も期待できる。さらに海外においては、太陽電池を設置できないような脆弱な建築物、長尺ロール太陽電池を一括で設置できる広大な土地、送電網が発達していないオフグリッド地域が多数存在している。これらは超軽量ペロブスカイト太陽電池の好適な市場であり、大きな波及効果が期待できる。



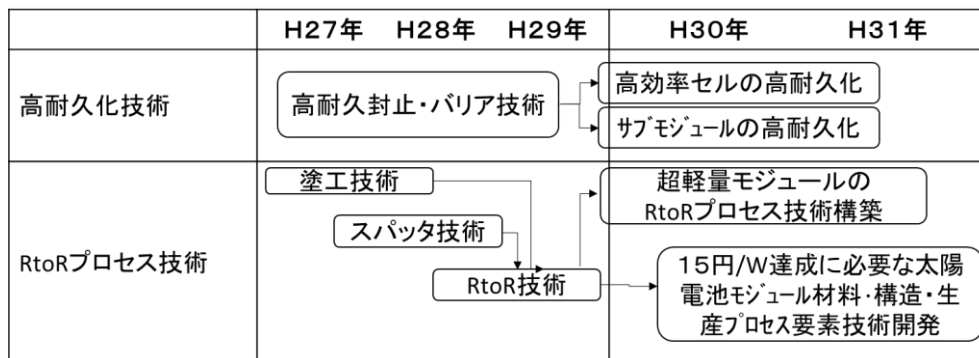
図Ⅲ-2-(ハ)-C-13 超軽量ペロブスカイト太陽電池の波及効果

4. 今後の展開

最終目標にむけた展開について、概略を図Ⅲ-2-(ハ)-C-14に示す。

これまで構築した高耐久化技術を高効率セルに適用させることにより、高い変換効率と高い耐久性の両立を目指す。さらに本技術をサブモジュールへ適用することにより、サブモジュールの高耐久化が可能かどうかの検証を行う。

またこれまで構築してきた塗工技術とスパッタ技術をベースとして、超軽量ペロブスカイト太陽電池モジュールでのR2Rプロセス技術の構築を目指す。そして、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセス要素技術開発に繋げていく予定である。



図Ⅲ-2-(ハ)-C-14 今後の展開

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	2(0)	4(0)	0(0)	6(0)件
研究発表・講演（うち国際会議）	0(0)	1(0)	0(0)	1(0)件

(2017年6月30日現在)

【特許出願】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	積水化学工業	特願 2016-018107	国内	2016/2/2	出願	太陽電池	早川明伸、 他
2	積水化学工業	特願 2016-032104	国内	2016/2/23	出願	フレキシ ブル太陽 電池	早川明伸、 他
3	積水化学工業	特願 2017-059352	国内	2017/3/24	出願	フレキシ ブル太陽 電池	早川明伸、 他
4	積水化学工業	特願 2017-061161	国内	2017/3/27	出願	太陽電池	早川明伸、 他
5	積水化学工業	特願 2017-066008	国内	2017/3/29	出願	太陽電池	早川明伸、 他
6	積水化学工業	特願 2017-068919	国内	2017/3/30	出願	太陽電池	早川明伸、 他

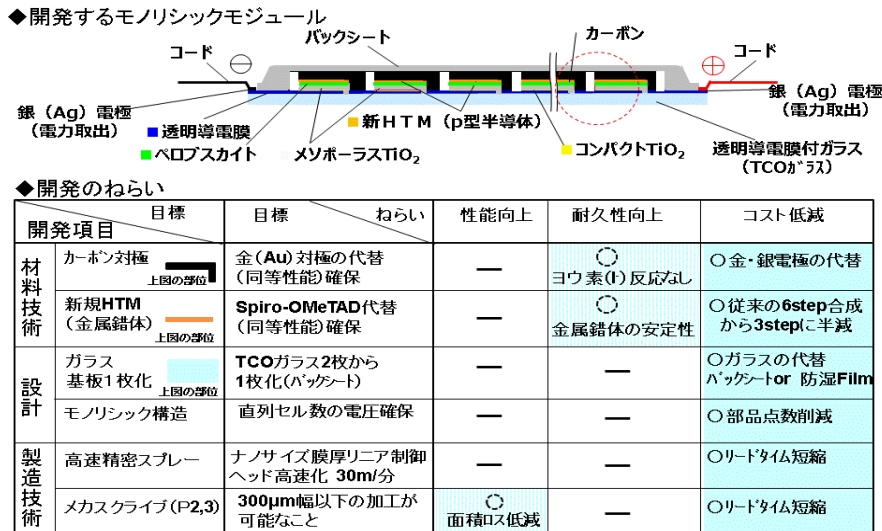
【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	森田健晴、 早川明伸	積水化学工業株式 会社	ペロブスカイト系 革新的低製造コス ト太陽電池の研究 開発－低コストR 2 R 太陽電池製造 技術の開発	NEDO 新エネルギー部 成果報告会ポスター 発表	2016/10/31

D 高性能高信頼性確保製造技術の開発 (アイシン精機株式会社、株式会社アイシン・コスモス研究所)

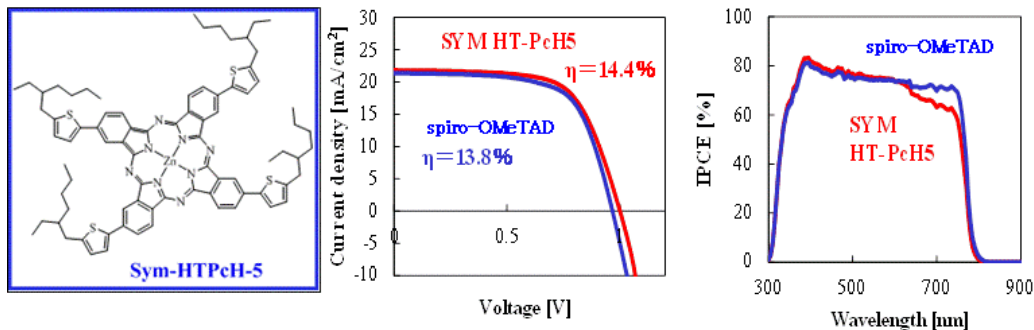
1. 成果詳細

アイシン精機株式会社、株式会社アイシン・コスモス研究所ではペロブスカイト太陽電池の低コスト化を念頭におき、材料・製造プロセスはどうあるべきかを議論し、研究開発を推進してきた。図III-2-(ハ)-D-1 に目指す太陽電池モジュールの概要と開発項目と目標、ねらいを示す。



図III-2-(ハ)-D-1 開発するモジュールと開発のねらい

まず材料技術であるが、カーボン対極に着目したのは、材料価格もさることながら従来報告されている真空蒸着した金や銀の対極とペロブスカイトから脱離したヨウ素イオンがさまざまな環境下で反応することが知られているからである。高信頼性を確保していく上で、こうした反応は好ましくなく化学的に不活性なカーボンを検討した。グラファイト・導電性カーボン・バインダーから構成される塗布型のカーボン対極を用いたセルは、金対極を用いたセルに比べ1Sunでは変換効率の比が7割ほどであったが0.1Sunでは、9割を超え、低照度では金に匹敵する性能を示した。ACインピーダンスの計測では、カーボン対極のバルク抵抗は金に比べ5倍程度高く、1Sunでは短絡電流密度と形状因子が金に比べ8割程度に低下している。開放電圧はほぼ等しいため、カーボン対極自身の抵抗低減が課題である。0.1Sunでは、抵抗の影響が小さくなるため、短絡電流密度・開放電圧・形状因子は両者ではほぼ差が無く、結果として変換効率も漸近したものになった。現在のところ中間目標における金対極の代替材料創出として1Sunでは十分な特性ではないが、カーボン組成と膜厚の見直しによる導電性向上で金対極と同等の特性を得ることは可能と考えられ、今年度中の実証を目指す。

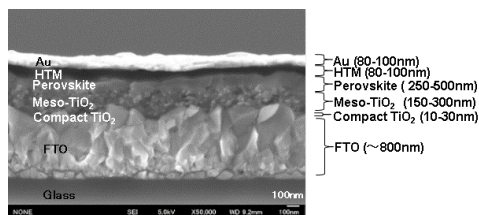


図III-2-(ハ)-D-2 新規HTMとIVカーブ、外部量子効率

また新規HTMとして、既知のHTMであるspiro-OMeTADよりも安定性があり合成ステップが半減できると考えられる金属錯体に着目した。種々の検討の結果Znフタロシアニン誘導体は合成も容易で安定性が高く安価に市場に出回ると考えられるため、spiro-OMeTADの代替HTMの第一候補とし、セルを作製した。ドーパントフリーのspiro-OMeTADとZnフタロシアニン誘導体(Sym-HTPcH5)とを比べた場合、

前者は 1Sun 時の変換効率が 13.8%であったのに対し、後者は 14.4%となり、Zn フタロシアニン誘導体は、従来の spiro-OMeTAD と同等の性能を示した。図Ⅲ-2-(ハ)-D-2 にその構造式と I-V カーブ、外部量子効率 (IPCE) を示す。開放電圧は Zn フタロシアニン誘導体のほうが大きく、I-V カーブから spiro-OMeTAD に比べ直列抵抗成分は大きい。また 700nm 付近に IPCE の低下があるが短波長の感度が若干高く短絡電流密度は同等になっている。直列抵抗成分は膜厚の調整で低減が可能のため、低減できれば spiro-OMeTAD を超える可能性がある。上記より spiro-OMeTAD に代替できると考えられる。

次に製造技術に関しては製品原価に直結するタクトと量産時の製品形状を考えた際の選択できる工法の検討が必要であった。1m を超える大型の太陽電池パネルの製造を想定すると、セルの研究で多用されているスピンの適用は、品質や安全面で適用困難と思われる。新たな塗布方法が求められる。スピンコートで作製した比較的高い性能が発現するペロブスカイトセルの断面を図Ⅲ-2-(ハ)-D-3 に示す。



図Ⅲ-2-(ハ)-D-3 ペロブスカイトセルの断面

写真から分かるよう凹凸のある透明電極 (FTO) にナノオーダー (nm) の層を定量厚みで製膜することは大きな課題であり、製膜する工法の選択も成否の鍵となる

ペロブスカイト太陽電池の各層に要求される厚みや膜の品質について、それぞれ適した装置になる可能性があるが、なるべくなら同一装置でスループットの高いものが望ましい。工程でいくつも設備があり、それぞれが異なると、装置間の輸送設備が必要で工程時間もかかる。図Ⅲ-2-(ハ)-D-3 より、コンパクト TiO₂ 層は 10~30nm でスプレー法か ALD 法の設備が望ましい。大型化への展開を考えるとスプレー法は、すべての層に対応可能であり一貫した連続製造の工程設計も可能と思われる。また設備コストも安価で、低コスト化の課題解決に最も望ましい工法と考えた。一概にスプレーと言っても種類が多く、出来る膜の品質や材料の歩留まりも大きく異なる。スプレー法で代表的な二流体方式と回転霧化方式のスプレーヘッドの概要を図Ⅲ-2-(ハ)-D-4 に示す。

2流体スプレーヘッド

図5 2流体スプレーヘッド

回転霧化スプレーヘッド (ベル式)

図6 回転霧化スプレーヘッド

回転数: 40,000rpm
17-径: 0.2M Pa
送液量: 10 mL / min

スプレーヘッド種別	二流体	回転霧化
メーカー	A社	B社
(最大) 噴出量	mL/min 50~150	30~400
ノズル径	φ mm 0.5~	ノズルなし
パターン開き	φ mm 100	18~100
最高印加電圧	DC~KV 静電非対応	~60静電対応
エア消費量	L/min 50-270	360-960
回転数	rpm -	10,000~80,000
最小粒子径	μm 12	5
粒子均質性(分布幅μm)	X(12~500)	O(5~30)
塗布エリア内膜厚均質性	X~Δ	O
塗着効率	% 50-60	>70%
用途	小物塗装	有機エレクトロニクス向け薄膜形成用
特徴	霧の粒子の微粒化と高速度化が連続して変動	霧の粒子径と粒子速度を独立制御可能

回転霧化スプレーは2流体スプレーに比べ溶液濃度・粒子径・粒子速度を独立に制御可能なため、基板に均質かつソフトな着弾にすることができる

図Ⅲ-2-(ハ)-D-4 スプレー方式 (ヘッド) の比較

本研究では高速でのスプレー塗布を目指し、溶液濃度・液滴粒子径、粒子速度を独立に制御可能な回転霧化スプレーを採用した。回転霧化スプレーは、複雑な 3 次元形状の自動車のボディ塗装に均一な厚みで塗装をする方法で塗着効率（材料歩留り）が高い特徴がある。近年、半導体分野でスピコートに代わり精密な回転霧化スプレーがレジスト塗布工程に提案されている。本方式で太陽電池が出来れば、従来できなかった 3 次元曲面にも太陽電池が形成でき、新たな価値が創造できる。応用範囲は自動車やモバイル機器に留まらず、あらゆる用途に爆発的な広がりが期待できる。

コンパクト TiO₂ 層を回転霧化スプレーで製膜してみると、図 III-2-(ハ)-D-5 に示すよう、ナノメートルサイズで膜厚が制御できていることが分かる。ナノメートルサイズで電極が構成されるペロブスカイト太陽電池に適合した新しい工法である。原理的には大型化にも対応でき、大きさに限界のあったスピコート法に替わる太陽電池の革新的な製造法となる可能性が高いことが証明された。溶液濃度を適正化し、液滴を超微粒化、液滴が基板に着弾する速度を抑えることにより、ヘッド移動の高速化も進めることが出来、当初の 7m/分から現在では 30m/分まで確認できている。図 III-2-(ハ)-D-6 に概要を示す。

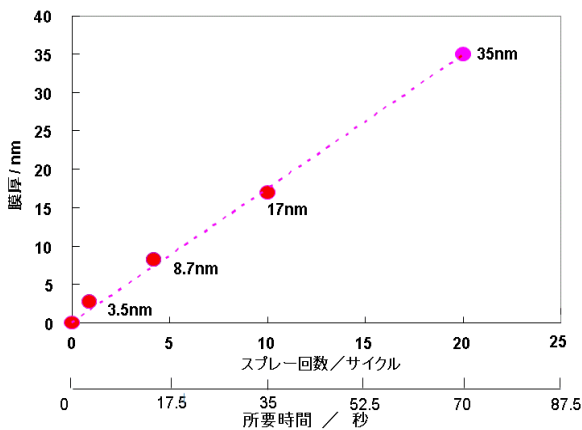


図 III-2-(ハ)-D-5 スプレー回数と膜厚

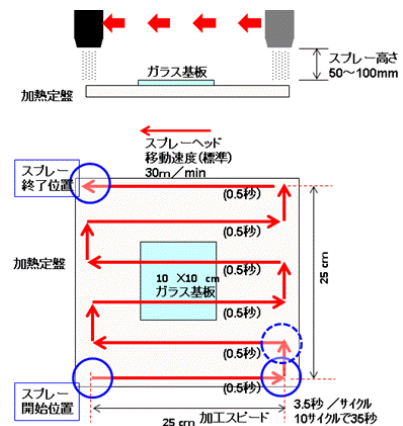


図 III-2-(ハ)-D-6 スプレーヘッドの動き

スプレー法によるコンパクト TiO₂ 層と従来の ALD(Atomic Layer Deposition)法で製膜したコンパクト TiO₂ 層との発電特性の比較をした。I-V カーブを図 III-2-(ハ)-D-7 に示す。スプレー法は ALD 法に比べ 3%ほど電流密度が低いが、開放電圧は 1%と高く、形状因子は等しい。両者の変換効率差はほとんどないことから、コンパクト TiO₂ 層は ALD 法に替わり、スプレー法でも製膜が可能であると考えられた。

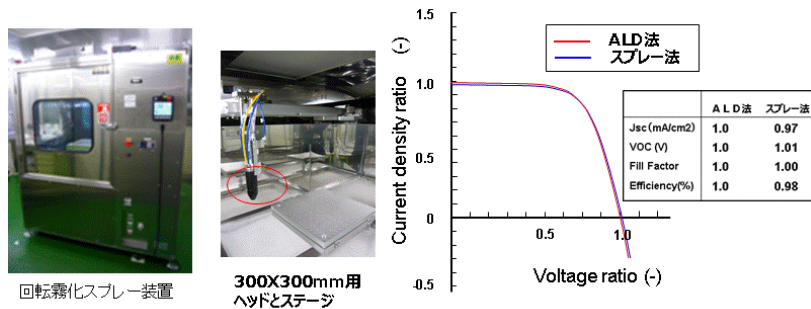
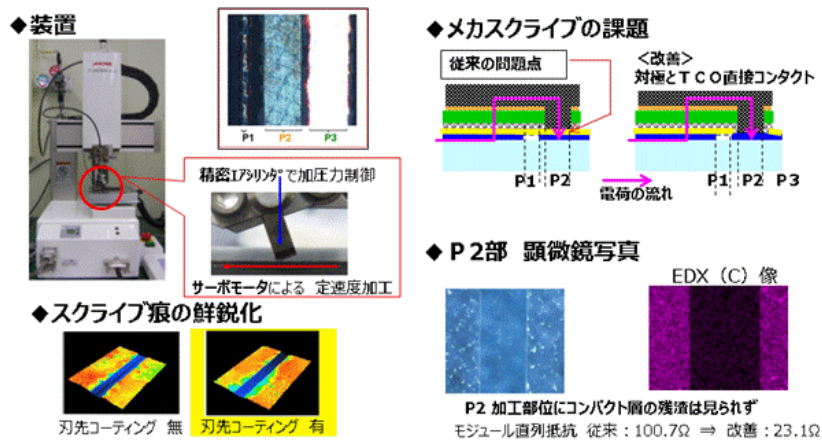


図 III-2-(ハ)-D-7 回転霧化装置とコンパクト TiO₂ 層製膜法の違い

一方モジュールの高出力化のためには、セルの効率だけでなくモジュール内に占める有効な面積が重要になる。セルが平面状で直列に集積したモノリシック型モジュールではセル間の発電に無効な面積を減らすことが重要とされる。通常モノリシック型の場合のスクライブは、透明導電膜の絶縁形成 (P1)、セルにブリッジする導電材料を充填する溝形成 (P2)、最終的に隣のセルと独立するための溝形成 (P3) の 3 回のスクライブを行う。モジュールで P1 の加工は半導体レーザーが主流である。P2、P3 に関しては、アモルファスの場合には半導体レーザーで、CIGS など化合物太陽電池の場合にはメカスクライブが適用され始めた。ペロブスカイトも化合物と近いため、本研究ではメカニカルスクライブを採用した。本テーマでは開発当初はスクリーン印刷法によりパターンメッシュで印刷を行っていたが、その場合は位置精度や交差を考え、セル間を 1mm 程度とる必要があった。これに対し p2、p3 をメカニ

カルスクライブにより形成できれば発電に有効な面積も増加できる。図Ⅲ-2-(ハ)-D-8 にはメカニカルスクライブ装置と加工の状態を示す。



図Ⅲ-2-(ハ)-D-8 メカニカルスクライブ装置と加工状態

65mm 角のガラス基板を用いて 8 直列のペロブスカイト太陽電池のモノリシック型モジュールを試作した。P1 は半導体レーザーでスクライブを行ったが P2、P3 はメカニカルスクライブで工程を進めた。モジュールを図Ⅲ-2-(ハ)-D-9 に示す。図のb) においてメカニカルスクライブ法を用いたモジュールは外周のシール幅を 3mm としセル間のスクライブ幅を 0.3mm として設計を行った。その場合電極面積は 31.36cm² となり基板に対する面積利用率は 74%となる。59mm 角のマスクを施すと仮定すると、外周シール部の面積が無視できるため、面積利用率は約 90%となる。2015 年度のモジュールの a) と比べ、b) はセル間が狭くなっている事が分かる。モジュールが大型化しても外周部のシールの幅は一定のため発電に有効な面積の比率は相対的に増えると思われる。面積利用率の向上のため、更なる寸法の追い込みが必要である。

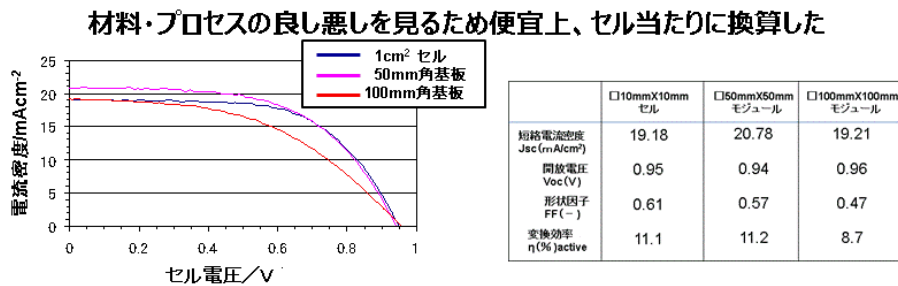


図Ⅲ-2-(ハ)-D-9 60mm角基板に 8セル直列接続したモノリスモジュール (右)

平成 27-28 年度にかけて、行った検討によりペロブスカイト太陽電池の電池材料において低コスト材料への代替の可能性を見出すことができた。また革新的な工法を目指し、各種スプレーやメカニカルスクライブ装置を導入して、セルから 100mm 角のモジュールまで一連の工程の検討を進めてきた。こうして種々検討してきた材料や工程を集約する必要があるが、現時点ですべてが完全に技術確立しているわけではない。現状最も効率が上がると予測される材料とプロセスを組み合わせ、10mm×10mm のセルと 50mm×50mm、100mm×100mm のモジュールを製作しその特性を評価した。結果を図Ⅲ-2-(ハ)-D-10 に示す。ここでは材料やプロセスの良し悪しを確認するため、便宜上直列接合したセル数やセル活性面積で換算した。

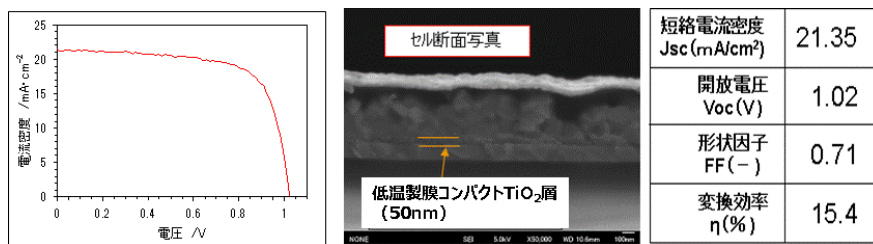
図において現状 10mm 角セルで変換効率 11.1%であるのに対し、100mm 角モジュールでは 8.7%であり 100mm 角のモジュールは小形セルの 78%となった。よって中間目標である 100mm 角モジュールで小形セルの 80%の効率を得ることについての達成の目処が得られた。I-V カーブを見ると、50mm 角のモジュールでは短絡電流密度や開放電圧はほぼ維持されているが、形状因子はやや下がっている。100mm 角に大型化すると短絡電流密度や開放電圧は同様にほぼ維持されているが、形状因子は更に大きく低下する。

今後最終目標の 300mm 角モジュールを目指し大型化を行うと、更に形状因子がb低下する可能性があるため、直列抵抗損失を小さくする工夫が必要である。面積増大に伴い形状因子が低下する要因はスクライプ状態にあると考えられ、今後スクライプ条件の最適化を行う予定である。



図Ⅲ-2-(ハ)-D-10 電極形状によるセルの特性比較

またこれまで、コンパクト TiO₂ 層やメソポーラス TiO₂ 層は、粒子間を強固に接合させるため電極を製膜後に高温で焼成処理してきた。PET/ITO/コンパクト層 TiO₂ 層/メソポーラス TiO₂ 層/ペロブスカイト層/HTM 層 (spiro-OMeTAD) /対極 (Au) のセル構成、非焼成 TiO₂ 電極でも焼成した TiO₂ 電極同等の変換効率 η = 15.4%のセルが得られることが実験で確認された。図Ⅲ-2-(ハ)-D-11 に I-V カーブとセル断面を示す。全工程をスプレーや印刷の塗布工程で完結し、曲面にも対応できるフレキシブルモジュールも可能性が出てきたことを付記しておく。



図Ⅲ-2-(ハ)-D-11 非焼成プロセスでのセルの特性

以上、平成 27 年度から現在までの進捗をまとめると、

- 1) モジュール製造の低コスト化のため、金対極を代替するカーボン対極の可能性を見出した。低照度ではほぼ同一の結果が得られた。課題はカーボン対極のバルク抵抗の低抵抗化 (1/5) であるが膜厚の増加や添加剤等で、代替品は開発できる見込みである。
- 2) 新規 HTM 材料 (フタロシアン誘導体) は、ドーパントフリーで従来品の spiro-OMeTAD に性能が匹敵するものができた。
- 3) モジュール製造技術として、生産性を上げることが低コスト化につながるため、精密スプレー (回転霧化式) を高速化し、膜厚に対し高い制御性が確認できた。工程時間の短縮のため、溶液濃度やスプレー条件の調整で従来の 4 倍速の 30m/分が可能であることを確認した。またメカニカルスクライプの製造技術が固まり、それを用いたモジュールの試作が可能となった。
- 4) 100mm 角のモジュールはセル換算で小形セルの 78%の効率にとどまった。工程の更なる改善で 8 割は達成できる予定である。

上記より、中間目標をクリアしたもの、中間目標にわずかだが届いていないものが混在している。プロジェクトの最終目標が太陽電池モジュールの低コスト化であり、これまで検討してきた材料や新しい工法で、プロジェクト開始前に比べ大きな可能性が膨らんできた。特に近年は進捗が著しいが、課題は依然残存するので更なる材料やプロセスの革新を進化させることが必要である。モジュール試作が可能となったラインにて、条件の最適化はもちろんのこと、今後は低コスト化のアイテムの検証を続け、早期の実用化を計画している。

2. 実用化・事業化見通し

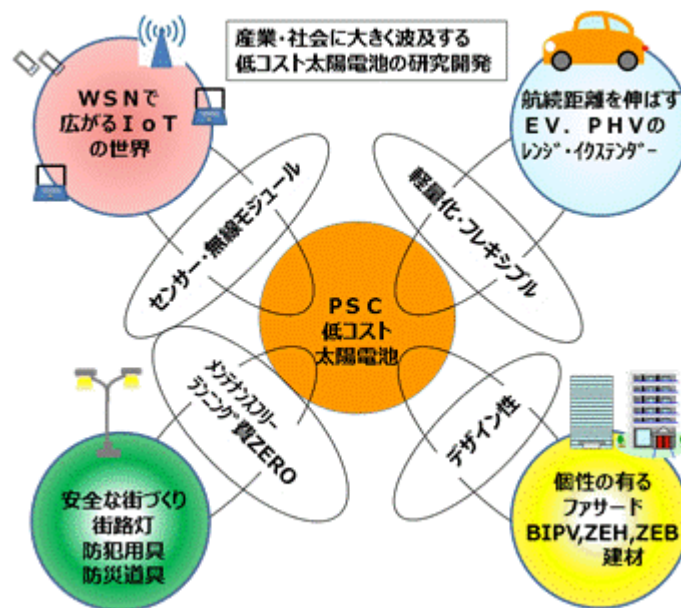
ペロブスカイト太陽電池モジュールの実用化の見通しについては、以下のように考えている。まず最終目標の平成 31 年度末までに 300mm 角のモジュールの作りこみを行う。平成 30 年度より、300mm 角の製造プロセスを固め、耐久性の確保に時間を割きたいと考えている。選択した工法がスプレー主体の工法のため、中間目標のセルから 100mm 角の大型化の製造の技法が確立すれば、300mm 角のスケールアップは、それほど高いハードルではないと考えている。大型化することによる異種材料の接合面や封止に時間を所要すると考えている。

実用化を軌道に乗せるには実績作りが必要であり、市場参入の糸口としてまずオフグリッドの太陽電池からはじめるべきと考えている。プロジェクトの完了した平成 32 年度からは、市場調査や商品企画を中心に実用化準備として進め（その間量産技術も高めておく必要が有るが）、その後、平成 33 年までに事業準備や生産準備を行い実用化を実現していく。オフグリッドで実績を積みながら、その後平成 37 年から高付加価値を持った ZEH や ZEB 用の太陽電池パネルとして供給体制を整備し、ビジネスを本格化させたいと計画していく。

3. 波及効果

回転霧化スプレーで製造する低コストペロブスカイト太陽電池の開発が成功すれば、波及効果は計り知れないものと考えている。オフグリッドだけでも、すでに IoT の無線センサネットワークのセンサや通信モジュールの電源、公共施設の防犯や防災機器のコードレス電源、最近急加速している自動車の電動化にあわせ、電気自動車（EV）、プラグインハイブリッド車（PHV）の走行距離延長のための太陽電池の搭載などがあり、改正省エネ法の中心テーマである ZEH、ZEB の系統連系や蓄電池を有する地産池消の用途も考えられる。これらの用途は、従来の「重い」「曲がらない」「色の黒い」結晶系シリコン太陽電池にはない特性を求められることが多く、特に回転霧化スプレーで出来る 3 次元のペロブスカイト太陽電池の活躍できる独壇場ではないかと考えている。

従来の市場が出来てしまっている系統につながるエネルギー機器市場においては、結晶系シリコン太陽電池とコストで競争し、それ以外の市場ではペロブスカイト太陽電池の特徴を生かした「軽い」「曲がる」「高い意匠性」「3 次元曲面」といった特徴で高付加価値製品としてさまざまな選択肢が生まれ、市場開拓が進むものと考えている。

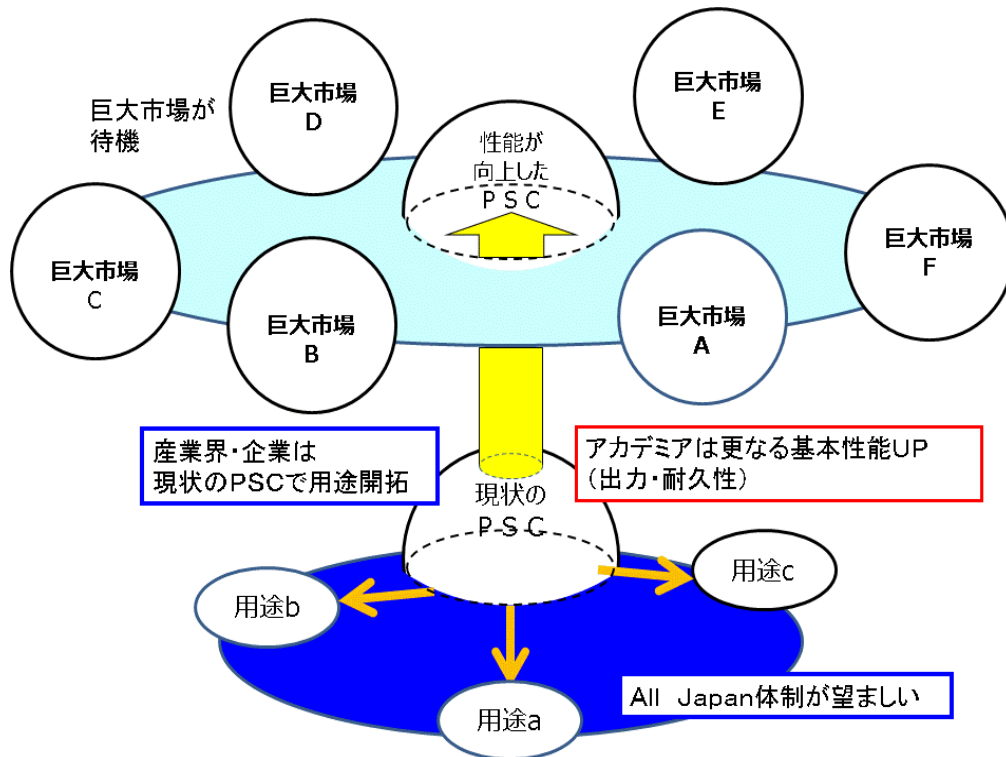


図Ⅲ-2-(ハ)-D-12 ペロブスカイト太陽電池の波及効果

4. 今後の展開

ペロブスカイト太陽電池は、色素増感や有機薄膜などこれまでに提案されてきた塗布型の太陽電池の中で最も変換効率が高い。そのため、これまで塗布型の太陽電池が要求仕様にこたえられなかった用途にすぐにでも対応できる可能性がある。そうした用途は微小電力が多く市場として目指すところではないかもしれないが、ペロブスカイト太陽電池の実績作りのため用途開拓はどんどん進めるべきと考えている。しかし1企業では、事業採算性やリスク管理の面で着手が難しい面がある。将来の布石と考え、オールジャパンとして新しい機構を設立して進めるのもひとつの手段ではないかと思われる。

ペロブスカイト太陽電池の研究開発の本来の目的は、結晶シリコンが先行し成功を収めた産業用ソーラーや住宅用ソーラー市場などの系統電源の置き換えである。エネルギー機器は特に長寿命が求められる。商品化で課題となるであろう耐久性を含め、アカデミアが基本性能（出力・耐久性）の向上を進め、競争力を更にアップする必要がある。企業がそれぞれの得意事業領域でペロブスカイト太陽電池を活用した商品群を事業化していくことが望ましい。ペロブスカイト太陽電池や応用商品が国際競争力を得るためにも、ペロブスカイト太陽電池の生産や物流などは、投資効率を考えると一極集中化が望まれる。過去一極集中できず、技術は秀でていても国際的なビジネスで競争に負ける事例は数多くある。先に述べた布石としての「新しい機構」に各社が資本を集中投入し、生産・物流を集中させ、先行した生産規模の確保、コスト低減を早期に図ることがペロブスカイト太陽電池の国際競争力を確保、維持していく上で必須であると考えている。



図Ⅲ-2-(ハ)-D-13 ペロブスカイト太陽電池の今後の展開

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
研究発表・講演（うち国際会議）	0(0)	1(0)	0(0)	1(0)件
展示会への出展	0	1	0	1件

(2017年6月30日現在)

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	中島 淳二 豊田 竜生 鈴木 晃 土本 勝也	アイシン精機株式会社、 株式会社アイシン ・コスモス研究所	ペロブスカイト系 革新的低製造コスト太陽電池の研究 開発－高性能高信頼性確保製造技術 の開発	NEDO 新エネルギー部 成果報告会ポスター 発表	2016/10/31

【展示会への出展】

番号	所属	会議名	内容	発表年月
1	アイシン精機株式会社、株式会社アイシン・コスモス研究所	第 11 回再生可能エネルギー世界展示会	NEDO ブース内にてペロブスカイト太陽電池モジュール展示	2017/6/29～ 7/1

E 高性能材料合成技術の開発（富士フイルム株式会社）

1. 成果詳細

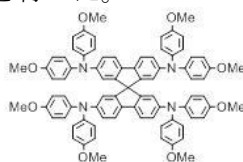
本プロジェクトにおける中間目標：セル効率20%以上、最終目標：モジュール効率20%以上、またはセル効率25%を達成するために、富士フイルムでは①正孔輸送材料合成技術及び②ペロブスカイト材料技術の開発を行っている。正孔輸送材料合成技術開発では中間目標である「HOMO レベル-5.3eV 以下と spiro-MeOTA 以上の電流値または spiro-MeOTAD に対し同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ 及び耐湿性を可能とする正孔輸送材料設計を抽出する」を達成すべく、耐湿性低下の原因となる親水性ドーパントを用いずとも高い発電特性を示すドーパントフリー正孔輸送材料の開発を行い、ペロブスカイト材料技術開発では中間目標の「長波長端750nm以上且つ、 $CH_3NH_3PbI_3$ 同等以上の $J_{sc} \times V_{oc}$ と耐湿性を可能とするペロブスカイト材料設計を抽出する」を達成するために、疎水性材料を用いたペロブスカイト層および層表面の疎水化技術開発を行った。以下に具体的な研究内容について記載する。

①正孔輸送材料合成技術開発

耐湿性低下の原因となる親水性のドーパントを用いずとも良好な発電特性を示す、ドーパントフリー適性の高い正孔輸送材料骨格を2種見出した。その内1種では、現在主に用いられている正孔輸送材料である spiro-MeOTAD（ドーパント有り）の変換効率14.2%に対し14.6%と同等以上の値に到達した。以下詳細を記す。

(i) ドーパントフリー適性の高い基本骨格の抽出

正孔輸送層中に含まれる親水性ドーパントはペロブスカイト太陽電池の耐湿性を低下させる一因である。しかし、spiro-MeOTAD (図III-2-(ハ)-E-1)等、多くの正孔輸送材料ではドーパントを用いなければキャリアが不足して導電率が低下し、十分な光電変換効率を得られない事が知られている。この問題に対し、我々は平面性が高く分子同士の重なりが大きい分子を用いれば電荷輸送に好適に寄与し、ドーパントを用いなくとも高い変換効率を得られるのではないかと仮説を立てた。そこで、正孔輸送材料を、基本骨格により、アリアルアミン型、縮環型、錯体型、ポリマー型、ドナー-アクセプター型等に分類し、それらを正孔輸送層に用いた電池の性能を評価することにより、仮説検証と同時にドーパントフリー化に有望な分子構造の抽出を行った。



図III-2-(ハ)-E-1. リファレンス (spiro-MeOTAD)

同日に作成した spiro-MeOTAD（ドーパント有り）を用いたセルを基準として、変換効率が0.8倍以上（変換効率10%以上）であれば、その後の改良により効率で上回ることが可能であるという仮定の下に有望骨格を抽出した。その結果、ドナー-アクセプター型に分類される骨格から、2種の骨格Aおよび骨格Bがドーパントフリー条件において良好な発電特性を有することを見出した。骨格Aの正孔輸送材料HTM-T2が変換効率11.2% ($J_{sc}=18.0\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=0.96\text{V}$, $FF=0.65$)、骨格Bの正孔輸送材料HTM-F35が変換効率11.4% ($J_{sc}=18.9\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=0.91\text{V}$, $FF=0.66$)を示し、いずれも spiro-MeOTAD（ドーパント有り）の変換効率13.4% ($J_{sc}=19.5\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=0.98\text{V}$, $FF=0.70$)に対し0.8倍以上であった。これらは平面性の高い分子構造をしており、前述の仮説を支持する結果である。一方で、spiro-MeOTADのドーパントフリー条件における変換効率はドーパント有りの条件に対し約0.5倍であり、ドーパントフリー適性がないことを確認した。

(ii) 電位調整技術の構築及び高効率を得られる HOMO レベル領域の抽出

正孔輸送材料の HOMO レベルは変換効率に大きく影響する。例えば一般に、HOMO レベルが深いほど変換効率の因子である V_{oc} が向上する。ただし、ペロブスカイトの価電子帯とのエネルギー差が小さくなると電荷分離と電荷捕集の非効率化を招くため繊細な設計が必要である。好適な HOMO レベルの範囲を抽出するために、(i) で見出した 2 種の骨格について、適当な HOMO レベルを有する材料を合成し、HOMO レベルの電池性能への影響を確認した (図 III-2-(ハ)-E-2、セル構成：FTO ガラス/TiO₂ 緻密層/TiO₂ 多孔質層/ペロブスカイト層/ドーパントフリー正孔輸送層/MoO₃ 層/Au 対極)。

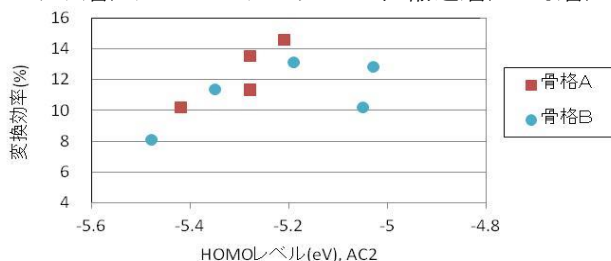


図 III-2-(ハ)-E-2. 正孔輸送材料の HOMO レベルと光電変換効率の関係

その結果、HOMO レベルが浅い方が高効率を得られる傾向が明らかとなった。骨格 A、B ともに HOMO レベルを浅くした材料で最高効率を得られており、骨格 A の HTM-F3 が 14.6% ($J_{sc}=18.7\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=1.02\text{V}$, $FF=0.79$)、骨格 B の HTM-F36 が、13.1% ($J_{sc}=18.4\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=0.99\text{V}$, $FF=0.72$) を示した。特に HTM-F3 を用いたセルは FF が高く、同日に作成した spiro-MeOTAD (ドーパント有り) を用いたセル ($\eta=14.2\%$, $J_{sc}=19.9\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=1.02\text{V}$, $FF=0.70$) 以上の変換効率を得られており、この点では最終目標の条件を満たしている。一方で、 J_{sc} が劣るために、中間目標である「 $J_{sc}\times V_{oc}$ 値で spiro-MeOTAD を上回る」には至っていない。HTM-F3 の導電率は $4.0\times 10^{-7}\text{ S/cm}$ とドーパントフリーの spiro-MeOTAD の $8.3\times 10^{-10}\text{ S/cm}$ に対し 3 桁高く、spiro-MeOTAD (ドーパント有り) の $1.4\times 10^{-6}\text{ S/cm}$ とほぼ同等の値が得られており、高い FF は HTM-F3 の高平面性に由来する高い電荷輸送性によるものと考えている。また、本検討において、浅い HOMO 領域では V_{oc} が低下するとの予想に反し、逆に V_{oc} が向上する傾向にあるという結果が得られており、さらに HOMO レベルを浅くすることによる効率向上の余地が残っている可能性がある。一方で、深い HOMO レベルを有する材料を用いれば、本来高い V_{oc} が得られるはずであり、HOMO レベルが深い材料で V_{oc} が低い要因を解析し、今後の分子設計指針に反映させる。

(iii) 高効率化に関する今後の展開

HTM-F3 の J_{sc} が低い原因を解析するためにペロブスカイト膜上の正孔輸送材料の配向を調べたところ、骨格 A の正孔輸送材料は基板に対し分子平面が垂直に立つ Edge-on 配向を取ることが明らかとなった。この状態では電流の方向と正孔輸送材料の π スタック方向が直交しているため電荷輸送には不利であり、ペロブスカイト-正孔輸送層界面の電荷捕集効率や正孔輸送層中の電荷輸送能を低下させてしまう。もし、基板に平行な Face-on 配向をとることができれば J_{sc} 等の電池性能が向上すると考えた (図 III-2-(ハ)-E-3)。現在、ペロブスカイト表面を特定の材料で表面処理することにより、一部を Face-on 配向化させる効果があることを確認している。その他の課題として、ドーパントフリー化による正孔輸送層の疎水化が、ペロブスカイト-正孔輸送層界面の欠陥を引き起こすことが示唆されている。これに対し界面安定化を狙った新規の製膜プロセスを見出し、従来の製膜プロセスでは効率 11.9% ($J_{sc}=18.5\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=0.97\text{V}$, $FF=0.66$) であった正孔輸送材料を用いたセルについて、新しい製膜プロセスを用いることにより 13.5% ($J_{sc}=18.7\text{mA/cm}^2$, $V_{oc}=0.99\text{V}$, $FF=0.73$) まで向上させることができた。これらの技術開発を進めてさらなる高効率化を狙う。

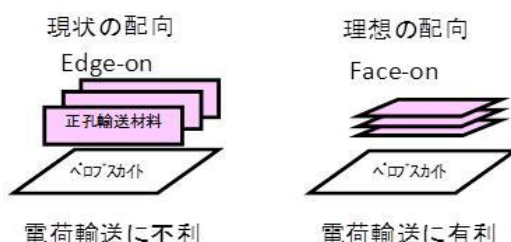
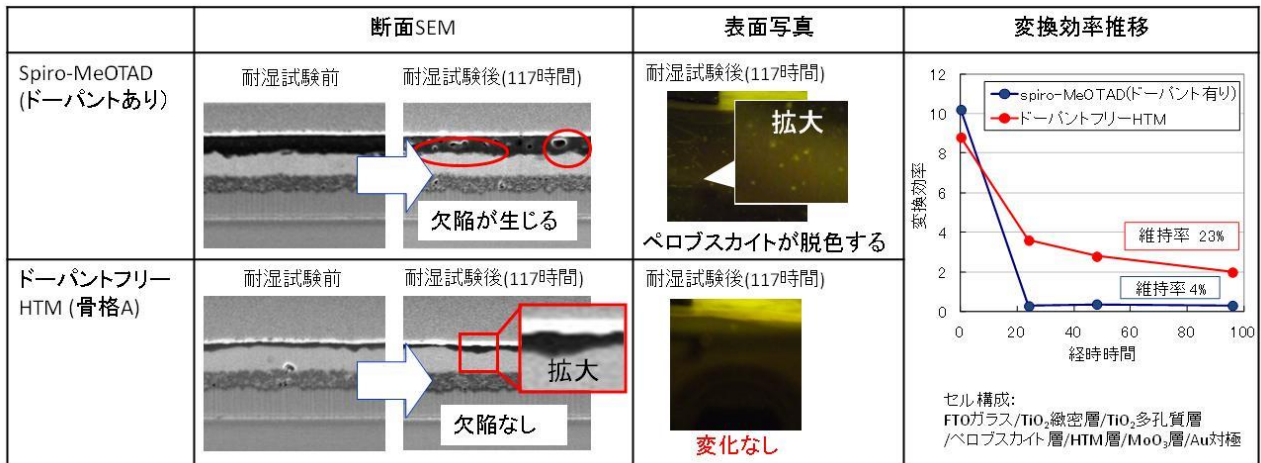


図 III-2-(ハ)-E-3. 正孔輸送材料が取る配向のイメージ図

また、現在当機関では、spiro-MeOTAD を用いた標準的なセルでも 15%程度の効率しか得られておらず、セル作製技術が不足している。効率 20%の達成に向け、プロジェクト内の他の機関と連携し、セル作製技術の向上にも取り組む。

(iv) 耐質性向上効果の確認

HTM-F3 を用いたセルの耐湿性試験（条件：40℃、80%RH、非封止セル）を実施した。その結果、spiro-MeOTAD を用いたリファレンスセルと比較し、層界面の欠陥や、ペロブスカイト膜の脱色が抑えられ、効率維持率（式1）が高いことが確認でき、正孔輸送材料のドーパントフリー化が耐湿性向上に有効であることがわかった（図III-2-(ハ)-E-4）。今後、(i)～(iii)に記載した効率向上技術開発を進め、耐湿性と効率で spiro-MeOTAD を用いたセルを上回る正孔輸送材料開発を目指す。



図III-2-(ハ)-E-4. ドーパントフリー正孔輸送材料の耐湿性向上効果

式1 : 効率維持率 (%) = 耐湿性試験後の効率 / 耐湿性試験前後の初期効率 × 100

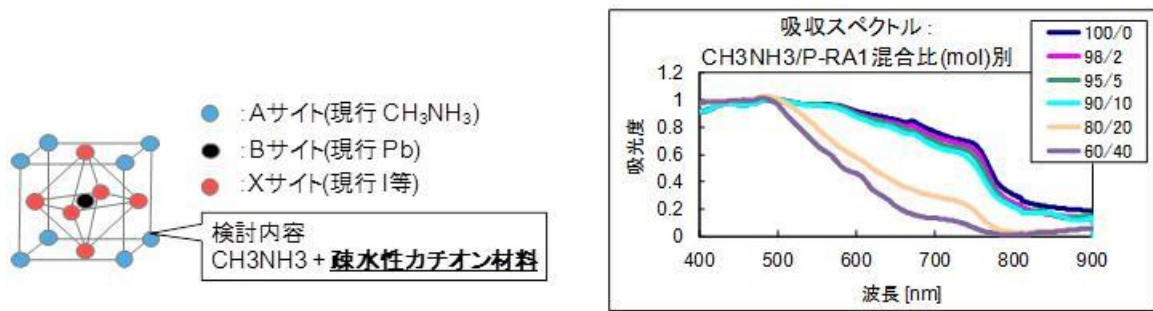
②ペロブスカイト材料技術開発

光吸収特性を低下させることなく耐湿性を向上させる技術として、疎水性のAサイトカチオン材料を微量混合する技術を見出した。さらに、ペロブスカイト膜品質低下の影響を最小限に抑えるため、ペロブスカイト膜表面のみの疎水化を狙った表面処理技術を開発し、効率と耐湿性の両立が可能であることを明らかにした。以下詳細を記す。

(i) 疎水性 A サイトカチオンの混合による耐湿性向上検討

(i)-1 光吸収特性維持可能な A サイトカチオン混合量の検討

ペロブスカイトの A サイト材料を疎水的な材料に変えることにより高耐湿化が可能であると考えた。しかし、A サイト材料の変更は、結晶構造の変化や、それに伴うバンド構造の変化によって、変換効率の重要因子である光吸収特性に影響を与える懸念がある。そこで、ペロブスカイト膜中の A サイト材料全てではなく一部のみを置き換えることによる耐湿性と光吸収特性の両立を狙い、疎水性カチオン材料 P-RA1 を用いて、混合比率とペロブスカイト膜の光吸収特性の相関を調べた。

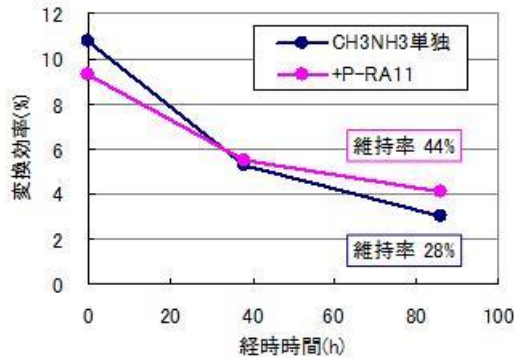


その結果、P-RA1 を 20mol%以上混合すると吸収端が大きく短波長化するが、10mol%以下の混合量であれば吸収特性をほぼ維持できることがわかった(図III-2-(ハ)-E-5)。

(i)-2 耐湿性向上効果の確認

(i)-1 の結果を基に 2mol%の混合量で種々の疎水性 A サイト材料を混合したペロブスカイト膜の接触角を測定し、疎水化効果の高い材料の抽出を行った結果、P-RA11 を見出した。P-RA11 を混合したペロブスカイト膜の接触角は、66° であり、未混合のペロブスカイト膜 (接触角=33°) に比べて大きく疎水化した (接触角はジヨードメタンで測定)。

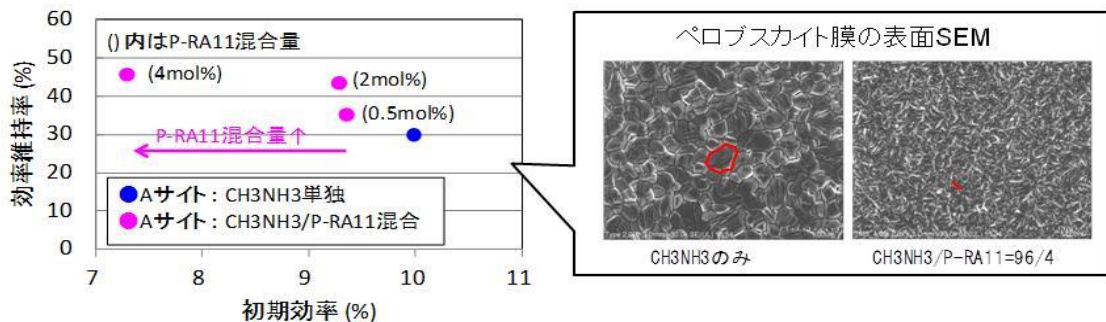
続いてP-RA11 を混合したペロブスカイト層を有するセルを作成し、耐湿性試験 (条件: 40°C、80%RH、86hr、非封止セル) を行ったところ、リファレンスセル(A サイトカチオン: CH₃NH₃ 単独) に対し効率維持率が向上しており(図III-2-(ハ)-E-6)、疎水性 A サイト材料の混合による膜の疎水化および耐湿性向上効果を確認した。



図III-2-(ハ)-E-6. P-RA11 混合太陽電池セルの耐湿性試験

(ii) 疎水性 A サイトカチオン材料を用いた表面処理による耐湿性向上検討

(i) で見出した疎水性 A サイトカチオン材料混合技術は、光吸収特性は維持できるが混合量を増やすにつれて初期変換効率が低下する傾向が明らかとなった。混合量を増やすとペロブスカイト粒径が小さく変化していることから、粒径の微細化により、粒子間での電荷輸送パスが増えたことで抵抗率が上昇していると推測される (図III-2-(ハ)-E-7)。



図III-2-(ハ)-E-7. 初期効率-効率維持率への混合量の影響

他にも、疎水性材料の混合では、ペロブスカイト結晶構造そのものが変化することによる性能低下の懸念があり、技術の汎用性が無いと考えられる。耐湿性の向上にクリティカルに効果があると考えられるペロブスカイト膜の表面のみに疎水性カチオン材料を偏在させることができれば、技術の汎用性および耐湿性の面で有利である。そこで、これを実現するために新たな表面処理方法を考案した。具体的なプロセスは、はじめに疎水性材料を含まないペロブスカイト膜を作製し、続いて疎水性材料を有機溶媒に溶解させた塗布液を塗布し、乾燥させる方法である。

耐湿性試験結果の比較 (膜吸収とXRD、条件: 40°C、80%RH、非封止セル)

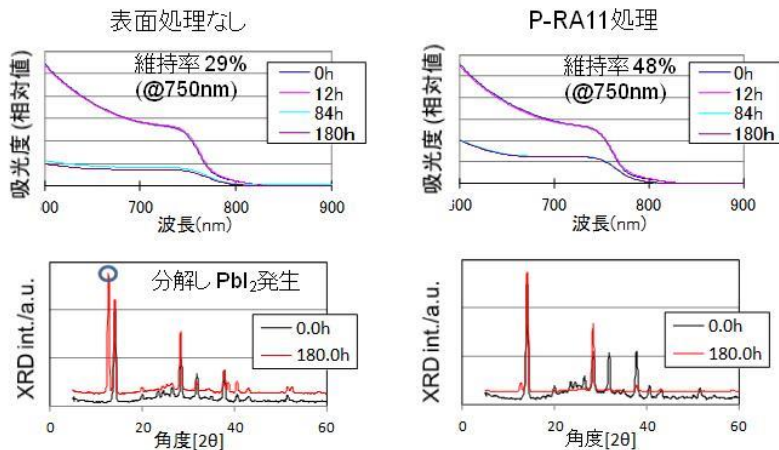


図 III-2-(ハ)-E-8. P-RA11 処理を行ったペロブスカイト膜光吸収特性及び XRD における耐湿試験結果

図 III-2-(ハ)-E-8 に膜光吸収および XRD を用いた耐湿性試験において、疎水性 A サイトカチオン材料 P-RA11 による表面処理を行った膜と処理を行わなかった膜を比較した結果を示す。P-RA11 で処理を行った膜の方が光吸収能の維持率が高く、分解生成物である PbI_2 の発生量が激減している事が分かる。よって、この表面処理はペロブスカイト層の安定化に効果があると判断できる。P-RA11 を用いた表面処理では、ペロブスカイト結晶表面の A サイトが疎水性カチオンで置換されることによって表面および層全体の耐湿性が改善されたと考えている。

ペロブスカイト層の耐湿性をさらに高めるために、種々の疎水性カチオン材料による表面処理を検討した。検討範囲を拡大し、疎水性基および A サイトへの置換もしくは吸着効果のある官能基を有する材料を探索した結果、最も高い耐湿性向上効果を示す P-S25 を見出した。

耐湿性試験結果の比較 (膜吸収と変換効率、条件: 40°C、80%RH、非封止セル)

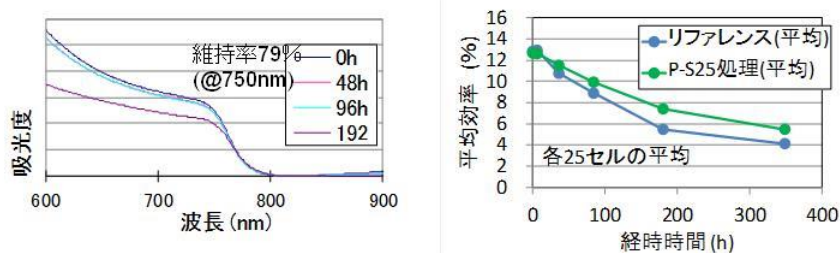


図 III-2-(ハ)-E-9. P-S25 処理を行ったペロブスカイト膜光吸収特性およびセル性能における耐湿試験結果

図 III-2-(ハ)-E-9 に、P-S25 を用いた表面処理による耐湿性向上効果を、ペロブスカイト膜の光吸収の変化とペロブスカイト太陽電池セルの変換効率の変化から評価した結果を示す。P-S25 による処理を行った膜は高温高湿下における光吸収の維持率が 79%と高く、また、セルの性能は spiro-MeOTAD を用いたセルと同等の光電変換効率を示すと同時に耐湿性が向上している。本技術はペロブスカイト層の組成や正孔輸送材料層の構成を変えずに、種々のセルに適用できるため汎用性があると考えられる。今後は、現在開発中の正孔輸送材料との組み合わせで、さらなる耐湿性向上を目指す。

2. 実用化・事業化見通し

2.1 成果の実用化・事業化に向けた戦略

富士フイルムでは、成長を続ける再生可能エネルギー市場は、社会貢献と事業性の両観点で非常に重要な市場と考えている。中でもペロブスカイト太陽電池は低発電コストと高効率化が実現可能であり、既存の他方式太陽電池を置き換えることができる次世代太陽電池として高く期待しており、ペロブスカイト太陽電池用のペロブスカイト材料や正孔輸送材料を提供する事業を考えている。

現在主に用いられている材料は耐湿性が低く、実用化には高耐湿化が必要であることに加えて、さらなる高効率化が求められている。早期にこれらを満たす材料を開発し、高いマーケットシェアの獲得を目指す。開発において、材料の電位制御技術や塗布適性の付与が重要課題であるが、富士フイルムは銀塩写真で培った分光増感技術及び塗布液調製技術と技術的類似点が多い色素増感型太陽電池に黎明期から取り組んでおり、そこで蓄積してきた技術やノウハウを用いて課題を解決することが可能であると考えている。また、実用化段階で求められる量産技術の確立においても、多くの機能性材料の製造化実績を有しており、この点でも高い実現性と競争力を有している。

実用化後はプロジェクト参画機関を含む国内モジュールメーカーにペロブスカイト材料や正孔輸送材料を提供するとともに、知財戦略を立てながら中国、韓国、台湾、インドなどのアジア諸国、北米、及びヨーロッパにも販売を展開し、事業を拡大する。

2.2 成果の実用化・事業化に向けた具体的取り組みと見通し

現在、実用化に必要なセルの高耐湿化、高効率化が可能な材料開発を行っている。正孔輸送材料開発においては、低耐湿性の原因である、親水性ドーパントを用いずとも高い発電能を発現させることができる、ドーパントフリーの正孔輸送材料を目標に開発を行い、ドーパントフリーで spiro-MeOTAD(ドーパント有り： $\eta=14.2\%$)同等の変換効率($\eta=14.6\%$)に到達した。ペロブスカイト材料開発においても、初期効率の低下を起こさずに耐久性を向上させるペロブスカイト膜の表面処理技術を見出し、これらの新規材料技術が、ペロブスカイト太陽電池の耐湿性向上に有望であることを確認している。

開発中の材料技術はペロブスカイト太陽電池の高耐湿化、高効率化のニーズと整合しており、完成すれば事業化の可能性が高いと考えている。今後は、産学連携を活用し、東京大学等の高効率セルで性能評価を行い、開発した材料技術の高耐久、高効率を実証する。その後、プロジェクト参画モジュールメーカーと連携して実用レベルの材料開発を行うとともに低コスト化、大量生産プロセスを構築し、モジュールメーカーでの量産に対し材料提供が行えるように準備を進める。

3. 波及効果

本研究開発で得られる正孔輸送材料技術は、有機トランジスタ、有機薄膜太陽電池、有機EL等の他分野にも応用可能であり、これらの技術的レベルアップが期待できる。また、ペロブスカイト太陽電池で採用された材料が他分野でも採用された場合、生産量増加によるコストダウンが可能となり、ペロブスカイト太陽電池のさらなる低コスト化が期待できる。ペロブスカイト材料技術に関しても同様に、ペロブスカイト材料を用いた発光素子、トランジスタ等においても耐湿性向上効果が期待できる。

4. 今後の展開

プロジェクト参画機関を含むモジュールメーカーの技術と組み合わせた実証試験を目指す。そのため、開発材料の優位性を明確に示す必要があると考えている。2.3に記載した通り、高効率化、高耐湿化を目的とした材料技術開発と並行し、他機関での評価、自社評価レベル向上による高効率域での材料技術評価を進める。特に自社評価レベル向上は材料開発において正確な課題抽出を行うためにも重要と考えている。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	3(0)	9(3)	2(0)	14 件
研究発表・講演（うち国際会議）	0(0)	1(0)	0(0)	1 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許出願】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	富士フイルム (株)	特願 2016-068690	国内	2016/3/30	取下 (国内 優先)	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤および表面処 理用組成物	佐藤寛敬 他
2	富士フイルム (株)	特願 2016-068784	国内	2016/3/30	取下 (国内 優先)	光電変換素子、 太陽電池および 組成物	佐藤寛敬 他
3	富士フイルム (株)	特願 2016-072734	国内	2016/3/31	取下 (PCT 出願)	光電変換素子、 太陽電池及び化 合物	佐藤寛敬 他
4	富士フイルム (株)	特願 2016-107853	国内	2016/5/30	取下 (国内 優先)	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤および表面処 理用組成物	佐藤寛敬 他
5	富士フイルム (株)	特願 2016-107661	国内	2016/5/30	取下 (PCT 出願)	光電変換素子、 太陽電池および 組成物	佐藤寛敬 他
6	富士フイルム (株)	特願 2016-107096	国内	2016/5/30	出願	光電変換素子の 製造方法	佐藤寛敬 他
7	富士フイルム (株)	特願 2016-140828	国内	2016/7/15	取下 (PCT 出願)	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤、表面処理用 組成物および表 面処理液	佐藤寛敬 他
8	富士フイルム (株)	特願 2016-168769	国内	2016/8/31	出願	光電変換素子、 及び太陽電池	白兼研史 他
9	富士フイルム (株)	特願 2016-168770	国内	2016/8/31	出願	光電変換素子、 太陽電池、 光電変換素子の 製造方法、及び ペロブスカイト 型結晶膜の表面 処理剤	白兼研史 他

10	富士フイルム (株)	PCT/JP2017/004596	PCT	2017/2/8	出願	光電変換素子、 太陽電池および 組成物	佐藤寛敬 他
11	富士フイルム (株)	PCT/JP2017/005126	PCT	2017/2/13	出願	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法、表面処理 剤、表面処理用 組成物および表 面処理液	佐藤寛敬 他
12	富士フイルム (株)	PCT/JP2017/005393	PCT	2017/2/15	出願	光電変換素子、 太陽電池及び化 合物	佐藤寛敬 他
13	富士フイルム (株)	特願 2017-100282	国内	2017/5/19	出願	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法及び感光層 形成用組成物	佐藤寛敬 他
14	富士フイルム (株)	特願 2017-100283	国内	2017/5/19	出願	光電変換素子、 太陽電池、光電 変換素子の製造 方法及び光電変 換素子用組成物	佐藤寛敬 他

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	佐藤 寛敬	富士フイルム(株)	ペロブスカイト系 革新的低製造コス ト太陽電池の研究 開発－高性能材料 合成技術の開発	NEDO 新エネルギー部 成果報告会ポスター 発表	2016/10/31

F 基盤材料技術と性能評価技術の開発

(早稲田大学、物質材料研究機構 (再)、神奈川県立産業技術総合研究所 (再))

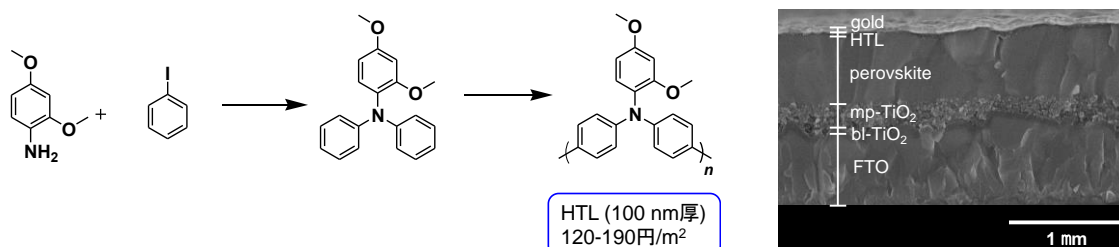
1. 成果詳細

モジュール用ホール輸送材料(HTM)の大巾なコスト低減、製造工程簡便化、界面制御とセル構造改良による変換効率 20%、および性能評価法の確立を目標として、基盤材料・素子構造・評価技術を開発している。

基盤材料技術の開発については、耐久性・歩留りが高い HTM を設計、簡便・低コストな酸化重合法により芳香族アミンポリマーを 20 種近く合成し、コスト 80 円/m²が見込める HTM から成るセルで変換効率 19.4%を達成した。東大、パナソニック(株)に g スケールで材料提供し、高い耐久性も共同して評価した。素子構造の基盤技術の開発については、 J_{sc} の低下がない逆型素子に新規な傾斜ヘテロ接合構造を開発し、欠陥の少ないペロブスカイト層ももとに、1cm²セルで効率 19.2%の世界最高値(認証)を達成した。性能評価技術の開発については、素子構造や印加電圧の幅などを変えて、ヒステリシス小さく精度高い測定条件を提示した。

1-1 高性能基盤材料技術の研究開発 (早稲田大学)

モジュール用 HTM 材料コスト低減については、市販・汎用のスピロ環芳香族アミン Spiro-OMeTAD (Aldrich 社)を代替する耐久性高く、低コストな HTM の開発を第一目標とした。酸化剤ドーピング無しで HTM の寿命を担保しながら高いホール輸送性能が発現し得ることも要件として 20 種類近くの芳香族アミンポリマーを設計・調製した。なお類似構造では、PTAA(ポリトリルアリルアミン, Aldrich 社)が知られているが極めて高価である。簡便・低コストな手法である酸化重合を従来知見活用のもと適用して調製した。出発物は 1~2 段の工程で簡便に合成でき、精製方法も確立した。各 HTM ポリマーは非晶性で容易に均質な薄層を与える。汎用キャスト溶媒に易溶であるよう置換基の位置と数を変えた。電子供与性置換基、例えばメトキシ基の数、位置を変え HOMO 準位(-5.2~ -5.6 eV)も調整できた。東京化成工業(株)製品戦略室とも情報交換した材料コスト試算では 120-190 円/m²と、設定の 250 円/m²目標を満足した。



図Ⅲ-2-(ハ)-F-1. ジメトキシ置換芳香族アミンポリマーの調製例とセルの断面 SEM 像

例えば上記ジメトキシ置換芳香族アミンポリマーは、分子量 1 万余り、HOMO 準位が-5.2 eV で耐熱性もあり、高い溶媒溶解性から広い面積での均質薄層の形成が可能であった。メソポーラスチタニア層上にペロブスカイト層を析出形成後、均一かつ 10-20 nm の薄い同ポリマーを HTL として積層した順型セルを作製した。変換効率 14.0%(J_{sc} 23.3 mA/cm², V_{oc} 0.95 V, FF 0.63)を得た。ジメチル基で置換した同分子構造の芳香族アミンポリマーも HTM としてほぼ同等のセル特性(効率 12~14%)を示した。

なお他にホール移動度が極めて高い(10^{-4} cm²/Vs)チオフェン系 HTM としてジケトピロロピロール/チオフェンポリマー(分子量 7 万)も調製した。成膜性高く均質な薄層を与えた。HTM 層とした順型セルでは内部抵抗が低く、ドーパント無しで効率 14.1%(FF 0.74)を得た。ただ HTM としてのコスト試算より候補から外した。

以上選択の HTM を対象に、調製工程の改良をさらに加え、簡便な再結晶精製、一段階の酸化重合により収率向上して、分子量 1-3 万、溶媒溶解性も高い HTM ポリマー(図Ⅲ-2-(ハ)-F-1)を g スケールで得て、一部は東大、桐蔭横浜大、パナソニック(株)に提供した。パナソ

ニック株)での 80°C, 85%耐久試験では、市販品 PTAA と同等、市販品 Spiro-OMeTAD より優れていた。現在、パナソニック株が開発のセルに適用した場合の性能、コスト計算について共同している。

この HTM は成膜性極めて良く、均一かつ約 10 nm 厚みの薄い HTL を形成できた(図Ⅲ-2-(ハ)-F-1)。また層厚み 50 nm としても低い材料コスト 80 円/m²が見込めた。ヨウ化メチルアミン/ホルムアミジン/セシウム/ルビジウム 3 および 4 混合カチオンのペロブスカイト層と組み合わせたセルで効率 19.4%($J_{sc} = 22.2 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 1.08 \text{ V}$, $FF = 0.81$)を達成した。

製造工程簡易化によるコスト低減については、大面積化に向けてペロブスカイト層および HTL 形成に、前駆体液および HTM 液のバーコーターによる引き塗り法を適用した。スピコート法など海外既報に比べ、HTM 散逸による損失が数分の一に抑えられる。溶媒組成、粘性、加熱後処理を調整して、1cm²セルで効率 18.1%を得て、ダイコーターの適用に向けさらに改良中である。

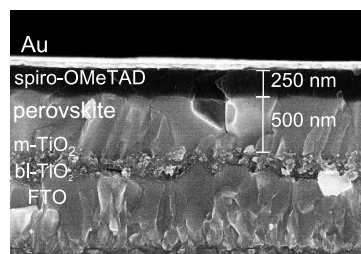
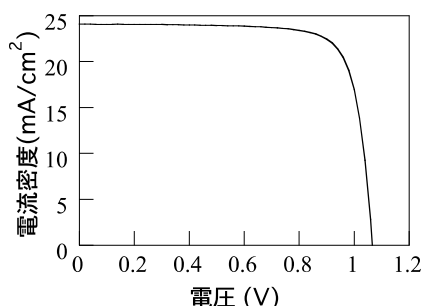
開発した混合カチオンペロブスカイト結晶の作製法および高分子を共存させ補強したペロブスカイト結晶作製法をもとに、ペロブスカイトインキを作成した(図Ⅲ-2-(ハ)-F-2)。引き塗り塗布法、インクジェット法を適用したペロブスカイト層および HTL の作製を検討している(図Ⅲ-2-(ハ)-F-2 右側)。

なお計画書に記載した既設の二源共蒸着装置と予備知見を活用した共蒸着法による大面積ペロブスカイト層および HTL の製造については、特にヨウ化メチルアミンの昇華条件(温度、真空度)、新るつば設計と配置位置等調整による共蒸着を試みたが、蒸着条件が極めて限定され、歩留りと大面積への適用の見込みが立たず、開発を中断した。



図Ⅲ-2-(ハ)-F-2. ペロブスカイト粉末とインキ塗布によるペロブスカイト層

準位・界面制御によるセル効率向上については、その要件確立のための HTM として別途、酸化剤ドーパントの残留を抑えた独自調製の Spiro-OMeTAD を開発した。これを HTL として 3 混合カチオンのペロブスカイト層から成るセルで、効率 20.3%を実証した(20%超 12 セル, 例 図Ⅲ-2-(ハ)-F-3)。さらにペロブスカイト層に 4 混合カチオンを採用して歩留り高く平均効率 19%となるセル作製手法を確立した。掃引方向による効率差 1%未満でヒステリシス少なく、最大 $V_{oc} = 1.14 \text{ V}$, $FF = 0.82$ であった。高価ではあるが、20%超の高い変換効率が実証できる独自開発の HTM として活用した。



図Ⅲ-2-(ハ)-F-3. 独自調製 HTM から構成のセルの光電変換特性と断面 SEM 像

さらにペロブスカイト層の形成時に微～少量の高分子を添加すると、良質なペロブスカイト粒塊の形成が促進され、効率と耐久性の向上に寄与することを見出した。分子量 1~10 万のポリメチルメタクリレート溶液を 0.1%前後でペロブスカイト層の形成時に添加すると、結晶核の生成が制御され、結果として結晶が密に形成されペロブスカイト層内の抵抗が減少し、再現性高く変換効率が向上した。この手順はパナソニック株に開示した。一般的な有機高分

子の添加は抵抗として働き電流はとれなくなる。しかし、ポリフッ化ビニリデンなど限られた高分子の添加では効率 19%は低減せず、セルの耐水性や耐久性が向上した。これら新たに見出した高分子補強ペロブスカイト層について一般性と機作を検討している。

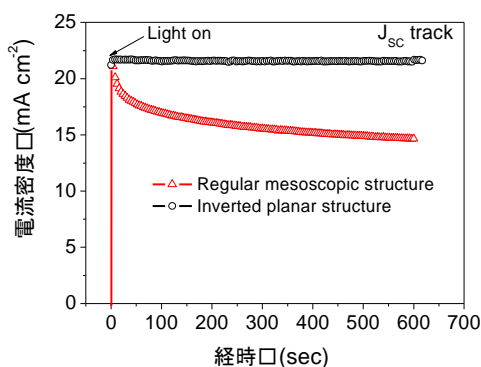
以上の研究開発は東京大学集中研においた早稲田大学分室にて実施された。

1-2 基盤技術の改良と性能計測技術の研究開発(物質材料研究機構(NIMS))

基盤技術の改良については、セル構造としてメソポーラス順型構造と逆型構造について比較検討した。メソポーラス構造のセルでは、20%超の変換効率が一部海外既報にあるが、小さいセル面積(0.0955 cm²など)で測定誤差も大きく、データの信頼性に課題を残している。

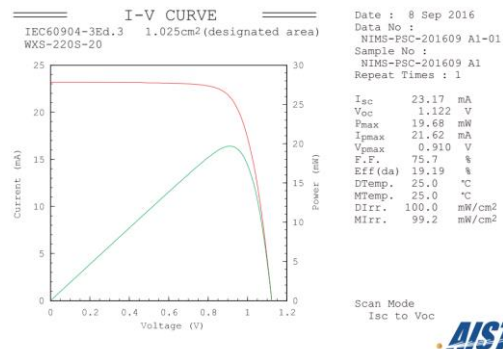
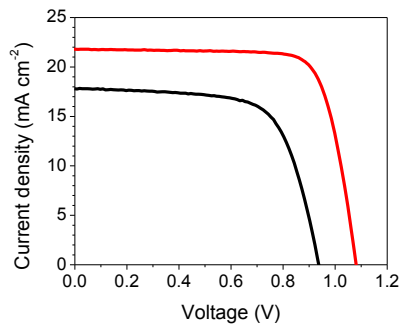
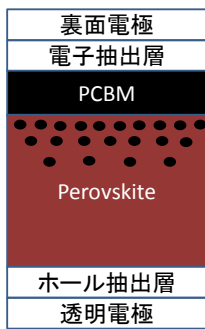
セル面積 1 cm²の逆型構造セルを対象としてセルを最適化した。2 カチオン混合比を調整、一部ヨウ素を臭素に置換したペロブスカイト層で、欠陥の少ない大きな結晶粒子を得て電子とホールの取り出し効率を上げ、 J_{sc} を 21mA/cm² 以上に向上させた。さらに、ペロブスカイト層、電子輸送層、電子抽出層などの材料と膜厚を最適化し、内部抵抗を低減し、 FF を約 2 割上げること成功した。産業総合技術研究所(AIST)太陽光発電研究センター評価・標準チーム(国際認証機関)での測定・評価に供した。擬似太陽光 AM 1.5G(100 mW cm⁻²)照射下で、 J_{sc} 21.48 mA cm⁻²、 V_{oc} 1.081 V、 FF 0.784 が得られ、世界で初めて標準面積(1cm²)のセルで変換効率 18.2%の達成が認証された。

なお J_{sc} の安定性の比較では、メソポーラス構造セルにおいて、100mW/cm²、10 分の照射で約 6mA/cm² 低下する一方、逆型構造セルでは J_{sc} の低下がなく、より安定なセル構造と判断した(図Ⅲ-2-(ハ)-F-4)。



図Ⅲ-2-(ハ)-F-4. 逆型構造とメソポーラス構造セルの初期短絡電流の安定性

さらにペロブスカイトでの電子の拡散長が 200 nm 弱と短く、電子収集が容易ではないためとの考察を元に、傾斜ヘテロ接合構造の逆型セルを開発した。電子輸送層である PCBM の一部がペロブスカイト層に入り込む構造となっており(図Ⅲ-2-(ハ)-F-5)、NiO の HTL 上にペロブスカイト層を形成時に、PCBM トルエン溶液を滴下する手法で作製された。この傾斜逆型構造により、光電子の収集効率が改善し、平面逆型セルに比べ J_{sc} は約 4 mA/cm²、 V_{oc} 約 0.15 V と共に大幅に向上した。同 1cm²セルの、AIST での計測(図Ⅲ-2-(ハ)-F-6)により、変換効率 19.2%と認定された(世界トップ値)。1 Sun 下 1000 時間連続照射の信頼性試験も満足した。



図Ⅲ-2-(ハ)-F-5. 傾斜ヘテロ接合構造セルと変換特性(赤：傾斜逆型構造，黒：平面逆型構造)

図Ⅲ-2-(ハ)-F-6. 傾斜逆型セル特性の AIST での認証データ

性能測定方法の検討では、平面およびメソポーラス構造の順型セル、逆型セルの 3 種類のセル構造で、ヒステリシス特性などへの測定条件の影響を比較した。両順型セルでは大きなヒステリシスが認められたが、測定時の遅延時間とともにヒステリシスが小さくなった。順方向への電圧印加では、遅延時間を長くすることで高い効率で一定値に収束した。一方、逆型セルではヒステリシスが非常に小さく、短い測定時間でも正確な変換効率を得ることが可能であった。また印加電圧幅を 5 mV まで小さくするとヒステリシスの影響が無視できることも明らかにした。

1-3 信頼性の高い性能評価手法の確立(神奈川県立産業総合研究所(KISTEC))

性能評価法の確立については、基本セル特性を把握するために、市販のグローブボックスに追加加工を施して、湿度・酸素濃度を制御した状態で光照射ができる測定槽を新たに設計、作製した。セルを 4 枚固定できる固定具およびセル作製場所(主に東大集中研)から神奈川県立産業総合研究所まで、真空置換した状態で搬送できる容器を作製した。12 個のセルを同時に測定できるソースメーターも作製した(特許出願済み)。また、環境制御型グローブボックスに酸素濃度・湿度のオートページ機能を追加するとともに、一定酸素濃度ガス供給装置を作製し、分光感度測定用小型密封ボックスに併設した。大型セル、また異なる形状のセルに対応できるように 2.5cm 角対応のセル固定具を背面電極の本数を増やして設計、設置した。

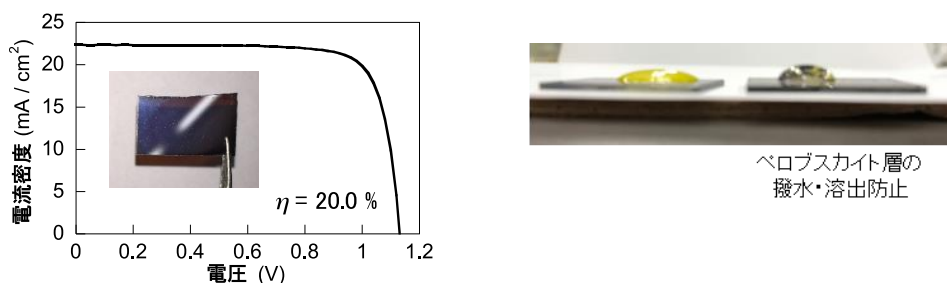
プロジェクト参画機関である東京大学、御国色素および京都大学のセルを測定できた。例えば、17%の初期効率は 3 ヶ月後 11%であった。環境制御測定槽での長期間の連続測定での性能(J_{sc} , P_{max} など)変動因子を分析し、セルの冷却の必要性やセル封止の時期などを提案した。順次受入れセル数、セル構造、形状を拡げてデータを蓄積するとともに、外部 AIST との意見交換も含め、標準となる測定手順の提示、測定方法の改良と信頼性向上を計っている。

2. 実用化・事業化見通し

モジュール用 HTM 材料コスト低減については、簡便・低コストな酸化重合法により、単純な構造でかつ寿命見込める独自 HTM を開発済みで(1cm²セルで変換効率 18%余)、HTM 層厚み 50nm として材料コスト 80 円/m²が見込め、中間目標である 250 円/m²を大きく上回っている。現在、パナソニック(株)が寿命試験を分担して実施するとともに、同社開発のセルに組み込んでの評価を HTM ロット番号差も含め固める手順を打ち合わせている。また東京化成工業(株)に製造法の大筋を開示し、試薬として市販する可能性を詰めている。鍵となる一つの材料候補として、共同してモジュール試作に組み込みたい。

NIMS で新規開発し、世界最高効率与えた傾斜ヘテロ接合構造セルおよび性能ヒステリシスなく信頼性高い逆型セルの要件は、集中研のもとプロジェクト内で共有するとともに、(株)東芝ほか NIMS と個別打ち合わせして共同目的に資しており、これを継続して推進する。

高分子補強ペロブスカイト層形成の計画外の新たな知見については、これを咀嚼、一般化して基盤技術の一つとして提示する。例えば、効率・歩留り高いペロブスカイト層の形成と高分子による撥水・耐水性の向上(図Ⅲ-2-(ハ)-F-7)である。既に、パナソニック(株)の開発セルに組み込めるか、ノウハウを供与して試験中である。

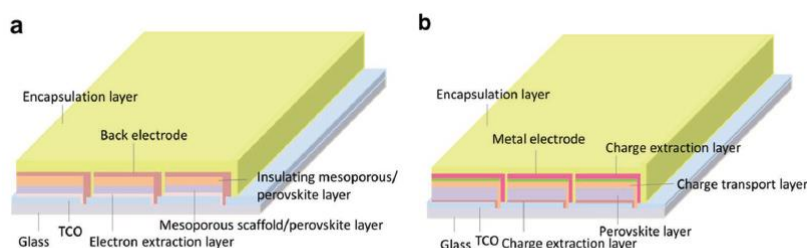


図Ⅲ-2-(ハ)-F-7 高分子補強ペロブスカイト層とセル特性および撥水による耐水性付与

低コスト製造要素技術の開発については HTL 製造コスト 500 円/m²達成に向け、湿式引き塗り法によるセル歩留まり確保の知見を起点に、大面積化に向けたペロブスカイト分散インキの調製(図Ⅲ-2-(ハ)-F-2)およびダイコート法、インクジェット法を適用する技術を確立して、低コスト高スループットなペロブスカイト層/HTL 製造法につなげたい。

光照射下 1000 時間の耐久性を巾広く実証するセル要素技術の開発については、本開発によるコスト低減 HTM、ペロブスカイトの高分子補強および 2-ピリジン等添加剤を活用して、セル構造と耐久性の相関を明らかにし、運転期間 10 年での耐久性保証の道筋を提示する。

本開発の要素技術をもとに、1m²モジュール構成の例示とコスト試算を NIMS 韓らは発表している(図Ⅲ-2-(ハ)-F-8, セル効率 15%のモジュール a 効率 12%で 0.26 米ドル/W, セル効率 20%のモジュール b 効率 18%で 0.22 米ドル/W)。これも一つとして、瀬川代表のもとチームで実施したコスト計算結果も踏まえて、モジュール試作のための要素技術の確立を急ぐ。



図Ⅲ-2-(ハ)-F-8 モジュール構成の提案例(NIMS 韓ら、Adv. Sci., 2016, 1600269 より)面積 1m², (a)印刷法メソポーラス構造、(b)逆型構造。

3. 波及効果

例えば、本テーマ分担の NIMS 韓らは、変換効率 12%、15 年耐久のペロブスカイト太陽電池でコスト 3.5-4.9 米セント/kWh と算出し、既存太陽電池含む電力源の中での圧倒的な優位性を説いている (Adv. Sci., 2016)。本プロジェクトで目標とするペロブスカイト太陽電池で 7 円/kWh を 2030 年までに実現するための、革新的な低製造コスト化の基盤となる高性能材料、セル製造技術を世界競争のなか先駆けの一端を担って開発することは、Society5.0 などに唱われるわが国の社会要請に多大に寄与する。パワーリソースの革新として再エネ社会の到来を先導するのは確かである。

4. 今後の展開

各材料・部材の低コスト化、高効率を実現するセル構成など基盤要素技術の開発はそれぞれ順調に進んでいる。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、歩留まり向上の視点から最適な基盤材料・セル構成を選択、さらに改良し、性能評価技術の確立とあわせ、NEDO 目標を満足する。代表の強い指針のもと集中研を軸として無駄の少ない共同による開発により、確かに目標を達成できると考えている。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	1 (0)	0 (0)	0 (0)	1 件
論文	0	6	4	10 件
研究発表・講演（うち国際会議）	6(4)	18(11)	3(2)	27 件
新聞・雑誌等への掲載	2	2	0	4 件

【特許出願】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	公益財団法人 神奈川 科学技術アカデミー 株式会社 セルシステム	特願 2016- 57127	国内	2016/3 /22	出 願	電流電圧測定システム 及び電流電圧測定方法	斎藤英純, 渡脩, 田村 裕

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	丸尾浩史, 西出 宏之	早稲田大 学	高分子電荷輸送材料と ペロブスカイト太陽電 池	光触媒, 49, 40 (2016).	有	2016/7/19
2	M. Yin , F. Xie , H. Chen, X. Yang, F. Ye, E. Bi, Y. Wu, M. Cai, L. Han	NIMS	Annealing-free perovskite films by instant crystallization for efficient solar cells	J. Mater. Chem. A, 4, 8548-8553 (2016).	有	2016/5/4
3	F. Ye, H. Chen, X. Fengxian, W. Tang, M. Yin, J. He, E. Bi, Y. Wang, X. Yang, L. Han	NIMS	Soft-cover deposition of scaling-up uniform perovskite thin films for high cost- performance solar cells	Energy & Environmental Science, 9, 2295- 2301 (2016).	有	2016/6/17
4	W. Yongzhen, X. Yang, C. Wei, Y. YouFeng, C. Molang, X. Fengxian, E. Bi, I. Ashraful, L. Han	NIMS	Perovskite solar cells with 18.21% efficiency and area over 1 cm ² fabricated by heterojunction engineering	Nature Energy, 1, 16148	有	2016/9/19
5	M. Cai, Y. Wu, H. Chen, X. Yang, Y. Qiang, L. Han	NIMS	Cost-Performance Analysis of Perovskite Solar Modules	Advanced Science, 10.1002/adv. 20160 0269	有	2016/9/15
6	Y. Yue, N. T. Salim, Y. Wu, X. Yang, A.	NIMS	Enhanced Stability of Perovskite Solar Cells through	Advanced Materials, 28, 10738 (2016).	有	2016/12/21

	Islam, W. Chen, J. Liu, E. Bi, F. Xie, M. Cai, L. Han		Corrosion-Free Pyridine Derivatives in Hole-Transporting Materials			
7	Y. Wu, F. Xie, H. Chen, X. Yang, H. Su, M. Cai, Z. Zhou, T. Noda, L. Han	NIMS	Thermally Stable MAPbI ₃ Perovskite Solar Cells with Efficiency of 19.19% and Area over 1 cm ² achieved by Additive Engineering	Advanced Materials, 2017, 1701073	有	2017/5/20
8	E. Bi, H. Chen, F. Xie, Y. Wu, W. Chen, Y. Su, A. Islam, M. Gratzel, X. Yang, L. Han	NIMS	Diffusion engineering of ions and charge carriers for stable efficient perovskite solar cells	Nature Communications, | 8:15330 | DOI: 10.1038/ncomms1533 0	有	2017/6/12
9	M. Yin , F. Xie , X. Li, Y. Wu, X. Yang, F. Ye, W. Tao, E. Bi, H. Chen, L. Han	NIMS	Accurate and fast evaluation of perovskite solar cells with least hysteresis	Applied Physics Express 10, 076601 (2017)	有	2017/6/7
10	F. Ye, W. Tang, F. Xie, M. Yin, J. He, Y. Wang, H. Chen, Y. Qiang, X. Yang, L. Han	NIMS	Low-Temperature Soft-Cover Deposition of Uniform Large-Scale Perovskite Films for High-Performance Solar Cells	Adv. Mater. 2017, 1701440	有	2017/7/15

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	T. Konishi, T. Suga, H. Nishide	Waseda Univ.	Conjugated Polymers via Vapor-Phase Polymerization and Their Application to a Perovskite Solar Cell	16th IUPAC International Symposium on MacroMolecular Complexes	2015/8/11
2	K. Harada, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Nishide	Waseda Univ.	Dikettopyrrolopyrrole Polymer and a Perovskite Type Solar Cell	Energy Materials Nanotechnology Meetings on Photovoltaics	2016/1/19
3	T. Konishi, T. Suga, H. Nishide	Waseda Univ.	In-situ Formation of Polythiophene Films via Vapor-Phase Polymerization and Their Application to an Inverted Planar Perovskite Solar Cell	Energy Materials Nanotechnology Meetings on Photovoltaics	2016/1/19

4	M. Takamura, R. Nakajima, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Nishide	Waseda Univ.	Oxoammonium Cation of TEMPO as a Dopant for Hole-transporting Aryl Amines and its Application to a Perovskite Solar Cell	Energy Materials Nanotechnology Meetings on Photovoltaics	2016/1/19
5	韓礼元	NIMS	高効率と高信頼性を両立する ペロブスカイト太陽電池*	PV EXPO2016	2016/3/3
6	斎藤英純, 青木大輔, 馬飼野信 一, 高木克 彦	KISTEC	再現性の高い測定法を確立す るための取り組み*	RATO 主催「有機系太 陽電池の高度利用に 向けた評価・標準化 ワークショップ」	2016/3/23
7	西出宏之	早稲田大 学	ペロブスカイト太陽電池: 高 分子電荷輸送材料の開発*	光機能材料研究会	2016/7/19
8	S. Tanaka, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ., The Univ. of Tokyo	Oxidizing Dopant-Free Spiro-OMeTAD to Improve the Performance of Perovskite Solar Cells	2nd International Confence on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics	2016/9/27
9	Y. Sasaki, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Segawa H. Nishide	Waseda Univ., The Univ. of Tokyo	Oxidizing Dopant-Free Diketo- pyrrolopyrrole Polymer as a Hole- Transporting Layer of Perovskite Solar Cells	2nd International Confence on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics	2016/9/27
10	R. Nakajima, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ., The Univ. of Tokyo	Methoxy-substituted Triarylamine Polymers as a Highly Efficient Hole- transporting Layer of Perovskite Solar Cells	2nd International Confence on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics	2016/9/27
11	S. Watanabe, H. Maruo, K. Oyaizu, H. Segawa, H. Nishide	Waseda Univ., The Univ. of Tokyo	Poly(vinyl triphenylamine)s as Hole- Transporting Layers of a 1cm ² Perovskite Solar Cell	Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics	2017/2/4
12	西出宏之	早稲田大 学	高性能ペロブスカイト太陽電 池に向けた有機材料開発*	PV EXPO2017	2017/3/2
13	岡太航、中 嶋里沙乃、 丸尾浩史、 小柳津研 一、西出宏 之	早稲田大 学	メトキシ置換トリフェニルア ミンの酸化重合とペロブスカ イト太陽電池への適用	日本化学会第 97 春季 年会	2017/3/18
14	山口 真悠、 渡邊 振一 郎、丸尾 浩 史、小柳津 研一、西出 宏之	早稲田大 学	アリールアミンポリマーを ホール輸送層とする実効面積 1cm ² のペロブスカイト太陽電 池	日本化学会第 97 春季 年会	2017/3/18
15	佐々木勇 輔、諏訪康 貴、丸尾浩		高分子複合ペロブスカイト層 の形成と太陽電池の特性	第 66 回高分子学会年 次大会	2017/5/29

	史、小柳津 研一、西出 宏之				
16	H. Nishide	Waseda Univ.	Polymer-Perovskite Hybrids for a Highly Efficient Solar Cell*	11th East Asian Symposium on Polymers for Advanced Technology, Nantong	2017/6/2
17	H. Nishide	Waseda Univ.	Polymer-Perovskite Hybrids: their Structure and Photovoltaic Performance*(Plenary)	8th International Symposium on Macro- and Supramolecular Materials	2017/6/7
18	L. Han	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells*	The 26th IUPAC Symp. Photochemistry	2016/4/3
19	L. Han	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells*	The 3rd Conf. New Generation Solar Cells	2016/5/21
20	L. Han	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells*	Hybrid Electronic & Photonic Materials and Phenomena GRC	2016/6/19
21	L. Han	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells*	ISC 2016	2016/6/26
22	L. Han	NIMS	ペロブスカイト太陽電池の高 性能化技術*	有機太陽電池シンポ ジウム	2016/7/14
23	L. Han	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells*	The 37th PIERS	2016/8/8
24	L. Han	NIMS	Efficient and Stable Large-area Perovskite Solar Cells*	The 5th SFSC	2016/10/11
25	斎藤英純, 青木大輔, 馬飼野信一, 高木克彦	KISTEC	再現性の高いペロブスカイト 太陽電池の性能評価法に関する 検討	光化学協会 光化学討 論会	2016/9/6
26	H. Saito, D. Aoki, S. Magaino, K. Takagi	KISTEC	Stability and durability evaluation of Perovskite solar cell performance under the controlled atmosphere conditions.	P-HOPV17	2017/2/3
27	斎藤英純, 青木大輔, 馬飼野信 一, 高木克 彦	KISTEC	ペロブスカイト太陽電池の性 能評価法の開発	日本化学会第97 会年 会	2017/3/18

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	NIMS	ペロブスカイト太陽電池で変換効率 18%超を達成 - 標準面積(1cm ²)のセルで世界初 -	NEDO ニュースリリース	2016/3/28
2	NIMS	ペロブスカイト太陽電池の変換効率 18.2%を達成	NIMS プレスリリース	2016/3/28
3	NIMS	ペロブスカイト太陽電池の新添加剤	日刊工業新聞	2016/10/6
4	早大	印刷で作れる太陽電池	日本経済新聞	2016/11/21

G 新素材と新構造による高性能化技術の開発（東京大学、産業技術総合研究所(再)、九州工業大学(再)、東京工業大学(再)、兵庫県立大学(再)、京都大学(再)、熊本大学(再)）

1. 成果詳細

本研究開発は、中間目標としてセル変換効率 20%、最終目標としてモジュール変換効率 20%を設定し、産官学連携による集中研体制で進めている。本実施項目では、モジュール変換効率 20%の基盤技術として、セル変換効率 25%を実現可能な要素技術の確立を最終目標とし、集中研および各再委託先において、ペロブスカイト太陽電池の更なる性能向上をめざす新素材と新構造の基礎研究を進める。ペロブスカイト太陽電池は、主に、透明導電電極、電子輸送層（正孔ブロック層）、ペロブスカイト層、正孔輸送層（電子ブロック層）、および対極で構成されており、その性能向上のためには、各層を構成する材料の開発、各層のナノスケール構造の改良、そして各層が接する界面の制御が重要である。材料開発においては、ペロブスカイト材料の高純度化や組成の検討、新規正孔輸送層材料としての金属酸化物などの検討、対極材料の検討などを行う。実験的研究に加え、理論計算による材料探索も行う。ナノスケール構造の改良と界面制御は表裏の関係にあり、材料開発とも密接に関係する。電子輸送の役割を担う酸化物半導体の構造制御によるペロブスカイト層の構造制御や、ペロブスカイト層と正孔輸送層の界面制御を検討する。これらにより、電流、電圧、FF を改善し、変換効率向上につなげる。

①新素材と新構造の開発

塗布系ペロブスカイト太陽電池では、ペロブスカイト層を構成する材料の検討を行い、これまで使われてこなかったカリウムイオンを用いて組成を調整した結果、有効面積 0.18 cm^2 のセルで光電変換効率 20.5% (V_{oc} 1.14 V、 J_{sc} 23.4 mA/cm^2 、FF 0.769) が得られた。このデバイスでは、これまで問題となってきた「電流-電圧特性ヒステリシス」がほとんど現れなかった。

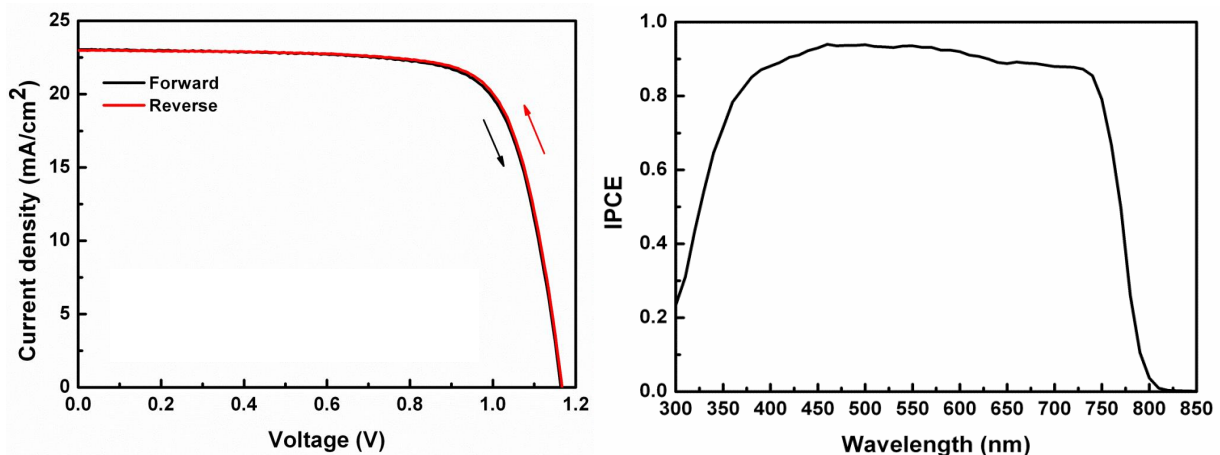
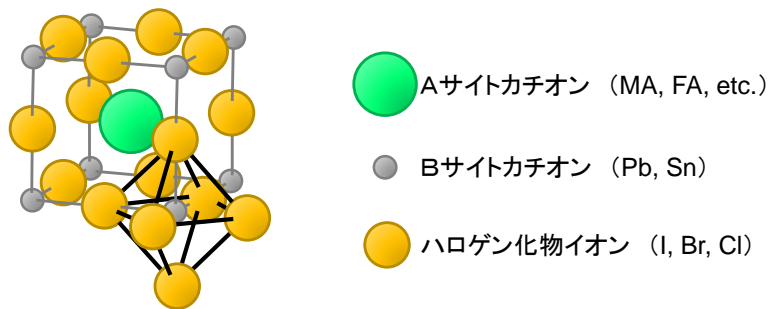


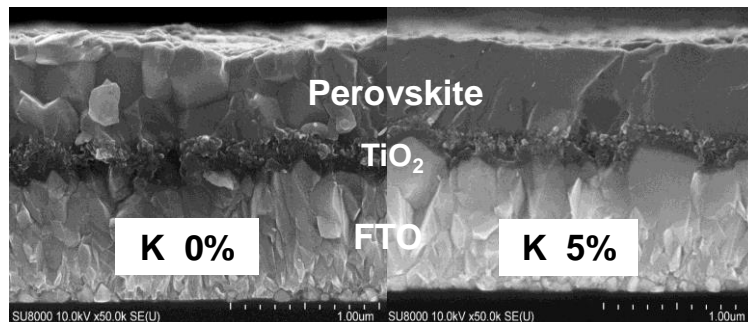
図 III-2-(ハ)-G-1. 新規カチオンを用いたデバイスの電流-電圧特性(左)と分光感度特性(右)

ペロブスカイト太陽電池では、図 III-2-(ハ)-G-2 に示す基本構造において、A サイトカチオンとして CH_3NH_3^+ (メチルアンモニウム : MA) を用いた MAPbI_3 が主に使われている。しかし、最近報告されている高効率デバイスの多くでは、A サイトカチオンとして $\text{NH}_2\text{CHNH}_2^+$ (ホルムアミジニウム : FA) と MA を併用し、ハロゲン化物イオンもヨウ化物イオンと臭化物イオンを併用した $(\text{FAPbI}_3)_{0.85}(\text{MAPbBr}_3)_{0.15}$ という組成のペロブスカイトが用いられている。この混合カチオン/混合ハロゲンペロブスカイトに、さらに添加物を加えることで、ペロブスカイト層の膜構造などを変化させることができ、さらなるデバイス効率向上につながる。本研究開発では、各種アルカリ金属イオンを添加し、カチオン比率やハロゲン化物イオン比率を変化させて検討した結果、カリウムイオンを加えた場合に高い性能が得られることが分かった。最も高い性能は、 $\text{K}_{0.05}\text{MA}_{0.16}\text{FA}_{0.79}\text{PbI}_{2.49}\text{Br}_{0.51}$ となる出発原料比でデバイスを作製した際に得られた。



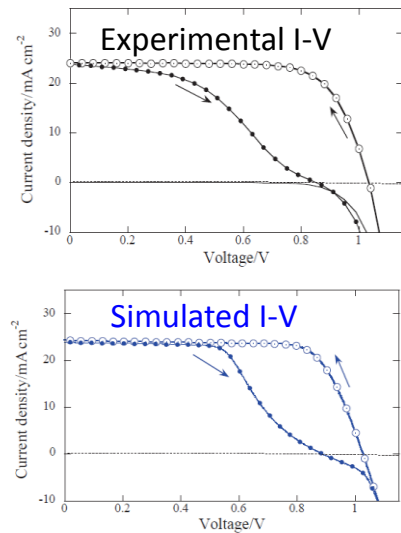
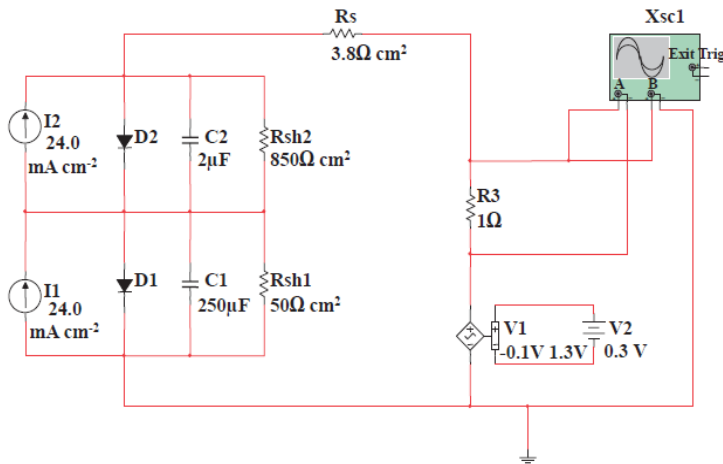
図Ⅲ-2-(ハ)-G-2. 有機金属ハライドペロブスカイトの基本構造

カリウムイオン添加により、図Ⅲ-2-(ハ)-G-3の断面SEM画像にみられるように、膜厚方向に結晶粒界のない高品質のペロブスカイト層が形成された。また、吸収端が長波長化し、光吸収能も高くなった。さらに、伝導帯下端が浅く（高エネルギー化）なり、酸化チタン層への電子移動に有利な状況となっていることも判明した。この組成で良好なデバイスを作製するにはいくつかのノウハウが必要だが、ポイントを掴めば、高効率デバイスを再現性良く作製可能である。光電変換効率 20.5%を達成したデバイス構造には、並行して検討した酸化物半導体層の最適化や正孔輸送層の最適化の結果も反映されており、それぞれの部位における改良が、中間目標効率達成につながった。さらに、理論計算により、界面に現れる原子（分子）層がどの部分であるかということによって界面の親和性が異なることを示した。理論計算では、有機材料や炭素材料を挟むことで接合状態が改善される様子も示された。ペロブスカイト単結晶試料を作成し、結晶構造や励起子物性などについて詳細に検討することで特性改善に向けた情報を得た。



図Ⅲ-2-(ハ)-G-3. カリウムイオン添加の有無によるペロブスカイト膜の質の違い

ペロブスカイト太陽電池では、電流-電圧特性評価により変換効率を求める際に、電位掃引方向によって特性が変わる「ヒステリシス」が大きく現れる。学術的には興味深い現象であるが、性能評価しにくい、2通り見積もられる変換効率のうち高い方の値を採用するのは過剰見積りである、などといった批判の対象ともなっていた。平成 27 年度に、この現象を MPPT（最大出力点追跡法）等により詳細に調べ、当時得られていたヒステリシスを伴う電流-電圧特性に基づく変換効率 18%が過剰見積りでないことを示した。この電流-電圧特性ヒステリシスは、従来のダイオードモデルやトランジスタモデルなどでは解析できず、ダブルキャパシタモデル（図Ⅲ-2-(ハ)-G-4）により再現できることを明らかにした。図Ⅲ-2-(ハ)-G-4 左側に示した等価回路に基づいてシミュレーションした電流-電圧特性は同図右下のようになり、実験で得られた電流電圧特性（同図右上）の特徴を再現している。平成 28 年度はキャパシタ成分の大きさを定量的に検討することが可能となり、デバイス改良を進める上で有用な情報を得た。このキャパシタ成分が、デバイス中のどこに相当するか、という点には議論の余地があるが、本研究では FTO、TiO₂、ペロブスカイト各層間の格子の不整合により、界面の接触に問題を生じていることを見出し、界面修飾等によってさらなる効率向上が見込めることを示した。



図III-2-(ハ)-G-4. 電流-電圧特性ヒステリシスを説明するダブルキャパシタモデル

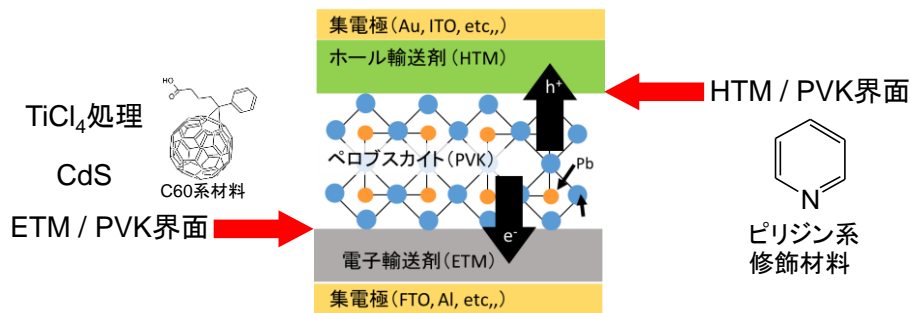
蒸着系ペロブスカイト太陽電池では、メチルアンモニウムハロゲン化鉛混晶とホルムアミジニウムヨウ化鉛の真空蒸着による薄膜作製に取り組んだ。蒸着セル温度のフィードバック制御によって安定な製膜が可能となった。真空蒸着膜における $5\mu\text{m}$ 四方での最大高低差は 37 nm (MAPbI_3) と 36 nm (FAPbI_3) で、ピンホールの影響がみられた。メチルアンモニウムハロゲン化鉛混晶については、ヨウ化物と臭化物の混晶について、平成 27 年度、全組成範囲で良質な薄膜作製が可能であることを確認できた。平成 28 年度には、このヨウ化物と臭化物の混晶について、光誘起相分離が起こることを見出し、その温度依存性等について詳細に調べた。また、ヨウ化物薄膜と臭化物薄膜のヘテロ積層膜が室温で自発的に混晶化するという特異な現象を見いだした。これらの現象にはいずれもハロゲン化物イオンの拡散が関与しているものと考えている。ホルムアミジニウムヨウ化鉛の真空蒸着では、溶液法と異なり、室温でアニールなしでペロブスカイト相が得られ、しかも溶液法のように短時間で非ペロブスカイト相に転移することなく、五ヶ月以上にわたってペロブスカイト相が安定であることを見いだした。一方、レーザー蒸着法で作製した MAPbI_3 膜における最大高低差は、 $2\mu\text{m}$ 四方の中で 22 nm であった。このレーザー蒸着法でペロブスカイト膜厚を精密制御して逆構造型セルを作製したところ、ヒステリシスがほぼ見られない特性を得ることができ 16% の変換効率を得られた。

ペロブスカイト太陽電池の耐久性確保に向けた検討の中で、現行の材料では劣化が目立つ正孔輸送材を用いない構造のセル作製を検討した。先にカーボン層まで含めた多孔質層 ($\text{TiO}_2/\text{ZrO}_2/\text{C}$) を作っておき、最背面のカーボン電極側からペロブスカイト材料を浸透させてセルを作製するプロセスにより、変換効率 9% の、正孔輸送材フリー・カーボン対極ペロブスカイト太陽電池を作製した。また、低コスト対極材料の開発として、カーボンを塗布したガラス基板を対極として貼り合せセルを試作した。

セル出力の高電圧化を目指し、熱安定性の高いホルムアミジニウム (FA) を用いた臭化ペロブスカイト FAPbBr_3 を、四塩化チタン処理チタニア多孔膜に製膜してセルを作製したところ、開放電圧 1.37 V を得た。さらにペロブスカイト層と正孔輸送層の間にブロック層を配したセルで開放電圧 1.42 V が得られ、高電圧化の中間目標を達成した。また、正孔ブロッキングに用いるチタニア緻密層が、チタニア多孔質層との接合界面で電荷再結合にかかわっている可能性を調べ、チタニア緻密層の表面を酸化マグネシウムで被覆してブロッキング効果を強めることによって、セルの電圧が向上する効果を見出した。また、三種カチオン (MA/FA/Cs) ハロゲン (I/Br) 混合系ペロブスカイトについて、アニーリング処理におけるオストワルド熟成を調整することで、粒子サイズ $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上と大きく、平坦で連続した平面結晶層を作ること的成功し、電圧を 1.1 V まで高めて効率 20.8% (サイズ 5 mm 角) が得られた。サイズの大きい 1 cm 角のセルでは効率 18% が得られた。また、界面の物理欠陥を無くし、連続性の良い層構造を作ることによって発電特性のヒステリシスをかなり抑制できることを示した。連続性の良い層構造を作ることによって、ヨウ素系ペロブスカイト太陽電池の電圧を安定的に 1.18 V まで高めることに成功した。低温製膜アモルファス TiO_x 緻密層、低温製膜ブルッカイト TiO_2 高結晶多孔膜からなる二層構造の MAPbI_3 ペロブスカイト太陽電池で V_{oc} $1.16\sim 1.18\text{ V}$ 、効率最高 21.6% が得られた。

②界面制御技術

高効率化に向けて、ペロブスカイト層で電荷分離したエネルギーを可能な限り損失無く抽出することが重要である。このため、ペロブスカイト層が接する各界面に着目した（図Ⅲ-2-(ハ)-G-5）。



図Ⅲ-2-(ハ)-G-5. ペロブスカイト層が接する各界面の修飾

電子輸送層であるチタニアとペロブスカイト界面について、四塩化チタン処理の条件とその効果について検討したところ、四塩化チタン処理をしたサンプルはチタニア伝導帯端(CBE)準位が高くシフトし、これを加熱するとCBEが低くシフトすることが示された。さらに電気化学インピーダンス法を用いて調べた結果、キャパシタンス(Quasi-capacitance)と印加電圧(V_{app})の関係から、四塩化チタン処理で生成したチタニア薄膜内部のキャパシタンスが加熱焼成過程で増大することがわかった。すなわち、四塩化チタン処理で生成したチタニアのCBEが加熱で低エネルギー側にシフトし、電子輸送層のCBEに影響を与えていることがわかった。さらに、四塩化チタン処理にともなうチタニア電子輸送層の変化を高輝度放射光施設(Spring-8)によるエックス線回折測定したところ、このチタニア緻密層にアナターゼ結晶が含まれており、アナターゼのピークが四塩化チタン処理後に低波数側に僅かにシフトし、加熱後に再び処理前のピーク位置まで戻り、同時にピーク強度が増大している様子がみられた。したがって、四塩化チタン処理後の加熱により結晶性が向上するため、伝導帯準位が加熱温度により変化することを見出した。伝導帯準位の低下に伴い開放電圧が減少する一方、短絡電流が向上し、加熱温度300°Cで最も高い変換効率17.9%が得られた。また、化合物系太陽電池で電子輸送層および再結合防止層として使用される硫化カドミウム(CdS)薄膜を酸化チタン緻密層の代わりに使用し、高効率化させることを検討した。高性能な混合カチオン系ペロブスカイトは、エネルギーレベルの関係で TiO_2 への電子注入に問題を生じやすいが、CdSは TiO_2 より伝導帯準位が低いいため、この点を改善できる。CdSは低温製膜が可能な点も特長である。反応温度と反応時間を最適化させ、膜厚約50nm以下の均質なCdS層をFTO表面に製膜することに成功した。

有機界面制御材料としてチタニア緻密層とペロブスカイト界面にフラーレン等のアクセプター分子を導入することでヒステリシスの低減とFFの向上が示唆されている。しかし、これまでのフラーレン導入技術では、フラーレンとチタニアとの吸着性は弱く、ペロブスカイト層をスピコートする際にフラーレンが脱着する可能性が考えられる。そこで、チタニアへの吸着基を持つフラーレン系界面修飾材料を検討し、電子移動効率を向上できる新規材料を見出した。

正孔輸送層とペロブスカイト界面の制御について、ペロブスカイト層表面には遊離ハロゲンなどのホールトラップの存在が指摘されており、ピリジンで処理することにより粒界のトラップが減少し、発光寿命が長くなると知られている。そこでホールトラップ解消機能を持つ分子構造を探索する目的で、正孔輸送層とペロブスカイト界面に対してピリジン系界面修飾材料の導入を検討した。種々のピリジン類を用いて、ペロブスカイト表面にリンス処理または蒸気曝露処理を施し、その後ホール輸送剤(spiro-OMeTAD)を塗布することにより電池を作製し、電池性能に与える影響について検討した。その結果、ピリジン、4-(5-Nonyl)pyridineを蒸気処理したもの、またテトラブチルピリジン(TBP)ではスピコート、蒸気処理の両方で開放電圧(V_{oc})が上昇し、光電変換効率が向上することがわかった。さらにピリジンを比較対象として窒素数の異なるピリジン系化合物のピリミジン、トリアジンの修飾効果を調べた。その結果、ピリジン、ピリミジン、トリアジンと窒素原子の数の増加に伴い開放電圧が向上することがわかった。ホールトラップの減少による再結合抑制効果について、現在検討している。またホール輸送剤の性能向上に対するアプローチとしての新規添加剤開発も行っている。

③高電流材料技術

可視光から近赤外領域まで光電変換できる Sn/Pb の二成分系ペロブスカイトを応用し高電流型ペロブスカイト太陽電池を開発した。MAPbI₃ 系の短絡電流密度 (J_{sc}) 最高値 24 mA/cm² 程度を超える J_{sc} 26 mA/cm² を中間目標とした。これまでの研究で PbI₂、SnI₂、および MAI の三成分を前駆体として二成分系ペロブスカイトを作製し (製法 1)、20 mA/cm² の J_{sc} を達成してきた。この方法で作製したペロブスカイト層の Urbach steepness factor を光音響スペクトルで測定すると 0.5-0.6 程度と小さい値であった。ちなみに MAPbI₃ は 1.5-1.7、結晶性シリコンは 2.3 程度であり、これらと比較しても製法 1 で作製された二成分系ペロブスカイトの結晶欠陥が多いことが推定できる。これらの結晶欠陥密度を小さくし、またペロブスカイト層のピンホールをなくす工夫 (製法 2) をしたところ、Urbach steepness factor は MASnPbI₃ で 1.3、FASnPbI₃ で 1.6 に向上し、28 mA/cm² の J_{sc} を達成できた。時間分解分光を用いキャリアダイナミクスを解析したところ、チタニアの電子とペロブスカイト層のホールとの電荷再結合が 880 μsec (製法 1) から 21msec (製法 2) と遅くなり、またペロブスカイト中の電子と P3HT のホールとの電荷再結合が 16psec (製法 1) から 0.9 μsec (製法 2) と長くなること分かった。ペロブスカイト界面のトラップ密度が減少したために電荷再結合時間が長くなり効率が向上したものと推定された。さらなる最適化により、30.02 mA/cm² の J_{sc} を達成できたが、V_{oc} が低く、変換効率も低かった (図 III-2-(ハ)-G-6 左)。詳しく調べたところ、TiO₂ 表面に PbI₂ が作用するとトラップ密度が減少するのに対し、SnI₂ が作用するとトラップ密度が増加し、Ti-O-Sn という結合が V_{oc} 低下につながるということが分かった。この結合を含まない逆構造デバイス (ITO/PEDOT:PSS/MASn_{0.5}Pb_{0.5}I₃/C60/BCP/Ag-Au) を作製したところ、V_{oc} 0.49 V となり、さらに MASn_{0.6}Pb_{0.4}I₃ を用いたセルで V_{oc} 0.69 V、広帯域ペロブスカイト太陽電池では世界最高となる変換効率 12.36% が得られた。分光感度は約 1000 nm から立ち上がっており、J_{sc} は 24.78 mA/cm² となっている。その後の検討により、J_{sc} を 26.53 mA/cm² としつつ V_{oc} を 0.77 V まで上昇させ、効率が 15.93% まで向上した (図 III-2-(ハ)-G-6 右)。

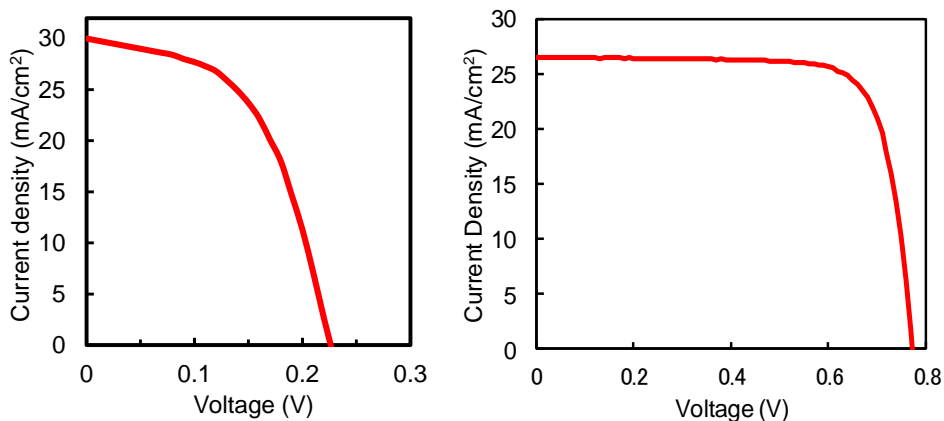
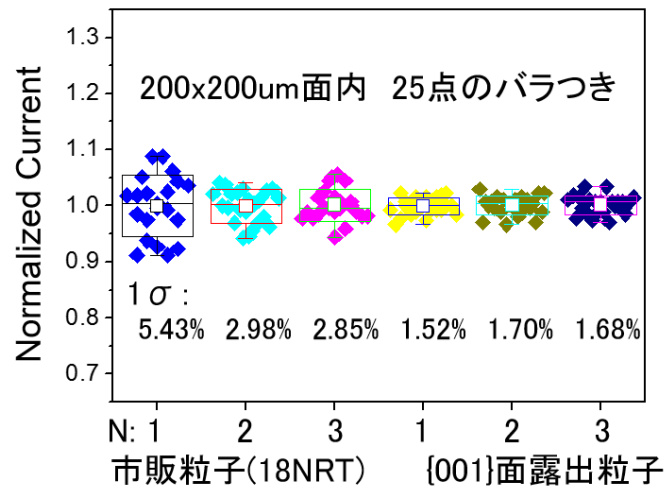


図 III-2-(ハ)-G-6. Sn/Pb 系ペロブスカイトを用いた高電流型セルの電流-電圧特性 : (左) 順構造デバイス J_{sc} 30.02 mA/cm²、(右) 逆構造デバイス J_{sc} 26.53 mA/cm²

④基板構造制御技術

一般的な TiO₂ ナノ粒子の表面は、アナターゼ型 TiO₂ で安定な {101} 面の割合が高い。ナノ粒子の形状を制御し、準安定な {001} 面を大きく露出するようにしたところ、伝導帯位置の違いにより、電子注入特性の向上と、界面抵抗に起因する逆電子移動過程の阻害が確認された。この {001} 面露出 TiO₂ を用いた (Cs/FA/MA)Pb(I/Br)₃ ペロブスカイト系デバイスにおける特性の面内ばらつきを、市販の酸化チタン PST-18NR (日揮触媒化成: 18NRT) を用いたものと比較した。ペロブスカイト層の微小な領域でのバンド端発光 (ピーク波長 770nm) 強度を、10 μm 刻みで 20×20 箇所の 400 データポイントについて調べたマッピングデータを取得し、基板が 18NRT の場合と {001} 面露出 TiO₂ の場合とで、像に現れるばらつきが明確に違うことを確認した。レーザー照射で生成する短絡状態光電流を、50 μm 刻みで 5×5 箇所の 25 データポイントについて、複数のデバイスで調べたところ、18NRT を用いた場合の短絡電流密度は 1σ 2.98% であったが、{001} 面露出 TiO₂ 粒子を用いた場合、1σ 1.7% 以内に収まった (図 III-2-(ハ)-G-7)。



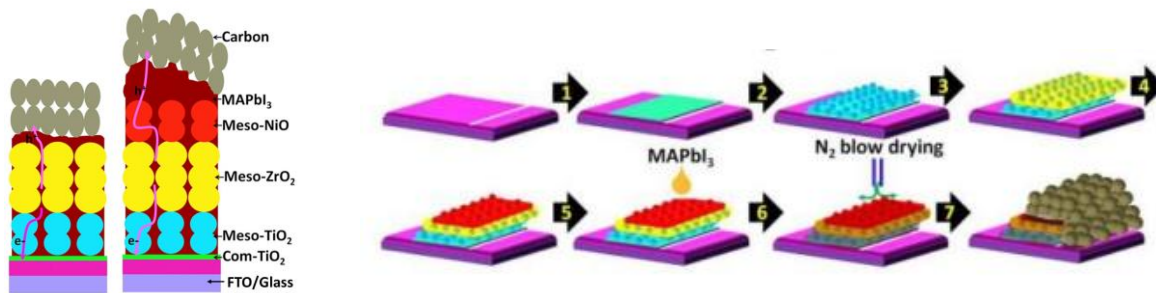
図III-2-(ハ)-G-7. 基板として、標準市販品のPST-18NR (左) および、{001}結晶面露出酸化チタン (右) を用いた、ミックスカチオン・ミックスハロゲン系ペロブスカイト太陽電池の200x200um領域での短絡電流バラつき。200x200um領域にて5x5箇所25データポイントの平均値(ドット)を1とした、標準偏差(棒グラフ)、最大/最小値(エラーバー)にて表記。

これらのペロブスカイト太陽電池は、変換効率16~17%程度で高いデバイス再現性を示していた。変換効率の面内バラつきを調べるため、φ1mmのピンホールを通した擬似太陽光照射下で、変換効率を4x4箇所の16データポイントにて測定したところ、いずれの酸化チタンを用いた場合でも、バラつき標準偏差で0.5%以下(1σ)であることを確認した。さらに、10x15mm角のペロブスカイト層に3mm角セルを8デバイス(4x2)配置し、それらの効率バラつきを調べたところ、0.5%(1σ)以下に収まっていた。更なる面内均一化とデバイス再現性の向上を目指した検討の中で、酸化チタンの各結晶面の配位不飽和チタンの密度に依存してCl等がPbに吸着する状況が変化することを明らかにした。この特性の面内バラつきの改善は、セル効率向上の重要技術と考えており、今後、基板の結晶層とペロブスカイト結晶層の格子マッチングを目的として、ALDで形成したバッファ層を導入することで接合特性を改善する技術の開発を進める。

マイクロ波加熱によるアニーリング装置を設計・導入し、一段階ペロブスカイト層形成におけるアニーリング過程に適用したところ、結晶サイズが2~3倍程度増大すると共に、結晶性も向上することを確認した。Cs/FA/MA-Pb-(I/Br)₃系ペロブスカイト前駆体膜のマイクロ波加熱でも同様の傾向を確認した。このマイクロ波加熱を、平均18%程度の効率が得られる東大集中研プロセスのアニーリング過程に導入したところ、平均効率で1%近く、即ち19%近くに向上できることを確認し、この技術について基本特許を東工大-東大の共願特許として出願した。FAPbI₃系は、一般に、ペロブスカイト相への変換に150°C程度の比較的高温での加熱が必要であるが、温度制御だけによる均一薄膜形成が困難で、デバイス効率も中程度に留まっている。このFAPbI₃系にマイクロ波加熱を適用したところ、100°C程度でペロブスカイト相(α相)へ変換できることを示す結果を得た。暫定的ではあるが、断面SEM観察で、ホットプレート加熱試料のペロブスカイト/酸化チタン界面付近でボイドが観測される一方、マイクロ波加熱試料ではボイドが観測されていないことから、均一なペロブスカイト薄膜形成が可能であると期待される。

⑤電極材料技術

ペロブスカイト太陽電池の有機正孔輸送材料を置き換える安定・安価な無機正孔輸送材料として酸化ニッケル(NiO)を検討した。NiOは300-600度の高温処理が必要であるため、順構造セルでは、先に他の材料と共に多孔質構造として積層・高温焼結をしておき、最後にペロブスカイト層を多孔質内部に構築する手法をとる(図III-2-(ハ)-G-8)。FTOガラス上に、スクリーン印刷を用いてTiO₂層、ZrO₂層、NiO層、カーボン層を順次積層した後、ペロブスカイト層を形成し、NiO層の有無による変換効率の変化を確認した。NiO層を導入することで変換効率が6%から11%まで向上し、NiO層の有用性が示された。これらのペロブスカイト太陽電池は、1000h以上たっても性能が低下しなかった。



図III-2-(ハ)-G-8. NiO を用いたペロブスカイト太陽電池の構造と、その作製手順

続いて、NiO を用いた逆構造セル(glass/FTO/NiO/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/BCP/Ag)を作製した。NiO の作製温度を 300~600℃まで変えてセルを作製したところ、作製温度が高いほど変換効率は向上し、550℃で変換効率 16.1%を得た。600℃では、ガラス基材からの Na イオン移動のため、変換効率が低下した。シンクロトロン（兵庫県立大学 NewSubaru）を用いて NiO 層を解析し、表面解析やバンド構造の調査を実施したところ、正孔輸送層である NiO 層の価電子帯がペロブスカイト層の価電子帯よりも負の位置にあった場合でも、高い変換効率を得ることが判明した。これは、従来提唱されていた結果と逆であり、従来のバンド設計を覆す結果である。今回の解析から、ペロブスカイト層と NiO 層の間でバンドベンディングを生じ、正孔が移動している明確な証拠が得られた。

逆構造セルに多く用いられるフラーレン誘導体は高価であるため、低コスト化を目指して無機電子輸送材料である ZnO の使用を検討した。スプレー熱分解法 550℃で NiO 層を作製し、ペロブスカイト層、ZnO ナノコロイド粒子をスピコートした結果、変換効率 5.2%を得た。ZnO ナノ粒子の内部抵抗が低下するほど、電子捕集能力が向上し、変換効率が向上することが判明した。

貼り合わせプロセス技術を開発する上で、以下の3点が課題であることを見出した。

- i 貼り合わせ材料として用いるカーボンの抵抗率低減。
- ii 無機系ホール輸送材を用いた張り合わせプロセスに適合するペロブスカイト層の開発。
- iii 貼り合わせに用いる接着材料の開発。

i に関して、グラファイト材料を最適化することで低抵抗値膜の開発に成功した。ii に対して、湿度制御を行ったグローブボックスを導入したことにより、再現高く良質なペロブスカイト層の作製が可能になった。iii の貼り合わせに関しては、グラファイト材料を用いた系では現在最適化を検討中である。これまでの検討として、FTO/TiO₂/ペロブスカイトを積層した基板と、FTO/NiO/ペロブスカイトを積層した基板を準備し、ペロブスカイト面を圧着させる貼合わせプロセスを開発し、効率 1.1%が得られた。ペロブスカイト層同士の接着面間の電子移動の改善が課題であり、接着剤の開発が重要であることが明らかになった。

⑥高純度材料技術

本項目ではペロブスカイト材料の高純度化という視点で高効率化の実現に取り組んだ。ペロブスカイト材料に及ぼす溶媒の効果を系統的に検討したところ、DMF および DMSO はペロブスカイト膜内にすみやかに挿入し、ペロブスカイト膜が速やかに透明膜へと変化し、SEM 観察の結果、その表面は針状の結晶が形成することを見出した。この知見をもとに、DMF 溶液中から再結晶を行うことにより、CH₃NH₃PbI₃・DMF の組成をもつ無色結晶を単離した。本錯体は、熱分析の結果、加熱により DMF 溶媒を放出しペロブスカイト(CH₃NH₃PbI₃)へと変化することを確認した。また、本錯体に対して ICP-MS を用いて 64 の元素に対して元素純度評価を行った結果、K および Na が 1.9 ppm 程度観測されただけで、極めて高い純度をもつことを確認した。さらに、本材料は DMF や DMSO といった溶媒に対して速やかに溶解することがわかった。すなわち、PbI₂ と MAI を 1:1 混合した固体を溶かす際には 30 分以上かかるが、本錯体の場合は 2 分以内で完全に溶解することが分かった。本錯体は、一段階溶液法によるペロブスカイト膜作製のための高純度前駆体材料として用いることができる。

続いて、本高純度材料を用いて、貧溶媒を添加する一段階溶液法でのペロブスカイト層の成膜条件を詳細に検討した。その結果、従来の方法では約 300nm のペロブスカイト層が形成されていたが、改良法により、約 500nm の厚さの緻密で平坦性の高いペロブスカイト層を形成できるようになった。この手法を用いてペロブスカイト太陽電池を作製することで、J_{sc} = 24.0 mA/cm²、V_{oc} = 1.13 V、FF = 0.74、PCE = 20.1%の特性を得ることができた。

28年度は、Sn系ペロブスカイト半導体の高純度化材料として、 $\text{SnI}_2(\text{dmf})$ 、 $\text{SnI}_2(\text{dmsO})$ 錯体など一連のSn錯体を新たに開発した。また、前年度までに開発したペロブスカイト前駆体材料($\text{MAPbI}_3(\text{dmf})$)の物性の詳細を明らかにした。その結果、本錯体は、ICP-MS測定により70元素に対しても残存金属を測定したところ、99.998%以上の純度をもつことがわかった。また、 PbI_2 (精製品)とMAI(再結晶品)を1:1で用いる従来のペロブスカイト材料(飽和濃度1.2 M in DMSO)に比べて、DMFおよびDMSOの溶媒に対して溶解速度が早く、また、特にDMSOに対しては飽和濃度(2.0 M)が著しく高いことが明らかになった。これらの特性を生かしたプロセスウィンドウが広い塗布法により、再現性よく高効率セル($J_{\text{sc}} = 22.7 \text{ mA/cm}^2$, $V_{\text{oc}} = 1.15 \text{ V}$, $\text{FF} = 0.76$, $\text{PCE} = 19.8\%$)を作製することが可能になった。本手法は、ロール to ロール方式による塗布工程への展開という観点から、特に重要な技術であると考えられる。

⑦第一原理計算

ペロブスカイト太陽電池の変換効率向上に貢献すべく、第一原理電子状態計算に基づく数値シミュレーションを用い、ペロブスカイト(PVK)層の電子状態、およびPVK層とホール輸送材料(HTM)層や電子輸送材料(ETM)層界面でのキャリア注入特性、およびHTM層でのキャリア輸送特性に注目した解析を行った。具体的には、(1)ハロゲン化鉛ペロブスカイトの基本的性質の検討、(2) Pb/Sn 混合金属ペロブスカイトの構造物性相関解析、(3) Pb フリー材料探索、(4)ペロブスカイト層の格子欠陥と制御、(5)ホール輸送材料の探索、(6)光誘起キャリア注入速度の評価とその改善のための分子設計、(7)ペロブスカイト層-電子輸送層界面の構造評価、の七つの課題について取り組んだ。以下にその概要を述べる。

(1) PVK結晶の構造と電子状態

ペロブスカイト型結晶である CsPbI_3 に注目し、そのクラスターモデルによる第一原理計算を行った。計算の結果、表面から少し内側に入ると単結晶での結合距離に近い Pb-I 距離が再現されたが、Aサイトイオンが少ない表面領域で Pb-I 結合が長くなる(つまり構造が膨らむ)傾向が見られた。従って、PVKの表面層は若干格子が広がっているものの、その厚さは極めて薄いと考えられる。表面準位はバルクの準位から大きく変化することもなく、表面層自身がキャリア輸送に大きく影響することはないように思われる。従って、太陽電池の光電変換特性は、PVK層のバルクとしての性質およびその内部の格子欠陥(空孔や不純物)に由来する性質によって制御されていると考えられる。

(2) Pb/Sn 混合金属PVKの構造と電子状態

ペロブスカイトの Pb の一部を Sn に置換する場合、その分布と電子状態の相関に興味をもたれる。クラスターモデルによる検討では、ほぼ均一に二種類の金属イオンが混合される場合、相対位置が多少異なっても熱力学的な相対安定性はほぼ等しいことがわかった。したがって、バルク全体で見ると、濃度分布が均一である限り、 Sn の原子レベルの分布はランダムであると思われる。励起状態計算からは Sn の相対配置によって光吸収スペクトルのピークが多少シフトすることが予想され、吸収バンドが若干ブロードになると思われる。 Pb の方がバンドギャップが大きいのは、相対論的効果であるランタノイド収縮によって Pb の価電子s軌道が安定化し、価電子p軌道が不安定化するためである。

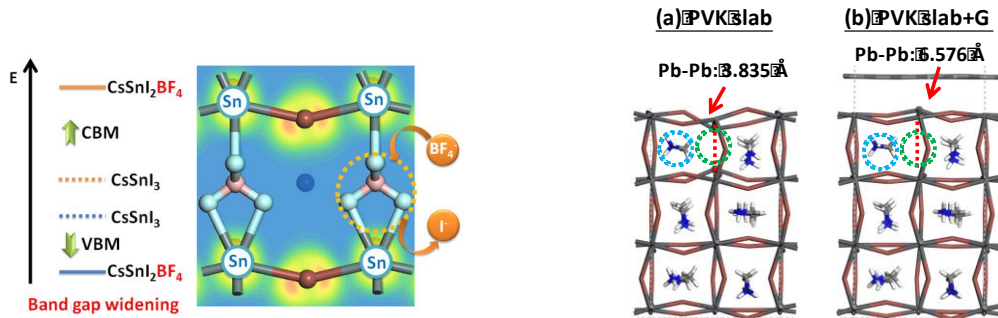
(3) 鉛フリーペロブスカイト太陽電池に関する研究

Sn 化合物で Pb 化合物と同程度のバンドギャップをもつ化合物を探索するために、我々は一部のハロゲンを多原子分子イオンで置換した化合物に注目し、バンド計算を行った。 Pb 化合物でバンドギャップを広げることがすでに知られている BF_4 および ClO_4 をハロゲンの代わりに導入した Sn 化合物(図III-2-(ハ)-G-9(左)参照)について検討したところ、 Sn 化合物においても Pb ハロゲン化合物と同程度のバンドギャップが得られると予測された。従って、鉛フリー太陽電池の開発では、多原子分子イオンの利用に興味を持たれる。なお、このような化合物ではキャリアの有効質量が大きくなる問題が生じることが予想された。更に第一原理計算を行った結果、この問題は圧縮応力の印加によってある程度改善できることも予測された。

(4) PVKの表面近傍の格子欠陥

PVK層とそれに隣接するキャリア輸送層との界面に存在する格子欠陥がキャリアトラップないしは再結合中心となり、短絡電流や開放電圧の低下の原因になると考えられている。我々は界面近傍の原子空孔がデバイス特性劣化の原因になるのではないかと考え、 MAPbI_3 の様々な原子空孔(MA分子、 Pb 原子、 I 原子の位置での空孔)および複合欠陥であるSchottky型欠陥とFrenkel型欠陥を検討した。検討の結果、いくつかの格子欠陥が電子トラップになることがわかった。この挙動は、バルク内部のものとは異なる。さらに、PVKの表面をグラフェンや不飽和炭化水素分子で化学修飾すると、同じ欠陥でも電子トラップにならないことが予測された(図III-2-(ハ)-G-9(右)参照)。従って、電子輸送層界面で

のキャリア輸送特性を改善するために、有機分子による表面修飾による格子欠陥制御が重要な技術となると考えられる。



図III-2-(ハ)-G-9. (左) 提案された Pb フリー材料(MASn(BF₄)I₂)。 (右) 芳香族炭化水素 (例： グラフェン) による MAPbI₃ の表面修飾による格子欠陥抑制効果。(a) 表面修飾なし、(b) 表面修飾あり。MAI の欠損による格子欠陥(ショットキー欠陥)形成時に Pb ダイマーが形成されキャリアトラップとなるが、表面修飾するとそれが抑制されることが予想される。

(5) 有機 HTM 層のキャリア輸送特性に関する研究

ペロブスカイト太陽電池を構成する材料で最もコストが高いと考えられているのはホール輸送材料 (HTM) として用いられる spiro-OMeTAD である。この有機材料は良好なデバイス性能の実現に有利であるが、そのホール移動度 (μ) はそれほど高くない。このため Li 系化合物のようなドーパントが用いられているが、この材料が HTM 層の耐久性を低下させると考えられており、ドーパントなしで利用可能なホール輸送材料の開発が期待されている。我々は既報のホール輸送材料に関する電子状態計算を行い、計算される電子的記述子と実験で測定された μ との相関を調べ、 μ の予測式を得ることに成功した。予測式の主成分の解析から、より高い μ を与える分子がもつべき電子状態の特徴が明確になったため、それに基づく分子設計を行った。提案した分子に対する μ は既報の材料よりも良好であり、今後の合成研究とデバイス応用が期待される。

(6) PVK 層から有機 HTM 層への光誘起ホール注入速度に関する研究

電子移動に関する Marcus 理論を用いて、PVK 層から有機系 HTM 材料への光誘起電子移動の速度定数を計算した。計算はクラスターモデルによって行い、電子励起状態を直接求めて速度定数を算出した。様々な仮定に基づく粗い計算ではあるが、CsPbBr₃ ナノ粒子表面に吸着した phenothiazine への正孔移動速度の実験結果をほぼ再現した。Spiro-OMeTAD の部分構造に相当する分子およびそれに含まれる O 原子を S、Se 原子に置換した分子について検討したところ、S 原子に置換した場合の正孔移動速度がもっとも高かった。実験的には Spiro-OMeTAD の S 置換体を用いると太陽電池のエネルギー変換効率が改善されると報告されており、正孔移動速度の改善と対応している。これらの知見に基づき設計した分子を第一原理計算で検討したところ、界面での正孔移動速度が速いことが計算で予測された。従って、エネルギー変換効率の向上も期待される。

(7) PVK 層と ETM 層 (TiO₂) 界面における Cl イオン偏析に関する研究

PVK 層と TiO₂ 層の界面を四塩化チタンで処理すると変換効率が向上する。本研究では、「④基板構造制御技術」として本課題に取り組んでいる東工大・和田教授グループと連携して、第一原理計算による構造解析を行った。実験では、界面での塩化物イオンの偏析が確認され、Pb 原子もその近傍に存在することが明らかとなった。第一原理計算によって、TiO₂ 表面におけるハロゲンの親和性を調べたところ、塩化物イオンの方がヨウ化物イオンよりも強く相互作用するために親和性が高いことが示され、実験結果が定性的に支持されるとともに、その原因の電子論的意味が明らかとなった。この傾向は、Pearson による HSAB (Hard and Soft Acids and Bases) 原理にも対応している。この知見は材料設計の指針として興味深い。

2. 実用化・事業化見通し

ペロブスカイト太陽電池の小面積セルの変換効率は、既に CIGS 太陽電池や CdTe 太陽電池と同等のレベルにある。しかも、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として期待されている。しかし、現状で高効率を示しているものは、研究者が手作業で作製した小型セルのみであり、事業化スケールでの生産に向けてはプロセスの自動化を含め解決すべき課題が多く残っている。今年度までに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。

東京大学先端科学技術研究センター附属産学連携新エネルギー研究施設に置いた集中研では、本研究開発に参加している各企業・各大学の研究者に対し、集中研で開発した高効率デバイスの作製方法を詳細に公開している。集中研の技術がこれらの企業を通じて事業化に進んでいくことが期待される。また、各企業や各大学において開発された高純度材料、新規正孔輸送材料、カーボン材料などが集中研に持ち込まれ、それらの持つポテンシャルを引き出す検討も進んでいる。一部の材料は既に実用化されている。

一方、ペロブスカイト太陽電池に関する研究はまだ歴史が浅く、さまざまな研究者が試行錯誤した結果として性能向上が実現しているものの解明されていない現象が多い。現状からさらに変換効率を向上するためには、基礎的な現象解明も重要である。現状の問題点の分析が進まなければ、今後の改善すべき点も見えてこない。本研究開発の中で、電流-電圧特性ヒステリシスの起源の解明、単結晶と微結晶の励起子挙動の違いの解明、微結晶薄膜中における複数結晶相共存状態の発見など、発電機構解明や安定的なデバイス作製条件設定に寄与する重要な発見ができており、これらの積み重ねにより、高性能化と実用化への道が拓かれるものと期待される。

今後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、本実施事項の最終目標である変換効率 25% を達成し、そ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。

3. 波及効果

ペロブスカイト太陽電池の高性能化と実用化が達成されれば、多くの波及効果が期待できる。技術的な観点では、塗布製造を利用した BIPV や車載用 PV としての展開が期待できる。一方、太陽電池以外の用途として光電変換素子やセンサー等への展開も期待できる。経済的な観点では、ペロブスカイト太陽電池に関連する幅広い材料メーカー、製造装置メーカー等の売り上げ向上で経済的波及効果が期待できる。また、ペロブスカイト太陽電池の海外市場への展開で、大きな経済的波及効果が期待できる。社会的波及効果としては、ペロブスカイト太陽電池の実用化による低コスト太陽電池の実現で、FIT 価格のさらなる低減に対応でき、国民負担の軽減につながる。また、FIT 終了後もジェネレーションパリティに対応した太陽電池の導入拡大が期待でき、再生可能エネルギーの導入拡大と低炭素社会構築に貢献するものと考えられる。

4. 今後の展開

これまでの研究開発により、ペロブスカイト太陽電池の変換効率向上に関する中間目標である効率20%を達成した。ペロブスカイト太陽電池の変換効率向上に関して、現段階では主に材料の観点から検討を加えており、反射防止膜の利用や、電流を取り出しやすいデバイス形状の設定など、さらに性能向上する余地が残っている。効率20.5%を達成したデバイスの V_{oc} は1.14 Vであったが、現在の材料系・作製法の延長線でも1.2 V程度の V_{oc} は実現可能と見られている。類似した材料を用いたデバイスで、遮光マスクを使わず全面に光を当てた場合には1.24 Vの V_{oc} が得られたという報告もあり、そのレベルまでは可能性がある。また、現行デバイスの弱点はFFで、主に正孔輸送層が厚いことに起因しているとみられる。高いFFは、主に正孔輸送層が極薄のデバイスで報告されており、単純には正孔輸送層の厚みを減らせばよいことになるが、ピンホール生成による短絡をいかに防ぐかということが課題となる。 V_{oc} を1.24 Vまで高め、FFを0.82まで向上させれば、効率23.8%となる。

高電圧化に関する実施事項では、 V_{oc} 1.37 Vを実現している。高電流化に関する実施事項では、 J_{sc} 30 mA/cm²以上を実現している。このように、有機金属ハライドペロブスカイトには材料の多様性があり、それぞれの長所をうまく組み合わせることができれば、効率を大幅に改善できると期待される。また、単セルでなくタンデムにして役割分担させることで、それぞれの長所を活かせば、高い性能を発揮できると期待される。ペロブスカイト太陽電池の特長は、結晶シリコンなどと比べて光吸収領域が少し狭く、出力電圧が高い点である。この特長を活かし、シリコン太陽電池などと組み合わせたタンデム太陽電池のトップセルとすることで、既存シリコン太陽電池を大きく上回る性能を実現できる。

ペロブスカイト太陽電池は、比較的安価な材料を用い、印刷などの溶液プロセスで作製できるため、これまでにない低製造コストを達成できることが期待される。現状でも実験室スケールのデバイスの変換効率は化合物半導体薄膜太陽電池に並ぶレベルにあり、本研究開発等を通じて、さらなる変換効率向上が見込まれる。現状のデバイス構成の中では正孔輸送材料がやや高価であるため、その代替となる安価な材料の開発を進めており、まもなく置き換えることが可能になると見込まれる。また、対極の金属蒸着膜の代替に関しても検討を進めている。これらの検討が進めば、最も高コストなのはガラスである、というレベルに至る。本研究開発では、透明導電電極付ガラスを不要とするバックコンタクト型デバイスの開発を進めており、低コスト化の観点では、これが切り札になると期待される。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	1(0)	3(1)	1(0)	5 件
論文（うち査読付）	24(17)	44(25)	9(7)	77 件
研究発表・講演（うち国際会議）	117(33)	168(47)	16(9)	301 件
新聞・雑誌等への掲載	9	2	0	11 件
受賞	5	10	1	16 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許出願】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人 京都大学	特願 2015 - 245525	国内	2015/12/16	出願	錯体及びそれを用いたペロブ スカイト型太陽電池	若宮淳志、 廣瀬由美、 嶋崎 愛
2	国立大学法人 京都大学	PCT/JP2016 /87529	PCT	2016/12/16	出願	錯体及びペロブスカイト材 料、並びに該錯体若しくはペ ロブスカイト材料を用いたペ ロブスカイト型太陽電池	若宮淳志、 廣瀬由美、 嶋崎 愛
3	国立大学法人 京都大学	特願 2017 -013651	国内	2017/1/27	出願	錯体及びその製造方法	若宮淳志、 尾崎雅司、 村田靖次郎
4	国立大学法人 東京工業大学 国立大学法人 東京大学	特願 2017 -039556	国内	2017/3/2	出願	複合体の加熱方法、複合体の 加熱装置及び光電変換素子	米谷真人、 瀬川浩司、 椿俊太郎、 和田雄二
5	国立大学法人 東京大学	特願 2017 -093656	国内	2017/5/10	出願	有機無機ハイブリッド材料な らびにこれを用いた太陽電池	瀬川浩司、 別所毅隆、 唐 澤国

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査 読	発表年月
1	H. Kunugita, T. Hashimoto, Y. Kiyota, Y. Udagawa, Y. Takeoka, Y. Nakamura, J. Sano, T. Matsushita, T. Kondo, T. Miyasaka, K. Ema	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Excitonic feature in hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ single crystals	Chemistry Letters 2015, 44(6), 852-854	有	2015/6/15
2	K. Zhu, T. Miyasaka, J. Y. Kim, I. Mora-Sero	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Trend of perovskite solar cells: Dig deeper to build higher	Journal of Physical Chemistry Letters 2015, 6(12), 2315-2317	有	2015/6/18
3	宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池と光 エレクトロニクス素子	オプトロニクス 2015 年 7 月号, 403, 59-65	無	2015/7/1

4	中崎城太郎, 瀬川浩司	東京大 学	ペロブスカイト太陽電池の実 用化に向けて	オプトロニクス 2015年7 月号, 403, 66-70	無	2015/7/1
5	近藤高志	東京大 学	ハロゲン化鉛ペロブスカイト 型半導体の物性	オプトロニクス 2015年7 月号, 403, 71-75	無	2015/7/1
6	T.-Y. Hsieh, T.-C. Wei, K.-L. Wu, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Efficient perovskite solar cells fabricated using an aqueous lead nitrate precursor	Chemical Communications 2015, 51(68), 13294- 13297	有	2015/7/10
7	E. Zheng, X.-F. Wang, J. Song, L. Yan, W. Tian, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	PbI ₂ -based dipping- controlled material conversion for compact layer free perovskite solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2015, 7, 18156-18162	有	2015/7/29
8	A. Alberti, I. Deretzis, G. Pellegrino, C. Bongiorno, E. Smecca, G. Mannino, F. Giannazzo, G. G. Condorelli, N. Sakai, T. Miyasaka, C. Spinella, A. La Magna	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Similar structural dynamics for the degradation of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ in air and in vacuum	ChemPhysChem 2015, 16, 3064-3071	有	2015/9/2
9	A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Brookite TiO ₂ as a low- temperature solution- processed mesoporous layer for hybrid perovskite solar cells	Journal of Materials Chemistry A 2015, 3(42), 20952-20957	有	2015/9/7
10	L. Cojocaru, S. Uchida, Y. Sanehira, V. Gonzalez- Pedro, J. Bisquert, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Temperature effects on the photovoltaic performance of planar structure perovskite solar cells	Chemistry Letters 2015, 44(11), 1557-1559	有	2015/9/10
11	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Origin of the hysteresis in I-V curves for planar structure perovskite solar cells rationalized with a surface boundary induced capacitance model	Chemistry Letters 2015, 44(12), 1750-1752	有	2015/10/22
12	宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	高効率ペロブスカイト光電変 換の応用展開と環境対応	光触媒 2015, 47, 48-59	無	2015/10/22

13	T. S. Ripolles, K. Nishinaka, Y. Ogomi, Y. Miyata, S. Hayase	九州工 業大学	Efficiency enhancement by changing perovskite crystal phase and adding a charge extraction interlayer in organic amine free- perovskite solar cells based on cesium	Solar Energy Materials and Solar Cells 2016, 144, 532-536	有	2015/10/23
14	J. Song, E. Zheng, X.-F. Wang, W. Tian, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Low-temperature-processed ZnO-SnO ₂ nanocomposite for efficient planar perovskite solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells 2016, 144, 623-630	有	2015/10/23
15	宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の特 徴とエネルギーハーベストへ の応用	エネルギーハーベストイン グの設計と応用展開（桑 野，竹内 監修，シーエム シー出版） pp.101-109	無	2015/10/23
16	T. Kinoshita, K. Nonomura, N. J. Jeon, F. Giordano, A. Abate, S. Uchida, T. Kubo, S. I. Seok, M. K. Nazeeruddin, A. Hagfeldt, M. Grätzel, H. Segawa	東京大 学	Spectral splitting photovoltaics using perovskite and wideband dye-sensitized solar cells	Nature Communications 2015, 6, 8834	有	2015/11/5
17	V. Murugan, Y. Ogomi, S. S. Pandey, T. Toyoda, Q. Shen, S. Hayase	九州工 業大学	Effects of different chloride precursors on crystal growth of lead halide perovskites	Applied Physics Express 2015, 8, 125501	有	2015/11/5
18	A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Anatase and brookite electron collectors from binder-free precursor pastes for low-temperature solution-processed perovskite solar cells	Chemistry Letters 2016, 45, 143-145	有	2015/11/26
19	木下卓巳、 瀬川浩司	東京大 学	スピン反転励起を示すR u 錯 体色素の開発と広帯域色素増 感太陽電池への応用	近赤外・紫外線一波長変換 と光吸収増大による太陽電 池の高効率化技術（S & T 出版） pp.95-107	無	2016/1/20
20	Y. Numata, Y. Sanehira, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Impacts of heterogeneous TiO ₂ and Al ₂ O ₃ composite mesoporous scaffold on formamidinium lead trihalide perovskite solar cells	ACS Applied Materials and Interfaces 2016, 8(7), 4608-4615	有	2016/1/26

21	A. K. Jena, A. Kulkarni, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Steady state performance, photo-induced performance degradation and their relation to transient hysteresis in perovskite solar cells	Journal of Power Sources 2016, 309, 1-10	有	2016/2/5
22	宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の実 力と将来ポテンシャル	化学工業 2016年3月号, 67(3), 60-66	無	2016/3/1
23	T. Singh, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	High performance perovskite solar cell via multi-cycle low temperature processing of lead acetate precursor solutions	Chemical Communications 2016, 52, 4784-4787	有	2016/3/2
24	N. Sakai, S. Pathak, H.-W. Chen, A. A. Haghighirad, S. D. Stranks, T. Miyasaka, H. J. Snaith	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	The mechanism of toluene- assisted crystallization of organic-inorganic perovskites for highly efficient solar cells	Journal of Materials Chemistry A 2016, 4, 4464-4471	有	2016/3/2
25	E. Smecca, Y. Numata, I. Deretzis, G. Pellegrino, S. Boninelli, T. Miyasaka, A. La Magna, A. Alberti	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Stability of solution- processed MAPbI ₃ and FAPbI ₃ layers	Physical Chemistry Chemical Physics 2016, 18, 13413-13422	有	2016/4/15
26	J. Song, W. Hu, X.-F. Wang, G. Chen, W. Tian, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	HC(NH ₂) ₂ PbI ₃ as a thermally stable absorber for efficient ZnO-based perovskite solar cells	Journal of Materials Chemistry A 2016, 4, 8435-8443	有	2016/4/26
27	T. S. Ripolles, A. K. Baranwal, K. Nishinaka, Y. Ogomi, G. Garcia- Belmonte, S. Hayase	九州工 業大学	Mechanisms of charge accumulation in the dark operation of perovskite solar cells	Physical Chemistry Chemical Physics 2016, 18, 14970-14975	有	2016/4/28
28	宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の開 発と研究動向	化学と工業 2016年5月 号, 90(5), 137-142	無	2016/5/1
29	早瀬修二	九州工 業大学	鉛フリーペロブスカイト太陽 電池の開発に向けて	化学と工業 2016年5月 号, 90(5), 143-149	無	2016/5/1
30	T. Singh, A. Kulkarni, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Effect of electron transporting layer on bismuth-based lead-free perovskite (CH ₃ NH ₃) ₃ Bi ₂ I ₉ for photovoltaic applications	ACS Applied Materials and Interfaces 2016, 8, 14542-14547	有	2016/5/26

31	A. Kogo, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	A SnO _x -brookite TiO ₂ bilayer electron collector for hysteresis-less high efficiency plastic perovskite solar cells fabricated at low process temperature	Chemical Communications 2016, 52, 8119-8122	有	2016/5/31
32	宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の可 能性と求められる材料設計	エネルギーデバイス 2016 年6月号, 70-75	無	2016/6/1
33	宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の研 究開発動向	Electrochemistry 2016, 84(6), 439-444	無	2016/6/5
34	中崎城太郎、 内田 聡、 瀬川浩司	東京大 学	有機金属ハライドペロブスカ イト太陽電池の実用化に向け て	Electrochemistry 2016, 84(6), 445-448	無	2016/6/5
35	L. Cojocaru, S. Uchida, D. Matsubara, H. Matsumoto, K. Ito, Y. Otsu, P. Chapon, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Direct confirmation of distribution for Cl ⁻ in CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x layer of perovskite solar cells	Chemistry Letters 2016, 45, 884-886	有	2016/6/11
36	宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ペロブスカイト太陽電池の研 究開発最新動向	光触媒 2016, 49, 4-15	無	2016/6/20
37	近藤高志	東京大 学	ペロブスカイト型半導体 CH ₃ NH ₃ PbI ₃ の基礎物性	光触媒 2016, 49, 16-19	無	2016/6/20
38	米谷真人	東京大 学、 東京工 業大学	ペロブスカイト太陽電池の基 板電極構造と界面制御	光触媒 2016, 49, 48-53	無	2016/6/20
39	尾込祐平、 早瀬修二	九州工 業大学	Sn系ペロブスカイト太陽電池 と界面制御	光触媒 2016, 49, 54-61	無	2016/6/20
40	内田 聡、 ルミラ ロジヨカ、 瀬川浩司	東京大 学	ペロブスカイト太陽電池の界 面エンジニアリング	光触媒 2016, 49, 78-83	無	2016/6/20
41	沼田陽平、 宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	カチオン-ハロゲン混合型ペ ロブスカイト太陽電池におけ る溶媒蒸気アシスト熱アニー ル法による高効率化	光触媒 2016, 49, 84-87	無	2016/6/20
42	古郷敦史、 池上和志、 宮坂 力	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	ブルッカイト TiO ₂ 電子収集層 を用いたフレキシブルペロブ スカイト太陽電池	光触媒 2016, 49, 88-91	無	2016/6/20
43	中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大 学	有機金属ハライドペロブスカ イト太陽電池の実用化最新動 向	光触媒 2016, 49, 92-99	無	2016/6/20

44	A. Kulkarni, A. K. Jena, H.-W. Chen, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Revealing and reducing the possible recombination loss within TiO ₂ compact layer by incorporating MgO layer in perovskite solar cells	Solar Energy 2016, 136, 379-384	有	2016/7/19
45	内田 聡、 コジヨカル トミヲ、 中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大 学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の現状と展望	応用物理 2016, 85(8), 676-683	無	2016/8/10
46	J. Song, E. Zheng, L. Liu, X.-F. Wang, G. Chen, W. Tian, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Magnesium-doped zinc oxide as electron selective contact layers for efficient perovskite solar cells	ChemSusChem 2016, 9, 2640-2647	有	2016/8/11
47	M.Vigneshwaran, T. Ohta, S. Iikubo, G. Kapil, T.S. Ripolles, Y. Ogomi, T. Ma, S. S. Pandey, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase	九州工 業大学	Facile synthesis and characterization of sulfur doped low bandgap bismuth based perovskites by soluble precursor route	Chemistry of Materials 2016, 28, 6436-6440	有	2016/8/30
48	M. Moriya, D. Hirotani, T. Ohta, Y. Ogomi, Q. Shen, T.S. Ripolles, K. Yoshino, T. Toyoda, T. Minemoto, S. Hayase	九州工 業大学	Architecture of the interface between the perovskite and hole-transport layers in perovskite solar cells	ChemSusChem 2016, 9, 2634-2639	有	2016/9/1
49	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技 術総合 研究所	Highly controlled codeposition rate of organolead halide perovskite by laser evaporation method	ACS Applied Materials and Interfaces 2016, 8, 26013-26018	有	2016/9/9
50	A.K. Baranwal, S. Kanaya, T. A. Nirmal Peiris, G. Mizuta, T. Nishina, H. Kanda, T. Miyasaka, H. Segawa, S. Ito	兵庫 県立大 学、 東京大 学、 桐蔭横 浜大学	100°C thermal stability of printable perovskite solar cells using porous carbon counter electrodes	ChemSusChem 2016, 9, 2604-2608	有	2016/9/15

51	M. Li, Y. Li, S. Sasaki, J. Song, C. Wang, H. Tamiaki, W. Tian, G. Chen, T. Miyasaka, X.-F. Wang	東京大学、桐蔭横浜大学	Dopant-free zinc chlorophyll aggregates as an efficient biocompatible hole transporter for perovskite solar cells	ChemSusChem 2016, 9, 2862-2869	有	2016/9/15
52	H.-W. Chen, T.-Y. Huang, T.-H. Chang, Y. Sanehira, C.-W. Kung, C.-W. Chu, M. Ikegami, T. Miyasaka, K.-C. Ho	東京大学、桐蔭横浜大学	Efficiency enhancement of hybrid perovskite solar cells with MEH-PPV hole-transporting layers	Scientific Reports 2016, 6, 34319	有	2016/10/4
53	N.-G. Park, M. Grätzel, T. Miyasaka, K. Zhu, K. Emery	東京大学、桐蔭横浜大学	Towards stable and commercially available perovskite solar cells	Nature Energy 2016, 1, 16152	有	2016/10/17
54	Q.-H. Zhang, W.-D. Hu, X.-F. Wang, G. Chen, J.-P. Zhang, L.-X. Xiao, T. Miyasaka	東京大学、桐蔭横浜大学	Fullerene multiadducts as electron collection layers for perovskite solar cells	Chemistry Letters 2017, 46, 101-103	有	2016/11/1
55	宮寺哲彦	産業技術総合研究所	蒸着法によるハロゲン化有機金属ペロブスカイト作製	応用物理学会 有機分子・ハイエレクトロニクス分科会誌 2016, Vol.26, No.4	無	2016/11/1
56	早瀬修二	九州工業大学	ペロブスカイト太陽電池の現状と将来展望	応用物理学会 有機分子・ハイエレクトロニクス分科会誌 2016, Vol.27, No.4	無	2016/11/1
57	H. Kanda, A. Uzum, A.K. Baranwal, T. A. Nirmal Peiris, T. Umeyama, H. Imahori, H. Segawa, T. Miyasaka, S. Ito	兵庫県立大学、東京大学、桐蔭横浜大学	Analysis of sputtering damage on I-V curves for perovskite solar cells and simulation with reversed diode model	Journal of Physical Chemistry C 2016, 120, 28441-28447	有	2016/11/10
58	P. Pinpithak, H.-W. Chen, A. Kulkarni, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学、桐蔭横浜大学	Low-temperature and ambient air processes of amorphous SnO _x -based mixed halide perovskite planar solar cell	Chemistry Letters 2017, 46, 382-384	有	2016/12/29
59	中崎城太郎、瀬川浩司	東京大学	世界を席巻する有機金属ハライド太陽電池	WEB Journal 2017年1月号, 32-35	無	2017/1/1

60	T. Singh, Y. Udagawa, M. Ikegami, H. Kunugita, K. Ema, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Tuning of perovskite solar cell performance via low-temperature brookite scaffolds surface modifications	APL Materials 2017, 5, 016103	有	2017/1/10
61	L. Cojocar, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, Y. Toyoshima, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Simulation of current-voltage curves for inverted planar structure perovskite solar cells using equivalent circuit model with inductance	Applied Physics Express 2017, 10, 025701	有	2017/1/13
62	A. Kulkarni, T. Singh, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Photovoltaic enhancement of bismuth halide hybrid perovskite by <i>N</i> -methyl pyrrolidone-assisted morphology conversion	RSC Advances 2017, 7, 9456-9460	有	2017/1/31
63	A. Kogo, S. Iwasaki, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	An ultrathin sputtered TiO ₂ compact layer for mesoporous brookite-based plastic CH ₃ NH ₃ PbI _{3-x} Cl _x solar cells	Chemistry Letters 2017, 46, 530-532	有	2017/2/1
64	T. A. Nirmal Peiris, A.K. Baranwal, H. Kanda, S. Fukumoto, S. Kanaya, T. Bessho, L. Cojocar, T. Miyasaka, H. Segawa, S. Ito	兵庫県 立大 学、 東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Effect of electrochemically deposited MgO coating on printable perovskite solar cell performance	Coatings 2017, 7, 36	有	2017/2/27
65	K. Motoki, Y. Miyazawa, D. Kobayashi, M. Ikegami, T. Miyasaka, T. Yamamoto, K. Hirose	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Degradation of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite due to soft x-ray irradiation as analyzed by an x-ray photoelectron spectroscopy time-dependent measurement method	Journal of Applied Physics 2017, 121, 085501	有	2017/2/27
66	T. A. Nirmal Peiris, A.K. Baranwal, H. Kanda, S. Fukumoto, S. Kanaya, L. Cojocar, T. Bessho, T. Miyasaka, H. Segawa, S. Ito	兵庫県 立大 学、 東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Enhancement of the hole conducting effect of NiO by a N ₂ blow drying method in printable perovskite solar cells with low-temperature carbon as the counter electrode	Nanoscale 2017, 9, 5475-5482	有	2017/3/31

67	中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大 学	有機金属ハライド太陽電池の 現状と展望	日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす 2017年3月 号, 96(2), 148-155	無	2017/3/31
68	中崎城太郎、 瀬川浩司	東京大 学	有機金属ハライド太陽電池の 現状と展望	太陽エネルギー 2017, 43(2), 3-14	無	2017/3/31
69	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, Y. Toyoshima, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Reply to "Comment on 'Simulation of current- voltage curves for inverted structure perovskite solar cells using equivalent circuit model with inductance' "	Applied Physics 2017, 10, 059102	有	2017/4/19
70	瀬川浩司	東京大 学	未来の社会を彩る再生可能エ ネルギー技術の挑戦	燃料電池 2017, 16(4), 50-53	無	2017/4/30
71	T. Miyasaka	東京大 学、 桐蔭横 浜大学	Evolution of organic and hybrid photovoltaics on interdiscipline of science	Electrochemistry 2017, 85, 221	無	2017/5/5
72	S. Hayase	九州工 業大学	Research following Pb perovskite solar cells	Electrochemistry 2017, 85, 222-225	有	2017/5/5
73	N. Onozawa- Komatsuzaki, T. Funaki, T.N. Murakami, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, K. Sayama	産業技 術総合 研究所	Novel cobalt complexes as a dopant for hole- transporting material in perovskite solar cells	Electrochemistry 2017, 85, 226-230	有	2017/5/5
74	M. M. Maitani, D. Iso, J. Kim, S. Tsubaki, Y. Wada	東京大 学、 東京工 業大学	Microwave application to efficient annealing process of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite crystalline films	Electrochemistry 2017, 85, 236-240	有	2017/5/5
75	T. Miyadera, T. Sugita, M. Chikamatsu	産業技 術総合 研究所	Hysteresis analysis of organolead halide perovskite solar cells by transient current measurement	Electrochemistry 2017, 85, 276-279	有	2017/5/5
76	J. Nakazaki, H. Segawa	東京大 学	Recent progress of organometal halide perovskite solar cells	AAPPS Bulletin 2017, 27(3), 9-21	有	2017/6/1
77	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, H. Wang, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大 学	Effect of TiO_2 surface treatment on the current- voltage hysteresis of planar-structure perovskite solar cells prepared on rough and flat fluorine- doped tin oxide substrates	Energy Technology, DOI:10.1002/ente.2017003 08	有	2017/7/14

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid solar cells for next generation photovoltaics	PVTC(Photovoltaic Technical Conference) - from advanced materials and processes to innovative applications (Aix-en-Provence, France)	2015/5/27
2	Takumi Kinoshita	東京大学	Wideband ruthenium sensitizers for multi-junction photovoltaics using lead halide perovskite solar cells	SNCPP15 (11th International Workshop on Supramolecular Nanoscience of Chemically Programmed Pigments) (Kusatsu, Shiga)	2015/5/30
3	西中浩二、宮田陽平、Teresa Ripolles. S、尾込裕平、沈青、吉野賢二、Shyam. S. Pandey、馬廷麗、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	CsPbI ₃ を用いたペロブスカイト太陽電池	第52回化学関連支部合同九州大会(北九州)	2015/6/27
4	森谷昌平、濱園康司、藤川直耕、尾込裕平、沈青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	一括塗布による自己組織化中間層を形成したペロブスカイト太陽電池	第52回化学関連支部合同九州大会(北九州)	2015/6/27
5	宮田陽平、西中浩二、尾込裕平、Teresa S. Ripolles、早瀬修二	九州工業大学	CsPbI ₃ ペロブスカイト太陽電池のヒステリシスの起源に関する考察	第52回化学関連支部合同九州大会(北九州)	2015/6/27
6	瀬川浩司	東京大学	高効率有機系多接合太陽電池	第11回有機太陽電池シンポジウム(京都大学・宇治)	2015/7/17
7	宮寺哲彦	産業技術総合研究所	有機薄膜太陽電池・ペロブスカイト太陽電池の結晶成長制御	第11回有機太陽電池シンポジウム(京都大学・宇治)	2015/7/17
8	早瀬修二	九州工業大学	二元 SnPb 太陽電池の性能向上に向けて	第11回有機太陽電池シンポジウム(京都大学・宇治)	2015/7/17
9	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池への挑戦	豊田工業大学研究懇話会(豊田工業大学)	2015/7/30
10	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid solar cells for next generation photovoltaics	IUPAC2015- 45th World Chemistry Congress (Busan, Korea)	2015/8/10
11	Shuzi Hayase	九州工業大学	Sn/Pb binary perovskite solar cells with IR sensitivity and architecture of charge injection interfaces	IUPAC2015- 45th World Chemistry Congress (Busan, Korea)	2015/8/10
12	M. Kawaraya, T. Miyasaka, H. Segawa	東京大学 桐蔭横浜大学 御国色素	Characteristics of TiO ₂ nano particles and pastes for new solar cell	IUPAC2015- 45th World Chemistry Congress (Busan, Korea)	2015/8/11

13	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト系太陽電池：高効率化にむけた取り組み	日本学術振興会「先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会」平成27年度第2回研究会 ハイスクール材料分科会研究会 合同研究会「ハライドペロブスカイト材料の基礎とスーパー太陽電池開発戦略」(東京大学)	2015/8/20
14	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池への挑戦	近大若手シンポジウム-光と化学のフロンティア-(近畿大)	2015/9/3
15	Hiroshi Segawa	東京大学	Organic and hybrid solar cells for next generation photovoltaics	EAS7 (7th East Asia Symposium on Functional Dyes and Advanced Materials) (Sakai, Osaka)	2015/9/4
16	A. Wakamiya, H. Nishimura, M. Endo, Y. Murata	京都大学	Printable solar cells: Recent progress on perovskite solar cells	EAS7 (Sakai, Osaka)	2015/9/4
17	Shuzi Hayase	九州工業大学	Crystalline defect and interface structure for Sn/Pb binary perovskite solar cells	KJF2015 (Jeju, Korea)	2015/9/7
18	和田雄二	東京工業大学	Control of photoinduced electron transfer by highly-ordered nanostructure	2015年光化学討論会シンポジウム「太陽光エネルギーと触媒が織りなす物質変換のための人工光合成」(大阪市大)	2015/9/9
19	木下卓巳、内田 聡、Graetzel Michael、瀬川浩司	東京大学	有機ハライド鉛ペロブスカイトセルと広帯域金属錯体色素を用いた高効率ハイブリッド多接合太陽電池	2015年光化学討論会(大阪市大) 3B10	2015/9/11
20	レポレス サンチス テレサ、西中浩二、尾込裕平、宮田陽平、早瀬修二	九州工業大学	Absorber crystallinity and nature of the charge extraction electrode play an important role on amine free-lead perovskite solar cells.	2015年電気化学秋季大会(埼玉工大) 2F07	2015/9/12
21	古郷敦史、實平義隆、池上和志、宮坂 力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	ブルッカイト酸化チタンを用いた低温プロセスペロブスカイト太陽電池	2015年電気化学秋季大会(埼玉工大) 2F09	2015/9/12
22	陳 信偉、Jena Ajay、池上和志、宮坂 力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	ペロブスカイト太陽電池構造を用いる超高感度光検出素子の創製	2015年電気化学秋季大会(埼玉工大) 2F10	2015/9/12
23	内田 聡、Cojocar Ludmila、久保貴哉、瀬川浩司	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の結晶化学と界面エンジニアリング	2015年電気化学秋季大会(埼玉工大) 2F11	2015/9/12

24	内田 聡、Cojocar Ludmila、中崎城太郎、 久保貴哉、瀬川浩司	東京 大学	High efficiency planar $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ based solar cells with determined amount of chloride ion	2015 年電気化学秋季大会 (埼玉工大) 2F12	2015/9/12
25	大賀 光、尾込裕平、早 瀬修二、佐伯昭紀	九州 工業 大学	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{I}_3$ ペロブスカ イトの局所電荷キャリア 移動度	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 13p- PB9-22	2015/9/13
26	西村昭美、村崎賢太 郎、Gururaj Shivashimpi、藤川直 耕、田中宏典、尾込祐 平、吉野賢二、早瀬修 二	九州 工業 大学	フルオレン構造を有する P 型半導体を用いたペロブ スカイト太陽電池	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14a-1G- 1	2015/9/14
27	T. Ripolles, K. Nishinaka, Y. Ogomi, Y. Miyata, S. Hayase	九州 工業 大学	High-efficient cesium perovskite solar cells influenced by alterations in current- voltage hysteresis	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14a-1G- 4	2015/9/14
28	瀬川浩司	東京 大学	次世代低コスト光電変換 素子としてのペロブスカ イト太陽電池	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14a-1G- 9	2015/9/14
29	近藤高志、江馬一弘	東京 大学	ハロゲン化鉛ペロブスカ イト型半導体 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ の 電子状態と励起子	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14a-1G- 10	2015/9/14
30	早瀬修二	九州 工業 大学	赤外光電変換ペロブスカ イト太陽電池の効率向上 について	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14a-1G- 11	2015/9/14
31	宮坂 力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	有機無機ペロブスカイト を用いる高効率光電変換 と高感度光センシング	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14p-1G- 1	2015/9/14
32	内田 聡、コジョカル ルドミラ、久保貴哉、 瀬川浩司	東京 大学	ペロブスカイト太陽電池 の結晶化学と界面エンジ ニアリング	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14p-1G- 3	2015/9/14
33	佐野惇郎、中村唯我、 松下智紀、近藤高志	東京 大学	$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ ヘテ ロ積層真空蒸着膜の自発 的混晶化	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14p-1G- 6	2015/9/14
34	L. Cojocar, S. Uchida, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京 大学	High efficiency planar $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{3-x}\text{Cl}_x$ based solar cells with determined amount of chloride ion	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14p-1G- 8	2015/9/14
35	實平義隆、沼田陽平、 宮坂 力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	二次元ペロブスカイト結 晶の配向性制御に向けた 十面体酸化チタン膜の構 造制御と太陽電池特性	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14p-1G- 9	2015/9/14
36	沼田陽平、實平義隆、 宮坂 力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	FAPbI ₃ ペロブスカイト太陽 電池の光電変換特性にお けるメソポーラス層のナ ノ粒子サイズ効果	第 76 回応用物理学会秋季学 術講演会 (名古屋) 14p-1G- 10	2015/9/14

37	尾込裕平、廣谷太佑、渡部直弥、戸野本久朗、沈青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	有機スズ錯体を使用したペロブスカイト太陽電池	第76回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋) 15a-1F-3	2015/9/15
38	宮寺哲彦、杉田武、近松真之	産業技術総合研究所	レーザ蒸着法による有機鉛ペロブスカイトの製膜制御	第76回応用物理学会秋季学術講演会(名古屋) 15a-1F-4	2015/9/15
39	清田祐貴、宇田川洋祐、中村唯我、佐野惇郎、松下智紀、櫻田英之、竹岡裕子、近藤高志、江馬一弘	東京大学	有機無機ペロブスカイト化合物の励起子物性	日本物理学会 2015年秋季大会(関西大学・千里山) 18pPSA-32	2015/9/18
40	Y. Kiyota, Y. Udagawa, H. Kunuigta, Y. Takeoka, Y. Nakamura, T. Matsushita, T. Kondo, T. Miyasaka, K. Ema	東京大学 桐蔭横浜大学	Excitonic properties and carrier dynamics of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ single crystals	PSCO 2015 (International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics) (Lausanne, Switzerland)	2015/9/27
41	Shuzi Hayase	九州工業大学	Crystalline defect and interface structure for Sn/Pb binary perovskite solar cells	PSCO 2015 (Lausanne, Switzerland)	2015/9/29
42	S. Uchida, L. Cojocar, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Temperature effects on the photovoltaic performance of planar structure perovskite solar cells	PSCO 2015 (Lausanne, Switzerland)	2015/9/29
43	A. K. Jena, A. Kulkarni, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Is hysteresis a practical problem for the power output of perovskite solar cells?	PSCO 2015 (Lausanne, Switzerland)	2015/9/29
44	Y. Nakamura, J. Sano, T. Matsushita, Y. Kiyota, Y. Udagawa, H. Kunugita, K. Ema, T. Kondo	東京大学	Exciton and bandgap energies of hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$	SSDM 2015 (International Conference on Solid State Devices and Materials) (Sapporo) PS-15-1	2015/9/29
45	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池：高効率化を目指した材料開発	有機太陽電池研究コンソーシアム 第15回 定例研究会/第3回プリントド・エレクトロニクス研究会 (PE研究会) (大阪大学)	2015/10/7
46	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト型太陽電池 -課題と展望-	第40回高分子同友会総合講演会 (化学会館ホール)	2015/10/22
47	若宮淳志	京都大学	有機無機ハイブリッド型太陽電池 -合成化学からのアプローチ-	第47回有機合成セミナー (大阪市立工業研究所)	2015/10/28
48	若宮淳志	京都大学	新型プリントブル太陽電池：ペロブスカイト太陽電池の研究最前線	京都グリーンケミカル・ネットワーク～先進的創電システム～ (京都市成長産業創造センター)	2015/10/29

49	S. Uchida, L. Cojocar, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Perovskite solar cell research	4th NextPV International Workshop (東京・駒場)	2015/11/9
50	Hiroshi Segawa	東京大学	Organic and hybrid solar cells for next generation photovoltaics	IASSF (Inter-academy Seoul Science Forum) 2015 (Seoul, Korea)	2015/11/11
51	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Metal oxide engineering for high performance lead halide perovskite solar cells and optoelectronic devices	ACTSEA 2015 (Advanced Ceramics and Technologies for Sustainable Energy Applications toward a Low Carbon Society) (NCKU, Taiwan)	2015/11/11
52	Shuzi Hayase	九州工業大学	Crystalline defect and interfacial structure for Sn/Pb binary perovskite solar cells	PVSEC-25 (International Photovoltaic Science and Engineering Conference) (Busan, Korea) PRV-I-02	2015/11/16
53	T. Nishina, S. Kanaya, G. Mizuta, H. Kanda, H. Nishino, S. Ito	兵庫県立大学	Perovskite solar cells using NiO inorganic hole-conductor material fabricated by spin-coating method	PVSEC-25 (Busan, Korea) PRV-P-07	2015/11/17
54	S. Fukumoto, S. Kanaya, G. Mizuta, H. Kanda, H. Nishino, S. Ito	兵庫県立大学	Sandwich-structured $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite solar cells using NiO and TiO_2 electrodes	PVSEC-25 (Busan, Korea) PRV-P-09	2015/11/17
55	M. Maitani, A. Tateyama, Y. Wada	東京工業大学	Effects of crystalline facet of oxide scaffold on $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ in perovskite solar cells	PVSEC-25 (Busan, Korea) PRV-0-12	2015/11/20
56	宮寺哲彦	産業技術総合研究所	有機鉛ペロブスカイト太陽電池の共蒸着制御	学振 175 委員会「次世代の太陽光発電システム」有機系太陽電池分科会・第三回研究会 (九工大)	2015/11/27
57	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト薄膜材料	日本学術振興会第 161 委員会第 93 回研究会「太陽電池用材料と結晶成長技術の新展開」(名城大学 名駅サテライト)	2015/11/27
58	内田 聡	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の結晶化学と界面エンジニアリング	2015 年電気化学会関東支部セミナー「ペロブスカイト型太陽電池の最新技術と開発動向」(東京)	2015/12/3
59	近藤高志	東京大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイト型半導体の基礎物性	2015 年電気化学会関東支部セミナー「ペロブスカイト型太陽電池の最新技術と開発動向」(東京)	2015/12/3
60	若宮淳志	京都大学	高性能化に向けた新規材料開発と構造解析	2015 年電気化学会関東支部セミナー「ペロブスカイト型太陽電池の最新技術と開発動向」(東京)	2015/12/3

61	Satoshi Uchida	東京大学	Perovskite solar cell - crystal structure and interface architecture	Organic/dye-sensitized/perovskite solar cell workshop 2015 (Xi'an, China)	2015/12/5
62	Shuzi Hayase	九州工業大学	Sn Perovskite photoconversion devices with infrared sensitivity	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1208	2015/12/17
63	A. Jena, A. Kulkarni, A. Kogo, Y. Numata, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Is hysteresis truly a problem for perovskite solar cells?	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1231	2015/12/17
64	Y. Wada, E. Suzuki, M. Maitani, D. Mochizuki	東京工業大学	Microwave special effects observed for interfaces	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 847	2015/12/18
65	A. Wakamiya, H. Nishimura, N. Maruyama, A. Shimazaki, Y. Nakaike, M. Endo, T. Aharen, Y. Murata	京都大学	Toward efficient perovskite solar cells: Development of new charge-transporting materials and surface treatment of lead halide perovskite layer	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1825	2015/12/18
66	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Organo lead halide perovskite for high efficiency solar cells and optoelectronic devices	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1827	2015/12/18
67	L. Cojocaru, S. Uchida, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Investigation of surface treatment for stable and efficient planar heterojunction perovskite solar cells	Pacificchem2015 (Hawaii, USA) 1829	2015/12/18
68	Shuzi Hayase	九州工業大学	Perovskite solar cells with IR photoelectric conversion (Printable solar cells)	IEMEJGB (India-Japan Expert Group Meeting on Biomolecular Electronics & Organic Nanotechnology for Environment Preservation) (Kitakyushu)	2015/12/23
69	Shuzi Hayase	九州工業大学	Sn-based perovskite solar cells (Printable solar cells)	EMN (Energy Materials and Nanotechnology) (Hong Kong)	2015/1/18
70	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Metal oxide management in high performance photovoltaics and optoelectronics of hybrid perovskite devices	ISFM2016 (International Symposium on Functional Materials) (Okinawa Institute of Science and Technology (OIST))	2016/1/26
71	近松真之、カザウイサイ、村上拓郎、宮寺哲彦、小野澤伸子	産業技術総合研究所	有機-無機ハイブリッド太陽電池の開発	未来 ICT シンポジウム 2016 (東京ビックサイト)	2016/1/27

72	S. Uchida, L. Cojocaru, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Perovskite solar cells - crystal structure and interface architecture	12th Workshop on the Future Direction of Photovoltaics (Tokyo Tech Front)	2016/1/28
73	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Present status and future prospects in perovskite solar cells	12th Workshop on the Future Direction of Photovoltaics (Tokyo Tech Front)	2016/1/28
74	Shuzi Hayase	九州工業大学	Perovskite solar cells - Enhancement of efficiency from the view point of new perovskite materials and interface architecture	12th Workshop on the Future Direction of Photovoltaics (Tokyo Tech Front)	2016/1/28
75	若宮淳志	京都大学	塗って作製できる新型太陽電池～ペロブスカイト太陽電池の開発最前線～	第9回日本電磁波エネルギー応用学会研究会（産総研 臨海副都心センター別館）	2016/1/29
76	若宮淳志	京都大学	有機合成の視点から挑むペロブスカイト型太陽電池の高効率化	有機合成のニュートレンド2016（大阪科学技術センター）	2016/2/3
77	早瀬修二	九州工業大学	ハロゲン化ペロブスカイト太陽電池の現状、問題点、および将来性について	CREST「太陽光を利用した独自のクリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域（豊田工大）	2016/2/4
78	若宮淳志	京都大学	次世代低コスト太陽電池：ペロブスカイト太陽電池研究の最前線	第8回太陽エネルギー利用関連技術分科会（三重県工業研究所）	2016/2/23
79	宮坂 力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の最新動向と将来展望	PV Expo 専門技術セミナー（東京）	2016/3/3
80	内田 聡	東京大学	高効率ペロブスカイト太陽電池が切り拓く薄膜エレクトロニクス	PV Expo 専門技術セミナー（東京）	2016/3/3
81	Shuzi Hayase	九州工業大学	Sn based perovskite solar cells - Interface architecture and Sn/Pb binary perovskite	ABX PV (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Barcelona, Spain)	2016/3/3
82	Satoshi Uchida	東京大学	The origin of hysteresis in I-V curve for planar structure perovskite solar cells rationalized with surface boundary induced capacitance model	ABX PV (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Barcelona, Spain)	2016/3/4
83	瀬川浩司	東京大学	進化する有機無機ハイブリッド太陽電池	近畿化学協会 機能性色素部会/エレクトロニクス部会 合同 公開講演会「有機エレクトロニクスの最前線」（大阪・千里）	2016/3/7

84	Tetsuhiko Miyadera	産業技術総合研究所	Co-evaporation control of organolead halide perovskite solar cells	Energy Materials Nanotechnology Spring Meeting 2016 (Taipei, Taiwan)	2016/3/8
85	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池の研究開発動向	第7回薄膜太陽電池セミナー (山形大学工学部)	2016/3/15
86	T. Singh, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Effect of non-halide lead precursors on CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite for photovoltaic applications	第63回応用物理学会春季学術講演会 (東工大) 19a-S224-9	2016/3/19
87	若宮淳志、西村秀隆、中池由美、嶋崎 愛、村田靖次郎	京都大学	ペロブスカイト太陽電池高効率化のための材料開発	第63回応用物理学会春季学術講演会 化合物薄膜太陽電池の高効率化の技術の現在と未来 (東工大) 19p-W541-14	2016/3/19
88	古郷敦史, 實平義隆, 池上和志, 宮坂 力	東京大学 桐蔭横浜大学	低温製膜 SnO _x -Brookite TiO ₂ 電子収集層を用いたフレキシブルペロブスカイト太陽電池	第63回応用物理学会春季学術講演会 (東工大) 20a-W531-3	2016/3/20
89	實平義隆, 沼田陽平, 宮坂 力	東京大学 桐蔭横浜大学	結晶配向性を制御した酸化チタン膜上における二次元ペロブスカイト結晶の太陽電池特性	第63回応用物理学会春季学術講演会 (東工大) 21a-W531-1	2016/3/21
90	沼田陽平, 實平義隆, 宮坂 力	東京大学 桐蔭横浜大学	チオシアネートを有する2次元擬ペロブスカイトを用いたペロブスカイト太陽電池に関する研究	第63回応用物理学会春季学術講演会 (東工大) 21a-W531-2	2016/3/21
91	尾込裕平, 沈 青, 吉野賢二, 豊田太郎, 早瀬修二	九州工業大学	有機スズ化合物を使用したペロブスカイト太陽電池の特性向上	第63回応用物理学会春季学術講演会 (東工大) 22a-W531-6	2016/3/22
92	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyonagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Material characterization of lead free air stable Cs ₂ SnI ₆ and its quantum dot for perovskite solar cells	第63回応用物理学会春季学術講演会 (東工大) 22a-W531-11	2016/3/22
93	沈 青, Ripolles Teresa, 尾込裕平, 西中浩二, 出石拓也, 片山建二, 豊田太郎, 吉野賢二, 早瀬修二	九州工業大学	ペロブスカイト CsPbI ₃ の遅いホットキャリア緩和と P3HT への高速ホール移動	第63回応用物理学会春季学術講演会 (東工大) 22p-W531-2	2016/3/22
94	米谷真人, 豎山 瑛人, 大村 葵, 椿 俊太郎, 鈴木榮一, 瀬川浩司, 和田雄二	東京工業大学	有機-無機ハイブリッドペロブスカイト太陽電池の Scaffold 酸化物の結晶面効果	第63回応用物理学会春季学術講演会 (東工大) 22p-W531-6	2016/3/22
95	内田 聡	東京大学	高キャパシタンス太陽電池の計測評価	RAT0「有機系太陽電池の高度利用に向けた評価・標準化ワークショップ」(東京)	2016/3/23

96	瀬川浩司	東京大学	次世代エネルギー供給デバイスとしての光発電素子	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大・京田辺)ATP 基調講演 1J4-26	2016/3/24
97	宮坂 力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	ヒステリシスのない高性能ペロブスカイト太陽電池の開発に向けて	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 1J4-31	2016/3/24
98	T. Ripolles, K. Hamada, Y. Ogomi, Q. Shen, S. Hayase	九州工業大学	Opto-electronic considerations for high performance cesium lead halide perovskite solar cells	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 1D2-42	2016/3/24
99	Y. Ogomi, Q. Shen, S. Iikubo, K. Yoshino, S. Hayase	九州工業大学	Crystal growth control of near-infrared perovskite solar cells consisting of tin halide complex	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 1PC-007	2016/3/24
100	宮坂 力	東京大学 桐蔭 横浜 大学	太陽電池の新潮流、有機無機ハライドペロブスカイト	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 2S7-04	2016/3/25
101	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池：中間体の構造解明と新規有機半導体材料開発	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 2J4-04	2016/3/25
102	尾込祐平, 早瀬修二	九州工業大学	Sn 系ペロブスカイト太陽電池の現状と今後の展開	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 2J4-07	2016/3/25
103	木下卓巳、内田 聡、瀬川浩司	東京大学	広帯域色素増感太陽電池とペロブスカイトセルを用いた分光型タンデムセルの開発	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 2A3-48	2016/3/25
104	小野澤伸子、舩木敬、カザウイサイ、村上拓郎、佐山和弘	産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池ホール輸送層への新規コバルト錯体の添加効果	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 2PC-014	2016/3/25
105	堅山瑛人、米谷真人、大村 葵、椿 俊太郎、MULMUDI Kumar Hemant、BOIX P. Pablo、MATHEWS Nripan、和田雄二	東京工業大学	有機-無機ハイブリッドペロブスカイト太陽電池特性への酸化チタン結晶面の効果	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 3A3-29	2016/3/26
106	大村 葵、堅山瑛人、椿 俊太郎、米谷真人、瀬川浩司、和田雄二	東京工業大学	有機-無機ハイブリッドペロブスカイト太陽電池の異形状 Scaffold の適用とモルフォロジ効果	日本化学会第 96 春季年会 (同志社大学・京田辺) 3A3-30	2016/3/26
107	T. Singh, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Lead acetate based perovskite hybrid solar cells with very low hysteresis and high efficiency	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/29

108	豎山瑛人、米谷真人、大村葵、椿俊太郎、Mulmudi Hemant Kumar、Pablo P. Boix、Nripan Mathews、和田雄二	東京工業大学	酸化チタン結晶面の特性を利用したペロブスカイト太陽電池の界面制御	電気化学会第 83 回大会（大阪大学・吹田）2J04	2016/3/30
109	ピンピタック ピラタット、陳 信偉、池上 和志、宮坂 力	東京大学 桐蔭横浜大学	低温製膜 SnO _x 緻密層を用いる FA/MA 混合ペロブスカイト太陽電池の高性能化	電気化学会第 83 回大会（大阪大学・吹田）2J09	2016/3/30
110	チャウダリ ブミカ、クルカニ アシシ、ジェナ アジェイ、池上 和志、宮坂 力	東京大学 桐蔭横浜大学	Incorporation of interfacial modifiers to boost the performance and stability of perovskite solar cell	電気化学会第 83 回大会（大阪大学・吹田）2J10	2016/3/30
111	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Metal oxide management for low-cost and durable lead halide perovskite solar cells	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
112	A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Low-temperature processed brookite TiO ₂ electron collector for hysteresis-less and high efficiency flexible perovskite solar cells	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
113	A. Jena, H.-W. Chen, A. Kogo, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Reversible and irreversible performance degradation in perovskite solar cells	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
114	T. Singh, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Lead free (CH ₃ NH ₃) ₃ Bi ₂ I ₉ perovskite for optoelectronic applications	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
115	A. Kulkarni, A. Jena, Y. Sanehira, M. Ikegami, T. Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Role of thin MgO layer in suppressing interfacial recombination loss at FTO- TiO ₂ interface in perovskite solar cells	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/30
116	瀬川浩司	東京大学	ハイブリッド太陽電池開発の新展開	電気化学会第 83 回大会（大阪大学・吹田）特 3J10	2016/3/31
117	S. Uchida, L. Cojocar, V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	The origin of hysteresis in I-V curve for planar structure perovskite solar cells with surface boundary induced capacitance model	2016 MRS Spring Meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2016/3/31

118	M. Maitani, H. Segawa, Y. Wada	東京大学 東京工業大学	Facet effect of titania nanoparticles on interfacial electron transfer and applications to printable solar cells	26th IUPAC Symposium on Photochemistry (大阪)	2016/4/5
119	Atsushi Wakamiya	京都大学	Materials design for highly efficient perovskite solar cells	福井謙一センター講演会 (京都大学)	2016/4/13
120	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Recent progresses in hybrid perovskite devices in photovoltaics and optoelectronics	New Trends in Solar Cells 2016 (Bratislava, Slovak)	2016/4/19
121	Satoshi Uchida	東京大学	Origin of the hysteresis in I-V curve for planar structure perovskite solar cells rationalized with a surface boundary induced capacitance model	New Trends in Solar Cells 2016 (Bratislava, Slovak)	2016/4/19
122	瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の現状と展望	高分子同友会「環境及びエネルギーに関する最新の技術及び市場を勉強する会」(東京)	2016/4/19
123	Tetsuhiko Miyadera	産業技術総合研究所	Development of coevaporation technique for the organic solar cells	Energy Materials Nanotechnology East Meeting (Beijing, China)	2016/4/1
124	若宮淳志	京都大学	化学の視点で挑む「ペロブスカイト太陽電池の高効率化」	第263回分子工学コロキウム (京都大学)	2016/5/13
125	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	One solar cell with two efficiencies with hysteresis for planar $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
126	内田聡、コジョカルルドミラ、久保貴哉、瀬川浩司	東京大学	高キャパシタンス・ペロブスカイト太陽電池の計測評価と界面エンジニアリング	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
127	松下智紀、紺野晃央、佐野惇郎、中村唯我、近藤高志	東京大学	太陽電池応用に向けた真空共蒸着法を用いたホルムアミニジウムヨウ化鉛多結晶薄膜の作製	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19
128	瓦家正英、八幡直人、別所毅隆、瀬川浩司	東京大学 御国色素	気相合成金属酸化物から作製したペロブスカイト太陽電池の特性	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム (長岡)	2016/5/19

129	村上拓郎、船木 敬、Ludmila Cojocararu、宮寺哲彦、Kazaoui Said、近松真之、瀬川浩司	東京大学産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池のチタニア伝導帯準位制御による性能向上	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（長岡）	2016/5/19
130	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyanagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Material characterization of lead free air stable Cs_2SnI_6 for perovskite solar cells	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（長岡）	2016/5/19
131	尾込祐平、Teresa Ripolles、廣谷太佑、森谷昌平、沈 青、豊田太郎、吉野賢二、早瀬修二	九州工業大学	ペロブスカイト太陽電池の高性能化と界面構築	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（長岡）	2016/5/19
132	堅山瑛人、米谷真人、和田雄二	東京工業大学	酸化物結晶面制御によるペロブスカイト太陽電池の界面制御技術	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（長岡）	2016/5/19
133	M. Sugimoto, W. -W. Wang, J. -S. Dang	熊本大学	First-principles study on metal halide perovskite-graphene hybrids	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（長岡）	2016/5/19
134	瀬川浩司	東京大学	進化するペロブスカイト太陽電池－現状と課題	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（長岡）	2016/5/20
135	若宮淳志、嶋崎 愛、中池由美、RAFIEH, Alwani、JUNG, Mina、丸山直輝、阿波連知子、村田靖次郎	京都大学	ペロブスカイト太陽電池：溶液法における中間体の構造・物性解明と高光電変換効率セルの作製法開発	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム（長岡）	2016/5/20
136	Tsutomu Miyasaka	東京大学桐蔭横浜大学	Low temperature printing process for metal oxide-based high performance perovskite solar cells	SISF 2016 (5th Sungkyun International Solar Forum 2016) (Seoul, Korea)	2016/5/25
137	Shuzi Hayase	九州工業大学	Interface architecture between TiO_2 /perovskite, perovskite/hole transport layer, and perovskite grain boundary	SISF 2016 (5th Sungkyun International Solar Forum 2016) (Seoul, Korea)	2016/5/25
138	近松真之	産業技術総合研究所	有機薄膜およびペロブスカイト太陽電池の開発動向	e-テキスタイル製品開発研究会平成28年度第1回例会（福井県工業技術センター）	2016/5/26
139	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid solar cells for next generation photovoltaics	SISF 2016 (5th Sungkyun International Solar Forum 2016) (Seoul, Korea)	2016/5/27

140	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Recent progresses in solution-processed perovskite solar cells and optoelectronic devices	32nd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (大宮)	2016/6/2
141	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池の成膜法	薄膜工学セミナー	2016/6/3
142	Y. Ogomi, D. Hirotsu, K. Fujiwara, K. Sakaguchi, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, A. Wakamiya, T. S. Ripolles, S. Hayase	九州工業大学	Near IR sensitive Sn based perovskite solar cells with high current density reaching 30 mA/cm ²	2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (Oregon, USA)	2016/6/5
143	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid photovoltaics based on nano-structured organic solar cells	Nature Conference on Materials for Energy 2016 (Wuhan, China)	2016/6/12
144	瀬川浩司	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の最新技術開発動向	TSC Foresight セミナー (東京)	2016/6/27
145	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Performance and durability of metal oxide and polymer-based organo lead halide perovskite solar cells	HOPV16 (International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics) (Swansea, UK)	2016/6/29
146	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Computational simulation of the I-V curves for different architecture perovskite solar cells	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/6/29
147	S. Kazaoui, Z. Wang, N. Onozawa-Komatsuzaki, T. Funaki, Y. Nishihara	産業技術総合研究所	Stability under continuous illumination and bias of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ -based solar cells consisting of various types of ETL and HTL layers	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/6/29
148	Shuzi Hayase	九州工業大学	Interface architecture between TiO ₂ /perovskite, perovskite/hole transport layer, and perovskite grain boundary for MAPbI ₃ , MASnPbI ₃ and CsPbI ₃ solar cells	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/6/28
149	瀬川浩司	東京大学	未来の社会を彩る再生可能エネルギー技術の挑戦	RE2016 (再生可能エネルギー国際会議) (横浜)	2016/6/29
150	M. Maitani, H. Segawa, Y. Wada	東京大学 東京工業大学	Interface effects of titania meso-scaffold on carrier transport in perovskite solar cells	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/6/30

151	Satoshi Uchida	東京大学	Perovskite solar cells - crystal structure and interface architecture	HOPV16 (Swansea, UK)	2016/7/1
152	與那覇 歩、西山 翼、尾込裕平、沈 青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	逆構造ペロブスカイト太陽電池のNiO緻密層に関する研究	第53回化学関連支部合同九州大会(北九州)	2016/7/2
153	戸野本久朗、與那覇歩、尾込裕平、沈青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	Sn/Pb ペロブスカイト太陽電池の改善	第53回化学関連支部合同九州大会(北九州)	2016/7/2
154	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池開発	JACI エネルギー・資源技術部会 エネルギー分科会・現地分科会 京都大学化学研究所	2016/7/2
155	近松真之	産業技術総合研究所	ペロブスカイトおよび有機薄膜太陽電池の開発	産学官連携ワークショップ(琉球大学)	2016/7/5
156	近藤高志	東京大学	ハロゲン化金属ペロブスカイト型半導体と太陽電池応用	AM-FPD16 (23rd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices) (京都)	2016/7/6
157	Atsushi Wakamiya	京都大学	Recent progress on perovskite solar cells and our materials science	AM-FPD16 (京都)	2016/7/6
158	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Laser deposition for the controlled co-deposition of organolead halide perovskite	AM-FPD16 (京都)	2016/7/1
159	T. A. Nirmal Peilis, G. Mizuta, H. Kanda, T. Nishina, S. Ito, H. Segawa	兵庫県立大学	Fully printable mesoscopic perovskite solar cells; effect of NiO layer on the device performance	AM-FPD16 (京都)	2016/7/7
160	V. Murugan, Y. Ogomi, S. S. Pandey, T. Toyoda, Q. Shen, S. Hayase	九州工業大学	Selection of suitable chloride precursor for bigger crystal growth and reduced defects in lead halide perovskites	IUMRS-ICEM2016 (International Union of Materials Research Societies - International Conference on Electronic Materials) (Singapore)	2016/7/4
161	近松真之	産業技術総合研究所	有機薄膜およびペロブスカイト太陽電池の研究開発動向	おかも次世代産業関連技術研究会第1回技術セミナー(岡山ロイヤルホテル)	2016/7/7
162	瀬川浩司	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の実用化最新動向	光機能材料研究会第60回講演会「ペロブスカイト太陽電池の研究開発・実用化最新動向」(東京理科大)	2016/7/19

163	近藤高志	東京大学	ペロブスカイト型半導体の基礎物性	光機能材料研究会第60回講演会「ペロブスカイト太陽電池の研究開発・実用化最新動向」(東京理科大)	2016/7/19
164	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト型太陽電池の研究開発最前線	第73回応用科学セミナー 大阪府立大学 分子エレクトロニックデバイス研究所 ニュー・フロンティア材料研究会	2016/7/25
165	Satoshi Uchida	東京大学	Perovskite solar cells - crystal structure and interface architectures	IPS-21 (21st International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy) (St. Petersburg, Russia)	2016/7/25
166	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid photovoltaics using organic solar cells	IPS-21 (St. Petersburg, Russia)	2016/7/26
167	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Progress in solution-processed organo metal halide perovskite solar cells	IPS-21 (St. Petersburg, Russia)	2016/7/26
168	L. Cojocaru, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Interfaces in perovskite solar cells, computational simulation of the I-V curves	IPS-21 (St. Petersburg, Russia)	2016/7/26
169	Shuzi Hayase	九州工業大学	Interface architecture between TiO ₂ /perovskite, perovskite/hole transport layer, and perovskite grain boundary for perovskite solar cells	IPS-21 (St. Petersburg, Russia)	2016/7/25
170	M. Maitani, H. Segawa	東京大学	Interface characteristics of perovskite solar cells depend on crystalline facet of scaffold	BWP-2 (2nd Best-Efficiency Engineering Research Workshop for Perovskite Photovoltaics and Beyond) (大阪)	2016/8/19
171	T. Miyadera, T. N. Murakami, T. Koganezawa, T. Sugita, and M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Crystallization dynamics of organolead-halide perovskite measured by real-time grazing incident wide angle X-ray scattering	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (Nagoya)	2016/8/1
172	Yuji Wada	東京工業大学	Perovskite solar cells created in the research of dye-sensitized solar cells -- similarities and differences	6th AEARU Energy and Environmental Workshop	2016/8/26

173	Atsushi Wakamiya	京都大学	Precursor chemistry for high efficiency perovskite solar cells	The 6th Energy and Environmental Workshop: Next generation solar cells as a solution to energy challenges (AEARU), Tokyo Institute of Technology	2016/8/26
174	M. Ozaki, A. Shimazaki, M. Jung, Y. Nakaike, N. Maruyama, T. Aharen, A. Rafieh, T. Sasamori, N. Tokitoh, A. Wakamiya, Y. Murata	京都大学	Development of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3 \cdot \text{DMF}$ as a perovskite precursor for highly efficient perovskite solar cells	The 6th Energy and Environmental Workshop: Next generation solar cells as a solution to energy challenges (AEARU), Tokyo Institute of Technology	2016/8/26
175	A. Tateyama, M. Maitani, S. Tsubaki, Y. Wada	東京工業大学	Crystalline facet effect of titanium dioxide scaffold on perovskite solar cell	6th AEARU Energy and Environmental Workshop	2016/8/27
176	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Interfacial management of hybrid perovskite solar cells toward high performance and stability	Symposium on Quantum Materials Synthesis (New York, USA)	2016/8/30
177	M. Jung, A. Rafieh, M. Ozaki, A. Shimazaki, Y. Nakaike, N. Maruyama, T. Aharen, T. Sasamori, N. Tokitoh, Y. Murata, A. Wakamiya	京都大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells (2): Elucidation of structures and properties of key intermediates in solution process	第 27 回基礎有機化学討論会, 広島国際会議場	2016/9/2
178	尾崎雅司・嶋崎 愛・Mina Jung・中池由美・丸山直輝・阿波連知子・Alwani Rafieh・笹森貴裕・時任宣博・村田靖次郎・若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池の作製：有機溶媒の効果と高純度前駆体の開発	第 27 回基礎有機化学討論会, 広島国際会議場	2016/9/2
179	若宮淳志、尾崎雅司、ミナ ユング、嶋崎 愛、中池由美、中村智也、ジェイヒュンリー、アネシュ ゴパル、西村秀隆、村田靖次郎	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池の作製：材料化学と塗布技術開発	日本セラミックス協会 第 29 回秋季シンポジウム、広島大学	2016/9/7
180	M. Sugimoto, W. Wang, J. Dang, R. Jono, H. Segawa	熊本大学	Influence of lattice defects on interfacial electronic properties of the MAPbI_3 -graphene hybrid system. An electronic-structure simulation study	2016 年光化学討論会	2016/9/7

181	J. -S. Dang, W. -W. Wang, R. Jono, M. Sugimoto, H. Segawa	熊本大学	Impact of Sn distribution on photovoltaic properties of Pb-Sn mixed perovskites. An electronic-structure simulation study	2016 年光化学討論会	2016/9/7
182	W. -W. Wang, J. -S. Dang, R. Jono, M. Sugimoto, H. Segawa	熊本大学	Surface modification of perovskite-type organic metal halides by graphene oxide. An electronic-structure simulation study	2016 年光化学討論会	2016/9/8
183	米谷真人, 新田明央, 樫渕耕平, 瀬川浩司, 和田雄二, 大谷文章	東京大学 東京工業大学	結晶面選択的酸化チタンナノ粒子のトラップ評価と光電変換デバイスでの電子移動特性に対する影響	2016 年光化学討論会 (東京)	2016/9/8
184	紺野晃央, 松下智紀, 佐野惇郎, 中村唯我, 近藤高志	東京大学	真空蒸着を用いた高安定性ホルムアミジニウムヨウ化鉛多結晶薄膜の作製	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/13
185	佐藤友香, 米谷真人, 椿 俊太郎, 鈴木榮一, 和田雄二	東京工業大学	金属-酸化物界面でのマイクロ波吸収特性における界面因子の影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/14
186	豎山瑛人, 米谷真人, 椿 俊太郎, 和田雄二	東京工業大学	有機-無機ハイブリッドペロブスカイト結晶の特性に対する金属酸化物基材の表面構造の影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/14
187	宇田川洋祐, 清田祐貴, 中村唯我, 佐野惇郎, 松下智紀, 櫻田英之, 竹岡裕子, 近藤高志, 江馬一弘	東京大学	有機無機ペロブスカイト物質 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ の励起子物性	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/15
188	濱田健吾, Ripolles Teresa, 尾込裕平, 沈青, 吉野賢二, 豊田太郎, 早瀬修二	九州工業大学	TiO_2 -Perovskite 界面 $\text{SnI}_2/\text{PbI}_2$ パッシベーションの太陽電池特性への影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/13
189	尾込裕平, 沈青, 飯久保 智, 吉野賢二, 峯元高志, 早瀬修二	九州工業大学	錫-鉛混合ペロブスカイト太陽電池の電荷分離界面制御に関する検討	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/13
190	山本久美子, 飯久保 智, 尾込裕平, 早瀬修二	九州工業大学	有機無機ペロブスカイト化合物の構造安定性と電荷分布	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/13
191	飯久保 智, 山本久美子, 尾込裕平, 早瀬修二	九州工業大学	Cs-Sn-I 三元系の安定構造探索	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/13
192	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyanagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. Taro, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Study pertaining to spray deposited Cs_2SnI_6 thin films for perovskite solar cells	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/13

193	V. Murugan, T. Ohta, S. Iikubo, G. Kapil, T. Ripolles, Y. Ogomi, T. Ma, S. Pandey, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase	九州工業大学	Sulfur doped lower band gap bismuth based perovskites for future solar cells	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟)	2016/9/13
194	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid photovoltaics based on nano-structured organic solar cells	Euro MRS Fall Meeting (Warsaw, Poland)	2016/9/19
195	Masayuki Chikamatsu	産業技術総合研究所	Thin-film fabrication and stability of organic and perovskite solar cells	Euro MRS Fall Meeting (Warsaw, Poland)	2016/9/1
196	Shuzi Hayase	九州工業大学	The relationship between interfaces and photovoltaic performances for perovskite solar cells including Pb and mixed metal of Sn/Pb	ACNSC (10th Aseanian Conference on Nano-Hybrid Solar Cell) (North China Electric Power University, China)	2016/9/20
197	Hiroshi Segawa	東京大学	Basics and Application of Organometal Halide Perovskite Solar Cells	PSCO2016 (2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics) (Genova, Italy)	2016/9/27
198	T. Miyasaka, A. Kulkarni, S. Trilok, A. Kogo, M. Ikegami, Y. Numata	東京大学 桐蔭横浜大学	Brookite-based lead halide and lead-free perovskite solar cells by low temperature processes	PSCO2016 (2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics) (Genova, Italy)	2016/9/26
199	T. N. Murakami, T. Funaki, T. Miyadera, L. Cojocar, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業技術総合研究所	Conduction Band Edge Tuning of Compact TiO ₂ Layer with TiCl ₄ Treatment in the Perovskite Solar Cells	2nd International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (Genova, Italy)	2016/9/1
200	田上晏莉、杉本 学	熊本大学	電子状態インフォマティクスによるペロブスカイト太陽電池用ホール輸送材料の探索	第 39 回ケモインフォマティクス討論会	2016/9/29
201	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Recent progresses in solution-processed hybrid perovskite devices in photovoltaics and optoelectronics	PRiME 2016 (230th ECS Meeting) (Hawaii, USA)	2016/10/2

202	Atsushi Wakamiya	京都大学	X-ray crystallographical studies on the intermediates in the solution fabrication process for highly efficient perovskite solar cells	PRIME2016, Convention Center, Honolulu Hawaii	2016/10/5
203	Tetsuhiko Miyadera	産業技術総合研究所	Real Time Analysis of the Crystallization Dynamics of Organilead Halide Perovskite	ECS Symposium on Photovoltaics for the 21th Century 12 (Honolulu, Hawaii)	2016/10/1
204	米谷真人, 岸本史直, 佐藤友香, A. Buyanin, 筑紫洋平, 間中孝彰, 岩本光正, M. Salmeron, 椿 俊太郎, 和田雄二	東京大学 東京工業大学	マイクロ波とナノ界面との相互作用による加熱原理	第10回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム	2016/10/14
205	W. -W. Wang, J. -S. Dang, M. Sugimoto	熊本大学	Band gap modulation by anion substitution in ASnI_3 ($\text{A} = \text{CH}_3\text{NH}_3, \text{Cs}$) perovskite crystals. A DFT study.	日本コンピュータ化学会 2016 秋季年会	2016/10/23
206	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭横浜大学	Organo-metal-halide perovskite solar cells - past, present, and future	PVSEC-26 (Singapore)	2016/10/25
207	M. Maitani, A. Nitta, K. Kashibuchi, M. H. Kumar, P. P. Boix, N. Mathews, H. Segawa, Y. Wada, B. Ohtani	東京大学 東京工業大学	Carrier transport of perovskite solar cells controlled by exposed facet of oxide scaffold	PVSEC-26 (Singapore)	2016/10/26
208	Satoshi Uchida	東京大学	Perovskite solar cell - crystal structure and interface architecture	PVSEC-26 (Singapore)	2016/10/27
209	Masato Maitani	東京大学	Organic-inorganic hybrid interface chemistry for solar cells and opto-electric devices	CBC Seminar at Department of Chemistry and Biological Chemistry, NanYang Technological University (Singapore)	2016/10/28
210	Masato Maitani	東京大学	Engineering of semiconductor energetics of scaffolds in perovskite solar cells from surface chemical point of view	Okinawa Institute of Science and Technology	2016/10/28
211	Takurou N. Murakami	産業技術総合研究所	Interface engineering for improving of the electron transfer in the dye-sensitized solar cells and the perovskite solar cells	11th TOIN International Symposium on Biomedical Engineering (Yokohama)	2016/10/29

212	M. Maitani, Y. Wada, H. Segawa	東京 大学 東京 工業 大学	Facet effects of oxide scaffold in perovskite solar cells	ENGE 2016 (4th International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment) (Jeju, Korea)	2016/11/7
213	瀬川浩司	東京 大学	有機無機ハイブリッド太 陽電池の新展開	光化学応用講座	2016/11/9
214	宮坂 力	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	ペロブスカイト太陽電池 ー構造と発電機構ー	光化学応用講座	2016/11/9
215	城野亮太	東京 大学	有機無機ハイブリッド太 陽電池材料の計算科学	光化学応用講座	2016/11/9
216	尾崎雅司, 嶋崎 愛, Mina Jung, 中池由美, 丸山直輝, 阿波連知 子, Alwani Rafieh, 笹 森貴裕,, 時任宣博, 若 宮淳志, 村田靖次郎	京大 学	高純度前駆体材料を用い た高効率ペロブスカイト 太陽電池の作製	第一回フロンティア太陽電 池セミナー	2016/11/17
217	M. Jung, A. Rafieh, M. Ozaki, A. Shimazaki, Y. Nakaike, N. Maruyama, T. Aharen, T. Sasamori, N. Tokitoh, Y. Murata, A. Wakamiya	京大 学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells using properties of key intermediates in solution process	第一回フロンティア太陽電 池セミナー	2016/11/17
218	米谷真人, 新田明央, 檀渕耕平, 瀬川浩司, 和田雄二, 大谷文章	東京 大学 東京 工業 大学	結晶面選択酸化チタンの 電子物性と塗布型太陽電 池特性との相関	第 35 回固体・表面光化学討 論会	2016/11/21
219	Tsutomu Miyasaka	東京 大学 桐蔭 横浜 大学	Photovoltaic hybrid materials for solar energy conversion	International Symposium on Next Generation Solar Cells and Solar Energy Conversion (Hsinchu, Taiwan)	2016/11/21
220	Takurou N. Murakami	産業 技術 総合 研究 所	Surface engineering on TiO ₂ for the dye- sensitized and perovskite solar cells	International Symposium on Next-Generation Solar Cells and Solar Energy Conversion (NCTU, Hsinchu, Taiwan)	2016/11/1
221	Takeru Bessho	東京 大学	Research for high efficiency organic- inorganic halide perovskite solar cells	Workshop for Emerging Photovoltaic Technology	2016/11/25
222	Takurou N. Murakami	産業 技術 総合 研究 所	Surface engineering on TiO ₂ for the dye- sensitized and perovskite solar cells	Workshop for Emerging Photovoltaic Technology (NCKU, Tainan)	2016/11/25

223	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid photovoltaics based on nano-structured organic solar cells	MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston, USA) ES3.2.01	2016/11/28
224	T. Miyasaka, T. Singh, A. Kogo, Y. Numata, M. Ikegami	東京大学 桐蔭 横浜 大学	Development of lead halide and lead-free halide perovskite solar cells by low temperature processes	MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston, USA)	2016/11/28
225	S. Uchida, L. Cojocar, P.V.V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Equivalent circuit model of perovskite solar cell with surface boundary induced capacitance	MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston, USA) ES3.4.07	2016/11/29
226	L. Cojocar, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Origin of the capacitance at the interface $TiO_2/CH_3NH_3PbI_3$ in planar structure perovskite solar cells	MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston, USA) ES3.6.08	2016/11/29
227	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Laser deposition for the highly controlled co-deposition of organolead halide perovskite	2016 Materials Research Society Fall Meeting (Boston, USA)	2016/11/1
228	尾崎雅司, 嶋崎 愛, Mina Jung, 中池由美, 丸山直輝, 阿波連知子, Alwani Rafieh, 笹森貴裕, 時任宣博, 若宮淳志, 村田靖次郎	京都大学	高純度前駆体材料を用いた高効率ペロブスカイト太陽電池の作製法	京都大学化学研究所第116回研究発表会	2016/12/2
229	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池のための鍵材料開発	2016 有機エレクトロニクスシンポジウム	2016/12/5
230	宮寺哲彦	産業技術総合研究所	有機鉛ペロブスカイトの製膜制御と評価	有機太陽電池研究コンソーシアム 第22回定例研究会 (京都大)	2016/12/6
231	若宮淳志	京都大学	高効率ペロブスカイト太陽電池のための材料化学	セラミックス協会関西支部平成28年度支部セミナー	2016/12/9
232	Hiroshi Segawa	東京大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	IPC2016 (11th SPSJ International Polymer Conference) (福岡)	2016/12/14
233	Y. Ogomi, T. Ripolles, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Pandey, T. Ma, D. Hirotsu, S. Moritani, K. Hamada, S. Hayase	九州工業大学	Perovskite solar cells-architecture of hetero interfaces	ICNME2016 (12th International Conference on Nano-Molecular Electronics) (神戸)	2016/12/14

234	尾込祐平、Teresa Ripolles、沈青、豊田太郎、吉野賢治、峯元高志、パンジー シャム、馬廷麗、廣谷大輔、森谷昌平、濱田健吾、早瀬修二	九州工業大学	ペロブスカイト太陽電池その界面構築 (Perovskite solar cells. Architecture of hetero interfaces for MAPbX ₃ , CsPbX ₃ , and MASnPbX ₃)	第26回日本MRS年次大会 (横浜)	2016/12/19
235	V. Murugan, T. Ohta, S. Iikubo, G. Kapil, T. Ripolles, Y. Ogomi, T. Ma, S. S. Pandey, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase	九州工業大学	Novel bismuth based perovskites by sulfur doping for future solar cells	第26回日本MRS年次大会 (横浜)	2016/12/19
236	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyanagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. Toyoda, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Study of interfacial charge transfer with Cs ₂ SnI ₆ thin films for perovskite solar cells	第26回日本MRS年次大会 (横浜)	2016/12/19
237	若宮淳志	京都大学	ペロブスカイト太陽電池：真の有機無機ハイブリッドを目指して	第219回フォトポリマー講演会、I-site なんば	2017/1/27
238	瀬川浩司	東京大学	有機無機ハイブリッド太陽電池の新展開	東京理科大学 総合研究院 太陽光発電技術研究部門第7回シンポジウム「太陽電池・発電技術の最新動向」 (東京・神楽坂)	2017/1/30
239	近松真之	産業技術総合研究所	有機系太陽電池の研究開発動向	東京理科大学総合研究院太陽光発電技術研究部門第7回シンポジウム (東京理科大学)	2017/1/30
240	H. Segawa, L. Cojocar, S. Uchida	東京大学	Gammavoltaic property of perovskite solar cell toward the novel nuclear power generation	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
241	T. Kubo, H. Segawa, L. Cojocar, S. Almosni, D. Li, S. Uchida	東京大学	Perovskite solar cells hysteresis simulation using Heiman-Warfield trapping model implemented in Silvaco Atlas	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
242	H.-W. Chen, T. Bessho, Z. Tang, H. Segawa	東京大学	Tin oxide based organo-lead-halide perovskite solar cells prepared by low temperature solution process	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3

243	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	Organolead halide perovskite solar cells with reduced hysteresis fabricated by laser deposition method.	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/1
244	N. Onozawa-Komatsuzaki, T. Funaki, T. N. Murakami, S. Kazoui, M. Chikamatsu, Kazuhiro Sayama	産業技術総合研究所	Novel cobalt complexes as a dopant for hole-transporting material in perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
245	T. N. Murakami, T. Funaki, T. Miyadera, L. Cojocar, S. Kazaoui, M. Chikamatsu, H. Segawa	産業技術総合研究所	Electrical properties of thin TiO ₂ prepared with TiCl ₄ treatment for perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
246	Y. Ogomi, T. Ripolles, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Pandey, T. Ma, D. Hirotsu, S. Moriya, K. Hamada, H. Zhaosheng, S. Hayase	九州工業大学	Hetero-interfaces for perovskite solar cells consisting of Sn	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
247	G. Kapil, T. Ohta, T. Koyanagi, Y. Ogomi, K. Yoshino, Q. Shen, T. Toyoda, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Lead free Cs ₂ SnI ₆ thin films using solution processing technique for perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
248	M. Vigneshwaran, T. Ohta, S. Iikubo, G. Kapil, T. Ripolles, Y. Ogomi, S. S. Pandey, T. Ma, Q. Shen, T. Toyoda, K. Yoshino, T. Minemoto, S. Hayase	九州工業大学	Facile synthesis and characterization of sulfur doped low bandgap bismuth based perovskites by soluble precursor route	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaics Conference) (横浜)	2017/2/3
249	M. Maitani, A. Tateyama, H. Segawa, Y. Wada	東京大学 東京工業大学	Interface engineering by facet controlled TiO ₂ for CH ₃ NH ₃ PbI ₃ perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
250	S. Tsubaki, M. Maitani, A. Tateyama, D. Iso, G. Han, P. P. Boix, N. Mathews, J. Kim, H. Segawa, Y. Wada	東京工業大学	Scaffold and annealing engineering for high crystallinity of CH ₃ NH ₃ PbI ₃ for perovskite solar cell	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
251	S. Fukumoto, H. Kanda, A. K. Baranwar, S. Ito	兵庫県立大学	Detail analysis on temperature effects of NiO electron conducting layer for perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3

252	Atsushi Wakamiya	京都大学	Materials science for fabrication of high performance perovskite solar cells	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
253	M. Ozaki, A. Shimazaki, M. Jung, Y. Nakaike, N. Maruyama, T. Aharen, A. Rafieh, T. Sasamori, N. Tokitoh, Y. Murata, A. Wakamiya	京都大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells using a complex of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3 \cdot \text{DMF}$ as a key precursor for perovskite	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
254	M. Jung, A. Rafieh, M. Ozaki, A. Shimazaki, Y. Nakaike, N. Maruyama, T. Aharen, T. Sasamori, N. Tokitoh, Y. Murata, A. Wakamiya	京都大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells: Properties of key intermediates in solution process	AP-HOPV17 (Asia-Pacific Hybrid and Organic Photovoltaic Conference) (横浜)	2017/2/3
255	Atsushi Wakamiya	京都大学	Fabrication of highly efficient perovskite solar cells: Elucidation of perovskite layer formation mechanism in solution process	The 3rd ANGEL Symposium, Yamagata University	2017/2/3
256	Hiroshi Segawa	東京大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	JSPS 175th Committee, Division of Organic Photovoltaics, 4th Workshop on Present Status and Future Perspective of Perovskite Solar Cells (東京・駒場)	2017/2/6
257	Tsutomu Miyasaka	東京大学 桐蔭 横浜 大学	High efficiency development perovskite solar cells by tuning metal oxide electron transport layers	JSPS 175th Committee, Division of Organic Photovoltaics, 4th Workshop on Present Status and Future Perspective of Perovskite Solar Cells (東京・駒場)	2017/2/6
258	Shuzi Hayase	九州工業大学	Enhancement of Sn/Pb perovskite solar cell from view-point of interface and crystal	JSPS 175th Committee, Division of Organic Photovoltaics, 4th Workshop on Present Status and Future Perspective of Perovskite Solar Cells (東京・駒場)	2017/2/6
259	村上拓郎	産業技術総合研究所	色素増感太陽電池およびペロブスカイト太陽電池における界面制御技術	電気化学会、電解科学技術委員会総会 (電気化学会)	2017/2/8

260	瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の現状と展望	兵庫県立大学 次世代分散エネルギーセンターシンポジウム (姫路)	2017/2/20
261	H. Segawa, T. Kubo, J. Nakazaki, S. Uchida, L. Cojocar, S. Kaneko, P. V. V. Jayaweera	東京大学	Simulation of I-V curves for inverted structure perovskite solar cells using equivalent circuit model with inductance	ABXPV17 (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Valencia, Spain)	2017/3/2
262	L. Cojocar, S. Uchida, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Physical modeling of hysteretic behavior in I-V curves of perovskite solar cells	ABXPV17 (International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics) (Valencia, Spain)	2017/3/2
263	木村浩平、松下智紀、近藤高志	東京大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体のヘテロエピタキシャル薄膜形成	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜) 14p-303-5	2017/3/14
264	佐野惇郎、松下智紀、近藤高志	東京大学	ハロゲン化鉛ペロブスカイト型半導体混晶の光誘起スピノーダル分解の温度依存性	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜) 16a-303-3	2017/3/16
265	T. Kim, S. Uchida, T. Matsushita, L. Cojocar, T. Kondo, H. Segawa	東京大学	Transmission electron microscopy observation of phase coexistence in organometal halide perovskite solar cell	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜) 16a-303-2	2017/3/16
266	西原佳彦、近松真之、カザウイサイ、宮寺哲彦、吉田郵司	産業技術総合研究所	ペロブスカイト太陽電池における NiOx への表面処理の影響	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/1
267	宮寺哲彦、村上拓郎、近松真之	産業技術総合研究所	過渡電流測定による有機鉛ペロブスカイト太陽電池におけるヒステリシスの解析	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/1
268	飯久保 智、山崎 純、山本久美子、尾込裕平、早瀬修二	九州工業大学	Cs-X-I 三元化合物の探索	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
269	山裾大樹、與那覇 歩、尾込裕平、沈 青、豊田太郎、吉野賢二、早瀬修二	九州工業大学	SnF ₂ (DMSO) ₂ を用いた逆構造 Perovskite 太陽電池の研究	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
270	山口恵里奈、與那覇 歩、尾込裕平、沈 青、吉野賢二、峯元高志、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	Sn 系ペロブスカイト太陽電池の Br 添加に関する研究	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
271	濱田健吾、Ripolles Teresa、尾込裕平、沈 青、吉野賢二、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	Sn 系 Perovskite 太陽電池における TiO ₂ 界面パッシベーションの影響	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
272	千場悠真、與那覇 歩、尾込裕平、沈 青、吉野賢治、豊田太郎、早瀬修二	九州工業大学	ホール輸送層に NiOx を用いた Sn/Pb ペロブスカイト太陽電池の作製	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14

273	G. Kapil, T. Ohta, Y. Ogomi, T. Koyonagi, K. Yoshino, Q. Shen, T. Toyoda, T. Minemoto, T. N. Murakami, H. Segawa, S. Hayase	九州工業大学	Dual role of Cs ₂ SnI ₆ : A hole transporter and an absorber for perovskite based solar cells	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/14
274	米谷真人, 豎山瑛人, 新田明央, 瀬川浩司, 大谷文章, 和田雄二	東京大学 東京工業大学	有機・無機ハイブリッド半導体ペロブスカイトの組成による金属酸化物 Scaffold の電子トラップへの影響	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (横浜)	2017/3/16
275	若宮淳志	京都大学	新規前駆体材料を用いた塗布法におけるペロブスカイト層形成メカニズム解明	日本化学会春季年会 ATP 講演, 化学が拓くエネルギーイノベーション, 慶應義塾大学	2017/3/17
276	瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の新展開	日本化学会第 97 春季年会 (横浜) 3D1-12	2017/3/18
277	宮坂 力	東京大学 桐蔭横浜大学	ペロブスカイト太陽電池における界面制御と耐久性向上技術	日本化学会第 97 春季年会 (横浜) 3D1-28	2017/3/18
278	木下卓巳、内田 聡、久保貴哉、瀬川浩司	東京大学	スピン禁制遷移を利用する広帯域ハイブリッド太陽電池の開発	日本化学会第 97 春季年会 (横浜) 3A6-39	2017/3/18
279	磯大吉, 米谷真人, 椿俊太郎, 瀬川浩司, 和田雄二	東京工業大学	ペロブスカイト太陽電池形成におけるマイクロ波を用いた薄膜結晶化プロセス	日本化学会第 97 春季年会 (横浜)	2017/3/18
280	田鎖光力, 米谷真人, 椿俊太郎, 瀬川浩司, 和田雄二	東京工業大学	微粒子酸化チタンを用いた結晶配向性制御コンパクト層のペロブスカイト太陽電池への適用	日本化学会第 97 春季年会 (横浜)	2017/3/18
281	尾崎雅司, 嶋崎 愛, Mina Jung, 中池由美, 丸山直輝, 阿波連知子, Alwani Rafiesh, 笹森貴裕, 時任宣博, 若宮淳志, 村田靖次郎	京都大学	高純度化鍵前駆体材料を用いた高効率ペロブスカイト太陽電池の作製	日本化学会第 97 春季年会 (横浜)	2017/3/18
282	瀬川浩司	東京大学	次世代光電変換デバイスの可能性 -有機系太陽電池を中心に-	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 講演会 (尼崎)	2017/3/23
283	米谷真人, 磯大吉, Kim Junbeom, 椿俊太郎, 瀬川浩司, 和田雄二	東京大学 東京工業大学	マイクロ波界面加熱を用いた有機・無機ハイブリッドペロブスカイト薄膜の結晶成長	電気化学会第 84 回大会 (首都大学東京・南大沢)	2017/3/25
284	濱田健吾, レボレス サンチス テレサ, 尾込裕平, 沈 青, 吉野賢二, 豊田太郎, 早瀬修二	九州工業大学	SnPb-Perovskite 太陽電池における TiO ₂ 界面パッシベーションの影響	電気化学会第 84 回大会 (首都大学東京・南大沢)	2017/3/25

285	小柳嗣雄、太田 剛、Gaurav Kapil、尾込裕平、吉野賢二、沈 青、豊田太郎、村上拓郎、瀬川浩司、早瀬修二	九州工業大学	超音波法を用いた Cs ₂ SnI ₆ 量子ドットの合成・物性評価	電気化学会第 84 回大会（首都大学東京・南大沢）	2017/3/25
286	瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライド太陽電池—その特殊性から見えてくるもの	応用物理学会結晶工学分科会第 146 回研究会「ペロブスカイトは結晶か？ —有機金属ハライド太陽電池の特殊性・一般性と可能性—」（東京・駒場）	2017/4/14
287	近藤高志	東京大学	ペロブスカイト型半導体の基礎物性と結晶工学	応用物理学会結晶工学分科会第 146 回研究会「ペロブスカイトは結晶か？ —有機金属ハライド太陽電池の特殊性・一般性と可能性—」（東京・駒場）	2017/4/14
288	T. Miyasaka, M. Ikegami, A. Kulkarni, T. Singh, A. Kogo	東京大学 桐蔭横浜大学	Lead halide and lead-free perovskite solar cells by metal oxide-based low temperature processes	MRS spring meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2017/4/17
289	S. Uchida, L. Cojocar, P. V. V. Jayaweera, S. Kaneko, J. Nakazaki, T. Kubo, H. Segawa	東京大学	Computational I-V curve of perovskite solar cell with surface boundary induced capacitance	MRS spring meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2017/4/18
290	Shuzi Hayase	九州工業大学	Enhancement of efficiency for Sn-perovskite solar cell from view point of hetero-interface structure	MRS spring meeting (Phoenix, Arizona, USA)	2017/4/20
291	Hiroshi Segawa	東京大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
292	Z. Tang, T. Bessho, F. Awai, T. Kinoshita, H. Wang, M. M. Maitani, R. Jono, T. Kubo, S. Uchida, H. Segawa	東京大学	Hysteresis-less highly efficient perovskite solar cells via modifying perovskite absorber	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
293	M. Maitani, A. Tateyama, A. Nitta, W.-W. Wang, M. Sugimoto, B. Ohtani, Y. Wada, H. Segawa	東京大学	Adsorption and trap-state control at perovskite/TiO ₂ interface by exposed facet of scaffold for CH ₃ NH ₃ PbI ₃ (Cl _x) perovskite solar cells	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/22
294	Satoshi Uchida	東京大学	The evaluation of capacitance for perovskite solar cell with hysteresis in I-V curve	HOPV17 (Lausanne, Switzerland)	2017/5/24

295	瀬川浩司	東京大学	有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池の基礎	光機能材料研究会 第63回講演会「ペロブスカイト太陽電池の材料開発とセル作成技術・実用化最新動向」	2017/6/12
296	杉本 学	熊本大学	電子状態インフォマティクスによるペロブスカイト太陽電池材料の解析と探索	光機能材料研究会 第63回講演会「ペロブスカイト太陽電池の材料開発とセル作成技術・実用化最新動向」	2017/6/12
297	宮坂 力	東京大学 桐蔭横浜大学	効率20%を超えるペロブスカイト太陽電池の製膜条件	光機能材料研究会 第63回講演会「ペロブスカイト太陽電池の材料開発とセル作成技術・実用化最新動向」	2017/6/12
298	Hiroshi Segawa	東京大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	SISF2017 (6th Sungkyun International Solar Forum 2017, Seoul, Korea)	2017/6/16
299	Hiroshi Segawa	東京大学	Basics and applications of organometal halide perovskite solar cells	ICMAT2017 (9th International Conference of Materials for Advanced Technologies), Suntec Singapore	2017/6/19
300	米谷真人, 堅山瑛人, 新田明央, Wei-Wei Wang, 杉本学, 大谷文章, 和田雄二, 瀬川浩司	東京大学	ペロブスカイト太陽電池の高効率化に向けた酸化チタン結晶面を利用した界面接合制御と電子トラップ制御	第41回有機電子移動化学討論会(北海道大学・札幌)	2017/6/22
301	Hiroshi Segawa	東京大学	Hybrid photovoltaics using organic solar cells	TOEO-10 (10th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics) (Waseda Univ., Tokyo)	2017/7/4

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学 桐蔭横浜大学	日本初の期待の新人、ペロブスカイト太陽電池(監修:宮坂)	日経サイエンス 2015年10月号 83 ページ	2015/10
2	東京大学	“日本発” 革新技術で貢献 “ペロブスカイト” 本命に	日刊工業新聞 32面	2015/11/4
3	東京大学	光発電特性に優れる日本初の太陽電池、世界に	日刊工業新聞 第2部 7面	2015/11/12
4	東京大学	東大、ペロブスカイト・広帯域色素増感太陽電池で変換効率21.5%の世界最高達成	日刊工業新聞/日刊工業新聞 Web http://www.nikkan.co.jp/articles/view/00364402	2015/11/13
5	東京大学	【革新! 温暖化対策#02】塗るとクルマで発電ができる日本発の太陽電池「ペロブスカイト」世界各地で効率更新。東大が世界新	ニュースイッチ https://newswitch.jp/p/2654	2015/11/16
6	東京大学	有機系太陽電池で世界最高効率 東大、事業化を目指す	日本経済新聞 電子版 http://www.nikkei.com/article/DGXLZ094035640V11C15A1TJM000/	2015/11/16

7	京都大学	ペロブスカイト太陽電池 東京化成、関連材料を拡充	化学工業日報 1面	2015/11/18
8	東京大学	太陽電池の新星登場で、街中で発電が可能に:ビルや電車が“発電所”になる日	Forbes Japan 2016年2月号 76ページ	2016/2/1
9	東京大学	ペロブスカイト太陽電池 変換効率向上 実用化へ弾み	日経産業新聞 8面 先端技術欄	2016/2/12
10	東京大学 桐蔭横浜大学	薄膜樹脂使い軽量化 折り曲げ自在 コスト3割低減	日刊工業新聞	2016/4/28
11	京都大学	Emerging Tech 解説 ペロブスカイト太陽電池「格安で超高性能」を実現へ (京都大学)	日経エレクトロニクス 2017年4月号 pp. 81-89	2017/3/1

【受賞】

番号	受賞者	所属	受賞内容	受賞年月
1	若宮淳志	京都大学	第11回野副記念奨励賞(基礎有機化学会)	2015/9
2	Taishi Ano, Fuminao Kishimoto, Takayuki Terauchi, Dai Mochizuki, Masato Maitani, Eiichi Suzuki, Yuji Wada	東京工業大学	Photocatalysis-1 (Chiba) Poster Award	2015/9
3	椿 俊太郎	東京工業大学	第1回 JEMEA 進歩賞(日本電磁波エネルギー応用学会)	2015/11
4	Masato Maitani, Akito Tateyama, Yuji Wada	東京工業大学	PVSEC-25 (Busan, Korea) Best Presentation Award	2015/11
5	山本将大, 羽石直人, 吉村武朗, ヤッパージミ, 椿俊太郎, 米谷真人, 鈴木榮一, 和田雄二	東京工業大学	第9回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム ベストポスター賞	2015/11
6	木下卓巳	東京大学	Journal of Materials Chemistry C Presentation Prize (Young Researcher Oral Presentation Award at 26th IUPAC Symposium on Photochemistry)	2016/4
7	若宮淳志, 嶋崎 愛, 中池由美, Alwani Rafieh, Mina Jung, 丸山直樹, 阿波連知子, 村田靖次郎	京都大学	イノベティブ PV Award (日本学術振興会産学協力研究委員会 次世代の太陽光発電システム第175委員会) “ペロブスカイト太陽電池: 溶液法における中間体の構造・物性解明と高光電変換効率セルの作製法開発”	2016/5
8	木下卓巳	東京大学	第28回配位化合物の光化学討論会・優秀講演賞	2016/8
9	木下卓巳	東京大学	Journal of Materials Chemistry A Presentation Prize	2016/8
10	Fuminao Kishimoto, Masato M. Maitani, Eiichi Suzuki, Yuji Wada	東京工業大学	AEARU 6th Energy and Environmental Workshop Best Poster Award, 1st Prize	2016/8
11	尾崎雅司	京都大学	AEARU (Association of East Asian Research Universities) 6th Energy and Environmental Workshop Best Poster Award, 2nd Prize, “Development of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -DMF as a Perovskite Precursor for Highly	2016/8

			Efficient Perovskite Solar Cells”	
12	Taishi Ano, Fuminao Kishimoto, Shuntaro Tsubakim, Masato M. Maitani, Eiichi Szuki, Yuji Wada	東京工業大学	2016 iSyCE (2016 International Symposium for Young Chemical Engineers) Presentation Award	2016/9
13	尾崎雅司	京都大学	第1回フロンティア太陽電池セミナー・最優秀ポスター賞 “高純度前駆体材料を用いた高効率ペロブスカイト太陽電池の作製”	2016/11
14	T. Miyadera, T. Sugita, H. Tampo, K. Matsubara, M. Chikamatsu	産業技術総合研究所	AMFPD-16 (The 23rd International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices) Paper Award “Laser deposition for the controlled co-deposition of organolead halide perovskite”	2016/12
15	宮坂 力	桐蔭横浜大学	日本化学会賞	2017/3
16	別所毅隆	東京大学	イノベティブ PV Award (日本学術振興会産学協力研究委員会 次世代の太陽光発電システム第175委員会)	2017/5

(二) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

【A 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発】

(豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発 (豊田工業大学)	<p>①23%のセル変換効率が得られる太陽電池セル試作ラインを構築する。</p> <p>②シリコン結晶の評価を進め、23%のセル変換効率を得るために必要な原料ならびに結晶の課題を明らかにする。</p> <p>③各プロセス技術を23%太陽電池量産に適用する際の課題を、太陽電池試作を通じて明らかにして参画企業の開発を支援する。</p> <p>④高効率ヘテロ接合セルを作製する技術を確立する。新規ヘテロ接合太陽電池の技術的目途付けを行う。</p> <p>⑤23%太陽電池セルをモジュール化評価し、課題を明確化する。</p>	<p>①極薄 p 型単結晶 PERC セル最高 19.3%平均 19.2%、n 型単結晶 Bifacial PERT セル最高 20.8%平均 20.6%。n 型単結晶 Bifacial PERT セルに簡易型(質量分離無)イオン注入法を適用し、0.3%ポイントの効率向上効果を確認。Mg ドープ・アルミナ膜の開発を推進。</p> <p>②株式会社トクヤマと共同で n 型 Bifacial Cell の試作とライフタイム評価を実施し、シリコン原料中に含まれる不純物や結晶成長条件が結晶シリコンの品質に与える影響を検討。</p> <p>③コマツ NTC 株式会社とナミックス株式会社および豊田工業大学・明治大学で、極薄・極狭カーフ・スライス・ウエハによる Bifacial セル試作評価検討を推進。</p> <p>④クラスター型 CVD 装置導入を推進。名古屋大学・ナミックス株式会社と連携した 156 mm 角サイズセル試作で変換効率 18.9% 達成。次世代セルの正孔選択コンタクト開発として、a)RPD-ITO/MoO_x/SiO_x セル試作・TEG 評価を進め、ITO 付きのサンプルにて仕事関数評価。b)新規 KFM 開発し、光照射の有無による仕事関数変化を取得。第 64 回応用物理学会春季学術講演会ポスター賞受賞。</p> <p>⑤試作した n 型単結晶 PERT セルを日清紡メカトロニクス株式会社に供給、54 直フルモジュール試作完了。信頼性評価実施。</p>	△	<p>シミュレーション検討により、中間目標 23% 達成への方策を明確化した。</p> <p>受光面側選択エミッタ構造、Finger電極狭ピッチ化 Busbar電極 4本化、裏側選択 BSF 構造、Finger電極微細化、パッシベーション改善、電極改善、裏面全面電極化により変換効率 23.1% の見込み。</p>
材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発 (明治大学)	<p>現在の交換効率 20% プロセスを改良し変換効率 23% を実現するのに必要な基盤技術を確立する。特に、物理化学評価の側面から開発を支援し、豊田工業大学と協働して次々世代 (23%) セル量産化のための新規材料・プロセスの評価・解析技術を確立する。それらを用いて、各大学や参画企業が開発している個々のプロセスや材料に関する課題を明らかにする。そこで得られ</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・株式会社トクヤマと共同で、10-20 Ω・cm で 18 msec、1-2 Ω・cm では全長の 95% 以上の領域で 2 msec を超える高ライフタイム結晶の成長に成功した。 ・SIRM 装置を導入し、熱処理によるライフ劣化機構を検討し、劣化の少ない成長条件を得た。ライフタイム劣化に関連する要因として、結晶中の C 濃度との関連を見出した。 ・発光活性化 PL により従来困難であった 10¹⁴cm⁻³ 以下の低濃度測定法を開発した。 10¹² cm⁻³ の定量の可能性を見出した。 ・発光活性化 PL の 77K での測定を検討し、4.2K の結果と良好な相関得た。測定の高速度化、低コスト化を実現した。 ・ダイヤモンドワイヤーでスライスした基板の目視できない欠陥の PL イメージング 	○	

	<p>た知見を各研究機関に対して横断的にフィードバックすることにより、本開発に関与している機関全体と協力して最終目標の達成に貢献する。</p> <p>以上の結果を各研究機関ならびに参画企業にフィードバックし、さらには参画企業の目標達成に貢献する。</p>	<p>による可視化し、セル特性への影響を明らかにした。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高周波インピーダンス解析装置を導入し、リークの多いパッシベーション膜評価への適用を検討した。 ・欠陥を含むシリコン基板に対する鉄、ニッケルの影響を p 型, n 型で確認した。 ・小径の酸素析出物によって鉄、ニッケルのゲッターリングが阻害される可能性を見出した。 		
<p>高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究 (九州大学)</p>	<p>原料ならびに結晶メーカーの製造コストの低減、およびそれら基板を用いたセルメーカーの高効率化・低コスト化のための高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究の推進</p> <p>p 型基板では 1.5~3msec、 n 型基板では 3~6msec のバルクライフタイムの実現</p>	<p>p 型基板では 2msec、n 型基板では 8msec のバルクライフタイムを実現</p>	○	
<p>新規ヘテロ接合用材料に関する研究 (名古屋大学)</p>	<p>ヘテロ接合材料の吸収係数 $1 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$ (@ 600nm)、導電率: $1 \times 10^{-7} \text{S/cm}$ を達成する。この結果を本プロジェクト内の各研究機関ならびに関係企業にフィードバックする。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・PECVD 装置を新規に導入し、成膜した a-Si:H で 0.725 V の Implied-Voc を達成 ・P 添加 a-Si:H と B 添加 a-Si:H で電気導電率がそれぞれ $2 \times 10^{-3} \text{S/cm}$、$1 \times 10^{-5} \text{S/cm}$ を達成 ・上記 a-Si:H を用いて 156 mm 角サイズの基板で変換効率 18.9% に貢献 ・CuI (p 型) と TiO₂:Nb (n 型) の高バンドギャップに由来する単膜の低い吸収率を確認 ・CuI の 2 段階形成の改善を行い、電気導電率約 3 S/cm を達成 ・TiO₂:Nb 膜の成膜条件を探索し、約 330 S/cm の電気導電率を達成 ・アルミニウム誘起成長法 (AIC) を用いた太陽電池特性が共晶点を超えない範囲での高温処理で向上することを見出した ・導入した PECVD により Si 基板上に a-Si:H を成膜した試料を用いて、QSSPC 法と PL イメージングを用いたプロセス条件の最適化を行える Implied-Voc イメージングの測定環境を構築 ・九州大学、株式会社トクヤマが成長した高品質 Si ウエハに PECVD で a-Si:H を成膜し、0.722 V の Implied-Voc を得た ・Regeneration プロセスにより、Implied-Voc で 0.717 V を達成 	○	

<p>アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究 (東京工業大学)</p>	<p>アモルファス膜と結晶シリコンとの界面構造や界面における再結合速度などを評価・解析して、得られた知見、技術開発指針をもとに、ヘテロ系デバイスにおける表面再結合電流 $J_{0\text{front}}$ を 75 fA/cm^2、裏面再結合電流 $J_{0\text{rear}}$ を 40 fA/cm^2 に低減する方法を提案する。</p>	<p>①ライフタイムの温度依存測定による界面のバンドオフセット評価手法を確立。キャリアトンネリングの影響を検討。a-Si:H よりも取り扱いが単純な Al_2O_3 を用いてキャリアトンネリングを取り入れたシミュレーションを行い、トンネリングの影響がライフタイムに与える影響を検討中である。対向ターゲットスパッタによる i-a-Si:H パッシベーション (50 nm 程度の厚膜) により、2 ms 以上のライフタイム ($J_0=3 \text{ fA/cm}^2$) を得た。</p> <p>②対向ターゲットスパッタ装置の導入及び低抵抗 $\text{Cu}_2\text{O:N}$ 膜の作製条件を確立した。既存装置による予備検討において、i-a-Si:H/$\text{Cu}_2\text{O:N}$ 構造を用いて $J_0=38 \text{ fA/cm}^2$ を達成した。i-a-Si_{1-x}O_x:H をバッファーに、$\text{Cu}_2\text{O:N}$ をエミッタに用いた HJ-c-Si 太陽電池の作製・評価を行い、11%程度の変換効率を得た。</p>	<p>○</p>	
<p>低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究 (兵庫県立大学)</p>	<p>表面再結合電流 $J_{0\text{front}}$、裏面再結合電流 $J_{0\text{rear}}$、およびバルク再結合電流 $J_{0\text{bulk}}$ の総和 J_0 ($=J_{0\text{front}} + J_{0\text{rear}} + J_{0\text{bulk}}$) を 500 fA/cm^2 まで低減する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ AlO_x パッシベーション膜をミスト CVD 法および LIA スパッタ法により製膜した結果、両者共、裏面再結合電流 $J_{0\text{rear}}$ を 30 fA/cm^2 以下に抑制することが出来た。その結果、中間目標である再結合電流 $J_0 < 500 \text{ fA/cm}^2$ を達成した。 ・ PERC 型セルにミスト CVD 法による AlO_x パッシベーション膜を適用した結果、ALD 法により作製した AlO_x 膜の場合とほぼ同程度の効率が得られた。 ・ パッシベーション用新材料として YO_x 膜をミスト CVD 法で製膜することに成功した。界面準位および固定電荷密度の値は n 型用パッシベーション膜として期待出来るものであった。 ・ PLD 法により SrSiO_x を製膜し、その物性の検討を行った。その結果、SrSiO_x は膜厚と共に固定電荷密度が増加することが明らかになった。電界効果パッシベーション用の材料として期待出来る。 ・ 低ダメージでの透明導電膜形成を実現するために、ミスト CVD 法により InO_x 膜の形成を試みた。250°C と比較的低温で $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下の膜形成に成功した。 	<p>○</p>	

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【B 薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発】(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	備考
① ウェハスライス技術に関する研究開発	薄型ウェハの極薄ウェハ(厚み75 μ m)のセル評価プロセスを確立する。	薄型ウェーハに適合するSHJセルプロセスならびに評価プロセスを開発し、参照基板(t244 μ m)にて効率21.3%(da)を得た。同プロセスにて薄型セル(t75 μ m以下)を作製し、参照基板と遜色ない効率21.0%(da)を得、75 μ m以下の薄型セル評価プロセスを確立した。	○	
② 高効率・低コストセルプロセス技術 高効率・高信頼性モジュール技術	高効率(セル効率22%)のためのセル化技術開発課題を明らかにする。 長寿命(35年)のための高信頼性モジュール化技術開発課題を明らかにする。	量産化プロセスで作製したPERCセル(選択エミッタなし)において、変換効率20.5%を得た。PERCセルの効率向上の鍵となる裏面側の構造を評価するための各種評価法を開発し、新しい知見を得た。信頼性評価については、単体ストレス試験を行った結果から、電極の断線や半田内部クラックの発生、半田溶着の際のフラックスの影響などの劣化モードを新たに明らかにした。	○	
③ 高効率・低コストセルプロセス技術	高効率セルの低コストのための簡易プロセス要素技術課題を明らかにする。	イオン注入技術については、まずリンとボロンのイオン注入条件と熱処理条件の検討を進めた。これを基にセルを作製し、N型両面受光セルで変換効率20.4%、N型バックコンタクトセルで、20.5%(da)を得た。産総研オリジナルの注入マスク位置合わせ装置を導入し、注入マスクの設計を行った。 薄型セルの作製については、厚さ80 μ mのセル(P型、両面受光・裏面接合型セル)を作製し、各セルプロセスでの問題点を明らかにするとともに、変換効率として18.7%を得た。	△	変換効率については、本年度末までに達成予定
④ 薄型セルを用いた高信頼性高効率モジュール技術	高信頼性の高効率モジュール(モジュール効率22%)の技術開発課題を明らかにする。	両面薄型ガラス構造モジュールの信頼性を調べるため、単独試験および各種シーケンス試験を行った。その結果、両面ガラス構造モジュールの方が通常の構造のモジュールよりも多くの点で信頼性が高いことが示された。また、厚さ80 μ mの薄型セルを用いてモジュールを作製し、タブストリング工程での反りの問題など、モジュール化プロセスでの課題を明確にした。	○	

*1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【C C a t - C V D など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発】
(北陸先端科学技術大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
Cat-CVD など新手法による 高性能太陽電池低 価格製造技術の開 発	効率 25%の太陽電池の 実現に資する技術を開 発する。	結晶シリコン(c-Si)太陽電池のテクス チャー基板に有効な新洗浄法を開発し、そ の洗浄後の c-Si 基板に Cat-CVD 法により SiNx/a-Si 積層膜を堆積したところ、キャ リヤ寿命 8 ms 以上、c-Si バルク内キャリ ヤ再結合を無視した表面再結合速度(SRV) の最大見積値(SRVmax)1.1 cm/s 以下、c- Si の厚み依存性から求めた真性 SRV 0.2 cm/s 以下の、世界最高レベルのパシベー ション性能が得られた。この値は、カネカ 株式会社が、効率 26%以上の太陽電池に関 し報告している値と少なくとも同等であ り、効率 25%以上の太陽電池の実現に資 する技術の開発に成功したと判断できる。 さらに、ヘテロ接合裏面電極型(HBC)太陽 電池の安価な製造技術の開発に努め、装置 が廉価で高速処理が可能なプラズマ・イ オン注入法を用いる、ヘテロ接合に適合で きる 250℃以下の低温処理しか用いない、安 価で簡単に太陽電池が製造できる新工程を 開発した。	○	現 在 、 我々のパ シベー ション膜 を用いた 太陽電池 を、メー カーの協 力で試作 中である 。工程途 中での試 料移動に 伴う問題 はあるが 、表面汚 染を防止 できる運 搬ボックス を開発す るなどして 対応してい る。
	上記目標の実現に資す る具体的数値目標を後 述する 2 つの研究項目 に分けて設定した。 (研究項目-1) 1) SRVmax<3 cm/s 光反射率R<3%(波長 500-900 nm) 2) 5% HF 中エッチング 速度<5 nm/min 3) SiNx/a-Si の a-Si 内 で発生したキャリヤ利 用効率>90% 4) a-Si 堆積時触媒体寿 命>30 日	1) SRVmax< 1.1 cm/s、R<3%を実現。これ らは、効率 25%以上の太陽電池の実現が 可能な数値である。 2) エッチング速度<4nm/min を実現。 3) a-Si 内で発生したキャリヤの 90%が c- Si 側に移動することを確認。 4) 計画通り推進中。30 日以上使用可能な TaB に加え、TaC の使用を検討中。	◎ ○ ○ ○	
	(研究項目-2) 1) Cat-doping機構解明 2) SiNx/Cat-doped c- Si構造でSRVmax<4 cm/s 3) Cat-doping時触媒体 寿命>30日 4) PのCat-dopingやPイ オン注入による局所的 ヘテロ接合太陽電池伝 導型制御技術の検討	1) c-Si表面欠陥による不純物移動が基本 的な不純物導入機構と推察できる結果を得 た。 2) SRVmax<2 cm/sを実現した。 3) 計画通り推進中。PのCat-dopingに関 しては実現している。 4) 廉価なプラズマ・イオン注入法によ り、p-a-Siをn-a-Siに変換した太陽電池の 駆動に成功した。	○ ○ ○ ○	

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【D C I S 太陽電池高性能化技術の研究開発】

(産業技術総合研究所、東京工業大学、立命館大学、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大学、龍谷大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
産業技術総合研究所 光吸収層の高品質化による CIS 太陽電池の高効率化	CdS/CIS 界面の高品質化および CIS 結晶の高品質化を推進し、CIS 小面積セルで変換効率 22%を達成する。	CIS 太陽電池を高効率化するための新しい技術を開発した。具体的には、光照射と加熱処理を同時に数 100 時間にわたって行う技術である。その結果明らかになったことは、CIS の電気的性質（キャリア濃度）は、本質的に双安定性を持ち、高キャリア濃度状態と低キャリア濃度状態の間を可逆的に往復することが可能である、ということである。このキャリア濃度の可逆変化は太陽電池の性能と強く関係しており、将来的には CIS 太陽電池の高効率化技術に新しいブレークスルーを起こす鍵となる可能性がある。	△	現時点までに得られている変換効率は 21.4%であるが、左記の光熱処理効果の解明と処理条件の最適化により、年度内に中間目標を達成できる可能性は高いと考えられる。
東京工業大学 界面制御によるカルコゲナイド系薄膜太陽電池の高効率化	表面、粒界および裏面における再結合成分を減少させる技術を開発し、開始時の短絡光電流と開放端電圧との積 $25 (\text{mA}/\text{cm}^2 \times \text{V})$ から開放端電圧 V_{oc} を +20mV 増加させ、 $J_{sc} \times V_{oc} = 25.8 (\text{mA}/\text{cm}^2 \times \text{V})$ を達成する。そして、他機関が開発する技術と総合して変換効率 22%の達成に貢献する。	表面・粒界に Cu 欠損層を挿入することにより ΔE_v を形成、正孔障壁により変換効率が向上することを提案、3 段階法における 2 段階目に Se インターバルを設けることにより同構造が作製することを新たに見出して変換効率 19.8%を達成、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 積 $0.672 \times 38.6 = 25.9 (\text{mA}/\text{cm}^2 \times \text{V})$ が得られ中間目標を達成した。	○	
立命館大学 バンド制御による再結合パッシベーション技術の開発	従来 に対して 20mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値において $26 \text{mW}/\text{cm}^2$ を達成する。	バンド制御した透明電極である $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O}:\text{Al} [\text{Mg}/(\text{Zn}+\text{Mg})=0.12]$ をスパッタ法で成膜し、ソーラーフロンティア社製の CIS 基板を用いて太陽電池を作製することで、従来よりも 21mV 高い V_{oc} 、 $V_{oc} \times J_{sc}$ 値で $27.48 \text{mW}/\text{cm}^2$ を達成。	◎	スパッタ法という量産に適した成膜プロセスで数値目標を達成した。
東京理科大学 エピタキシャル成長を利用した CIS 太陽電池の高効率	エピタキシャル CIGS 単結晶薄膜で、少数キャリア寿命 τ_2 の値で 80ns 以上 (300K) を達成する。	エピタキシャル CIGS 製膜に際し、その下地となる Mo 薄膜について、低温バッファ層を導入した新規スパッタ法を開発し、Mo 薄膜のエピタキシャル成長に成功した。次に、新たに開発した高温 3 段階法で Mo/サブファイア基板上にエピタキシャル CIGS 薄膜を作製し、最終目標値であるキャリアライフタイム τ_2 の値で 100ns 以上 (300K) を達成した。	◎	エピタキシャル CIGS 太陽電池の作製・評価に先立ち、比較対象用の多結晶 CIGS 太陽電池についてアルカリ金属処理と熱・光照射

化指針の解明		さらに、この上に形成した CdS/CIGS 界面では、格子整合が良好なエピタキシャル関係となることを明らかにし、光生成キャリアの界面再結合が極めて少ないデバイスへの展開が期待できる。		の複合処理により変換効率の改善が可能であることを初めて見出した。
筑波大学 結晶欠陥の検出と同定、欠陥密度低減化技術開発支援	格子欠陥、異相欠陥の検出と同定に関する知見を得る。 他機関が開発する技術を総合して従来効率に対して+1%を達成し、変換効率 22%の達成に貢献する。	<ul style="list-style-type: none"> ・SAS 法で作製された CIS デバイスの KF 後処理 (KF-PDT) 効果について、欠陥準位の評価ならびに再結合解析に取り組んだ。その結果、KF-PDT を施した試料では、バルクよりバッファ/CIS 界面近傍の特性が改善する様子を確認し、界面再結合の抑制が高効率 CIS 太陽電池において重要な課題となることを確認した。 ・三段階法で作製された CIGS デバイスについて、①Ga/III 比、②Ga グレーディングの変化させた試料について欠陥準位の評価ならびに再結合解析に取り組んだ。深い欠陥準位の定量化や異相検出 (高 Ga 濃度試料)、バンドギャップの極小位置で起こるキャリア再結合 (Ga グレーディング) など、電流-電圧特性の改善指針構築につながる知見を得た。 	○ ○	
鹿児島大学 積層構造・改質界面の電子構造評価による電池特性向上技術の開発	①CIGSSe 表面状態解明 ②アルカリハライド処理効果の解明 ③CIGSSe～窓層までのバンドプロフィール評価技術の開発・改善指針の導出 ④裏面電極～CIGSSe～バッファ～窓層縦貫断面バンドプロフィールの可視化技術の開発	①SF 社製高品質 CIGSSe 層の表面組成・電子構造の特徴を解明：高 S 置換率、ワイドギャップ、高 CBM、Cu 欠損層無し ②KF-PDT の主要効果が光吸収層のホール濃度増大にあることを解明 ③CIGSSe～バッファ～窓層に至る多層構造のバンド接続状態の <i>in-situ</i> 法による初めての決定に成功。 CdS/CIGSSe 界面：フラットな伝導帯バンド接続 (最適領域の下端)、i-ZnO/CdS 界面：バンド湾曲が大きいものの、伝導帯オフセットが僅かに負、改善指針：バッファ及び窓層の伝導帯下端の 0.1-0.2 eV 上昇によりセル特性・歩留まり向上が示唆される ④ケルビンプローブ顕微鏡による断面プロフィール評価技術を開発	①：○ ②：○ ③：◎ ④：○	①～③の成果：他機関の成果と対応・整合 (当該研究開発内共同研究機関およびソーラーフロンティア社との連携による)
龍谷大学 理論計算と実験的手法を組み合わせ	光吸収層として CuInSe ₂ , CuGaSe ₂ , CuInS ₂ を中心とした 3 元系から、Cu(In, Ga)Se ₂ ,	・Cu ₂ Se-In ₂ Se ₃ -Ga ₂ Se ₃ 系についてカルコパイライトとスタンナイト相の存在領域について研究し、CuInSe ₂ の In サイトに Ga を置換するとカルコパイライトやスタンナイト相の存	○	

<p>せた粒界と界面を中心とした材料設計とモデル実証研究</p>	<p>Cu(In, Ga)S₂, CuIn(S, Se)₂等を想定した4元系に拡張して、CIS太陽電池の電子構造の明確化を図る。</p>	<p>在領域を広げことを見いだした。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スタンナイト型 Cu(In, Ga)₃Se₅ の VBM と CBM の変化について研究し、CIGS 膜の表面や粒界にスタンナイト型 Cu(In, Ga)₃Se₅ が存在すると CIGS 光吸収層との価電子帯のオフセットの効果によりキャリア再結合が低減できることを明らかにした。 ・CIGS 光吸収層とバッファ層相の界面にスタンナイト型 Cu(In, Ga)₃Se₅ を挿入することで、高い Ga 濃度でも CdS バッファ層との伝導帯のオフセットをスパイク状態に保つことが出来ることを見いだした。 ・CuInSe₂-In₂Se₃-In₂S₃についてカルコパイライトとスタンナイト相の存在領域について研究し、Se サイトに S を置換すると、スタンナイト相の存在領域が非常に狭くなることを見いだした。 ・CuInS₂の Cu サイトに Li が固溶し、この Li 固溶により CuInS₂の電子構造を制御できる出来ることを見いだした。 ・CIGS 膜の高品質化とともに CIGS 太陽電池の裏面電極が重要になる。CIGS 膜と Mo 裏面電極の間に生成する MoSe₂の相の安定性と電子構造を明らかにした。 		
----------------------------------	--	---	--	--

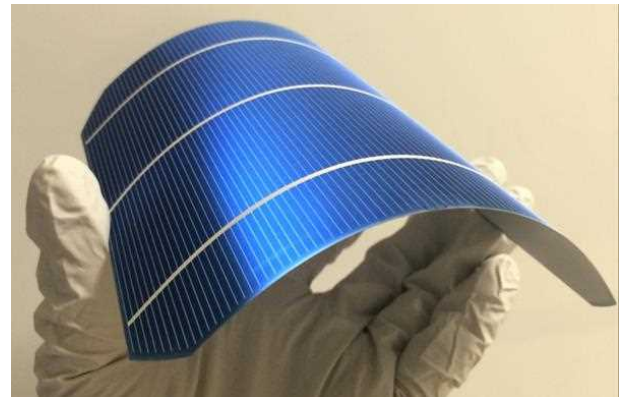
* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

A 先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発
 (豊田工業大学、明治大学、九州大学、名古屋大学、東京工業大学、兵庫県立大学)

1. 成果詳細

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」(豊田工業大学)

結晶シリコン太陽電池において次世代の主流である p 型 PERC(Passivated Emitter and Rear Cell)セルの開発を推進した。図Ⅲ-2-(ニ)-A-1 に試作した 156mm 角極薄 p 型 PERC セルの外観写真を示す。また、表Ⅲ-2-(ニ)-A-1 には試作した PERC セルの特性を示している。156mm 角 88 μ m 厚極薄 p 型 PERC セルで平均効率 19.2%を達成した。これは通常の 200 μ m 厚セル平均効率 19.3%とほぼ同等の効率であり、これによってウエハおよびセル製造コストを大幅に低減しながら高い変換効率を実現できる、100 μ m 厚極薄 PERC セルの実現可能性を証明することができた。

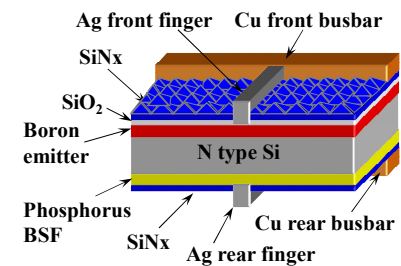


図Ⅲ-2-(ニ)-A-1 156mm 角 88 μ m 厚極薄 p 型 PERC セル外観

表Ⅲ-2-(ニ)-A-1 p 型 PERC セル試作結果(4 枚平均)

As slice 基板厚	Texture 後基板厚	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	F.F.	Eff.(%)
202 μ m	170 μ m	38.3	649	0.775	19.3
105 μ m	88 μ m	37.7	655	0.779	19.2

また N 型基板を使った Bifacial (両面受光)セル開発をナミックス株式会社と共同で推進した。図Ⅲ-2-(ニ)-A-2 に試作した n 型 Bifacial セルの構造模式図を示す。表Ⅲ-2-(ニ)-A-2 には試作した銀(Ag)ペースト・フィンガー電極および銅(Cu)ペースト・バスバー電極による 156mm 角 n 型 Bifacial セルのセル特性を示しているが、p⁺面側から光を入射した場合でセル効率 20.8%、n⁺面側では 20.2%という高い効率を得られている。この結果から、Ag ペースト・フィンガー電極および Cu ペースト・バスバー電極による低コスト高効率 n 型 Bifacial セル実現の可能性を実証することができた。

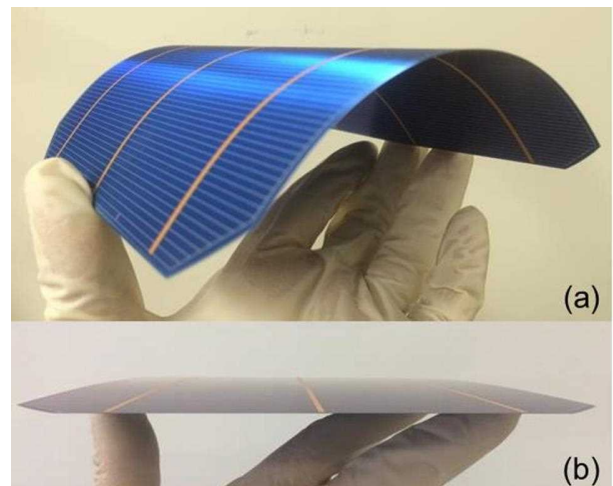


図Ⅲ-2-(ニ)-A-2 n 型 Bifacial セル構造模式図

表Ⅲ-2-(ニ)-A-2 156mm 角 n 型 Bifacial Ag/Cu 電極セル特性

光入射面	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	F.F.	Eff.(%)
p ⁺	40.8	661	0.771	20.8
n ⁺	39.4	661	0.774	20.2

コマツ NTC 株式会社とナミックス株式会社および豊田工業大学・明治大学で極薄 p 型単結晶 Bifacial (両面受光) PERT (Passivated Emitter and Rear Totally diffused)セルの開発を推進し、156mm 角 88 μ m 厚極薄 p 型単結晶 Bifacial PERT セルで表面 (n⁺面) 効率 16.6%、裏面 (p⁺面) 効率 15.6%を達成した。図Ⅲ-2-(ニ)-A-3 に試作した 156mm 角 88 μ m 厚極薄 p 型単結晶 Bifacial PERT セルの外観写真を示す。この試作に用いた p 型単結晶ウエハのスライス完了時点での平均厚さは 105 μ m であり、Texture エッチング完了時点での平均厚さは 88 μ m であった。これは現在結晶シリコン太陽電池セルに一般的に用いられている基板の約半分の厚さであるため柔軟性があり図Ⅲ-2-(ニ)-A-3 (a)のように曲げても割れることがない。また図Ⅲ-2-



図Ⅲ-2-(ニ)-A-3 156mm 角 88 μ m 厚極薄 p 型 Bifacial PERT セル外観

(ニ)-A-3 (b)では極薄基板であってもセルが全く反っていないことがわかる。さらにコマツ NTC 株式会社とナミックス株式会社および豊田工業大学・明治大学で、極薄・極狭カーフ・スライス・ウエハ(スライス完ウエハ厚 120 μm 、カーフ 80 μm 固定砥粒ワイヤスライス)による n 型 Bifacial セル試作評価検討を推進し、156mm 角 97 μm 厚極薄 n 型単結晶 Bifacial PERT セルで表面 (p⁺面) 効率 19.7%、裏面 (n⁺面) 効率 19.3%を達成した。通常の 200 μm 厚セル平均効率 19.8%とほぼ同等の効率であり、これによってウエハおよびセル製造コストを大幅に低減しながら高い変換効率を実現できる、極薄 n 型単結晶 Bifacial PERT セルの実現可能性を証明することができた。

また n 型 Bifacial セルのボロン・エミッタ高品質化のために、簡易(非質量分離)型イオン注入法を適用した。表Ⅲ-2-(ニ)-A-3 に、異なる 2 種類のボロン・エミッタ形成方法を用いて試作した n 型 Bifacial PERT セルの特性比較を示している。簡易型イオン注入における課題を結晶学的見地から検討・改善することにより、簡易型イオン注入によってボロンイオンを注入する方法でセルを試作したところ、APCVD・BSG 拡散セルが効率 20.4%であったのに対し簡易型イオン注入セルでは 20.7%の効率が得られ、0.3%ポイントの向上効果を確認することができた。

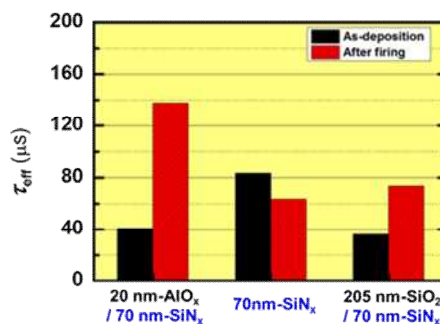
表Ⅲ-2-(ニ)-A-3 ボロン・エミッタ形成方法による n 型 Bifacial PERT セル特性の比較

ボロン・エミッタ形成方法	光入射面	Jsc (mA/cm ²)	Voc (mV)	F.F.	Eff. (%)
APCVD・BSG 拡散	p ⁺ 面	40.6	651	0.772	20.4
簡易(非質量分離)型イオン注入	p ⁺ 面	40.5	652	0.782	20.7

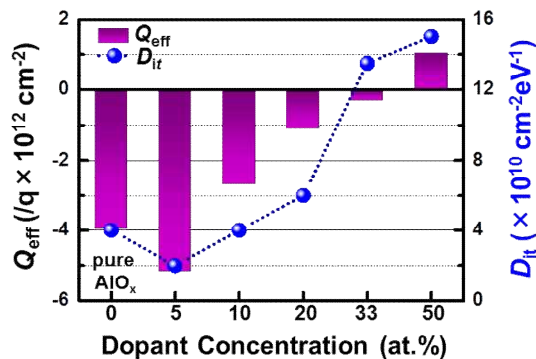
上記のような高効率セルにおいて表面パッシベーションは非常に重要であり、高品質パッシベーション技術開発は必須である。豊田工業大学ではアルミナ(AI₂O₃)膜の検討を行った。図Ⅲ-2-(ニ)-A-4 には SiN_x 単膜、SiO₂/SiN_x 積層膜と AlO_x/SiN_x 積層膜によって表面パッシベーションを行った単結晶ウエハの実効ライフタイム(τ_{eff})比較を示している。この結果によると、特に焼成工程を経た後には AlO_x/SiN_x 積層膜の τ_{eff} 、すなわちパッシベーション性が最も高いことが分かる。さらなる改善のために Mg ドープ・アルミナ(Mg-doped AlO_x)膜の検討を行った。図Ⅲ-2-(ニ)-A-5 はドーパント(Mg)量を変化させた場合の Mg-doped AlO_x 膜の界面固定電荷(Q_{eff})と欠陥準位密度(D_{it})の変化を示しているが、33at.%では 10¹¹cm⁻²の負の固定電荷を持つ Mg-doped AlO_x 膜となって実質的に電界効果を持たないパッシベーションとなり、なおかつ、 D_{it} は 1.5 $\times 10^{11}$ cm⁻²eV⁻¹以下という極めて高品位の化学パッシベーションを維持することができることが分かる。これらの結果から、AlO_x/SiN_x 積層膜を p 型 PERC セルや n 型 Bifacial セルに適用していくことによって、これらのセルのさらなる高効率化と安定性の向上が期待できる。

また、25-26%超の変換効率を期待できる、高品質パッシベーションと良好なコンタクト特性を両立する Passivated Contact あるいは CSC (Carrier-Selective Contacts) セルの開発を進めた。アモルファス/結晶

シリコンのヘテロ接合や、トンネル酸化膜型の金属-絶縁膜-半導体接合を基本構造に有するデバイスを想定してトンネル酸化膜型セルの開発を進め、デバイス・シミュレーションにより高効率化のための設計指針を調べた。最適な酸化膜厚、要求される膜厚制御性、および、電子と正孔それぞれのコンタクトに要求される酸化膜厚制御性の違い等の設計指針を得た。電極の仕事関数に関しては、仕事関数のバンド端近傍値からのずれに対して開放電圧と曲線因子が大きく影響を受けること、および、電子と正孔それぞれに対して仕事関数依存性が異なる等の設計指針を得た(図Ⅲ-2-(ニ)-A-6)。特に正孔用コンタクトにおいては、仕事関数設計値からのずれが曲線因子に与える問題が大きいことを示した。これらシミュレーション結果を踏まえ、高効率に必要な酸化膜や電極仕事関数の設計指針を決めた。



図Ⅲ-2-(ニ)-A-4 各種パッシベーション層の実効ライフタイム比較



図Ⅲ-2-(ニ)-A-5 Mg 量による Mg-doped AlO_x 膜の Q_{eff} と D_{it} の変化

新規仕事関数材料として、特に正孔選択電極に適した高仕事関数を有すると期待されるモリブデン系酸化物を主な候補として種々の成膜法や条件を探索した。低ダメージプロセスである反応性プラズマ蒸着（RPD）を用いたコンタクト材料の成膜、物性評価用およびセル構造テストデバイスを作製し、各種評価を進めた。RPD プロセス評価としては、ITO を用いた成膜時に導入されるダメージの評価を進めた。パッシベーション層に酸化膜を用いる TOPCon セルを想定したテストデバイスにおいて、容量 - 電圧 (C-V) 特性解析を行い、シリコン/酸化膜界面近傍に導入される欠陥密度 (Dit) の定量化、および、それが熱処理でどのように変化するかを調べた (図 III-2-(二)-A-7)。RPD プロセスはダメージが比較的少ないと漠然と言われてきたが、C-V 特性には Si/SiO₂ 界面欠陥の導入がはっきりと現れており、低く見積もっても 10¹² cm⁻²eV⁻¹ オーダーの欠陥密度であることがわかった。これらのダメージは約 250°C 以下のフォーミングガスや窒素ガス雰囲気熱処理で 1 桁程度減少することもわかり、比較的低温熱処理で回復することは実際の CSC セル作製プロセスに十分使えるものであることもわかった。一方で、本 C-V 解析により、ITO/酸化膜界面における ITO の仕事関数の抽出も行った。種々材料が積層するような実際のデバイス特性を決めるのは、コンタクト材料のバルクとしての仕事関数値ではなく、パッシベーション層界面における実効的な仕事関数である。しかしこの界面における実効的な仕事関数は、従来の関連研究においてほとんど報告されてこなかった。今回、RPD で成膜した ITO で上記界面仕事関数をはじめ評価し、コンタクト材料開発において重要な評価手法を確立した。

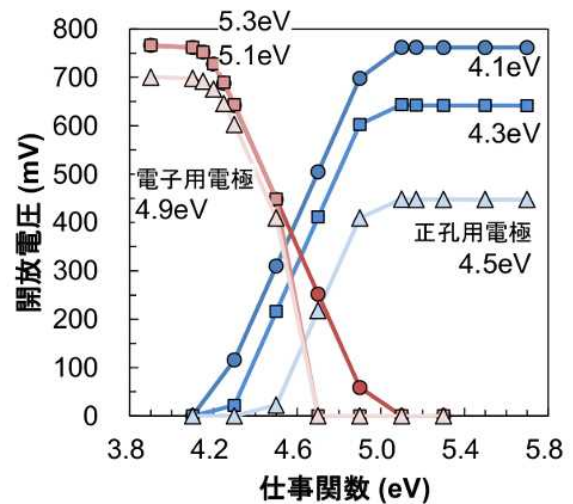


図 III-2-(二)-A-6 電極仕事関数と開放電圧の関係

これらのダメージは約 250°C 以下のフォーミングガスや窒素ガス雰囲気熱処理で 1 桁程度減少することもわかり、比較的低温熱処理で回復することは実際の CSC セル作製プロセスに十分使えるものであることもわかった。一方で、本 C-V 解析により、ITO/酸化膜界面における ITO の仕事関数の抽出も行った。種々材料が積層するような実際のデバイス特性を決めるのは、コンタクト材料のバルクとしての仕事関数値ではなく、パッシベーション層界面における実効的な仕事関数である。しかしこの界面における実効的な仕事関数は、従来の関連研究においてほとんど報告されてこなかった。今回、RPD で成膜した ITO で上記界面仕事関数をはじめ評価し、コンタクト材料開発において重要な評価手法を確立した。

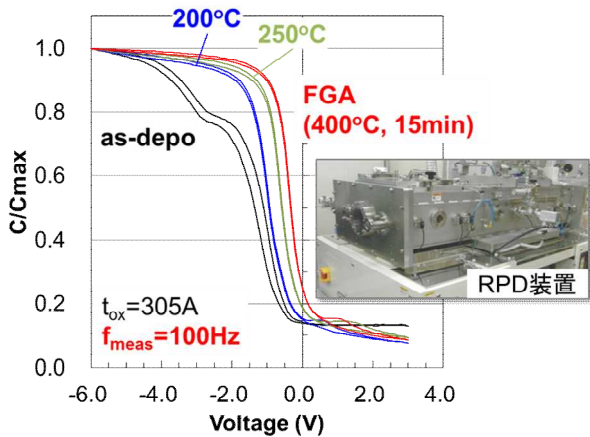


図 III-2-(二)-A-7 RPD-ITO MOS 構造デバイスの C-V 解析によるプロセスダメージ評価

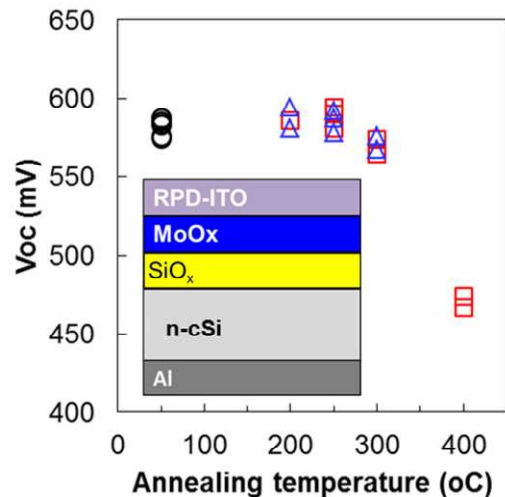


図 III-2-(二)-A-8 ITO/MoO_x CSC セルの開放電圧

このような評価結果・手法を踏まえ、実際に正孔選択コンタクトの開発も進めた。コンタクト材料としては仕事関数がシリコンの価電子帯よりも十分大きいと期待されるモリブデン酸化物 (MoO_x) を選択した。パッシベーション層としては湿式処理により形成したトンネル酸化膜を用いた。MoO_x の成膜法・条件の検討を踏まえ、ITO/MoO_x 積層コンタクト構造の開放電圧評価用のテスト素子を作製した。この ITO は前述した RPD で成膜したものである。MOS 構造のテストデバイスの C-V 解析により、MoO_x の仕事関数を抽出し、セル構造テストデバイスの I-V 測定により開放電圧を求めた (図 III-2-(二)-A-8)。n 型基板の受光面側に正孔選択コンタクトを形成したもののだが、現在約 600 mV までの値が出ている。

これら Passivated Contact セルの接合特性評価、およびプロセス評価に関しては、ナノスケール

で光照射下の接合界面における仕事関数分布を測定するための新規プローブ顕微鏡評価システムの構築も進めた。本装置は、太陽電池デバイス断面観察が可能なフランジを備えており、光照射下の接合界面における仕事関数分布を測定できるものである。比較的単純な構造のデバイスを用いて、Si の p/n 領域に対する光照射の有無による仕事関数変化の測定に成功した。これは本手法の可能性を示すものであり、第 64 回応用物理学会学術講演会（2017 年 3 月）にてポスター賞を受賞した。

豊田工業大学ではこれらの研究開発の成果を定量的に評価するために 2020 年発電コスト目標 14 円/kWh に至るコスト試算を実施した。その結果を表Ⅲ-2-(ニ)-A-4 に示す。これによると本プロジェクトにおける結晶成長・スライス加工・セルプロセスの各技術開発成果を活用することによって下表のようにモジュール製造原価を 23.4 円/W、発電コストを 4.0 円/kWh 低減することができ、さらに BOS コスト低減および設備利用率向上を織り込むことによって 14 円/kWh 達成が可能と見込まれる。豊田工業大学では上記開発項目のうち、主にセルプロセス開発によるセル効率向上に取り組んでいるが、他にもセル評価を通じて、他機関の結晶成長技術開発・スライス加工技術開発にも貢献している。そのうち、豊田工業大学におけるセルプロセス開発によるセル効率向上の取り組みでは、n 型 Bifacial セル開発をナミックス株式会社と共同で推進し、Ag ペースト・フィンガー電極および Cu ペースト・バスバー電極セルで効率 20.8%を達成している。これは下記コスト試算によると、モジュール製造コスト 1.5 円/W、発電コスト 0.7 円/kWh 低減に相当する成果である。また結晶成長技術開発への貢献では、株式会社トクヤマと豊田工業大学・明治大学で、n 型単結晶 Bifacial セル試作による不純物および結晶成長方法の評価を実施し、インゴットのライフタイム 2,000 μ sec 以上の達成とインゴットの良品直胴部歩留まり向上に貢献した。これはモジュール製造コスト 1.9 円/W、発電コスト 0.38 円/kWh 低減に相当する成果である。さらに、スライス加工技術開発への貢献では、コマツ NTC 株式会社とナミックス株式会社および豊田工業大学・明治大学で、極薄・極狭カーフ・スライス・ウエハによる n 型単結晶 Bifacial セル試作評価検討を推進中であり、スライスピッチ（ウエハ厚+カーフロス）200 μ m スライス加工技術の確立に貢献した。これはモジュール製造コスト 6.8 円/W、発電コスト 0.5 円/kWh 低減に相当する成果である。

表Ⅲ-2-(ニ)-A-4 モジュール製造原価及び発電コスト試算

	インゴット製造経費 (円/kg)	スライス加工費 (円/枚)	ウエハ厚+カーフロス (mm)	セル搭載材料費 (円/枚)	セル効率	PCS・BOS・施工費・販売経費 (円/kW)	設備利用率	モジュール製造原価 (円/W)	発電コスト (円/kWh)	モジュール製造原価低減効果 (円/W)	発電コスト低減効果 (円/kWh)
2015 年見積り	¥2,600							¥61.4	¥24.2		
結晶成長技術開発によるインゴット製造経費低減		¥47.0	0.350	¥40.5	20.0%	¥223,500	13.0%	¥58.6	¥24.0	¥2.8	¥0.2
スライス加工技術開発によるスライス加工費低減								¥52.9	¥23.5	¥5.7	¥0.4
スライス加工技術開発によるウエハ薄型・カーフロス低減			0.200	¥30.0	23.0%	¥136,335	14.0%	¥46.1	¥23.0	¥6.8	¥0.5
セルプロセス開発によるセル搭載材料費低減	¥2,000	¥22.0						¥43.7	¥22.9	¥2.4	¥0.2
セルプロセス開発によるセル効率向上							¥38.0	¥20.2	¥5.7	¥2.7	
量産効果(経験曲線)による BOS コスト低減								¥38.0	¥15.0	¥0.0	¥5.2
設備利用率向上(2015 年実績)								¥38.0	¥14.0	¥0.0	¥1.1

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」(明治大学)

シリコン基板スライスの低コスト高性能化を目指して、従来手法の遊離砥粒を用いたセルを参照として、コマツ NTC 株式会社と共同で固定砥粒ワイヤーによるスライスプロセスのセル特性への影響を調査した。固定砥粒ワイヤーを用いた基板で時として紫外領域でのみ分光感度が劣る現象を発見した。

セルプロセスごとに最適なウエハ仕様を提示するため、株式会社トクヤマと共同で原料・結晶中の不純物濃度や結晶成長条件を変えたウエハを作製した。改良した成長プロセスによって高ライフタイムかつ高プロセス耐性のインゴットを実現した。図 III-2-(ニ)-A-9 に従来手法と改良手法によって成長したインゴットのライフタイム測定結果を示す。インゴット全領域で従来手法と比べ 1 ms 以上高く、劣化領域が見られなかった。さらに 1000°C 近傍の高温処理を含む製造プロセスによって n 型両面受光セルを作製したところ、改良手法によるウエハでは熱処理によるライフタイム劣化が小さいことが見出された。ライフタイムと熱処理耐性に対する改善について、酸素析出物の観点から調査を行なった。走査型赤外顕微鏡 SIRM-2100 および透過電子顕微鏡 (TEM) 像解析によって熱プロセスによる酸素析出動態を調べた (図 III-2-(ニ)-A-10、図 III-2-(ニ)-A-11)。析出物密度は炭素濃度と相関し、従来手法で作製したウエハ (A0-A5) と改良手法によって作成したウエハ (B0-B2) を比較すると改良手法で一桁程度析出物密度が小さくなった。図 III-2-(ニ)-A-11 (b) に示すように、従来手法と改良手法では析出物の形状に大きく違いがあり、従来手法では板状の析出物周辺に高密度の転位が発生していることを見出した。

結晶 Si 太陽電池の高効率化に向け、低コスト原料中に残留するドナー・アクセプタ不純物、および接合層、コンタクト層の高濃度不純物の精密評価を目的とし、低温フォトルミネッセンス (PL) 分析において不純物クラスターに起因する発光 (ICBE: impurity cluster bound exciton) を新たに見出し、さらに不純物定量への応用を示した。

Si 基板の高品質化を図る上で不可欠な極低炭素濃度定量を目的とし、電子線照射発光活性化 PL 法により 10^{14} - 10^{15} cm^{-3} 台の炭素が高感度で検出できることを示した。また、炭素濃度をコントロールした試料の定量を行ない、電子線誘起炭素複合体に起因する C-line 発光が 10^{14} cm^{-3} オーダーまで信号強度に

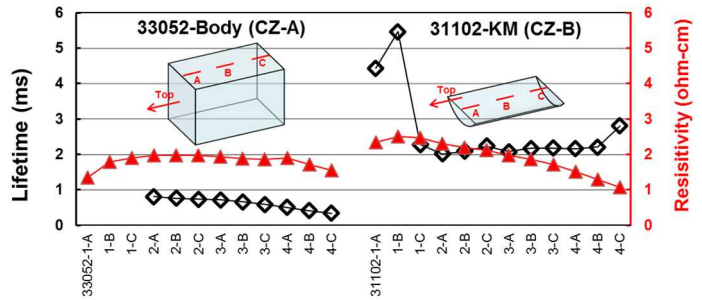


図 III-2-(ニ)-A-9 従来手法 (CZ-A) と改良手法 (CZ-B) によって成長したインゴットのライフタイム (黒) と抵抗率 (赤) の分布

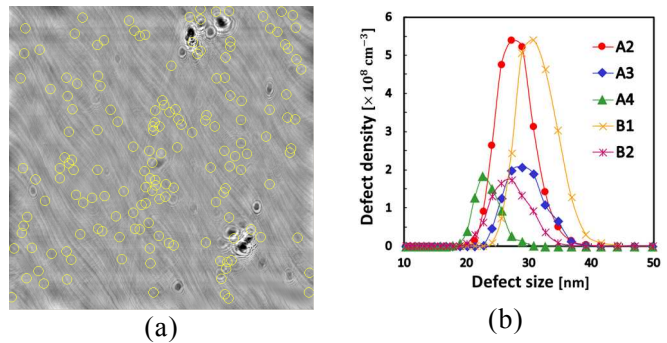


図 III-2-(ニ)-A-10 1100°C、3 時間の熱処理後の (a) SIRM による赤外後方散乱像と散乱体の検出結果 (黄色の円) および (b) 欠陥のサイズ分布

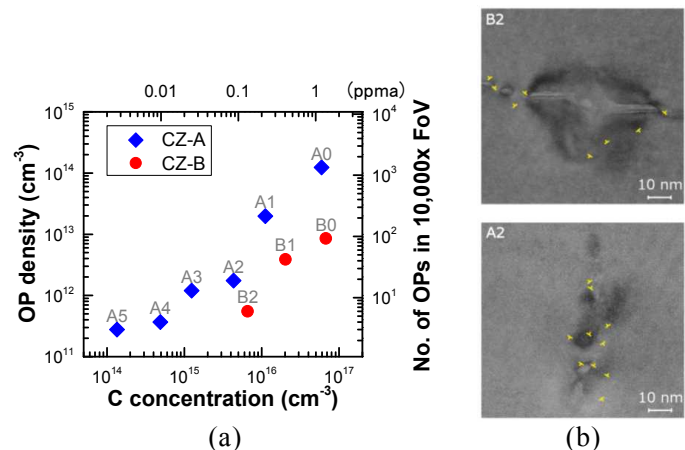


図 III-2-(ニ)-A-11 太陽電池製造プロセス後のウエハにおける (a) TEM 像解析による酸素析出物密度、および (b) 酸素析出物の TEM 像。転位を黄色の記号で示した。

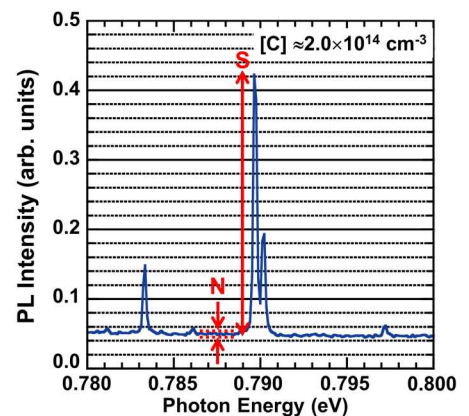


図 III-2-(ニ)-A-12 電子線照射量を 2 MeV で 1×10^{16} cm^{-2} としたときの C-line と背景ノイズの強度比較

対応することを確認した。また電子線照射量を十分に大きくすることで信号強度が増強され、得られた S/N 比から検出下限を見積もり、おおよそ $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ という結果を得た (図 III-2-(ニ)-A-12)。本成果は、論文誌 *Japanese Journal of Applied Physics* にて注目論文として spotlight に選ばれた。現在さらに簡便で低コスト定量が可能な液体窒素温度での同手法の可能性を検討し、成果を得つつある。

キャスト成長による太陽電池用多結晶シリコンは高効率化の傾向と平行してシェアを維持している。ハイパフォーマンス (HP) 多結晶シリコン、擬似単結晶シリコンは種結晶を導入することでキャスト成長法を用いて従来型多結晶シリコンより優れたライフタイムなどの性質が得られる。特に HP 多結晶は従来型多結晶シリコンとの置き換えが進んでいる。我々は種結晶以外の条件を揃えた従来型多結晶、HP 多結晶、擬似単結晶シリコン (図 III-2-(ニ)-A-13、図 III-2-(ニ)-A-14) について顕微赤外分光マッピングを用いて酸素・炭素分布を調べた。HP 多結晶シリコンでは従来手法と同様の分布を示す一方、擬似単結晶シリコンでは種結晶に由来すると考えられる比較的高濃度の酸素分布が見出された。また低品位原料の影響を金属不純物と欠陥の相互作用の観点から評価し、サブグレイン欠陥への金属修飾を PL イメージング法により解析した。その結果、金属不純物が欠陥と相互作用して効率劣化をもたらす現象について、基板導電型 (n または p) が異なると汚染金属種毎に影響度が異なることを見出した。本成果は、2016 年春季応用物理学会で講演奨励賞を獲得した。

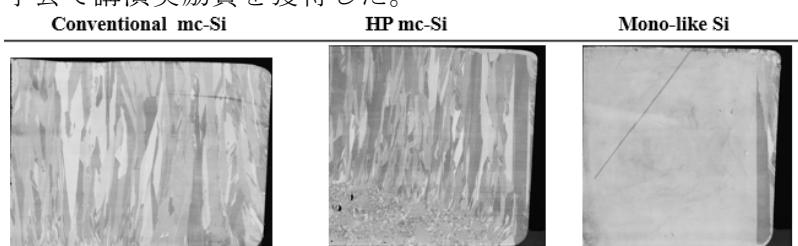


図 III-2-(ニ)-A-13 従来型多結晶、HP 多結晶、擬似単結晶シリコンの試料断面。インゴットから結晶成長方向に平行にスライスした。

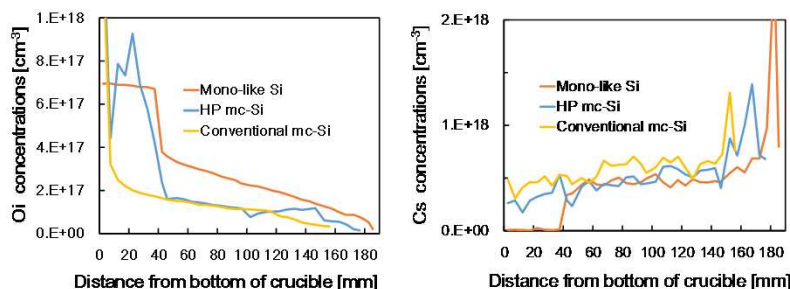


図 III-2-(ニ)-A-14 擬似単結晶、HP 多結晶、従来型多結晶シリコン試料の成長方向の格子間酸素 (Oi)、置換位置炭素 (Cs) 濃度分布

表面パッシベーションは HIT や TOPCon に代表されるパッシベティッドコンタクトの研究の進展、PERC セル、PERT セルの市場参入によりさらに重要な技術課題となっている。SiN パッシベーション成膜プロセスを詳細に評価し、窒化シリコン膜 (SiN_x 膜) のパッシベーション性がプラズマ処理によって改善し、X 線光電子分光 (XPS) によって化学結合の再結合が起こっていることを見出した。また SPring-8、BL46XU の硬 X 線光電子分光 (HAXPES) 装置を用い、100.5 eV の位置に Si⁺(Si₂O) に起因するピークが存在し、プラズマ処理により減少することを見出した (図 III-2-(ニ)-A-15)。また、パッシベティッドコンタクトなど高リーク性の界面を評価するために、超高周波インピーダンス解析装置を用いて、アモルファス膜界面や改良ペースト電極の評価を進めた。インピーダンスの Cole-Cole プロットと等価回路フィッティングの結果を図 III-2-(ニ)-A-16 に示す。今後本手法を用いることで、界面特性を界面準位 (Dit) および固定電化密度 (Qf) 等の定量的な指標で示していく。

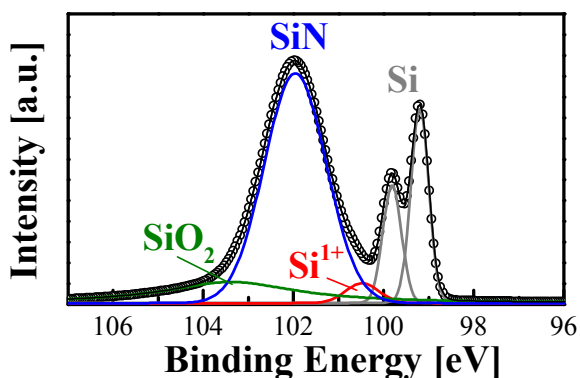
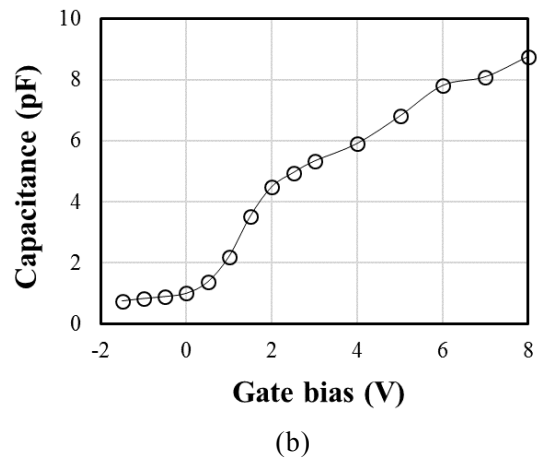
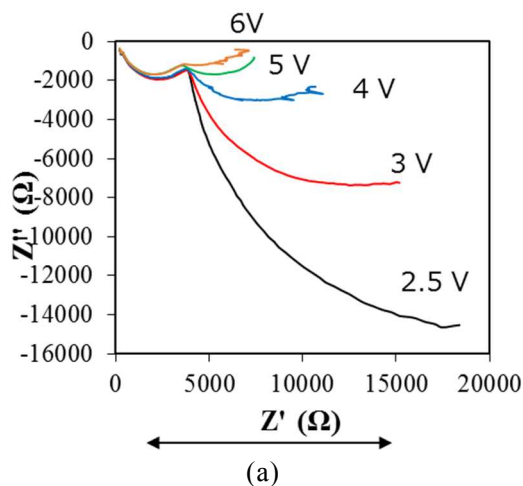


図 III-2-(ニ)-A-15 SPring-8、硬 X 線光電子分光 (HAXPES) 法によって測定した、SiN_x 膜界面における化学結合状態による Si2p ピークの分裂



図Ⅲ-2-(ニ)-A-16 超高周波インピーダンス測定によるアモルファスシリコン界面に対する測定結果の(a) Cole-Cole プロット、および(b)等価回路フィッティングにより導出した容量

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」(九州大学)

シリコン結晶の品質向上に関する研究開発は、LSI の研究開発分野で 50 年以上の長い歴史が有る。しかし、この技術を直接太陽電池に応用すると高いコストが発生し、実用的ではない場合が多い。従って、既存の結晶成長技術を太陽電池用に応用するとき、太陽電池の製造プロセスに対応したシリコン単結晶成長技術を研究開発する必要がある。特に、コスト低減を視野に入れた高純度のシリコン単結晶の製造に関する研究開発を通して、発電コストの低減に貢献する。

本研究開発の中間目標は、高品質・低コスト結晶成長技術として、転位密度が低くライフタイムの長い高品質な疑似単結晶ならびに軽元素濃度精密制御による単結晶成長技術に関する研究を行い、p 型基板では 1.5~3msec、n 型基板では 3~6msec のバルクライフタイムを実現することであり、最終目標は、p 型基板では 2~5msec、n 型基板では 5~7msec のバルクライフタイムを実現することである。これらにより得られた知見、技術開発指針をもとに、原料ならびに結晶メーカーの製造コストの低減、およびそれら基板を用いたセルメーカーの高効率化・低コスト化に貢献する。なお、これまでの研究開発によって現在までに、p 型基板では 2msec、n 型基板では 8msec のバルクライフタイムを実現し、既に中間目標をクリアしている。以下に本研究開発の詳細について述べる。

①高品質低コスト疑似単結晶成長技術の構築

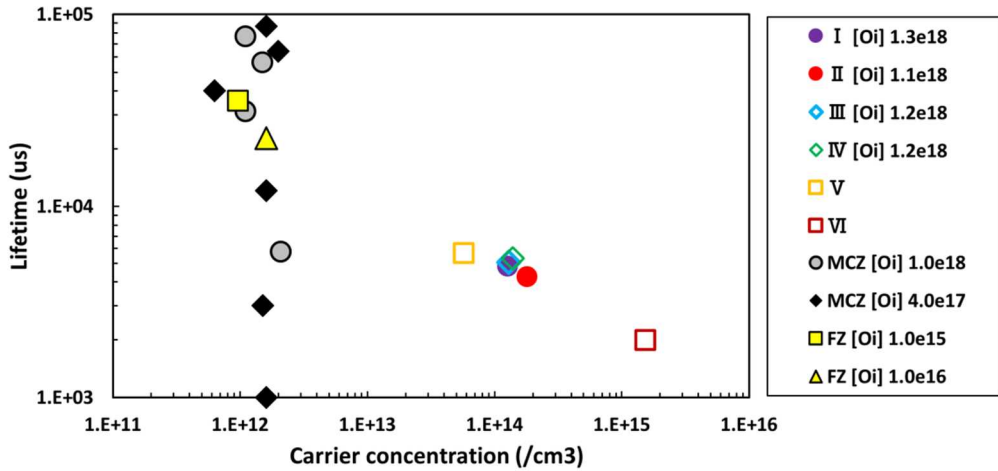
本研究開発では、疑似単結晶 Seed cast シリコン結晶化率の向上法を提案し、これを実施する。特に、X 線カメラを使用して、単一シードを用いた時の疑似単結晶 Seed cast シリコン結晶中の転位密度測定や、結晶中の軽元素汚染を極力低減できる新規結晶育成方法の提案を行う。これまでに、購入した X 線カメラを使用して、九州大学が結晶成長したシリコン単結晶を評価した。X 線セクショントポグラフィ法を用いて、シリコンウエハの 3 次元の酸素析出物の観察に成功した。これにより、100 マイクロメートル程度の大きさの酸素析出物のウエハの深さ方向の分布の撮影に成功した。すなわち、キャリアライフタイムの低下の一つの原因である欠陥の 3 次元分布の観測に成功した。さらに X 線カメラを使用して、結晶成長したシリコン単結晶と多結晶の評価も行った。X 線セクショントポグラフィマルチスライス法を用いて、シリコンウエハ表面近傍の研磨傷や析出物の 3 次元観察に成功した。これにより、ウエハ切削時に生じる研磨傷等の定量的な評価が可能となった。今後、Seed cast 法で育成した疑似単結晶や CZ 法で育成した結晶研磨後の欠陥評価を行う。特に、種々の結晶育成条件で育成した単結晶と多結晶中の析出物や研磨傷の 3 次元分布とライフタイムとの関係を定量的に比較検討し、欠陥形成課程シミュレーションへのフィードバックを行う。X 線カメラによる結晶内転位構造の 3 次元観測結果と数値解析データをもとに、結晶中の応力低減の方法、特に結晶冷却方法について企業に提案し、新規結晶成長を行う。これにより、従来よりも転位密度、残留応力、双晶等が少ない疑似単結晶シリコンを Seed cast 法により実施する。さらに、結晶中の不純物解析を高精度に予測することが可能な数値解析コードを開発する。

②超高品質単結晶成長技術の構築

本研究開発では、CZ シリコン結晶化速度の向上法を提案し、実施した。特に、極低濃度の酸素と炭素の CZ シリコン単結晶育成用液体原料供給炉の設計を行った。これにより、新規な CZ 結晶成長法を提案し、従来では到達できなかったライフタイムの実現に向けた炉の設計を行った。さらに、この結晶育成装置を用いて、実際に結晶育成を行い、極低濃度の酸素と炭素の CZ シリコン単結晶を育成する。

太陽電池の効率向上のため、結晶シリコンの高キャリアライフタイム化が求められている。ライフタイムは、酸素析出物や育成欠陥の影響を受けることが報告されている。また、炭素濃度が 10^{14} atoms/cm³ 以下では、ライフタイムは酸素濃度に依らず炭素濃度のみに依存すると報告されている。今回、酸素濃度の比較的高い CZ 結晶シリコンにおいて、バルクライフタイムに対する炭素濃度の影響を検証した。実験では、直径 3 インチの n 型リンドープ CZ シリコン単結晶を成長した。2 本の結晶は、炭素濃度の高い条件で、その他の結晶は炭素濃度の低い条件で成長した結晶である。抵抗率は 4 探針法にて、酸素濃度と炭素濃度は FT-IR 法にて、バルクライフタイムは渦電流方式 (Sinton BLS-I) を用いて測定した。

実験結果は以下のとおりである。図Ⅲ-2-(ニ)-A-17 は、ドーパント濃度とバルクライフタイムの関係を示す。バルクライフタイムはドーパント濃度に依存し、炭素濃度が 10^{16} atoms/cm³ 以上の結晶においても、炭素濃度が 2×10^{15} atoms/cm³ 以下の他の結晶と同じ直線で整理することが可能である。なお、抵抗率 3Ωcm (ドーパント濃度 1.5×10^{15} atoms/cm³) でのバルクライフタイムは 6 msec であった。以上より、バルクライフタイムは、炭素濃度のみでは決まらず、他の要因の影響が大きいことが示唆される。



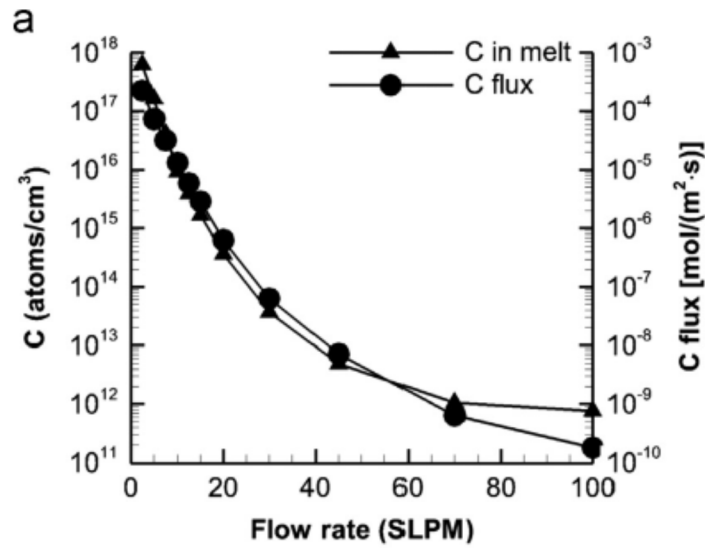
図Ⅲ-2-(ニ)-A-17 キャリア濃度と結晶のキャリアライフタイムとの関係

シリコン結晶中の軽元素の一つである炭素濃度制御は、高効率の太陽電池の実現に重要である。図Ⅲ-2-(ニ)-A-18 は、結晶中の炭素濃度と結晶育成炉内のアルゴンガスの流量との関係を、九州大学が独自に開発したグローバルシミュレータを用いて解析した結果である。これにより、結晶中の炭素濃度は、炉内にアルゴン流量が大きいほど低減できることが明らかになった。これは、炭素製の坩堝とシリコン融液から蒸発した SiO が反応して CO を生成し、これが拡散によりシリコン融液に戻ってくるためである。従って、シリコン結晶中の炭素濃度を低減するためにはアルゴンガスの流量を増加させる必要があるが、アルゴンガスの値段が高いために実用的にはこの流量を低減させる必要がある。今後、結晶育成炉内の構造物の最適化を行うことにより、より低流速でも結晶中の炭素濃度低減が可能な結晶成長条件を数値解析と実験の定量比較により明らかにしていく。

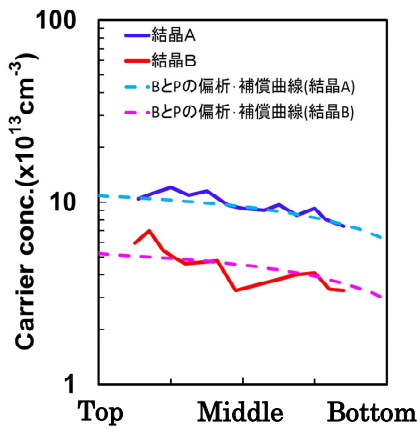
CZ シリコン結晶化速度の向上法を提案し、開発を実施した。その結果、従来の結晶育成速度の 2.5 倍の結晶育成速度を得ることができた。また、極低濃度の酸素と炭素の CZ シリコン単結晶育成用液体原料供給炉の製作を行った。また、結晶のライフタイムの決定要因を探索するために、単結晶育成実験を行った。実験では、3”φn 型リンドープ CZ シリコン単結晶を成長した。抵抗率は 4 探針法、酸素濃度と炭素濃度は FT-IR 法、バルクライフタイムは渦電流方式 (Sinton BLS-I) を用いて測定した。

図Ⅲ-2-(ニ)-A-19, 20, 21 に示すようにライフタイム依存性や不純物濃度依存性を考慮した結果、キャリア濃度が 5×10^{13} atoms/cm³ 程度までは、ライフタイムは不純物濃度によって決定されるこ

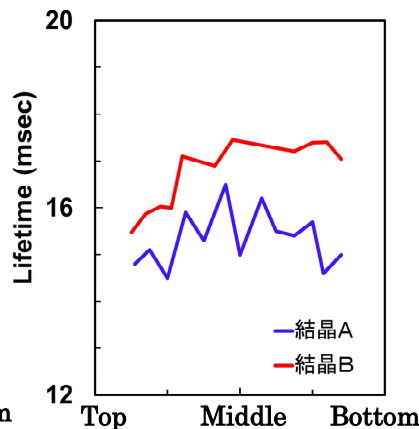
とが分かった。さらに、 5×10^{13} atoms/cm³以下の領域では、バンドギャップ内に存在する欠陥による、いわゆる SRH 統計に基づく効果が見え始めており、一般の結晶中の欠陥密度よりも約1桁程度少ないことが予想された。これについては今後も引き続き実験と解析を行い、太陽電池の基盤として相応しい基板の欠陥濃度の定量化を行う予定である。



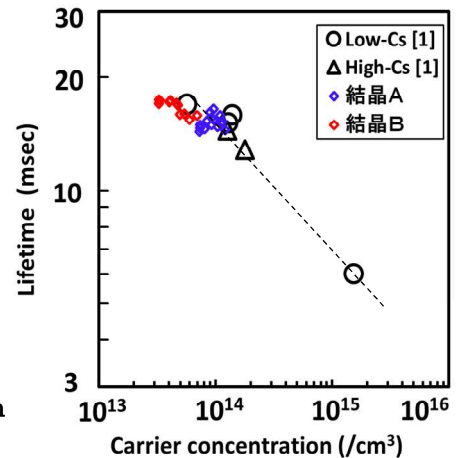
図III-2-(二)-A-18 アルゴンガス流量と炭素濃度との関係



図III-2-(二)-A-19 キャリア濃度分布



図III-2-(二)-A-20 ライフタイム分布

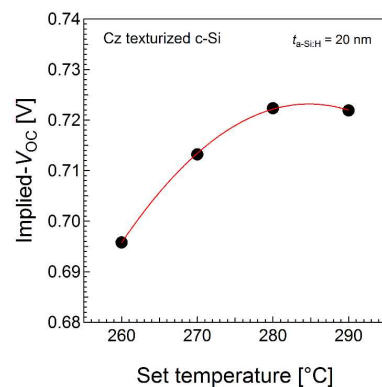


図III-2-(二)-A-21 キャリア濃度とライフタイムの関係

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」(名古屋大学)

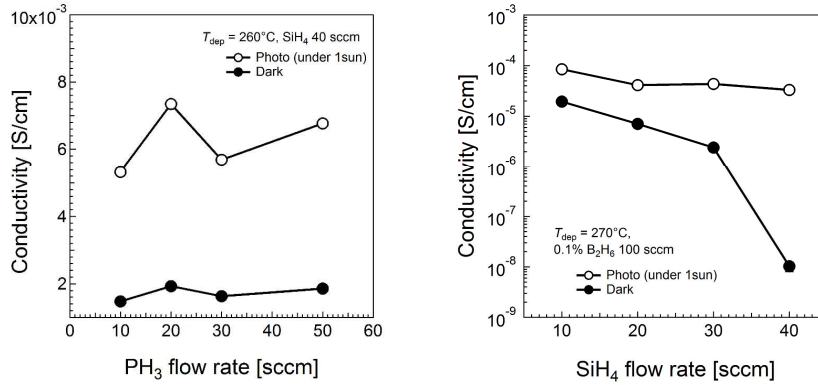
① 高品質かつ低吸収なパッシベーション膜の開発

2017年2月にプラズマ援用化学気相堆積(PECVD)装置導入後、水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)のi層及びドープ層の条件出しを迅速に行い装置の垂直立ち上げを行った。高品質パッシベーション膜の成膜条件として、成膜温度、投入電力、電極間距離、SiH₄流量の条件検討を行い、implied-V_{oc}(i-V_{oc})が高くなる成膜条件を探索した。図III-2-(二)-A-22は、豊田工業大学が準備したテクスチャー加工した156mm角基板に最適な設定ヒーター温度付近でa-Si:Hを基板両面に約20nm成膜した際のi-V_{oc}の変化を示す。ヒーターの設定温度が280°Cで0.725Vのi-V_{oc}を得た。次に、低抵抗のドープ層の電気導電率が高くなる成膜条件



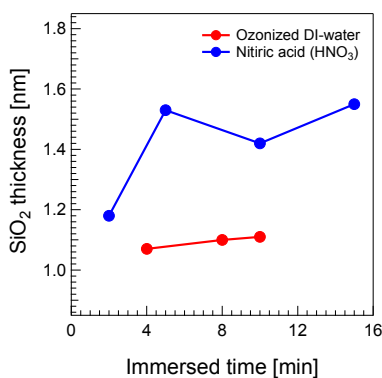
図III-2-(二)-A-22 i-V_{oc}のヒーター温度依存性

の探索を行った。図Ⅲ-2-(ニ)-A-23 (a)および(b)は、n層とp層をガラス基板上に200-300 nm 製膜した際のそれぞれの暗時と照射時の電気導電率である。n層に関しては暗時で電気伝導率が約 2×10^{-3} S/cm、p層に関しては約 1×10^{-5} S/cm の電気伝導率まで得た。これらの膜を用いて太陽電池の作製を行った。Si基板洗浄、透明導電膜(TCO)の成膜は豊田工業大学が行い、電極形成と評価をナミックス殿に行っていただいた。その結果、装置移設後3か月程度で156 mm角の基板において18.9%の変換効率まで達成した。

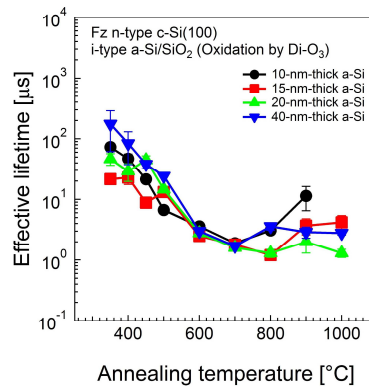


図Ⅲ-2-(ニ)-A-23 (a) n層の電気伝導率のPH₃流量依存性と(b) p層の電気伝導率のSiH₄流量依存性

また、1 nm程度の極薄酸化膜形成法としてオゾン水酸化装置を導入した。図Ⅲ-2-(ニ)-A-24はSi基板の硝酸(HNO₃)とオゾン水への液浸時間と酸化膜の膜厚関係を示す。オゾン水を用いた場合には、硝酸を用いた場合に比べて、1.0-1.1 nm程度の薄い酸化膜が形成されていることが分かった。すなわち、オゾン水により、トンネル効果がより有利に働く酸化膜を形成することができた。図Ⅲ-2-(ニ)-A-25は、PECVD導入前にオゾン水で酸化したSi基板にRFスパッタリングでa-Siを成膜後、H₂ 3%含有Ar雰囲気中でアニール(FGA)を行った際のライフタイムの結果を示す。SiO₂のみで同じような実験をした場合は、ライフタイムの向上は見られず2-3 μs程度の値を示した。一方、a-Si成膜後では400°C前後の比較的低温領域でアニールすることで、100 μs程度のライフタイムが得られた。すなわち、極薄膜のSiO₂上の膜を堆積した後、FGAを行うことが、極薄膜のSiO₂を用いた構造でライフタイムを向上させる重要な点の一つであることが分かった。



図Ⅲ-2-(ニ)-A-24 SiO₂膜厚の液浸時間依存性



図Ⅲ-2-(ニ)-A-25 a-Si/SiO₂のポストアニール温度依存性

② バンドエンジニアリングを駆使した新規ヘテロ接合材料の探索

アルミニウム誘起結晶化(AIC)を利用して形成したp⁺-Siを新規裏面電界効果(BSF)層として用いた太陽電池作製を行った。図Ⅲ-2-(ニ)-A-26は、AIC-Siの形成時の温度を変化させて作製した太陽電池の電流-電圧特性を示す。温度570°Cの処理で最も高い変換効率12.26%を得た。これはホール測定から570°Cにおいて抵抗率がおよそ 4×10^{-2} Ω·cmと最も小さくなっており、それによりフィルファクターが改善したためと考えられる。

また、結晶シリコン (c-Si) とヘテロ接合を形成した際に電子とホール選択にそれぞれ有効なバンドラインナップを示す材料としてそれぞれヨウ化銅 (CuI) と酸化チタン (TiO₂) に着目して研究を行った。

CuI は Cu を真空蒸着にて成膜後、ヨウ素雰囲気中にさらす 2 段階法で形成した。図 III-2-(ニ)-A-27 は CuI を異なる温度で Si 基板上に形成した際の内蔵電位とヨウ素雰囲気中に曝露する時間の関係を示す。内蔵電位は、静電容量-電圧測定から片側階段接合近似により求めた。これにより、CuI の内蔵電位は 0.5 から 1.5 V まで制御が可能であり、適切な形成条件を用いることでキャリアの分離に十分な内蔵電位を有していることを確認した。また、温度 100°C の試料においては電気導電率が約 4 S/cm であり、p 型 a-Si:H より高い電気伝導率を達成した。

TiO₂ はノンドーパでは抵抗率が高いため、ニオブをドーパした TiO₂:Nb の研究開発に取り組んだ。TiO₂:Nb は DC スパッタリングにより成膜し、ポストアニールを行うことで結晶化させた。図 III-2-(ニ)-A-28 はスパッタ時の Ar 圧力を変化させて成膜した試料のポストアニール温度と抵抗率の変化を示している。これにより、低い Ar 圧力と 600 °C を用いることでおよそ 330 S/cm の電気導電率と n 型 a-Si:H より高い電気伝導率を達成した。

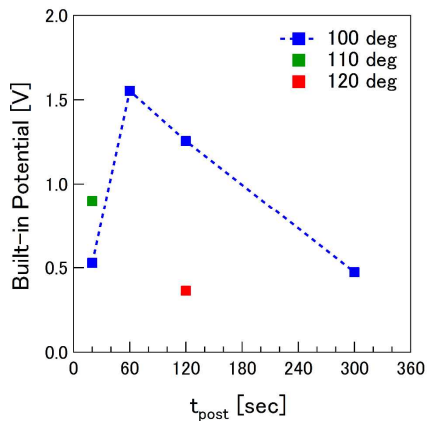


図 III-2-(ニ)-A-27 CuI の内蔵電位とヨウ素暴露時間の関係

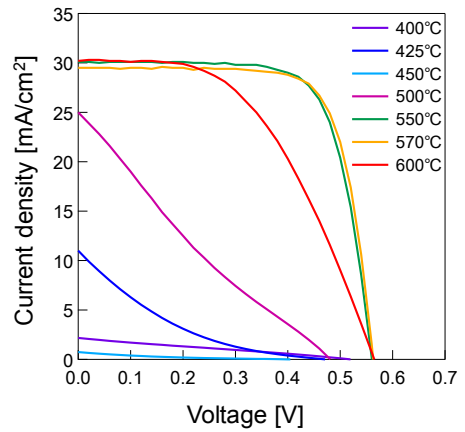


図 III-2-(ニ)-A-26 AIC-Si を裏面に用いた太陽電池の電流-電圧特性

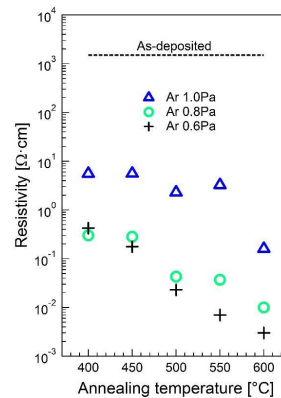


図 III-2-(ニ)-A-28 TiO₂:Nb のポストアニール温度依存性

③ 高品質セルに適応したシリコン基板の物性解明

まず、i-V_{oc} と PL イメージングを組み合わせた i-V_{oc} イメージングの測定環境を整えた。PL イメージングによるカウント数 (I_{PL}) と i-V_{oc} とは、 $i-V_{oc} = C_1 \ln(I_{PL}) + C_2$ の関係があるため、両者の関係曲線を作成することにより、i-V_{oc} のイメージングが可能となる。図 III-2-(ニ)-A-29 は、豊田工業大学が準備した抵抗率 1-2 Ω·cm のテクスチャー加工 Cz-Si 基板に PECVD を用いて 20 nm の a-Si:H を堆積した試料の i-V_{oc} イメージングである。試料の中央部と周辺部で i-V_{oc} に差が生じていることが確認でき、洗浄や成膜条件のさらなる改善が必要なることが確認できた。i-V_{oc} イメージングにより、太陽電池特性の因子と関連させてパッシベーション性能の分布評価が視覚的に素早く行うことが可能となった。加えて、i-V_{oc} イメージング用の Excel マクロ (PassiVis) を作製し、i-V_{oc} イメージングが容易に行える環境も整えた。

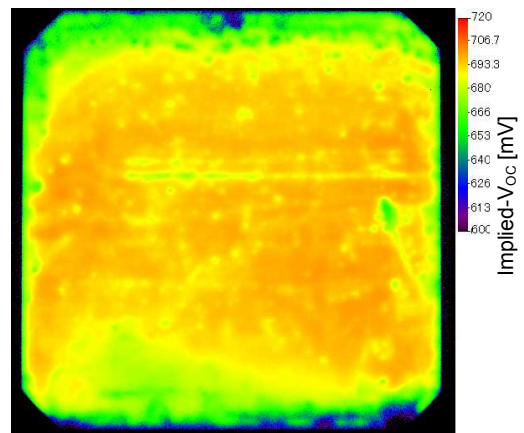


図 III-2-(ニ)-A-29 20 nm の a-Si:H を成膜した試料の i-V_{oc} イメージング

また、九州大学と株式会社トクヤマが成長した高品質 Cz-Si インゴットから切り出したウエハ上に

PECVD で 20 nm の i 層 a-Si:H を成膜し、i-V_{oc} の評価を行った。180 μm 厚の株式会社トクヤマのウエハでは 0.722 V、380 μm 厚の九州大学のウエハでは 0.714 V の i-V_{oc} を得た。これにより、九州大学と株式会社トクヤマのウエハがヘテロ接合型太陽電池の基板として十分な品質を有していることを確認できた。

さらに、リジェネレーション検討用の試料として SiN_x:H/AlO_x の積層した Si 基板を福島再生可能エネルギー研究所 (FREA) に準備していただき、光照射やアニールがライフタイムに及ぼす影響を調査した。図 III-2-(二)-A-30 は熱処理の行った試料と行っていない試料で光照射した際ライフタイムの経時変化である。図から、熱処理を行うことによりライフタイムが大きく向上していることがわかる。すなわち、熱処理により欠陥が不活性化していることを見出した。

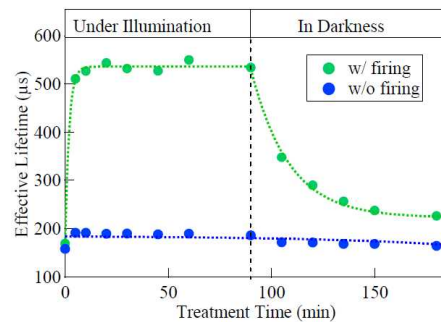


図 III-2-(二)-A-30 熱処理の有無による光照射時の実効ライフタイムの経時変化

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」(東京工業大学)

①アモルファス Si 系材料/結晶シリコン接合界面の精密評価 研究内容：

アモルファス Si 系材料/結晶シリコン界面の状態を精密に評価することは、パッシベーション効果の更なる向上や新しい材料系の導入のために非常に重要である。界面評価技術には様々な手法があるが、多くは電極形成などの前処理が必要、試料を破壊する必要があるなどの短所がある。我々は、前処理なしに界面状態を精密に評価できる簡便な手法として、少数キャリアライフタイムの温度依存性測定に着目し、解析技術の開発を進めた。

研究室に既設の温度可変型 QSSPC 装置を用いて、高品質な水素化アモルファスシリコンオキシド(a-Si_{1-x}O_x:H)により両面をパッシベーションされた n 型結晶シリコン基板の実効少数キャリアライフタイム (以下、ライフタイム) の温度依存性測定 (60~180℃) を行った。図 III-2-(二)-A-31 は a-Si_{1-x}O_x:H によりパッシベーションされた結晶シリコン基板のライフタイムの温度依存性を示しており、良好なパッシベーション効果が得られた試料に熱処理を行い、バンドギャップを変化させてライフタイムの温度依存性測定を行った結果である。熱処理温度を増加させるとバンドギャップが縮小する。この結果より、a-Si_{1-x}O_x:H 膜のバンドギャップを変化させるとライフタイムのみならず、その温度依存性も変化することが明らかとなった。

より詳細に検討を行うため、製膜時の CO₂ (酸素源) 添加量を変化させることによりバンドギャップを変化させた試料のデータも解析した結果、a-Si_{1-x}O_x:H のバンドギャップが大きい場合、ライフタイムが温度上昇に伴い増加することが明らかとなった。しかし、バンドギャップが小さい場合には、ある温度以上でライフタイムが減少する傾向がみられた。なお、バンドギャップが小さいほど、ライフタイムが低下に転じる温度が低いことも明らかとなった。

デバイス・シミュレータを用いて詳細な解析を行った結果、ライフタイムが低下に転じる温度と価電子帯オフセットに相関があることが見出された。a-Si_{1-x}O_x:H/結晶シリコンの伝導帯オフセットは価電子帯オフセットに比べると小さいため、結晶シリコン中の電子は比較的容易にパッシベーション膜の表面に到達できる。価電子帯オフセットが小さい場合は、少数キャリアである正孔は価電子帯オフセットを容易に乗り越えることができるため、比較的低温でも再結合が促進され、ライフタイムが低下するものと考えられる。これらの結果はデバイス・シミュレーション

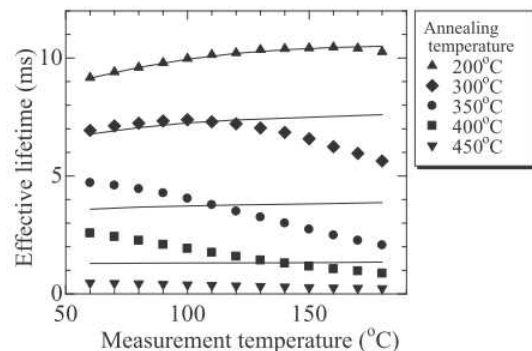


図 III-2-(二)-A-31 ライフタイムの温度依存性。プロットは様々な熱処理温度で処理後のライフタイムの温度依存性を示している。実線は温度依存性のない界面再結合を仮定してシミュレーションを行った結果である。

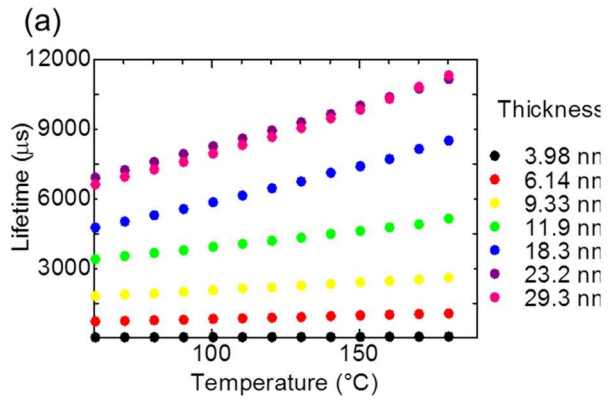
Inaba et al., Jpn. J. Appl. Phys. 55 04ES04 (2016)
“Copyright (2016) The Japan Society of Applied Physics”

とライフタイムの温度依存性を組み合わせることにより、バンドオフセットを推定できる可能性を示している。

さらに、本手法をバンドギャップが非常に大きな Al_2O_3 パッシベーション膜に適用した。この系においては Al_2O_3 /結晶 Si 界面に固定電荷が存在するため、固定電荷がライフタイムの温度依存性に与える影響を評価した。また、 Al_2O_3 膜の膜厚がライフタイムの温度依存性に与える影響についても詳細に検討した。

図III-2-(ニ)-A-32 は ALD 法で製膜した Al_2O_3 によりパッシベーションされた結晶シリコン基板のライフタイムの温度依存性を示している。a-Si_{1-x}O_x:H を用いた場合とは異なり、すべての試料のライフタイムは測定温度の上昇に伴い増加した。また、図III-2-(ニ)-A-32 からは分かりづらいが、ライフタイムの増加割合は Al_2O_3 膜の厚みが薄い場合に非常に大きくなるという結果が得られた。

デバイス・シミュレータを用いて詳細な解析を行った結果、基板/ Al_2O_3 膜界面の固定電荷はライフタイムの増加率にほとんど影響を与えないことが明らかとなった。ライフタイムの増加割合に影響を与えるのは、界面の欠陥密度および欠陥準位の位置である。欠陥密度が大きいほどライフタイムの増加が促進される。ライフタイムの増加割合は、欠陥準位がバンド端より約 0.1 eV 程度の位置にあるときに最も大きくなった。また、 Al_2O_3 膜厚が非常に小さい場合にはキャリアが Al_2O_3 膜をトンネル可能であり、実効ライフタイムが低下するとともに、温度増加時のライフタイムの増加が促進されるという知見が得られた。今後、更なる詳細な解析が必要であるが、ライフタイムの増加割合を解析することにより、欠陥密度の影響と固定電荷の影響を分離することが可能であると考えられる。



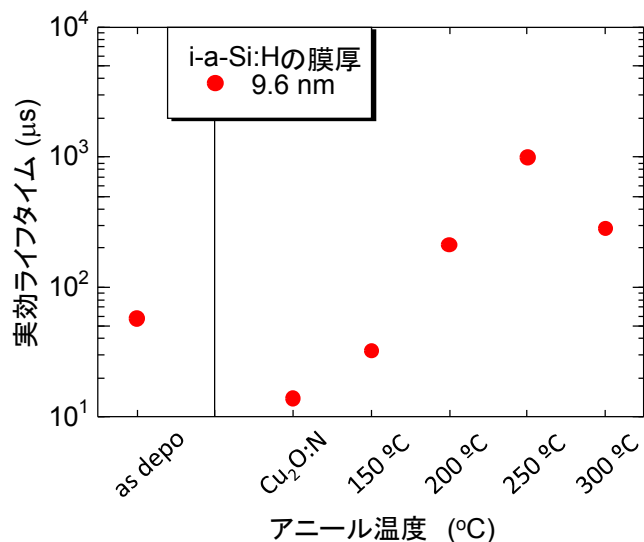
図III-2-(ニ)-A-32 Al_2O_3 によりパッシベーションされた n 型シリコン基板のライフタイムの温度依存性。様々な膜厚の Al_2O_3 を用いた場合のデータを示している。なお、データはアニール後の値である。

②超低ダメージ金属氧化物エミッタ製膜技術の開発

研究内容：

ヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池のエミッタ層には、ドーパしたアモルファスシリコンが用いられているが、製膜時に爆発性の SiH_4 および毒性の強いドーピングガス (B_2H_6 , PH_3) を用いることが問題である。また、結晶 Si とアモルファスシリコンのバンドアライメントを考えると、価電子帯に大きなオフセットが存在することが問題である。これらの問題に対する解決策の候補として金属氧化物エミッタが挙げられる。金属氧化物は特殊ガスを使用しない手法で作製が可能であり、p 型の半導体としての特性もしくは正孔選択コンタクトの機能を有する材料が存在する。先行研究ではモリブデン酸化物がその候補として検討されているが、良い特性は蒸着法のみで得られており、量産への適用は難しいと考えられる。我々は低ダメージスパッタ法を用いて金属氧化物エミッタの検討を行った。

金属氧化物エミッタの作製には量産性に優れ、基板表面にダメージを与えずに製膜できる手法を用いることが重要である。そのため超低ダメージで製膜が可能なスパッタ装置の導入を行った。また、



図III-2-(ニ)-A-33 i-a-Si:H/n-c-Si/i-a-Si:H/p-Cu₂O:N 構造のライフタイムのアニール温度依存性

RF スパッタ装置による p 型の窒素ドープ Cu_2O ($\text{p-Cu}_2\text{O:N}$) エミッタと i-a-Si:H パッシベーション膜の積層構造を用いて、パッシベーション効果の検討を行った。図 III-2-(ニ)-A-33 は i-a-Si:H/n-c-Si/i-a-Si:H/p- $\text{Cu}_2\text{O:N}$ 構造のライフタイムのアニールによる影響を示している。i-a-Si:H パッシベーションのみの場合のデータ(as-depo)も示した。p- $\text{Cu}_2\text{O:N}$ 製膜時のスパッタダメージにより、製膜後のライフタイムは低下するが、200-250°C 程度のアニール処理により、ライフタイムが向上することが明らかとなった。ただし、アニール温度が高すぎる場合にはライフタイムが低下する。このライフタイムの低下は、Cu の拡散によるものと考えられる。ここで示したデータは i-a-Si:H の膜厚 9.6 nm の場合であるが、より薄い膜の場合においても同様の傾向が得られており、太陽電池への応用が可能と考えられる。太陽電池化を行った結果、変換効率 11.3% を得ている。開放電圧は 0.579 V であり、ライフタイム測定の結果から推定される値よりもかなり小さくなっていることから、デバイス作製プロセスの最適化が必要である。また、対向ターゲットスパッタ法を用いた i-a-Si:H パッシベーション膜の作製にも取り組み、プラズマ CVD 膜に迫るパッシベーション特性 (実効ライフタイム 2 ms 程度) を得ており、 SiH_4 フリープロセスによるヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池作製プロセスの実現が視野に入りつつある。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」(兵庫県立大学)

(1) 高性能パッシベーション膜材料開発

太陽電池の高効率化には高性能パッシベーション膜が必須であるが、多くの場合、ALD 法や PECVD 法などにより製膜されている。これらの手法は装置導入コストおよびランニングコストが高いため、同性能のパッシベーション膜を低コストな手法で製膜出来れば、発電コスト低減につながる。そこで、これまでに開発したミスト CVD 法による AlO_x 膜を PERC 型太陽電池に適用し、現在一般に用いられている ALD 法による AlO_x 膜との比較を行った。図 III-2-(ニ)-A-34 にミスト CVD 法による AlO_x 膜を適用した PERC 型太陽電池の特性を、ALD- AlO_x 膜を適用した場合を基準とした相対値として示す。ALD- AlO_x 膜には若干性能は劣るものの、熱処理工程などの最適化を行うことで、ミスト CVD 法は ALD 法の代替法として十分期待出来ることが示された。

また、n 型用の新規パッシベーション材料としては正の固定電荷を有することが望まれる。これまでの知見から、 YO_x (イットリウム酸化物) は正の固定電荷を有すると予想し、低コストな製膜が可能なミスト CVD 法を用いて YO_x 膜作製を試み、イットリウムアセチルアセトナートを溶質とすることで、 YO_x 膜形成に成功した。 YO_x 膜の電気的特性を評価したところ、予想通り、正の固定電荷を有することが判った。さらに解析を行った結果、実効固定電荷密度は製膜温度によらずほぼ一定の値 ($2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) を示す一方、界面トラップ密度は製膜温度上昇に伴い低下する傾向が見られた。

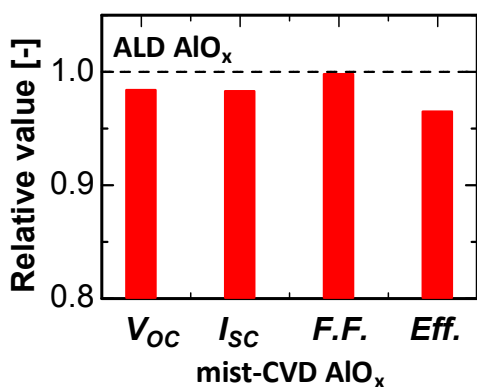


図 III-2-(ニ)-A-34 ALD- AlO_x 膜とミスト CVD 法 AlO_x 膜 PERC セルの特性比較

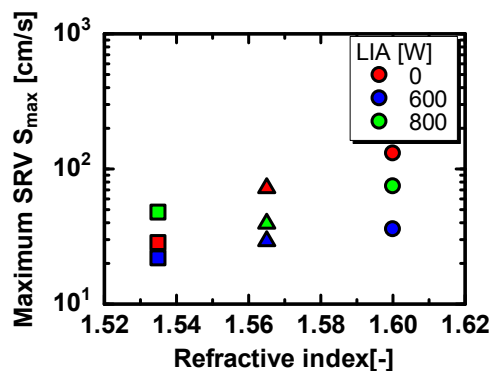
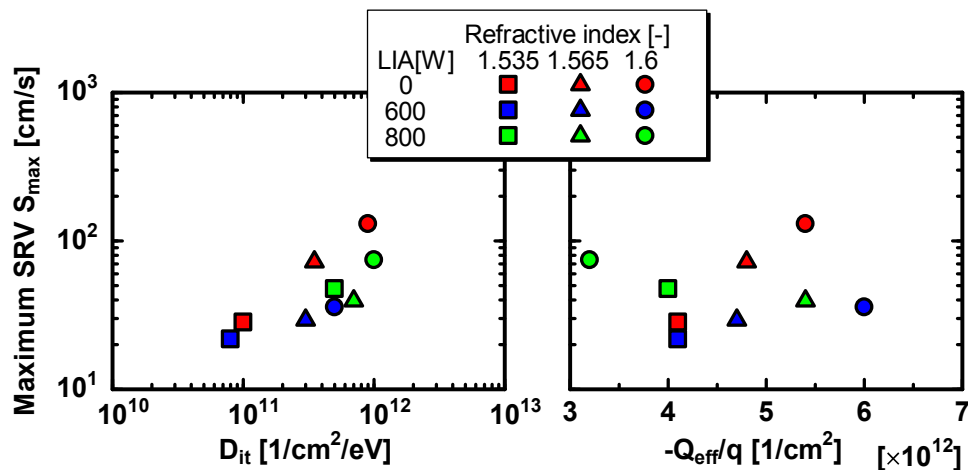


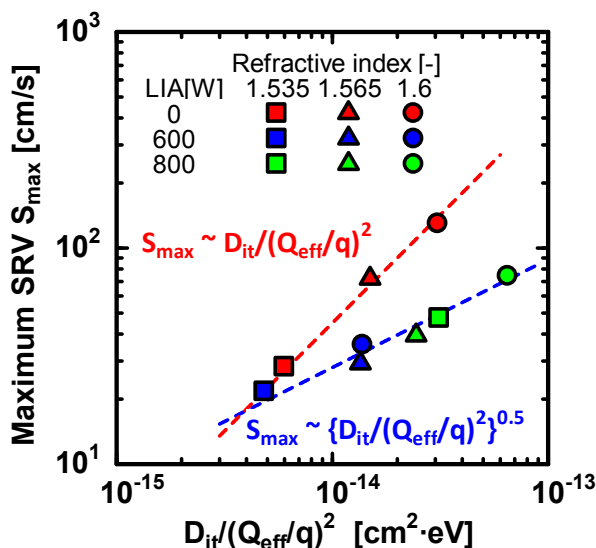
図 III-2-(ニ)-A-35 異なる LIA 条件下における屈折率と最大再結合速度の関係

比較的低コストな製膜法としてスパッタ法が挙げられるが、製膜と同時にプラズマによるダメージが入るため、パッシベーション膜の製膜には不向きとされてきた。そこでターゲット近傍に低インダクタンスアンテナ(LIA)を導入することでプラズマを制御し、製膜時のダメージ軽減を試みた。図 III-2-(ニ)-A-35 に異なる LIA 条件下における屈折率と最大再結合速度 S_{max} [cm/s] の関係を示す。全体の傾向として屈折率が小さいほど S_{max} が小さい、すなわちパッシベーション能力が高くなっている。LIA 条件で比較すると、LIA なしの条件に比べ、LIA 600W の条件の方が S_{max} が小さくなっている。しかし、LIA 800W の条件に関しては、LIA なしの条件よりも S_{max} が大きな場合もあり、屈折率により最適な LIA 条件があることが示唆された。この原因を明らかにするために、界面の電気

的特性について評価を行った。図III-2-(ニ)-A-36 に、各試料の界面トラップ密度 D_{it} [$\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$]と、実効固定電荷密度 Q_{eff}/q [cm^{-2}]、および最大再結合速度の関係を示す。LIA 600W、屈折率 1.535 の試料で最大再結合速度が最も小さい値を示し、そのときの界面トラップ密度は $8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ と最も小さく、実効固定電荷密度は $4.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ と全体の中ではそれほど大きな値では無かった。最大再結合速度は界面トラップ密度、実効固定電荷密度の両者に影響を受けるため、それぞれの明確な影響は見られない。そこで我々がこれまでに得た解析結果を元に、 $D_{it}/(Q_{eff}/q)^2$ で整理を行った。図III-2-(ニ)-A-37 に $D_{it}/(Q_{eff}/q)^2$ と最大再結合速度の関係を示す。LIA なしの条件下では $D_{it}/(Q_{eff}/q)^2$ に比例しているのに対し、LIA 600W および 800W の場合は $D_{it}/(Q_{eff}/q)^2$ の 1/2 乗に比例していることが判る。これらの結果から、LIA なしの時に導入される界面トラップと、LIA ありの時に導入される界面トラップは異なる特性を有しており、LIA ありの場合の方が再結合への寄与の小さい欠陥であると言える。以上の結果から、LIA はスパッタ法で高品質パッシベーション膜を得るために有用な手法であることが示された。



図III-2-(ニ)-A-36 各試料の界面トラップ密度、実効固定電荷密度および最大再結合速度の関係



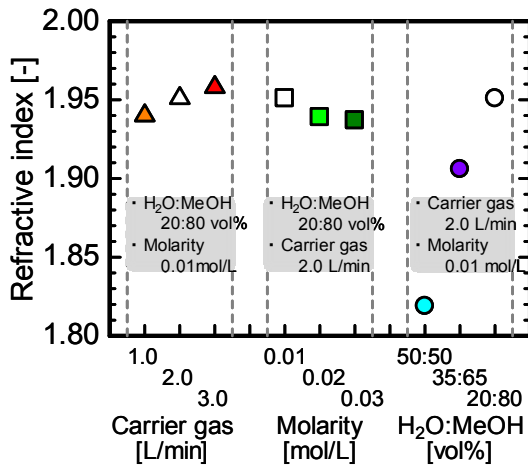
図III-2-(ニ)-A-37 界面トラップ密度、実効固定電荷密度および最大再結合速度の関係

(2) 界面近傍の特性評価技術の構築

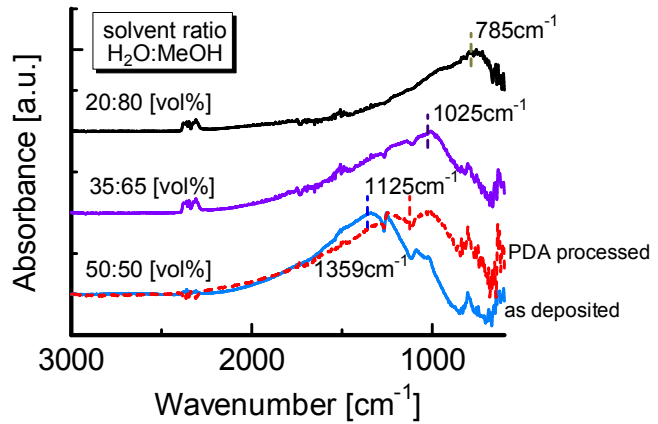
界面での再結合電流を抑制するためにはパッシベーション技術が必須である。パッシベーションには界面の欠陥を減らす化学パッシベーションと、界面の少数キャリアを減らす電界効果パッシベーションが存在し、それぞれ、界面トラップ密度 D_{it} [$\text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$]と実効固定電荷密度 Q_{eff}/q [cm^{-2}]が性能の指標となる。 D_{it} 及び Q_{eff}/q は容量-電圧 (C-V) 測定から求めるのが一般的であり、測定には試料両面に電極を形成する必要がある。電極形成には蒸着法やスパッタ法が用いられているが、パッシベーション膜が非常に薄い場合や、アモルファスシリコンなど、いわゆる“ソフ

ト”な材料の場合には、電極形成によりダメージが入り、正確な測定を困難なものとする場合がある。また電極に関しては、従来の金属電極は光を透過しないため、太陽電池の動作時を模擬した状態での評価を行うことは困難である。そこで、“ダメージの少ない方法”で“光を透過する電極”を形成するために、ミスド CVD 法による酸化インジウム (InO_x) 透明導電膜の形成について検討を行った。

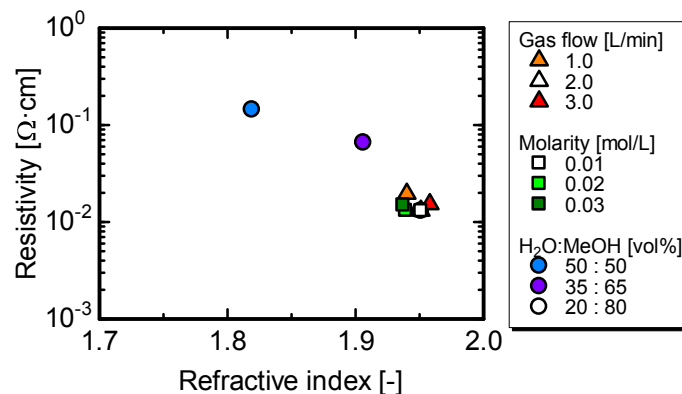
図III-2-(ニ)-A-38 に各操作パラメーターと膜屈折率の関係を示す。溶質濃度およびガス流量は膜屈折率にほとんど影響を与えておらず、膜屈折率は原料溶液の溶媒（水-アルコール比）に大きく依存し、溶媒中の水比率が高くなるに伴い膜屈折率が低下することがわかった。屈折率の違いと膜構造の関係を検討するために、膜屈折率が大きく異なる試料の赤外吸収スペクトルを比較した(図III-2-(ニ)-A-39)。その結果、溶媒中の水比率増加に伴い、吸収のピーク波数は増加していた。さらに溶媒中の水比率が高い(50:50)場合は吸収スペクトルの形状が異なっていた。そこで製膜温度より高温で熱処理を行い、熱処理前後の吸収スペクトルを比較したところ、水比率が高い(50:50)場合のみ吸収スペクトルが変化し、熱処理後の吸収スペクトルはその他の条件での吸収スペクトルの形状に近づいた。ピーク波数は 200 cm^{-1} 以上変化したにもかかわらず膜屈折率は殆ど変化しなかったことなどから、水比率が高い(50:50)場合は膜中に In-OH 結合が多く存在し、その後の熱処理により H が離脱し In-O 結合へと変化したものと考えられる。キャリアガスを変化させた実験結果などを合わせて検討した結果、 In の酸化反応は主として溶媒中の酸素を介し、水が多く含まれる場合は -OH が -O と同時に導入されたと考えられる。



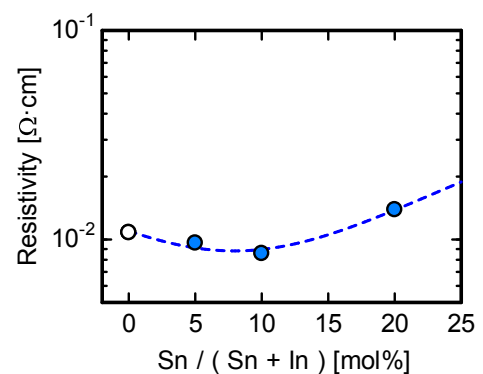
図III-2-(ニ)-A-38 各種操作パラメーターと膜屈折率の関係



図III-2-(ニ)-A-39 溶媒を変化させて製膜した InO_x 膜の赤外吸収スペクトル



図III-2-(ニ)-A-40 膜屈折率と抵抗率の関係



図III-2-(ニ)-A-41 溶液中の Sn 比率と抵抗率の関係

図III-2-(ニ)-A-40 に膜屈折率と抵抗率の関係を示す。膜屈折率が 1.9 付近から 1.95 にかけて急激に抵抗率が低下し、およそ $0.01 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ の抵抗率が得られた。これは C-V 測定用の電極としては十分な値であり、当初の目的、「低ダメージで光を透過する電極を形成する」ことに成功した。

より発展的な用途として、HIT 太陽電池に使用されている透明導電膜としての利用が考えられる。その場合、より抵抗率の低減が求められる。そこで製膜温度を変えずに低抵抗化の検討を

行ったが、変更可能な実験条件の範囲内では実現出来なかった。そこで原料溶液に Sn を加え、いわゆる ITO 膜の形成を行った。図Ⅲ-2-(ニ)-A-41 に溶液中の Sn 比率と抵抗率の関係を示す。溶液中の Sn 比率が 10 mol% の場合に最も低い抵抗率が得られたが、HIT 用の透明導電膜としては十分な値ではなかった。しかしミスト CVD 法は低コストな製膜法であるため、コストと効率のトレードオフによりミスト CVD 法で製膜を代替する可能性はあると考えられる。

2. 実用化・事業化見通し

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」(豊田工業大学)

豊田工業大学ではセル効率向上に取り組むとともに他機関の結晶成長技術開発・スライス加工技術開発・セルプロセス技術開発にも貢献している。既述のように、豊田工業大学におけるセルプロセス開発によるセル効率向上の成果は、モジュール製造コスト 1.5 円/W、発電コスト 0.7 円/kWh 低減に相当し、また株式会社トクヤマの結晶成長技術開発への貢献は、モジュール製造コスト 1.9 円/W、発電コスト 0.38 円/kWh 低減に相当する。さらに、コマツ NTC 株式会社のスライス加工技術開発への貢献では、モジュール製造コスト 6.8 円/W、発電コスト 0.5 円/kWh 低減に相当する成果をあげている。これらの他にも豊田工業大学・明治大学では連携先のセルメーカー、装置メーカー、材料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・情報を交換し、デバイス・シミュレーション等を活用した理論検討、パイロットライン設備を活用した試作検討、各種解析装置・手法を活用した評価・解析を、それら連携先メーカーと共同で行うことによってその研究開発の推進に貢献している。今後は、これらの開発成果がそれぞれのメーカーの製品やサービスに適用され、それらを通じて実用化・事業化されていく見込みである。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」(明治大学)

開発中の測定手法について、随時セルメーカーと情報共有を行なっている。すでに、セルメーカーからの試料提供を頂き測定結果のフィードバックを協議中である。またセルメーカー、装置メーカー、材料メーカーなど数社から試料提供を受け、現行のプロセスにおける不良解析および製品開発を共同で行なっている。詳細は NDA により公開できないものの、これらの開発成果がそれぞれのメーカーの製品やサービスに適用され、それらを通じて実用化・事業化されていく見込みである。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」(九州大学)

キャリアライフタイムの低下をもたらす結晶中不純物濃度の低減技術を、企業に現在移管中である。この濃度低減のために必要な炉内構造の改造を含めて、移管作業が進行中であり、終了した場合は、実用化に至る可能性がある。また、九州大学で育成した結晶を用いて、企業で太陽電池の作成を予定している。現在企業のセル作成装置が故障中であるために、修理終了後にウエハを用いて試作する。これについても、当該メーカーの製品を通じて九州大学の開発成果が事業化されていくものと見込まれる。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」(名古屋大学)

新規インゴット成長法の実用化サイズの検討実験に関して京セラ株式会社と技術討論を行った。これを通じて当該メーカーの事業へ貢献していく。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」(東京工業大学)

現在の研究は、将来を見据えた探索的なテーマであり、今のところ実用化・事業化の見通しは立っていないが、SiH₄ フリープロセスによるヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池作製プロセスの実現の可能性を示唆する結果が得られている。このプロセスはヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池の製造コスト低減の可能性を秘めているため、今後はデバイスレベルで本プロセスの有効性を示すことで、実用化の可能性を示していく。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」(兵庫県立大学)

現在の結晶シリコン太陽電池の大部分は Al-BSF 構造であるが、ITRPV ではより高いエネルギー変換効率が期待できる PERC 構造へと移行していくと予想している。Al-BSF 構造と PERC 構造の間で最も顕著な違いが裏面へのアルミナ(AI₂O₃)薄膜の導入である。現段階では AIO_x 薄膜は ALD 法により形成されているが、装置導入コストおよびランニングコストが高いという問題がある。本研究開発では、ALD 法に比べて大幅なコストダウンが可能な薄膜形成技術であるミスト CVD 法および LIA 援用反応

性スパッタ法により AlO_x 薄膜形成を試み、ALD 法で形成された AlO_x 薄膜と比較して、遜色のないレベルの AlO_x 薄膜形成にラボレベルで成功している。現在、国内セルメーカーと連携して、生産レベルでの検証を開始しており、良好な結果が得られれば数年以内での実用化・事業化につながると見通している。

3. 波及効果

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」(豊田工業大学)

上述のように、豊田工業大学・明治大学の開発成果はトータルでモジュール製造コスト 10.2 円/W、発電コスト 1.58 円/kWh 低減に相当すると見積もられるが、さらなるセルプロセス技術開発の進展や、詳述していない連携先メーカーの製品・サービスを通じて研究開発成果が実用化・事業化されていくことにより、モジュール製造コストおよび発電コストのより一層の低減に寄与するものと考えられる。さらに、2030 年を見据えて取り組んでいる、Passivated Contact あるいは CSC と言われる新規ヘテロ接合技術を世界に先駆けて開発し、関連する日本企業の研究開発を主導していくことによって、日本の結晶シリコン太陽電池技術および産業の国際競争力を高めていく。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」(明治大学)

前項で述べたセルメーカーへの解析を通してデバイス特性およびプロセスの改善に貢献する。それによって世界における日本のプレゼンスを確保することができると考えられる。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」(九州大学)

九州大学が提案している不純物低減法を実際の生産炉に展開する可能性がある。以前、本法を用いて結晶を作成したところ、セル変換効率が 17%から 19%に向上しているため、生産レベルでの変換効率の向上が期待できる。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」(名古屋大学)

九州大学および株式会社トクヤマが結晶成長したインゴットから作製したウエハに対して、a-Si:H 成膜によるライフタイム評価を行うことによって、これらのウエハおよびインゴットが高品質であることを確認した。これにより Si インゴット成長へのフィードバックが可能になり、さらなるヘテロ接合型太陽電池用の高品質インゴット成長が可能となる。また、新規ヘテロ材料の高い透過率と電気導電率を有していることを確認できたため、それらを用いた太陽電池の性能向上を示すことで、従来のドーパ層 a-Si:H に置き換わる可能性が示唆される。さらに、Excel の i-Voc マッピング用のマクロ (PassiVis) を開発したため、ハードウェアを有していれば素早いパッシベーション性能の視覚化評価が可能になり、より研究開発の速度が向上することが予測される。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」(東京工業大学)

ライフタイムの温度依存性評価により、アモルファスシリコン/結晶シリコン界面のバンドオフセットの情報を簡便に評価可能であることを確認した。この手法は新しい電子選択および正孔選択コンタクトの評価にも使用できるため、新材料/結晶シリコン界面の評価を詳細に行うことが可能になる。また、 $\text{Cu}_2\text{O}:\text{N}$ を用いたヘテロ接合型太陽電池の動作を確認しており、スパッタ法による新規ヘテロ接合材料の可能性を示すことができた。さらに、対向ターゲットスパッタ法を用いたアモルファスシリコンパッシベーション膜の形成において、プラズマ CVD に迫る特性が得られている。この結果は、 SiH_4 フリープロセスによるヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池の作製の可能性を示すものである。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」(兵庫県立大学)

ミス CVD 法および LIA 援用反応性スパッタ法は、 AlO_x 薄膜のみならず、様々な金属酸化膜の形成に対応可能である。そのため、既存薄膜形成プロセスをこれらの手法に置き換えることにより、さらなる製造コスト削減につながる可能性がある。

4. 今後の展開

「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」(豊田工業大学)

引き続き PERC、PERT など拡散系セルの技術開発を推進し、関連する企業とも緊密に連携することによって、それらの研究開発を支援するとともに、それらの実用化・事業化に貢献していく。それと並行してバンドギャップ・仕事関数(ワークファンクション)エンジニアリング技術開発を加速し、アモルファスシリコン以外の異種材料を用いた新規ヘテロ接合太陽電池を開発して、(1) 最低限の

プロセス・ステップ数、(2) 低価格かつ高スループットの生産設備、(3) 幅広いプロセス温度、(4) 広いプロセスウインドウ、などを特徴とするセル製造プロセスを早期に実現する。これにより、高効率と高生産性・低コストを両立できる新規ヘテロ接合太陽電池プロセスを共通基盤技術として確立し、関連する企業の研究開発を主導していく。

「材料・プロセス評価基盤技術に関する研究開発」(明治大学)

高品質化材料を用いたデバイス実証、新規測定手法のデータの蓄積と方式の確立、科学的基盤に基づくプロセスの開発支援を行なっていく。

「高品質・低コスト結晶成長技術に関する研究」(九州大学)

今後も、本方法を実際の生産炉へ展開するための技術移管を継続していく。

「新規ヘテロ接合用材料に関する研究」(名古屋大学)

PECVD による a-Si:H のさらなる高品質化により、インゴットメーカーが成長したウエハのバルクライフタイムの評価を行っていく。それにより将来的には名古屋大学が標準ヘテロ接合型 Si 太陽電池作製の拠点となっていく。また、高いパッシベーション性能を示す a-SiO_x:H による寄生吸収の少ない膜の技術開発を行い、セルメーカーの研究開発、製品化に寄与する。さらに、ヘテロ接合型太陽電池用の低温硬化型新規電極用ペースト開発のための試料を提供することによって電極材料メーカーの事業に貢献する。あわせて、新規ヘテロ接合材料の太陽電池性能を向上し、標準ヘテロ接合型 Si 太陽電池に代わる新型太陽電池の実現に貢献していく。本研究によって開発された i-Voc イメージングの評価試料数を増し、Excel マクロ (PassiVis) を改善することによって、パッシベーション性能の視覚化評価環境をさらに向上させる。

「アモルファス・結晶界面における構造及び電気的特性に関する研究」(東京工業大学)

ライフタイムの温度依存性評価を新規ヘテロ接合材料の評価に適用していく。また、正孔選択コンタクト材料候補である Cu₂O:N を用いた太陽電池の試作を進め、そのポテンシャルを明らかにする。また、銅系材料を用いた場合の問題点である銅の拡散に関する詳細な評価を行う。また、対向ターゲットスパッタ法によるアモルファスシリコンパッシベーション層、Cu₂O:N 層および SiH₄ フリープロセスによる電子選択コンタクト層を組み合わせることにより、完全に SiH₄ フリープロセスでのヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池の可能性を追求する。

「低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究」(兵庫県立大学)

現在の研究開発は PERC 構造の AlO_x 薄膜を中心として実施しているが、上述したように、様々な金属酸化膜形成が可能であり、かつ、LIA 援用反応性スパッタ法の場合は金属/酸素比率も制御可能という特徴があるため、バンドエンジニアリングを駆使した新規太陽電池構造への展開につながるものと考えている。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	0	1	1 件
論文	19	19	9	47 件
研究発表・講演（うち国際会議）	107(50)	117(53)	14(13)	238 件
新聞・雑誌等への掲載	7	0	0	7 件
受賞実績	1	6	3	10 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	学校法人明治大学	特願 2017- 13609	国内	2017/1/27	出願中	炭素濃度測定方法及び炭素濃度測定装置	田島道夫, 小椋厚志

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Xin Liu, Bing Gao, Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical investigation of carbon contamination during the melting process of Czochralski silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth 417(2015)58-64	有	2015/5
2	Y. Miyamura ^{1,2} , H. Harada ^{1,3} , K. Jiptner ¹ , S. Nakano ³ , B. Gao ³ , K. Kakimoto ³ , K. Nakamura ⁴ , Y. Ohshita ⁵ , A. Ogura ⁴ , S. Sugawara ⁶ , and T. Sekiguchi ^{1,2}	1, MANA Nanoelectronic Materials Unit, National Institute for Materials Science 2, Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba 3, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 4, Meiji University 5, Toyota Technological Institute 6, Kyocera Corporation	Advantage in solar cell efficiency of high-quality seed cast mono Si ingot	Applied Physics Express 8, 062301 (2015)	有	2015/5

3	T. Sekiguchi*, 1, 2, K. Jiptner1, Ronit R. Prakash1, 2, J. Chen1, Y. Miyamura1, H. Haradal, S. Nakano3, B. Gao3, and K. Kakimoto3	1, MANA Nanoelectronic Materials Unit, National Institute for Materials Science 2, Doctoral Program for Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba 3, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Control of extended defects in cast and seed cast Si ingots for photovoltaic application	Phys. Status Solidi C 12, No. 8, 1094-1098 (2015)	有	2015/5
4	T. Kamioka, D. Takai, T. Tachibana, T. Kojima, Y. Ohshita,	Toyota Technological Institute	"Plasma damage effect on ultraviolet-induced degradation of PECVD SiNx:H passivation"	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-42)	無	2015/6
5	Tomihisa Tachibana, Takuto Kojima, Daisuke Takai, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Recombination lifetime estimation at crystalline defects layer induced by SiNx deposition using plasma CVD	42th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-42)	無	2015/6
6	T. Kamioka, Y. Hayashi, K. Nakamura and Y. Ohshita,	Toyota Technological Institute	"Simulation of interdigitated back-contact silicon heterojunction solar cells with quantum transport model"	Jpn. J. Appl. Phys. vol. 54, 08KD07	有	2015/7
7	Ken Mishina Atsufumi Ogishi Kiyoshi Ueno Sachiko Jonai Norihiro Ikeno Tetsuya Saruwatari Kohjiro Hara Atsushi Ogura Toshiharu Yamazaki Takuya Doi Makoto Shinohara Atsushi Masuda	Shimadzu Corporation Shimadzu Corporation Choshu Industry Co., Ltd. AIST Meiji University Shimadzu Corporation AIST Meiji University Choshu Industry Co., Ltd. AIST Shimadzu Corporation AIST	Plasma-enhanced chemical-vapor deposition of silicon nitride film for high resistance to potential-induced degradation	Jpn. J. Appl Phys. 54, 08KD12	有	2015/7

8	Yoshihiro Yamashita Norihiro Ikeno Tomihisa Tachibana Yoshio Ohshita Atsushi Ogura	Meiji University Meiji University Toyota Technological Institute Toyota Technological Institute Meiji University	X-ray evaluation of electronic and chemical properties and film structures in SiN passivation layer on crystalline Si solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KD14	有	2015/7
9	C. T. Trinh, Y. Nakagawa, K. O. Hara, R. Takabe, T. Suemasu, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University, Tsukuba University	Photoresponse properties of BaSi ₂ film grown on Si (100) by vacuum evaporation .	Materials Research Express 3, 076204	有	2015/7
10	Norihiro Ikeno Yoshihiro Yamashita Hiroshi Oji Shohei Miki Koji Arafune Haruhiko Yoshida Shin-ichi Satoh Ichiro Hirosawa Toyohiro Chikyow Atsushi Ogura	Meiji University, Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science Meiji University Japan Synchrotron Radiation Research Institute University of Hyogo University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST Japan Synchrotron Radiation Research Institute National Institute for Materials Science Meiji University, JST-CREST	Relationship between passivation properties and band alignment in O ₃ -based atomic-layer-deposited AlO _x on crystalline Si for photovoltaic applications	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KD17	有	2015/7
11	Hyunju Lee Keigo Ueda Yuya Enomoto Koji Arafune Haruhiko Yoshida Shin-ichi Satoh Toyohiro Chikyow Atsushi Ogura	Meiji University, JST-CREST University of Hyogo University of Hyogo University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST National Institute	Surface passivation of crystalline silicon by sputtered AlO _x /AlN _x stacks toward low-cost high-efficiency silicon solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 54, 08KD19	有	2015/7

		for Materials Science Meiji University				
12	Shohei Miki Koji Iguchi Sho Kitano Koki Hayakashi Yasushi Hotta Haruhiko Yoshida Atsushi Ogura Shin-ichi Satoh Koji Arafune	University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo University of Hyogo University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST Meiji University, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST	Passivation properties of aluminum oxide films deposited by mist chemical vapor deposition for solar cell applications	Jpn. J. Appl Phys. 54, 08KD25	有	2015/7
13	T. Hiramatsu, I. Takahashi, S. Matsushima, and N. Usami	Nagoya University	Growth direction control of dendrite crystals in parallel direction to realize high-quality multicrystalline silicon ingot	Jpn. J. Appl. Phys. 55, 091302	有	2015/8
14	I. Takahashi, S. Joonwichien, T. Iwata, and N. Usami	Nagoya University	Seed manipulation for artificially controlled defect technique in new growth method for quasi-monocrystalline Si ingot based on casting	Appl. Phys. Exp. 8, 105501	有	2015/9
15	Gao ¹ , S. Nakan ¹ , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1 Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University 2 National Institute for Materials Science	Single-Seed Casting Large-Size Monocrystalline Silicon for High-Efficiency and Low-Cost Solar Cells	Engineering , 2015, Vol. 1 Issue (3) : 378 -383	有	2015/9
16	Takashi Sekiguchi ¹ , Yoshiji Miyamura ^{1, 2, 3} , b, Hirofumi Harada ^{1, 3} Karolin	1, WPI Center for Materials Nanoarchitectonics (MANA), National Institute for Materials Science 2, Graduate School	50cm size Seed Cast Si ingot growth and its characterization	Solid State Phenomena Vol. 242 (2016) pp 30-34	有	2015/10

	Jiptner1, Jun Chen1, Ronit R. Prakash1, 2, Satoshi Nakano3, Bing Gao3, and Koichi Kakimoto3	of Pure & Applied Sciences, Univ. Tsukuba 3, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University				
17	Mitsuhiro Matsumoto1, Hirofumi Harada2, Koichi Kakimoto2, and Jiwang Yan1	1, Department of Mechanical Engineering, Keio University 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Study on Mechanical Properties of Single-Crystal Silicon Carbide by Nanoindentation	Advanced Materials Research 1136, 549- 554	有	2016/1
18	Erick Omondi Ateto Makoto Konagai Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Triple Layer Antireflection Design Concept for the Front Side of c- Si Heterojunction Solar Cell Based on the Antireflective Effect of nc-3C- SiC:H Emitter Layer	International Journal of Photoenergy (Vol. 2016, 5282851)	有	2016/2
19	Masahiro Inaba Soichiro Todoroki Kazuyoshi Nakada Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Temperature- dependent minority carrier lifetime of crystalline silicon wafers passivated by high quality amorphous silicon oxide	Japanese Journal of Applied Physics (Vol. 55, 04ES04)	有	2016/3
20	K. Kakimoto, B. Gao, Xin Liu, Satoshi Nakano	Kyushu University	Growth of semiconductor silicon crystals	Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 62 (2016) 273-285	有	2016/5
21	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Efficiency improvement by charged-insulator layers for IBC-SHJ cells	Energy Procedia (Vol. 1.92 pp. 96-102)	有	2016/8
22	Mari Aoki, Takayuki Aoyama, Isao Sumita, Yasushi Yoshino, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	A Study on the Evaluation Method of Glass Frit Paste for Crystalline Silicon Solar Cells	Proceedings of the 43th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC43)	無	2016/8

23	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Excellent Surface Passivation of Crystalline Silicon by Ternary Al _x Mg _{1-x} O _y Thin Films	Proceedings of the 43th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC43)	無	2016/8
24	Kuniyuki Sato, Atsushi Ogura, and Haruhiko Ono	Meiji University Meiji University Kanagawa Industrial Technology Center, Meiji University	Electrically active light-element complexes in silicon crystals grown by cast method	Jpn. J. Appl Phys. 55, 095502	有	2016/8
25	Tomihisa Tachibana ^a , Daisuke Takai ^b , Takuto Kojima ^b , Takefumi Kamioka ^b , Atsushi Ogura ^c and Yoshio Ohshita ^b	aAIST FREA, bToyota Technological Institute, cMeiji University	Minority Carrier Recombination Properties of Crystalline Defect on Silicon Surface Induced by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition	ECS J. Solid State Sci. Technol. 5 (9) Q253	有	2016/8
26	H. Ichikawa, I. Takahashi, N. Usami, K. Shirasawa, and H. Takato	Nagoya University, Fukushima Renewable Energy Institute, National Institute of Advanced Sciences and Technology	Light-induced recovery of effective carrier lifetime in boron- doped Czochralski silicon at room temperature	Energy Procedia 92 (2016) 801- 807	有	2016/8
27	Hyunju Lee, Fumiya Nishimura, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Haruhiko Yoshida, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Doped Dielectric Nanolayers for Advanced Surface Passivation of Silicon Solar Cells	Proceedings of the 26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	無	2016/8
28	Xin Liu, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	Kyushu University	Effect of the packing structure of silicon chunks on the melting process and carbon reduction in Czochralski silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth 468 (2017)595- 600	有	2016/9

29	Yasushi Hotta, Satoshi Ueoka, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Atsushi Ogura, Shin-ichi Satoh	兵庫県立大学	Room temperature formation of Hf- silicate layer by pulsed laser deposition with Hf- Si-O ternary reaction control	AIP ADVANCES, 6, 105303 (2016)	有	2016/10
30	Xin Liu, Satoshi Nakano, and Koichi Kakimoto	Kyushu University	Development of carbon transport and modeling in Czochralski silicon crystal growth	Cryst. Res. Technol., 1-11 (2016)	有	2016/10
31	Shota Taniwaki, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Atsushi Ogura, Shin-ichi Satoh, Yasushi Hotta	兵庫県立大学	Correlation between chemical-bonding states and fixed- charge states of Sr- silicate film on Si(100) substrate	Journal of Vacuum Science & Technology A, 34, 061506 (2016)	有	2016/11
32	Y. Hayama, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Controlling impurity distributions in crystalline Si for solar cells by using artificial designed defects	Journal of Crystal Growth 468, 625-629	有	2016/12
33	Karolin Jiptner ^{1,2} , Yoshiji Miyamura ^{2,3} , Hirofumi Harada ^{2,3} , Bing Gao ³ , Koichi Kakimoto ³ and Takashi Sekiguchi ²	1, WPI Center for Materials Nanoarchitectonics , International Center for Young Scientists 2, National Institute for Materials Science 3, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Dislocation behavior in seed-cast grown Si ingots based on crystallographic orientation	Progress in Photovoltaics: Research and Application s Volume 24, Issue 12 December 2016 Pages 1513- 1522	有	2016/12
34	J. A. Wibowo, I. Takahashi, K. O. Hara, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Realization of Crystalline BaSi ₂ Thin Films by Vacuum Evaporation on (111)-oriented Si Layers Fabricated by Aluminum Induced Crystallization	JJAP Conf. Proc. 5, 11201	無	2017
35	B. Gallien ^{a,b} , M. Albaric ^b , T. Duffar ^{a,n} , K. Kakimoto ^c , M. M' Hamdi ^d	^a , SIMAP-EPM ^b , INES, CEA, LITEN, Solar Technologies Department ^c , RIAM, KyushuUniversity	Study on the usage of a commercial software (Comsol- Multiphysics®) for dislocation multiplication model	Journal of Crystal Growth 457(2017)60 -64	有	2017/1

		d, Dep. Mat. Sci. Eng., NTNU				
36	Koichi Kakimoto, Bing Gao, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, and Yoshiji Miyamura	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Silicon bulk growth for solar cells: Science and technology	Japanese Journal of Applied Physics 56 (2), 020101	有	2017/1
37	S Nakano, B Gao, K Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical analysis of dislocation density and residual stress in a GaN single crystal during the cooling process	Journal of Crystal Growth 468 (2017)839-844	有	2017/1
38	Michio Tajima, Hirotatsu Kiuchi, Fumito Higuchi and Atsushi Ogura	Meiji University	Quantification of C in Si by photoluminescence at liquid N temperature after electron irradiation	Appl. Phys. Express 10, 046602	有	2017/3
39	Tomihisa Tachibana ¹ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Ogura ² , Yoshio Ohshita ³ , Takafumi Shimoda ⁴ , Isao Masada ⁴ , and Eiichi Nishijima ⁴	¹ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Fukushima Renewable Energy Institute, AIST (FREA), Koriyama 963-0298, Japan ² Meiji University, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan ³ Toyota Technological Institute, Nagoya 468-8511, Japan ⁴ Tokuyama Corporation, Yamaguchi 745-8648, Japan	Effects of thermal budget in n-type bifacial solar cell fabrication processes on effective lifetime of crystalline silicon	AIP Advances 7, 045111	有	2017/4
40	K. Takahashi, Y. Nakagawa, K. O. Hara, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Investigation of p-type emitter layer materials for heterojunction barium disilicide thin film solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 05DB05	有	2017/4

41	Yoshio Ohshita, Takefumi Kamioka, Kyotaro Nakamura	Toyota Technological Institute, Meiji University	Technology Trend of High Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells	Association of Asia Pacific Physical Societies Vol. 27 No. 3	有	2017/6
42	Takefumi Kamioka, Satoshi Kameyama, Kazuo Muramatsu, Aki Tanaka, Naotaka Iwata, Kyotaro Nakamura, Atsushi Ogura, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University, NAMICS	Carrier Transportation at Novel Silver Paste Contact	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	無	2017/6
43	Hirotatsu Kiuchil, Michio Tajimal, Fumito Higuchil, Atsushi Ogural, Nobuhito Iida2, Shoji Tachibana2, Isao Masada2 and Eiichi Nishijima2	1 Meiji University, Kawasaki 214-8571, Japan 2 Tokuyama Corporation, Shunan, Yamaguchi 745-8648, Japan	Determination of low carbon concentration in Czochralski-grown Si crystals for solar cells by luminescence activation using electron irradiation	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 070305	有	2017/6
44	Shota Taniwaki, Keiji Imanishi, Mitsuhiro Umano, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Atsushi Ogura, Shin-ichi Satoh, Yasushi Hotta	兵庫県立大学	Investigation of the static electric field effect of strontium silicate layers on silicon substrates	J. Appl. Phys., 121, 225302 (2017)	有	2017/6
45	T. Iwata, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Effects of grain boundary structure controlled by artificially designed seeds on dislocation generation	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 75501	有	2017/6
46	K. Gotoh, M. Cui, N. C. Thanh, K. Koyama, I. Takahashi, Y. Kurokawa, H. Matsumura, and N. Usami	Nagoya University, Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST)	Fabrication of CuI/a-Si:H/c-Si Structure for Application to Hole-selective Contacts of Heterojunction Si Solar Cells	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	無	2017/6

47	S. Masuda, K. Gotoh, I. Takahashi, K. Nakamura, Y. Ohshita, and N. Usami	Nagoya University, Meiji University, Toyota Technological Institute, Meiji University	Solar Cells Application of p-type poly-Si Thin Film by Aluminum Induced Crystallization	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	無	2017/6
----	--	---	---	---	---	--------

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	B. Gaol, K. Jiptner ² , S. Nakanol, H. Harada ² , Y. Miyamura ² , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	One-seed casting large-size monocrystalline silicon for high-efficiency and low-cost solar cells	8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2015/5/7
2	K Nakagawa Michio Tajima Hiroyuki Toyota Atsushi Ogura	Meiji University, ISAS/JAXA Meiji University, ISAS/JAXA ISAS/JAXA Meiji University	Systematic change of photoluminescence spectra in highly doped Si	8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells (CSSC-8)	2015/5/8
3	S. Nakanol, B. Gaol, H. Harada ² , Y. Miyamura ² , K. Jiptner ² , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	Numerical investigation of the relationship between the crystal growth method and dislocation density in multicrystalline silicon for solar cells	8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2015/5/8
4	I. Takahashi, T. Iwata, S. Joonwichien, and N. Usami	Nagoya University	Seed Manipulation for Artificially controlled defects Technique (SMART) as a new growth method for high-quality mono-like silicon crystals	8th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells	2015/5/8
5	ト部駿介, 清水一希 Ateto Eric Omondi, 宮島晋介	東京工業大学	太陽電池裏面のレーザーポイントコンタクト部の特性解析	第12回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2015/5/28

6	高橋勲、岩田 大将、宇佐美 徳隆	名古屋大学	SMART (Seed Manipulation for ARtificiallycontrol led defects Technique)法による 新規モノライクシリ コンの結晶成長	第12回「次世代 の太陽光発電シ ステム」シンポ ジウム	2015/5/29
7	稲葉真宏、轟宗 一郎 中田和吉、宮島 晋介	東京工業大学	温度可変 QSSPC 法に よる結晶シリコンの パッシベーション膜 評価	第12回「次世 代の太陽光発電 システム」シン ポジウム	2015/5/29
8	T. Kamioka, D. Takai, T. Tachibana, T. Kojima, Y. Ohshita,	Toyota Technological Institute	"Plasma damage effect on ultraviolet-induced degradation of PECVD SiNx:H passivation"	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-42)	2015/6/14
9	Tomihisa Tachibana, Takuto Kojima, Daisuke Takai, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Recombination lifetime estimation at crystalline defects layer induced by SiNx deposition using plasma CVD	42th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-42)	2015/6/16
10	Yoshihiro amashita Norihiko Ikeno Nagisa Aizawa Tomihisa achibana Yoshio Ohshita Atsushi Ogura	Meiji University Meiji University, Research Fellow of JSPS Meiji University AIST-FREA Toyota Technological Institute Meiji University	Raman Spectroscopy Study of Crystalline Damage Induced by PECVD SiN	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/6/16
11	K. Nakamura K. Okamoto Y. Kawamoto Y. Yoshino Y. Ohshita	Meiji University MITSUBOSHI DIAMOND INDUSTRIAL CO., LTD, NORITAKE CO., LIMITED NORITAKE CO., LIMITED Toyota Technological Institute	SiO ₂ /SiNx Stacking Layer for Rear Surface Passivation of PERC	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015/6/16
12	大下祥雄、 神岡武文、 中村京太郎	豊田工業大学、明治 大学	結晶シリコン太陽電 池の最近の動向	第12回 Cat-CVD 研究会	2015/7/4

13	中村京太郎	明治大学	結晶シリコンセルの 技術開発動向 ~ 次世 代高効率セルにおけ る劣化現象 ~	学振 175 委員会 モジュール・シ ステム分科会・ 次世代シリコン 太陽電池分科会 合同研究会	2015/7/22
14	D. Takai, T. Kamioka, T. Kojima, T. Tachibana, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	"Plasma damage Effects on light- induced degradation of PECVD SiNx:H Passivation quality,"	Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2015/7/26- 29
15	R. Suzuki N. Ikeno T. Tachibana Y. Ohshita A. Ogura	Meiji University Meiji University, Research Fellow of JSPS AIST-FREA Toyota Technological Institute Meiji University	Evaluations of Carrier Recombination at Small Angle Grain Boundaries with Metal Contamination in n-type Multicrystalline Silicon by PL Imaging	25th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2015/7/27
16	B. Gao, S. Nakano, K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS OF DISLOCATION MULTIPLICATION IN SINGLE-CRYSTAL SILICON UNDER ACCURATE CONTROL OF COOLING HISTORY OF TEMPERATURE	ACCGE-20/OMVPE- 17	2015/8/5
17	B. Gao ¹ , S. Nakano ¹ , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , T. Sekiguchi ² , K. Kakimoto ¹	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	ONE-SEED CASTING LARGE-SIZE MONOCRYSTALLINE SILICON FOR HIGH- EFFICIENCY AND LOW- COST SOLAR CELLS	ACCGE-20/OMVPE- 17	2015/8/6
18	Takuto Kojima, Yoshio Ohshita, Masafumi Yamaguchi	Toyota Technological Institute	Annealing effects on recombinative activity of nickel at direct silicon bonded interface	AIP Advances	2015/9/1

19	B. Gallien1, M. Albaric1, J.P. Garandet2 Thierry Duffar1, K. Kakimoto3, M. M' Hamdi4	1, Grenoble Institute of Technology 2, CEA 3, RIAM, Kyushu University 4, NTNU	Study on the usage of a commercial software (Comsol multiphysics) for dislocation multiplication model	5th European Conference on Crystal Growth	2015/9/10
20	Satoshi Nakanol, Bing Gaol, Karolin Jiptner2, Hirofumi Harada2, Yoshiji Miyamura2, Takashi Sekiguchi2, Masayuki Fukuzawa3and Koichi Kakimoto1	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS 3, Kyoto Institute of Technology	Numerical analysis of dislocation density in multicrystalline silicon for solar cells using experimental verification	5th European Conference on Crystal Growth	2015/9/10
21	筋原康博、Sergii Tutashkonko、高橋勲、宇佐美德隆	名古屋大学	Al 誘起成長における a-Si 層の厚膜化が poly-Si の成長メカニズムに及ぼす影響	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/13-16
22	神岡 武文, 林豊, 中村 京太郎, 大下 祥雄	豊田工業大学、明治大学	“電極の仕事関数を制御した MIS 型セルのシミュレーション”	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/13
23	Xin Liul, Bing Gaol, Satoshi Nakanol, Hirofumi Harada1, Yoshiji Miyamura1, Koichi Kakimoto1	1, RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analysis of SiC and SiO ₂ deposition processes by gas-solid interaction in Czochralski silicon crystal growth	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/13
24	T. Tachibana Y. Ohshita N. Ikeno A. Ogura	AIST-FREA Toyota Technological Institute Meiji University, Research Fellow of JSPS Meiji University	The Effects of Annealing Processes on Effective Lifetime in n-Type Crystalline Silicon	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/14

25	T. Aoyama Y. Yoshino N. Sawamoto A. Ogura	NORITAKE CO., LIMITED, Meiji University NORITAKE CO., LIMITED Meiji University Meiji University	Impact of Glass Frit in Ag/Al Paste on Electrical Properties of Bifacial N-Type Crystalline Silicon Solar Cells	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/14
26	山田 郁彦、須 田 耕平、神岡 武文、中村 京 太郎、小椋 厚 志、大下 祥 雄、神谷 格	豊田工業大学、明治 大学	結晶 Si 太陽電池の断 面仕事関数測定に適 した観察面研磨手法 の検討	第 76 回応用物理 学会秋季学術講 演会	2015/9/15
27	宇野 匠 1,2、 小椋 厚志 1、 小野 春彦 2,1	1. 明治大、2. 神奈川 県産技セ	多結晶シリコン中の 粒界上に形成された 酸素・窒素析出物	第 76 回応用物理 学会秋季学術講 演会 (名古屋国 際会議場)	2015/9/15
28	鈴木 涼太 1、 池野 成裕 1,2、立花 福 久 3,4、大下 祥雄 3、小椋 厚志 1	1. 明治大学、2. 学振 特別研究員 DC、3. 豊田工大、4. 産総研 福島	PL イメージングによ る n 型多結晶 Si 中 の小角粒界における キャリア再結合と金 属不純物の影響評価	第 76 回応用物理 学会秋季学術講 演会 (名古屋国 際会議場)	2015/9/15
29	山田 郁彦 1、 須田 耕平 2、 神岡 武文 1、 中村 京太郎 2、小椋 厚志 2、大下 祥雄 1、神谷 格 1	1. 豊田工大、2. 明治 大	結晶 Si 太陽電池の断 面仕事関数測定に適 した観察面研磨手法 の検討	第 76 回応用物理 学会秋季学術講 演会 (名古屋国 際会議場)	2015/9/15
30	Y. Yamashita N. Ikeno Meiji T. Katsumata K. Kurishima R. Imai Y. Suzuki A. Ogura H. Oji I. Hirosawa T. Tachibana Y. Ohshita,	Meiji University University, Research Fellow of JSPS Meiji University Meiji University Meiji University Meiji University Meiji University Japan Synchrotron Radiation Research Institute Japan Synchrotron Radiation Research Institute AIST-FREA Toyota Technological Institute	Detail Study on Electronic Bonding States on SiN Passivation Film and Interface for Si Solar Cell Applications	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/15

31	中野 智 1、高冰 1、Jiptner Karolin2、原田 博文 2、宮村 佳児 2、関口 隆史 2、福澤 理行 3、柿本 浩一 1	1. 九大応力研 2. 物質・材料研究機構 3. 京都工繊大	太陽電池用多結晶 Si 育成時における 3 次元転位密度・残留応力解析の評価	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/15
32	高 冰、中野智、原田 博文、宮村 佳児、柿本 浩一	九大応力研	シリコン単結晶成長における転位密度低減に対する結晶成長方位の役割	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/15
33	高橋勲、岩田大将、市川寛章、宇佐美德隆	名古屋大学	SMART (Seed Manipulation for ARTificially controlled defects Technique)法を用いたモノライクシリコンの結晶成長	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/15
34	岩田大将、高橋勲、宇佐美德隆	名古屋大学	$\Sigma 3$ 粒界からの微小角度ズレと融液成長過程における欠陥発生	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/15
35	黄雅テイ、星裕介、高橋勲、宇佐美德隆	名古屋大学	ホスフィンを利用した Si 基板中への P ドーピングによる電界効果パッシベーションの検討	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/15
36	稲葉 真宏、宮島晋介	東京工業大学	a-Si _{1-x} O _x :H パッシベーション膜を堆積させた結晶シリコンの実効ライフタイムの温度依存性	第 76 回 応用物理学会秋季学術講演会 (15p-2S-3)	2015/9/15
37	卜部 駿介、Ateto Eric Omondi、宮島晋介	東京工業大学	太陽電池裏面レーザーポイントコンタクトの最適化	第 76 回 応用物理学会秋季学術講演会 (15p-2S-11)	2015/9/15
38	Akira Faris, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Optimization of a-Si (i) Passivation Layer Fabricated by Facing Target Sputtering (FTS) Method	第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会 (15p-P13-10)	2015/9/15
39	N. Ikeno, Y. Yamashita A. Ogura T. Chikyow	Meiji University, Research Fellow of JSPS Meiji University Meiji University NIMS	Interface States Observation between Atomic Layer Deposited AlO _x Layer and Si by Photoelectron Spectroscopy	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/16

40	K. Nakamura T. Takahashi Y. Ohshita	Meiji University NAMICS Corporation Toyota Technological Institute	Novel Silver and Copper Pastes for N-type Bi-Facial PERT Cell	2015 European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/17
41	Bing Gao	RIAM, Kyushu University	The role of numerical simulation in growing high quality and large size crystals in silicon	第39回結晶成 長討論会	2015/9/25
42	N. Ikeno Meiji T. Katsumata H. Yoshida K. Arafune S. Satoh T. Chikyow A. Ogura	Meiji University University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST NIMS Meiji University	Investigation of New Stacking Surface Passivation Structures with Interfacial Tuning Layers on p-type Crystalline Silicon for Solar Cell Applications	International Conference on Solid State Devices and Materials	2015/9/30
43	Masahiro Inaba Soichiro Todoroki Kazuyoshi Nakada Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Temperature- dependent minority carrier lifetime of crystalline silicon wafers passivated by high quality amorphous silicon oxide	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (C-7- 3)	2015/9/30
44	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Crystalline Silicon Solar Cell R&D - higher conversion efficiency and lower cost	Association for Research on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules Workshop 2015	2015/10/15
45	K. Nakamura	Meiji University	Recent Developments of Silicon Heterojunction Solar Cells in Japan	15th Chinese Photovoltaic Conference, (招 待講演)	2015/10/15
46	高冰, 中野 智, 原田博 文, 宮村佳 児, 柿本浩一	九大・応力研	シリコン単結晶成長 における転位密度低 減に対する結晶成長 方位の役割	第45回結晶成長 国内会議	2015/10/20
47	中野智 1, 高冰 1, Karolin Jiptner2, 原 田博文 2, 宮村 佳児 2, 関口隆 史 2, 福澤理行 3, 柿本浩一 1	1. 九大・応力研, 2. 物材機構, 3. 京都工繊大	太陽電池用多結晶シ リコン育成時におけ る三次元転位密度・ 残留応力の数値解析 および実験的評価	第45回結晶成長 国内会議	2015/10/20

48	Xin Liu, Bing Gao, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Reduction of Carbon Contamination during the Melting Process of Czochralski Silicon Crystal Growth	第45回結晶成長国内会議	2015/10/20
49	大下祥雄	豊田工業大学	豊田工大におけるセル・モジュール工程の紹介	平成27年度第1回PVTEC戦略企画部会	2015/10/22
50	Yoshio Ohshita, Takefumi Kamioka, Lee Hyunju, Kyotaro Nakamura, Atsushi Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University	High efficiency and low cost crystalline silicon solar cells	The 14th International Union of Materials Research Societies- International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2015)	2015/10/26
51	中村京太郎	明治大学	極限シリコン結晶太陽電池の研究開発	平成27年度NEDO新エネルギー成果報告会(ポスター, 予稿集)	2015/10/28
52	Isao Takahashi, Noritaka Usami	Nagoya University	Growth of Silicon Bulk Crystals for solar cells	The first International Workshop on Advanced Nanomaterials for Future Electron Devices 2015	2015/11/7-8
53	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Mari Aoki, Tomohiro Fujii, Koji Arafune, Haruhiko Yoshida, Naomi Sawamoto, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Impact of light illumination on surface passivation of crystalline silicon by SiNx:H capped oxide layers	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC25)	2015/11/15

54	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Crystalline Silicon Solar Cells	The 25 Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25 & GPVC-2015)	2015/11/15
55	Y. Sujihara, S. Tutashkonko, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Growth of thick polycrystalline silicon layer by aluminum-induced crystallization	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition Global Photovoltaic Conference 2015	2015/11/16
56	Yoshio Ohshita, Kyotaro Nakamura, Atushi Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University	High-efficiency and low-cost crystalline silicon solar cell R&D by universities' network of intelligent technologies	The 25 Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25 & GPVC-2015)	2015/11/16
57	S. Nakanol, B. Gaol, K. Jiptner ² , H. Harada, Y. Miyamural, T. Sekiguch ² , M. Fukuzawa ³ , K. Kakimotol	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS 3, Kyoto Institute of Technology	Numerical Analysis of Relationship between Dislocation Density and Residual Strain in Silicon Ingots Used for Solar Cells	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/16
58	X. Liu, B. Gao, S. Nakano, K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Reduction of Carbon Contamination during the Melting Process of Cz-Si Crystal Growth	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/16
59	B. Gaol, S. Nakanol, H. Harada, Y. Miyamural, T. Sekiguchi ² , K. Kakimotol	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	One-Seed Casting Large-Size Monocrystalline Silicon for High-Efficiency and Low-Cost Solar Cells	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/16
60	Takumi Uno Atsushi Ogura Haruhiko Ono	Meiji University Meiji University Kanagawa Ind. Technol. Center, Meiji University	Oxygen and Nitrogen Precipitates distributed on Grain Boundaries in Cast-grown Multicrystalline Silicon	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/17

61	I. Takahashi, T. Iwata, and N. Usami	Nagoya University	Seed Manipulation for ARTificially controlled defects Technique (SMART) as a new growth method for high-quality quasi-mono crystalline silicon	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/17
62	B. Gaol, S. Nakanol, H. Haradal, Y. Miyamura1, T. Sekiguchi2, K. Kakimoto1	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	One-Seed Casting Large-Size Monocrystalline Silicon for High- Efficiency and Low- Cost Solar Cells	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/17
63	Sho Kitano, Hiroki Imaeda, Shohei Miki, Atsushi Ogura, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Shin-ichi Satoh, Koji Arafune	兵庫県立大学	Effect of post- deposition thermal annealing on passivation quality of AlO _x film deposited by atomic layer deposition	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/17
64	Yuki Miki, Hiroki Imaeda, Kou Urushibata, Ippei Nakagoshi, Shohei Miki, Atsushi Ogura , Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida, Shin-ichi Satoh, Koji Arafune	兵庫県立大学	Evaluation of emitter saturation current density in n-type emitter formed by phosphorus thermal diffusion	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/17

65	Hyunju Lee Takefumi Kamioka Mari Aoki Tomohiro Fujii Koji Arafune Haruhiko Yoshida Naomi Sawamoto Atsushi Ogura Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute Toyota Technological Institute Toyota Technological Institute University of Hyogo, University of Hyogo, JST-CREST University of Hyogo, JST-CREST Meiji University Meiji University Toyota Technological Institute	Impact of light illumination on surface passivation of crystalline silicon by SiNx:H capped oxide layers	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/18
66	B. Gaol, S. Nakanol, H. Harada1, Y. Miyamural, T. Sekiguchi2, K. Kakimoto1	1, RIAM, Kyushu University 2, NIMS	Modelling of Crystal Growth: Macro and Atomic Scale Analysis	The 8th International Workshop on Modeling in Crystal Growth	2015/11/18
67	Shunsuke Urabe Kazuki Shimizu Ateto Eric Omondi Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Optimization of laser-transferred contact process for PERC cells with high open-circuit voltage	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (CSi-0-21)	2015/11/18
68	K. Nakamura A. Tanizaki K. Okamoto Y. Kawamoto Y. Ohshita	Meiji University Komatsu NTC Ltd. Mitsubishi Diamond Industrial Co. Noritake Co. Toyota Technological Institute	Mono Crystalline Si PERC using Less Than 100 μ m-thick Wafer by MWS Slicing	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11/20
69	Fumihiko Yamada	Toyota Technological Institute	nm-scale Workfunction Measurements of the Interface between Si and Surface Layers on the Crystalline Si Solar Cell using Kelvin Probe Microscopy	Energy Materials Nanotechnology Meeting on Vacuum Electronics	2015/11/21

70	高橋勲、宇佐美徳隆	名古屋大学	シリコンインゴット成長の新技術	日本学術振興会 第 161 委員会 第 93 回研究会 プログラム 「太陽電池用材料と結晶成長技術の新展開」	2015/11/27
71	宮島晋介	東京工業大学	ナノ結晶シリコンカーバイドの低温 CVD とヘテロ接合型結晶シリコン太陽電池への応用	第 62 回 CVD 研究会 (招待講演)	2015/12/8
72	T. Kamioka, Y. Hayashi, K. Nakamura and Y. Ohshita,	Toyota Technological Institute, Meiji University	"R&D of next generation heterojunction crystalline Si solar cells"	The Energy Materials and Nanotechnology (EMN) Photovoltaics Meeting	2016/1/18-21
73	宇佐美徳隆	名古屋大学	結晶シリコン太陽電池の高効率化技術	第 23 回次世代自動車公開シンポジウム	2016/1/19
74	中村京太郎	明治大学	結晶シリコン太陽電池の技術開発動向と今後の展望	東京理科大学太陽光発電技術研究部門第 6 回シンポジウム「太陽電池・発電技術の現状と課題」(招待講演)	2016/1/21
75	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	NEDO Si Solar Cells Program	2th Workshop on the Future Direction of Photovoltaics	2016/1/29
76	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Mari Aoki, Tomohiro Fujii, Koji Arafune, Haruhiko Yoshida, Naomi Sawamoto, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Impact of Light Illumination on the Surface Passivation Properties of SiNx:H Capped Oxides Deposited on P-type Silicon	スマートエネルギー技術研究センター」第 7 回シンポジウム JST-CREST「太陽光を利用した独自のクリーンエネルギー生成技術の創出」研究領域 平成 27 年度第 4 回公開シンポジウム	2016/2/4
77	中村京太郎	明治大学	試作ラインの紹介と最近の技術動向	学振 175 委員会次世代シリコン太陽電池分科会研究会	2016/2/22

78	T. Kamioka, T. Iwahashi, H. Lee, Y. Sato, K. Nakamura, Y. Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	"Effects of light soaking and thermal treatment on PECVD- SiNx passivation on n-type Si,"	9th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (ISPlasma 2016 / IC-PLANTS 2016)	2016/3/6-10
79	T. Kamioka, Y. Hayashi, K. Nakamura and Y. Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Efficiency Improvement by Charged-Insulator Layers for IBC-SHJ Cells	6th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics 2016	2016/3/6-12
80	H. Ichikawa, I. Takahashi, N. Usami, K. Shirasawa, and H. Takato	Nagoya University, AIST	Light-induced recovery of effective carrier lifetime in boron- doped Czochralski silicon at room temperature	6th International Conference on Silicon Photovoltaics	2016/3/7-9
81	Yoshio Ohshita, Takefumi Kamioka, Taisei Iwahashi, Lee Hyunju, Yuri Sato	Toyota Technological Institute	Light-Induced Degradation and Thermal-Induced Recovery of PECVD- SiNx:H Passivation: Reaction Kinetics and Interfacial Properties	6th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics 2016 (Silicon PV 2016)	2016/3/9
82	宇佐美德隆	名古屋大学	結晶シリコン太陽電池の高効率化技術	第7回薄膜太陽電池セミナー	2016/3/15
83	高橋勲、筋原 康博、Wibowo Jefferson、宇 佐美德隆	名古屋大学	Al 誘起成長法を用いた p 型薄膜多結晶 Si の太陽電池セルへの応用	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/19-22
84	神岡 武文, 岩 橋 泰正, Hyunju Lee, 佐藤 友理, 中 村 京太郎, 大 下 祥雄	豊田工業大学、明治 大学	"n 型 Si 表面における PECVD-SiNx:H パッシベーション性に対する光照射・熱処理の効果"	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/19-22
85	山田 郁彦, 神 岡 武文, 大下 祥雄, 神谷 格	豊田工業大学	"太陽電池構造断面材料作製時のダメージが仕事関数測定に与える影響"	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/19-22

86	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Excellent Surface Passivation of Crystalline Silicon by Atomic Layer Deposition Al _x Mg _{1- x} O _y Thin Films	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会	2016/3/19
87	鈴木 涼太 1、 池野 成裕 1, 2、小島 拓 人 1、大下 祥 雄 3、小椋 厚 志 1	1. 明治大理工、2. 学 振特別研究員、3. 豊 田工大	PL イメージングを用 いた強制汚染および ゲッターリングによる 多結晶 Si 中の鉄およ びニッケルの影響評 価	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会 (東工大大 岡山キャンパ ス)	2016/3/19
88	Xin Liu, Bing Gao, Satoshi Nakano, Hirofumi Harada, Yoshiji Miyamura, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Effect of packing structure of Si chunks on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会	2016/3/19
89	中川 啓 1、田 島 道夫 1、小 椋 厚志 1	1. 明治大	フォトルミネッセ ンス法による高濃度 Si 結晶の不純物効果の 解析	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会 (東工大大 岡山キャンパ ス)	2016/3/20
90	山下 祥弘 1、 池野 成裕 1、 小島 拓人 1、 肥山 卓矢 1、 小椋 厚志 1	1. 明治大理工	結晶 Si 太陽電池にお けるポストプラズマ 処理を用いた SiN パッシベーション特 性	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会 (東工大大 岡山キャンパ ス)	2016/3/20
91	樋口 史仁 1、 宇野 匠 1、田 島 道夫 1、小 椋 厚志 1	1. 明治大理工	太陽電池用多結晶 Si における酸素析出初 期状態のフォトルミ ネッセンス	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会 (東工大大 岡山キャンパ ス)	2016/3/20
92	福島 航 1、高 冰 2、原田 博 文 2、宮村 佳 児 2、中野 智 2、柿本 浩一 1	2. 九大院工, 2. 九大応力研	シリコン単結晶の転 位増殖に及ぼす酸素 の影響	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会	2016/3/20
93	羽山優介、高 橋勲、宇佐美 徳隆	名古屋大学	機能性欠陥層を用い た太陽電池用結晶シ リコンの不純物制御	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会	2016/3/20
94	岩田大将、高 橋勲、宇佐美 徳隆	名古屋大学	欠陥マニピュレー ションに向けた結晶 Si の粒界構造と転位 発生の関係	第 63 回応用物理 学会春季学術講 演会	2016/3/20

95	卜部駿介, 宮島晋介	東京工業大学	PERC 型太陽電池用 LTC コンタクトの電気的特性	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (20a-W611-3)	2016/3/20
96	大下祥雄, 小椋厚志, 中村京太郎	豊田工業大学、明治大学	先端複合技術型シリコン太陽電池に必要なとされる技術	2016 年第 63 回応用物理学会春季学術講演会 -次世代高効率・低コスト結晶シリコン太陽電池シンポジウム-	2016/3/21
97	小椋 厚志 1、小島 拓人 1、中村 京太郎 1、田島 道夫 1、大下 祥雄 2、西島 英一 3、正田 勲 3、飯田 伸仁 3、橘 昇二 3	1. 明大理工、2. 豊田工大、3. 株式会社トクヤマ	結晶シリコン太陽電池におけるウェーハとプロセスの相性	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (東工大大岡山キャンパス)	2016/3/21
98	小島 拓人 1、鈴木 涼太 1、小椋 厚志 1、立花 福久 2、大下 祥雄 3、西島 英一 4、正田 勲 4、飯田 伸仁 4、橘 昇二 4	1. 明大理工、2. 産総研福島、3. 豊田工大、4. 株式会社トクヤマ	n 型 CZ シリコンのキャリア寿命に対する熱処理による酸素析出の影響	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (東工大大岡山キャンパス)	2016/3/21
99	宇佐美德隆、高橋勲、黒川康良、中塚理	名古屋大学	高性能結晶シリコン太陽電池の実現に向けた新規ヘテロ接合用材料と高品質シリコン結晶に関する研究	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (東工大大岡山キャンパス)	2016/3/21
100	高橋一真、中川慶彦、原康祐、黒川康良、宇佐美德隆	名古屋大学、山梨大学	BaSi ₂ 薄膜太陽電池における p 型エミッタ層材料の探索	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (東工大大岡山キャンパス)	2016/3/21
101	柿本 浩一、宮村 佳児、原田博文、中野智、高 冰	九大応力研	CZ シリコン単結晶における軽元素とバルクライフタイムの関係	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	2016/3/21
102	稲葉真宏, 宮島晋介	東京工業大学	a-Si _{1-x} O _x :H ヘテロ接合太陽電池構造に対する少数キャリアライフタイム温度依存測定	第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (20p-S611-13)	2016/3/21

103	谷脇将太、今西啓司、馬野光博、吉田晴彦、新船幸二、佐藤真一、堀田育志	兵庫県立大学	PLD 法により Sr ₂ SiO ₄ ターゲットから作製した Sr ₂ SiO ₄ 薄膜の膜中固定電荷のアニール時間依存性	第 63 回 応用物理学関係連合講演会	2016/3/21
104	上岡聡史、三宅省三、堀田育志、新船幸二、佐藤真一	兵庫県立大学	HfO ₂ /SiO _x /Si 構造における C-V 特性のアニール温度依存性	第 63 回 応用物理学関係連合講演会	2016/3/21
105	Takuto Kojima Yoshio Ohshita Atsushi Ogura Masafumi Yamaguchi	Meiji University Toyota Technological Institute Meiji University Toyota Technological Institute	Effect of Symmetricity on Annealing Sensitivity to Σ3n Grain Boundaries	6th International Conference on Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2016)	2016/3/22
106	竹井雄太郎, 滝口雄貴, 宮島晋介	東京工業大学	Cu ₂₀ :N/c-Si ヘテロ接合太陽電池のデバイスシミュレーション	第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 (22a-W321-4)	2016/3/22
107	滝口雄貴, 竹井雄太郎, 宮島晋介	東京工業大学	Cu ₂₀ :N/c-Si ヘテロ接合の作製と評価	第 63 回応用物理学学会春季学術講演会 (22a-W321-5)	2016/3/22
108	市川寛章, 高橋勲, 宇佐美徳隆, 白澤勝彦, 高遠秀尚	名古屋大学、産業技術総合研究所	SiN _x :H/AlO _x パッシベーションスタック層を用いた光照射による Si 基板のライフタイム向上	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19-20
109	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	ALD Al _x Mg _{1-x} O _y Surface Passivation for Next Generation Silicon Solar Cells	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
110	神岡武文, 林豊, 中村京太郎, 大下祥雄	豊田工業大学、明治大学	裏面コンタクト型アモルファス/結晶 Si ヘテロ接合セルにおける電荷保有絶縁膜による効率改善	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
111	滝口雄貴, 竹井雄太郎, 宮島晋介	東京工業大学	Cu ₂₀ :N/c-Si ヘテロ接合太陽電池の検討	第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19

112	中村 京太郎 1, 大下 祥雄 2, 小椋 厚 志 1,	明治大学 1, 豊田工 業大学 2	豊田工業大学試作ラ インにおける結晶シ リコン太陽電池セル 開発	第 13 回 「次世 代の太陽光発電 システム」 シン ポジウム	2016/5/20
113	I. Takahashi, Y. Sujihara, H. Yating, J. Wibowo, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Application of New Doping Techniques to Solar Cells for Low Temperature Fabrication	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/5-10
114	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Excellent Surface Passivation of Crystalline Silicon by Ternary AlxMg1- xOy Thin Films	The 43th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC43)	2016/6/9
115	Mari Aoki, Takayuki Aoyama, Isao Sumita, Yasushi Yoshino, Atsushi Ogura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	A Study on the Evaluation Method of Glass Frit Paste for Crystalline Silicon Solar Cells	The 43th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC43)	2016/6/9
116	肥山 卓矢 小島 拓人 山下 祥弘 小椋 厚志	明治大学	Evaluation of SiNx Passivation with Plasma Treatment for Crystalline Si Solar Cell	43rd IEEE PVSC, Portland, USA	2016/6/9
117	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Next generation of high-efficient heterojunction crystalline silicon solar cells	Collaborative Conference on 3D & Materials Research (CC3DMR) 2016	2016/6/20
118	C. T. Trinh, Y. Nakagawa, And N. Usami	Nagoya University	Photoresponse Properties of BaSi ₂ Film Grown on Si (100) by Vacuum	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2016), Munich, Gemany	2016/6/20

119	Takefumi Kamioka	Toyota Technological Institute	Next generation of high-efficient heterojunction crystalline silicon solar cells	CC3DMR	2016/6/21
120	小島 拓人 鈴木 涼太 中村 京太郎 小椋 厚志 大下 祥雄 西島 英一 正田 勲 飯田 伸仁 橘 昇二	明治大理工 明治大理工 明治大理工 明治大理工 豊田工大 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ	Influence of Growth Conditions on Thermal Process Sensitivity for n-Type Cz Silicon	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2016), Munich, Gemany	2016/6/23
121	K. Takahashi, Y. Nakagawa, K. O. Hara, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Investigation of p-type Emitter Layer Materials for Heterojunction Barium Silicide Thin Film Solar Cells	APAC Silicide 2016	2016/7/17
122	C. T. Trinh, Y. Nakagawa, K. O. Hara, R. Takabe, T. Suemasu, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi, University of Tsukuba	The Growth of Polycrystalline Orthorhombic BaSi ₂ on Ge Substrate by Vacuum Evaporation Method	APAC Silicide 2016	2016/7/17
123	Y. Nakagawa, C. T. Trinh, K. O. Hara, Y. Kurokawa, T. Suemasu and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi, University of Tsukuba	Proposal of a Method to Realize BaSi ₂ Thin Films with Uniform Orientation using Reactivity of Excessive Ba in the Film and Si Substrate in Vacuum Evaporation	APAC Silicide 2016	2016/7/17
124	T. Suhara, K. Murata, A. Navabi, K. O. Hara, Y. Nakagawa, C. T. Trinh, Y. Kurokawa, T. Suemasu, K. L. Wang, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi, University of Tsukuba	Post -Annealing Effects on BaSi ₂ Evaporated Films Grown on Si Substrates	APAC Silicide 2016	2016/7/17

125	J. A. Wibowo, I. Takahashi, K. O. Hara, and N. Usami	Nagoya University, University of Yamanashi	Realization of Crystalline BaSi ₂ Thin Films by Vacuum Evaporation on (111)-oriented Si Layers Fabricated by Aluminum Induced Crystallization	APAC Silicide 2016	2016/7/17
126	Hyunju Lee	Toyota Technological Institute	Recent Progress in the Dielectric Passivation for Silicon Solar Cells	(独) 日本学術振 興会「結晶加工 と評価技術」第 145 委員会	2016/7/19
127	柿本浩一、宮 村佳児、原田 博文、中野 智、高 冰	九州大学	CZ シリコン単結晶成 長における軽元素の 導入とバルクライフ タイムとの関係：実 験と数値解析	(独) 日本学術振 興会「結晶加工 と評価技術」第 145 委員会 第 149 回研究会	2016/7/19
128	山田郁彦	豊田工業大学	走査型プローブ顕微 鏡によるナノスケー ル構造観察と物性評 価	三重大学極限ナ ノエレクトロニ クスセンター	2016/7/28
129	Y. Hayama, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Controlling Impurity Distributions in Crystalline Si for Solar Cells by Using Artificial Designed Defects	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/8
130	Takefumi Kamioka, Hyunju Lee, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	PECVD-SiNx:H Growth-Induced Defects in Crystalline Si	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18)	2016/8/8
131	W. Fukushima ¹ , B. Gao ² , S. Nakano ² , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , and K. Kakimoto ^{1, 2}	1, Dept. Aeronautics and Astronautics 2, RIAM, Kyushu University	Effect of oxygen atoms on dislocation multiplication in a silicon crystal	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/8

132	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Atomic Layer Deposition of Al _x Mg _{1-x} O _y Nanolayers and Their Excellent Surface Passivation for Crystalline Silicon Solar Cells	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-18)	2016/8/9
133	X Liu, S. Nakano, B. Gao, K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Effect of packing structure of Si chunks on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/11
134	Y. Miyamura, H. Harada, S. Nakano, B. Gao, K. Kakimoto	Kyushu University	Japan Influence of Light Elements on Bulk Lifetime in CZ Si crystals	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/11
135	T. Iwata, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoaya University	Dependence of Grain Boundary Structure Controlled by Artificially Designed Seeds on Dislocation Generation	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/11
136	G. Anandha babu, I. Takahashi, T. Muramatsu, and N. Usami	Nagoaya University	Towards optimized nucleation control in multicrystalline silicon ingot for solar cells	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/11
137	T. Muramatsu, I. Takahashi, G. Anandha Babu, and N. Usami	Nagoaya University	On the growth mechanism of a muticrystalline silicon ingot with small grains by using single layer silicon	The 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy	2016/8/12
138	Hyunju Lee, Fumiya Nishimura, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Haruhiko Yoshida, Naotaka Iwata, and	Toyota Technological Institute	Charge-Controllable Doped Dielectric Nanolayers for the Surface Passivation of Si Solar Cells	The 26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2016/8/29

	Yoshio Ohshita				
139	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Fumihiko Yamada, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Workfunction of transition metal oxides in carrier-selective contact stacks: Device simulation and Kelvin force microscopy studies	The 26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2016/8/29
140	樋口 史仁 田島 道夫 小椋 厚志	明治大学	Photoluminescence due to Early Stage of Oxygen Precipitates in Multicrystalline Si for Solar Cells	Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, Breckenridge, USA	2016/8/29
141	Yoshio Ohshita, Kyotaro Nakamura, and Atsushi Ogura	Toyota Technological Institute, Meiji University	Thin Wafer Crystalline Silicon Solar Cells using Advanced Technologies	The 26th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes	2016/8/30
142	小島 拓人 肥山 卓矢 小椋 厚志	明治大学	Evaluation of Passivation Film with Large Leakage Current by Applying Extremely High-frequency AC Voltage	Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, Breckenridge, USA	2016/8/30
143	N. Usami	Nagoya University	Silicon-based materials for heterojunction solar cells	Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes, Breckenridge, USA	2016/8/30

144	柿本 浩一	九州大学	パワーデバイス用高純度 Si 単結晶製造とその適用	日本機械学会 2016 年度年次大会	2016/9/12
145	Hyunju Lee, Naotaka Iwata, Atsushi Ogura, Haruhiko Yoshida, Toyohiro Chikyow, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Dielectric Oxide Nanoengineering and Its Impact on the Surface Passivation and Interface Properties of Crystalline Silicon	The 2016 EMN Meeting on Surface and Interface	2016/9/13
146	宇佐美德隆	名古屋大学	アルミニウム誘起層 交換成長法によるシリ コン薄膜成長のカ イネティクスと応用	第 77 回応用物理 学会秋季学術講 演会	2016/9/14
147	西 慎太郎、上 岡聡史、谷脇 将太、吉田晴 彦、新船幸 二、佐藤真 一、堀田育志	兵庫県立大学	PLD 法により SiO ター ゲットから作製した SiO ₂ 薄膜の表面ラフ ネス効果	第 77 回 応用物 理学会秋季学術 講演会	2016/9/14
148	J. A. Wibowo, I. Takahashi, K. O. Hara and N. Usami	Nagoya University, Yamanashi University	Growth of Crystalline BaSi ₂ Thin Films by Vacuum Evaporation on Poly-Crystalline Silicon Fabricated by Aluminum Induced Crystallization	第 77 回応用物理 学会秋季学術講 演会	2016/9/15
149	山田 郁彦、神 岡 武文、大下 祥雄、神谷 格	豊田工業大学	太陽電池評価に適し た光照射が可能な AFM/KFM 装置の開発	第 77 回応用物理 学会秋季学術講 演会	2016/9/15
150	小島 拓人 木下 晃輔 鈴木 涼太 中村 京太郎 小椋 厚志 大下 祥雄 西島 英一 正田 勲 橘 昇二 飯田 伸仁	明治大理工 明治大理工 明治大理工 明治大理工 明治大理工 豊田工大 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ	n 型 CZ シリコン太陽 電池のプロセス起因 酸素析出に対する成 長条件の影響	第 77 回応用物 理学会秋季学術 講演会 (朱鷺 メッセ)	2016/9/15

151	木内 広達 田島 道夫 樋口 史仁 小椋 厚志 飯田 伸仁 橘 昇二 正田 勲 西島 英一	明治大理工 明治大理工 明治大理工 明治大理工 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ	電子線照射発光活性化PL法によるCZ-Si結晶中の酸素析出過程の解析	第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016/9/15
152	正田 勲 橘 昇二 飯田 伸仁 西島 英一 小島 拓人 中村 京太郎 小椋 厚志 大下 祥雄	トクヤマ トクヤマ トクヤマ トクヤマ 明治大理工 明治大理工 明治大理工 豊田工大	単結晶シリコンの品質に及ぼす炭素と酸素析出の影響	第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016/9/15
153	鈴木 涼太 小島 拓人 木下 晃輔 河津 知之 中村 京太郎 大下 祥雄 小椋 厚志	明治大理工 明治大理工 明治大理工 コマツNTC株式会社 明治大理工 豊田工大 明治大理工	PLイメージングを用いた結晶シリコン太陽電池のスライスダメージ評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016/9/15
154	鈴木 涼太 小島 拓人 木下 晃輔 大下 祥雄 小椋 厚志	明治大理工 明治大理工 明治大理工 豊田工大 明治大理工	PLイメージングによる太陽電池用シリコン結晶の評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016/9/15
155	樋口 史仁 田島 道夫 木内 広達 小椋 厚志	明治大理工	電子線照射発光活性化PL法によるCZ-Si結晶中の酸素析出過程の解析	第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016/9/15
156	中山 椋平 小椋 厚志 小野 春彦	明治大 明治大 神奈川県産業技術センター、明治大	熱処理の冷却過程の違いによる太陽電池用単結晶シリコン中の酸素析出への影響	第77回応用物理学会秋季学術講演会(朱鷺メッセ)	2016/9/15
157	高橋勲、 Supawan Joonwichien、 岩田大将、宇 佐美德隆	名古屋大学	Seed manipulation for artificially controlled defect technique in new growth method for quasi-monocrystalline Si ingot based on casting	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15

158	高橋一真、中川慶彦、原康祐、黒川康良、宇佐美德隆	名古屋大学、山梨大学	Si ヘテロ接合太陽電池におけるホール選択層としての BaSi ₂ の検討	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15
159	市川寛章、高橋勲、宇佐美德隆、白澤勝彦、高遠秀尚	名古屋大学、福島再生エネルギー研究所	SiN _x :H/AlO _x パッシベーションスタック構造を持つ Si 基板への光照射の影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15
160	須原貴道、青柳健太、原康祐、末益崇、宇佐美德隆	名古屋大学、山梨大学、筑波大学	真空蒸着法により作製した BaSi ₂ /SUS304 の断面評価	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15
161	中野 智、高冰、柿本 浩一	九大応力研	Si 単結晶成長における転位密度・残留歪の結晶成長方位依存性	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15
162	Xin Liu, Satoshi Nakano, Koichi Kakimoto	RIAM, Kyushu Univ.	Dynamic modeling of melting process and carbon contamination in packed Si chunks of Czochralski silicon crystal growth	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15
163	渡邊光、竹井雄太郎、滝口雄貴、宮島晋介	東京工業大学	対向ターゲットスパッタリングによる Cu ₂ O 薄膜の作製と評価	第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会 (15a-A31-8)	2016/9/15
164	中田和吉、ファリス アキラ、宮島晋介	東京工業大学	対向ターゲットスパッタ法による i-a-Si パッシベーション膜の解析	第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会 (15p-P13-11)	2016/9/15
165	Akira Faris, Kazuyoshi Nakada, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Optimization of a-Si (i) Passivation Layer Fabricated by Facing Target Sputtering (FTS) Method	第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会 (15p-P13-10)	2015/9/15
166	西村郁哉、森英喜、新船幸二、佐藤真一、吉田晴彦	兵庫県立大学	LIA スパッタ法により成膜した AlO _x 膜の XPS 評価	第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/15
167	神岡武文、林豊、磯貝勇樹、中村京太郎、大下祥雄	豊田工業大学、明治大学	遷移金属酸化物/SiO ₂ /結晶 Si ヘテロ接合コンタクト界面における仕事関数	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/16
168	宮村 佳児、原田 博文、中野智、柿本 浩一	九大応力研	CZ シリコンにおける低温熱履歴のバルクライフタイムへの影響	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	2016/9/16

169	竹井雄太郎, 滝口雄貴, 中 田和吉, 宮島 晋介	東京工業大学	i-a-Si:H/c-Si ヘテロ 接合への Cu ₂ O:N ス パッタ製膜の影響	第 77 回 応用物 理学会秋季学術 講演会 (16a- A24-7)	2016/9/16
170	Hyunju Lee, Takefumi Kamioka, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Light-Induced Degradation of SiNx:H Capped Metal Oxide Stacked Passivation	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016/9/28
171	Shota Taniwaki, Mitsuhiro Umano, Haruhiko Yoshida, Koji Arafune, Shin-ichi Satoh, and Yasushi Hotta	兵庫県立大学	Influence of post annealing treatment on fixed charge density state and chemical bonding state of Sr- silicate film	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials	2016/9/28
172	Kyotaro Nakamura	Meiji University	Recent Developments of Crystalline Si Solar Cells in Japan under NEDO	Photovoltaic Industry Workshop 2016 (招待講演)	2016/9/30
173	X. Liu, B. Gao, S. Nakano and K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Effect of packing structure of Si chunks on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	The 9th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells and the 3rd Silicon Materials Workshop (CSSC- 9)	2016/10/10
174	S. Nakano, B. Gao, H. Harada, Y. Miyamura and K. Kakimoto	RIAM, Kyushu University	Effect of growth orientation on dislocation density and residual strain in mono-like silicon crystal	The 9th International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells and the 3rd Silicon Materials Workshop (CSSC- 9)	2016/10/12
175	Yutaro Takei, Yuki Takiguchi, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Sputtered Cu ₂ O:N Emitter for Silicon Heterojunction Solar Cells	PVSEC-26 (2_3- 0057)	2016/10/22

176	Takahisa Masuda, Masahiro Inaba, Shinsuke Miyajima	東京工業大学	Characterization of the Passivation Effect of Al ₂ O ₃ for Crystalline Silicon by Using Temperature Dependence of Effective Carrier Lifetime	PVSEC-26 (2_4-0046)	2016/10/22
177	Koji Arafune, Shunpei Tanaka, Sho Kitano, Takashi Harada, Kouji Maeda	兵庫県立大学	Mist chemical vapor deposited yttrium oxide films for crystalline silicon surface passivation	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/22
178	Koji Arafune, Toshiya Marukane, Yuki Miki, Sho Kitano, Kouji Maeda, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida	兵庫県立大学	Study of aluminum oxide passivation films deposited by reactive sputtering with assistance of low inductance antenna	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/22
179	Koji Arafune, Sho Kitano, Yuki Miki, Kouji Maeda, Yasushi Hotta, Haruhiko Yoshida	兵庫県立大学	X-ray reflectivity study of structural change in atomic layer deposited AlO _x films by post deposition thermal treatment	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/22
180	小島 拓人 鈴木 涼太 木下 晃輔 中村 京太郎 小椋 厚志 大下 祥雄 西島 英一 正田 勲 橘 昇二 飯田 伸仁	明治大理工 明治大理工 明治大理工 明治大理工 明治大理工 豊田工大 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ	Effects of growth conditions and carbon on oxygen precipitation in Cz silicon	PVSEC-26, Singapore	2016/10/26
181	鈴木 涼太 小島 拓人 木下 晃輔 河津 知之 中村 京太郎 大下 祥雄 小椋 厚志	明治大理工 明治大理工 明治大理工 コマツ NTC 株式会社 明治大理工 豊田工大 明治大理工	Evaluation of Saw Damages with Diamond-Coated Wire in Crystalline Silicon Solar Cell by Photoluminescence Imaging	PVSEC-26, Singapore	2016/10/26

182	Hyunju Lee, Fumiya Nishimura, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Haruhiko Yoshida, Naotaka Iwata, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Excellent Surface Passivation of Crystalline Silicon by Al _x Mg _{1-x} O _y and Its Tunable Interface Properties	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/27
183	Fumihiko Yamada, Takefumi Kamioka, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita and Itaru Kamiya	Toyota Technological Institute, Meiji University	Development of an AFM/KFM System Capable of Local Workfunction Mapping of Solar Cells under Light Illumination	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/27
184	Kyotaro Nakamura ¹ , Tomoyuki Kawatsu ² , Kazuo Muramatsu ³ and Yoshio Ohshita ⁴	1Meiji University, 2Komatsu NTC Ltd., 3NAMICS CORPORATION, 4Toyota Technological Institute	P-type Bi-facial PERT Solar Cell using Less Than 100 μ m thick Cz Wafer and Cu Paste	PVSEC-26, Singapore	2016/10/27
185	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Fumihiko Yamada, Yuki Isogai, Kyotaro Nakamura, Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Interfacial workfunctions of transition metal oxides in carrier- selective contact stacks	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/28
186	Takefumi Kamioka, Tetsu Takahashi, Kazuo Muramatsu, Aki Tanaka, Naotaka Iwata, Kyotaro Nakamura, Atsushi Ogura, Yoshio	Toyota Technological Institute, Meiji University	Novel silver paste to n- and p-layers for fabricating high efficiency crystalline Si solar cells	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/28

	Ohshita				
187	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Crystalline silicon solar R&D by universities' network of intelligent technologies	Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS) and the 175th Committee of the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)	2016/10/28
188	神岡武文	豊田工業大学	ヘテロ接合用デバイスシミュレーション技術	学振第 175 委員会	2016/11/7
189	宮島晋介	東京工業大学	ライフタイム測定を基礎した高品質 Si ヘテロ界面のバンドアライメント評価	学振 175 委員会・次世代シリコン太陽電池分科会(招待講演)	2016/11/7
190	増田翔太、高橋勲、後藤和泰、中村京太郎、大下祥雄、宇佐美徳隆	名古屋大学、明治大学、豊田工業大学	アルミニウム誘起成長法による高濃度 p 型 Si 多結晶薄膜の太陽電池応用に関する研究	第 26 回学生による材料フォーラム	2016/11/15
191	Hyunju Lee, Fumiya Nishimura, Takefumi Kamioka, Dongyan Zhang, Haruhiko Yoshida, Naotaka Iwata, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Nano-Engineered Surface Passivation for Advanced Silicon Solar Cells	第 8 回スマートエネルギー技術研究センターと第 2 回グリーン電子素子・材料研究センター合同シンポジウム	2016/11/18

192	木内 広達 田島 道夫 樋口 史仁 小椋 厚志 飯田 伸仁 橘 昇二 正田 勲 西島 英一	明治大理工 明治大理工 明治大理工 明治大理工 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ 株式会社トクヤマ	Determination of Low Carbon Concentration in CZ-Si for Solar Cells by Luminescence Activation Using Electron Irradiation	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials 2016, USA	2016/11/22
193	W. Fukushima ¹ , B. Gao ² , S. Nakano ² , H. Harada ² , Y. Miyamura ² , K. Kakimoto ^{1,2}	1, Department of Aeronautics and Astronautics 2, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Three-dimensional Analysis of Dislocation Density in Oxygen Dissolved Silicon Crystals	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials	2016/11/22
194	K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, X. Liu, S. Nakano	Kyushu University	Crystal Growth and Defect Analysis of Silicon for Photovoltaics	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials	2016/11/24
195	S. Nakano, B. Gao, K. Kakimoto	Kyushu University	Relationship between the Dislocation Density and Residual Stress in a GaN Crystal during the Cooling Process	The 7th International Symposium on Advanced Science and Technology of Silicon Materials	2016/11/24
196	小島 拓人	明治大学	結晶シリコンにおけるキャリアライフタイムのデバイスへの影響 および測定と解析	第6回次世代シリコン太陽電池分科会 研究会	2017/2/17
197	後藤和泰、崔敏、高橋勲、黒川康良、宇佐美德隆	名古屋大学	スピコート法で作製したCuIのヘテロ接合型太陽電池のホール選択層への検討	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/14
198	羽山優介、高橋勲、宇佐美德隆	名古屋大学	SMART法を用いた太陽電池用擬似単結晶Siの不純物制御	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/14
199	山田 郁彦, 神岡 武文, 水野 皓登, 大下 祥雄, 神谷 格	豊田工業大学	平坦なp-n接合断面における局所仕事関数測定	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/14

200	田島 道夫1、 木内 広達1、 樋口 史仁1、 小椋 厚志1	1. 明治大	発光活性化後の液体 窒素温度フォトルミ ネッセンス測定によ る Si 結晶中炭素不純 物の定量	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会 (パシフィ コ横浜	2017/3/14
201	木内 広達1、 田島 道夫1、 樋口 史仁1、 石川 陽一郎 1、小椋 厚志 1	1. 明治大理工	電子線照射発光活性 化液体窒素温度 PL 法 による太陽電池用 CZ- Si 中の低炭素濃度の 定量	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会 (パシフィ コ横浜	2017/3/14
202	宮村 佳児、原 田 博文、中野 智、柿本 浩一	九大応力研	CZ シリコンにおける キャリア濃度とバル クライフタイムの関 係	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会	2017/3/14
203	中野 智 2、福 島 航 1、原田 博文 2、宮村 佳児 2、柿本 浩一 1, 2	1. 九大院工 2. 九大応力研	酸素拡散を考慮した シリコン単結晶中の 転位密度解析	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会	2017/3/14
204	Liu Xin、Han Xue-Feng、 Nakano Satoshi、 Kakimoto Koichi	RIAM, Kyushu Univ.	Effect of crucible movement on melting process and carbon contamination in Czochralski silicon crystal growth	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会	2017/3/14
205	Han Xuefeng、 Nakano Satoshi、Liu Xin、Kakimoto Koichi	RIAM, Kyushu Univ.	Numerical analysis on the free surface of floating zone (FZ) for silicon crystal growth by Volume of Fluid (VOF) model	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会	2017/3/14
206	谷脇将太、馬 野光博、新船 幸二、吉田晴 彦、佐藤真 一、堀田育志	兵庫県立大学	フーリエ変換赤外分 光法による Si (100) 基 板上の Sr ₂ SiO ₄ 薄膜 の評価	第 64 回 応用物 理学関係連合講 演会	2017/3/14
207	Hyunju LEE, Fumiya Nishimura, Haruhiko Yoshida, Takefumi Kamioka, Naotaka Iwata, Kyotaro Nakamura, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Charge-Controllable Mg-Doped AlO _x for the Passivation of High Efficiency Silicon Solar Cells	Global Photovoltaic Conference 2017 (GPVC2017)	2017/3/15

208	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	CRYSTALLINE SILICON SOLAR R&D BY UNIVERSITIES' NETWORK OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES	Korea Photovoltaic Society	2017/3/15
209	中島 佑実 1, 2、○中山 椋平 1, 2、沓掛 健太朗 3、小椋 厚志 1、小野 春彦 2, 1	1. 明治大、2. 神奈川 県産技セ、3. 東北大	High Performance mc-Si 中の軽元素分布	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会 (パシフィ コ横浜)	2017/3/15
210	木下 晃輔 1、 小島 拓人 1、 鈴木 涼太 1、 小林 弘人 1、 大下 祥雄 2、 正田 勲 3、橘 昇二 3、小椋 厚志 1	1. 明治大理工、2. 豊 田工大、3. 株式会社 トクヤマ	赤外線トモグラ フィーによる太陽電 池用 n 型 Cz-Si 中の 酸素析出挙動の評価 ー炭素濃度と成長条 件の影響	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会 (パシフィ コ横浜)	2017/3/15
211	小島 拓人 1、 木下 晃輔 1、 鈴木 涼太 1、 中村 京太郎 1、小椋 厚志 1、大下 祥雄 2、正田 勲 3、 橘 昇二 3	1. 明大理工、2. 豊田 工大、3. 株式会社ト クヤマ	TEM による太陽電池用 n 型 Cz-Si 中の酸素析 出挙動の評価 ー炭素 濃度と成長条件の影 響	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会 (パシフィ コ横浜)	2017/3/15
212	堀川 裕貴、森 英喜、新船 幸 二、佐藤 真 一、吉田 晴彦	兵庫県立大学	SiNx/Si 構造の電気特 性におけるファイ ヤースルー処理の影 響 (II)	第 64 回 応用物 理学関係連合講 演会	2017/3/15
213	松本 要朗、森 英喜、新船 幸 二、佐藤 真 一、吉田 晴彦	兵庫県立大学	LIA スパッタ法により 成膜した AlOx 膜の XPS 評価 (II)	第 64 回 応用物 理学関係連合講 演会	2017/3/15
214	増田翔太、後 藤和泰、高橋 勲、中村京太 郎、大下祥 雄、宇佐美徳 隆	名古屋大学、明治大 学、豊田工業大学	Al 誘起成長法を用い た p 型 Si 多結晶薄膜 の太陽電池応用	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会	2017/3/16
215	神岡武文、林 豊、山田郁彦、 磯貝勇樹、 Hyunju Lee、 中村京太郎、 大下祥雄	豊田工業大学、明治 大学	遷移金属酸化物 /SiO ₂ /結晶 Si ヘテロ 接合コンタクト界面 における仕事関数 (2): RPD-ITO	第 64 回応用物理 学会春季学術講 演会	2017/3/16

216	高橋一真、中川慶彦、原康祐、黒川康良、宇佐美德隆	名古屋大学、山梨大学	Si ヘテロ接合太陽電池応用に向けた p 型 BaSi ₂ の作製技術開発	第 64 回 応用物理学関係連合講演会	2017/3/16
217	中川慶彦、黒川康良、宇佐美德隆	名古屋大学	3C-SiC 膜上に成長した BaSi ₂ 膜の結晶構造の評価	第 65 回 応用物理学関係連合講演会	2017/3/16
218	須原貴道、中川慶彦、原康祐、黒川康良、末益崇、宇佐美德隆	名古屋大学、山梨大学、筑波大学	真空蒸着法により作製した a-Si/BaSi ₂ の接触抵抗低減効果	第 66 回 応用物理学関係連合講演会	2017/3/16
219	藤原道信、高橋一真、中川慶彦、後藤和泰、黒川康良、宇佐美德隆	名古屋大学	テクスチャ Si 上に真空蒸着法で形成した BaSi ₂ 薄膜の評価	第 66 回 応用物理学関係連合講演会	2017/3/16
220	堀田 育志、佐伯 郁弥、西慎太郎、伊藤明、中西 英俊、吉田 晴彦、新船 幸二、佐藤 真一、斗内 政吉、川山 巖	兵庫県立大学	High-k/SiO ₂ 界面双極子に起因するシリコン表面バンドベンディングのレーザー THz 放射顕微鏡による直接観察	第 64 回 応用物理学関係連合講演会	2017/3/16
221	小島 拓人 1、肥山 卓矢 1、中村 京太郎 1、小椋 厚志 1、大下 祥雄 2	1. 明大理工、2. 豊田工大	超高周波インピーダンス解析による高漏れ性パッシベーション膜の評価	第 64 回 応用物理学会春季学術講演会 (パシフィコ横浜)	2017/3/17
222	肥山 卓矢 1、小島 拓人 1、小椋 厚志 1	1. 明治大学理工	硬 X 線光電子分光法によるプラズマ処理を用いた SiN _x パッシベーション膜の評価	第 64 回 応用物理学会春季学術講演会 (パシフィコ横浜)	2017/3/17
223	白取優大、ファリス アキラ、中田和吉、宮島晋介	東京工業大学	対向ターゲットスパッタ法による i-a-Si:H パッシベーション膜作製における RF 電力の影響	第 64 回 応用物理学会春季学術講演会 (17p-211-4)	2017/3/17
224	市川寛章、高橋勲、宇佐美德隆、白澤勝彦、高遠秀尚	名古屋大学、産業技術総合研究所	熱 ALD による AlO _x 層成膜時の酸化剤とパッシベーション性能の関係	第 64 回 応用物理学会春季学術講演会	2017/3/17

225	Y. Hayama, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Controlling Impurity Distribution in Quasi-mono Crystalline Si Ingot by Seed Manipulation for Artificially Controlled Defect Technique	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics	2017/4/4
226	Takefumi Kamioka, Yutaka Hayashi, Fumihiko Yamada, Yuki Isogai, Kyotaro Nakamura, and Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute, Meiji University	Interfacial workfunction and its impact on open-circuit voltage in transition-metal-oxide/silicon-oxide contact stacks	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics (SiliconPV 2017)	2017/4/4
227	Y. Hayama, I. Takahashi, and N. Usami	Nagoya University	Controlling Impurity Distribution in Quasi-mono Crystalline Si Ingot by Seed Manipulation for Artificially Controlled Defect Technique	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics	2017/4/4
228	K. Gotoh, M. Cui, I. Takahashi, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Development of Spin-coated Copper Iodide Film on Silicon for Use in Hole-selective Contacts	7th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics	2017/4/5
229	J. A. Wibowo, Y. Nakagaya, Y. Kurokawa, and N. Usami	Nagoya University	Realization of p-type BaSi ₂ by simple thermal evaporation on Si grown by aluminium induced crystallization	The 10th International Conference on Silicon Epitaxy and heterostructures	2017/5/15
230	丸金稔弥、原田貴志、前田光治、新船幸二	兵庫県立大学	反応性スパッタ法による結晶シリコン太陽電池用パッシベーション膜の開発	応用物理学会関西支部 平成 29 年度 第 1 回講演会	2017/5/26

231	Yoshio Ohshital, Takefumi Kamioka1, Satoshi Kameyamal, Kazuo Muramatsu2, Aki Tanaka2, Naotaka Iwatal, Kyotaro Nakamura3, Atsushi Ogura3	Toyota Technological Institute, Meiji University, Namics	Carrier Transportation at Novel Silver Paste Contact	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	2017/6/25
232	Yoshio Ohshital, Takuto Kojima2, Ryota Suzuki2, Kosuke Kinoshita2, Tomoyuki Kawatsu3, Kyotaro Nakamura2, Atsushi Ogura2	Toyota Technological Institute, Meiji University, Komatsu NTC Ltd.	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC44)	2017/6/25
233	Takuto Kojimal, Ryota Suzukil, Kosuke Kinoshital, Kyotaro Nakamural, Atsushi Ogural, Yoshio Oshita2, Isao Masada3, Shoji Tachibana3	1Meiji University, Kawasaki, Japan /2Toyota Technological Institute, Nagoya, Japan /3Tokuyama Corporation, Shunan, Japan	Effect of Carbon Concentration and Growth Conditions on Oxygen Precipitation Behavior in n-type Cz-Si	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), June 25-30, 2017, Washington D. C, U. S.	2017/6/28
234	K. Gotoh, M. Cui, N. C. Thanh, K. Koyama, I. Takahashi, Y. Kurokawa, H. Matsumura, and N. Usami	Nagoya University, JAIST	Fabrication of CuI/a-Si:H/c-Si Structure for Application to Hole-selective Contacts of Heterojunction Si Solar Cells	44th IEEE Photovoltaics Specialists Conference	2017/6/28

235	S. Masuda, K. Gotoh, I. Takahashi, K. Nakamura, Y. Ohshita, and N. Usami	Nagoya University, Meiji University, Toyota Technological Institute	Solar Cells Application of p-type poly-Si Thin Film by Aluminum Induced Crystallization	44th IEEE Photovoltaics Specialists Conference	2017/6/28
236	Kenji Arakil, Kyotaro nakamura ² , Yu-Cian Wang ¹ , Nobuaki Kojima ¹ , Atsushi Ogura ² , Yoshio Ohshita ¹ , Masafumi Yamaguchi ¹	¹ Toyota Technological Institute, Nagoya, Japan ² Meiji University, Kawasaki, Japan	Design Arithmetic of the Lateral III-V / Si Hybrid Module	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), June 25-30, 2017, Washington D. C, U. S.	2017/6/29
237	Yoshio Ohshita ¹ , Takuto Kojima ² , Ryota Suzuki ² , Kosuke Kinoshita ² , Tomoyuki Kawatsu ³ , Kyotaro Nakamura ² , Atsushi Ogura ²	¹ Toyota Technological Institute, Nagoya, Japan ² Meiji University, Kawasaki, Japan ³ Komatsu NTC Ltd., Nanto, Japan	High quality and thin silicon wafer for next generation solar cells	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), June 25-30, 2017, Washington D. C, U. S.	2017/6/29
238	Yoshio Ohshita ¹ , Takefumi Kamioka ¹ , Satoshi Kameyama ¹ , Kazuo Muramatsu ² , Aki Tanaka ² , Naotaka Iwata ¹ , Kyotaro Nakamura ³ , Atsushi Ogura ³	¹ Toyota Technological Institute, Nagoya, Japan ² NAMICS Corporation, Nigorigawa, Japan ³ Meiji University, Kawasaki, Japan	Carrier Transportation at Novel Silver Paste Contact	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44), June 25-30, 2017, Washington D. C, U. S.	2017/6/29

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	「シリコン太陽電池の発電コスト低減に向けた新プロジェクトを始動」	明治大 HP プレス発表	2015/11/11
2	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	シリコン太陽電池の発電コスト低減に向けた新プロジェクトを始動 「先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発」	@Press ①朝日新聞デジタル ②SankeiBiz 産経新聞社 ③夕刊フジ ④livedoorNews ⑤ Infoseek 楽天 NEWS ⑥なびポー	2015/11/11
3	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	「シリコン太陽電池の発電コストを 2020 年に 14 円/kWh へ、新プロジェクト始動」	環境ビジネスオンライン	2015/11/12
4	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	「明大ら、太陽電池発電コスト低減に向けた NEDO プロジェクトを開始」	OPTRONICS ONLINE	2015/11/12
5	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	「明治大学など 6 大学、太陽電池の低コスト化研究でコンソーシアム」	日経テクノロジーonline	2015/11/20
6	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	「明治大学、6 大学と太陽電池の低コスト化研究」	日本経済新聞 電子版	2015/11/21
7	6 大学コンソーシアム (豊田工業大学・明治大学・九州大学・名古屋大学・東京工業大学・兵庫県立大学)	「6 大学で太陽電池のコスト低く」	日経産業新聞	2015/12/16

【受賞実績】

番号	氏名	所属	名称	年月日
1	鈴木 涼太	明治大理工	第 40 回 (2016 年春季) 応用物理学会 講演奨励賞	2016/3/19
2	市川寛章	名古屋大学	イノベティブ PV 奨励賞	2016/5/20
3	市川寛章	名古屋大学	材料バックキャストテクノロジー研究センター研究奨励賞	2016/6/12
4	高橋勲	名古屋大学	応用物理学会論文奨励賞	2016/7/8

5	増田翔太	名古屋大学	第 26 回学生による材料フォーラム優秀賞	2016/11/15
6	山田 郁彦, 神岡 武文, 水野 皓 登, 大下 祥雄, 神谷 格	豊田工業大学	第 64 回応用物理学会春季学術講演会 Poster Award 受賞	2017/3/14
7	Yoshio Ohshita	Toyota Technological Institute	Korea Photovoltaic Society, GPVC Daejoo Award	2017/3/15
8	白取優大	東京工業大学	第 42 回 (2017 年春季) 応用物理学会講 演奨励賞	2017/5/12
9	Hirotatsu Kiuchil, Michio Tajimal, Fumito Higuchil, Atsushi Ogural, Nobuhito Iida2, Shoji Tachibana2, Isao Masada2 and Eiichi Nishijima2	1 Meiji University, Kawasaki 214- 8571, Japan 2 Tokuyama Corporation, Shunan, Yamaguchi 745- 8648, Japan	Jpn. J. Appl. Phys. 56, 070305 Spotlights 2017	2017/6/9
10	柿本浩一	九州大学	応用物理学会フェロー受賞『結晶成長の 大規模数値解析と半導体結晶の高品質 化』	2017 年度 (第 11 回)

B 薄型セルを用いた高信頼性・高効率モジュール製造技術開発（産業技術総合研究所）

1. 成果詳細

(1) 企業との連携に係る技術開発

① ウェハスライス技術に関する研究開発（連携先：コマツ NTC(株)）

薄型ウェーハのセル評価プロセスの構築に関しては、薄型ウェーハに好適と考えられる a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型太陽電池に着目し、中間目標である「厚さ 75 μm のセル評価プロセスの確立」を目指した研究開発を実施した。まず、a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型太陽電池のベースライン技術構築を図り、さらに厚さ 75 μm 程度の薄型ウェーハに適合するようセル作製プロセスや評価装置を改良した。結果として、標準 FZ-Si 基板 (n 型、t244 μm) にて効率 21.34% (da) を、研究連携先のコマツ NTC (株) から提供を受けた極薄ウェーハ (t59 μm) にて効率 21.0% (da) を達成した (図 B-1)。この薄型セルでは、標準厚セルに較べて V_{oc} が向上し (0.705 V \rightarrow 0.730 V)、理論から予想される V_{oc} 向上幅と概ね整合する結果を得た。以上のように、厚さ 75 μm 以下の薄型セルを比較的高い特性にて評価できるプロセスを構築し、中間目標を達成した。

並行して、a-Si:H/c-Si 系のヘテロ接合型太陽電池の特性向上を目的として、a-Si:H 層、セル前駆体及び光学構造に関する基礎評価も実施した。界面パッシベーションに用いる厚さ 10 nm 以下の極薄 a-Si:H 層の諸特性を独自のポンプ・プローブ法を開発して評価し、a-Si:H 層では極薄化に伴い欠陥密度が増え裾準位の影響が大きくなること、またその変化は製膜条件に強く依存することなど、セル特性向上に寄与し得る知見を明らかにした。また、薄型セルを念頭に、セルの前駆体である a-Si:H/c-Si/a-Si:H 積層構造を形成し、少数キャリア寿命及び implied V_{oc} 値 (V_{oc} の期待値) をウェーハ厚に対して系統的に評価した。結果として、ウェーハ薄型化に伴って implied V_{oc} 値は大きく増加し、ウェーハ厚 40 μm 以下にて最大 0.763 V を示し、薄型化の利点を実験的に確認された (図 B-2)。一方、アルカリテクスチャと反射防止膜を施したダミーセルの光学吸収評価を行い、厚さ 50 μm 程度でも Lambertian limit に近い光吸収が可能なることを実験的に明らかにした。

また、自立ウェーハとしては作製が困難と予想される厚さ 50 μm 以下の超薄型結晶シリコン膜の評価手段として、液相結晶化法によるガラス基板上への極薄結晶シリコン (t<10 μm) の作製と評価を実施した。種々の条件下で成長した結晶シリコン膜の電気特性および簡易セルの I-V 特性評価を行った結果、ガラス/シリコン層界面の中間層の製膜条件とシリコン層のドーピング濃度が、移動度やライフタイム、セルの開放電圧を決定づける重要な因子であることを明らかにした。また、簡易セルにて比較的高い開放電圧 0.620 V を得、超薄型結晶シリコン太陽電池の評価が可能であることを確認した。

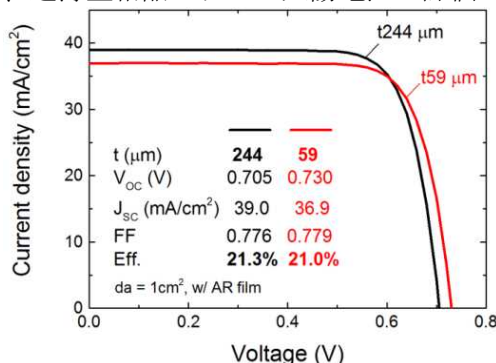


図 III-2-(二)-B-1 薄型 (t<75 μm) 及び標準厚 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型太陽電池の発電特性

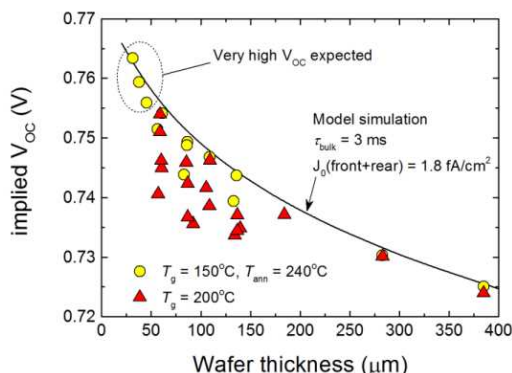


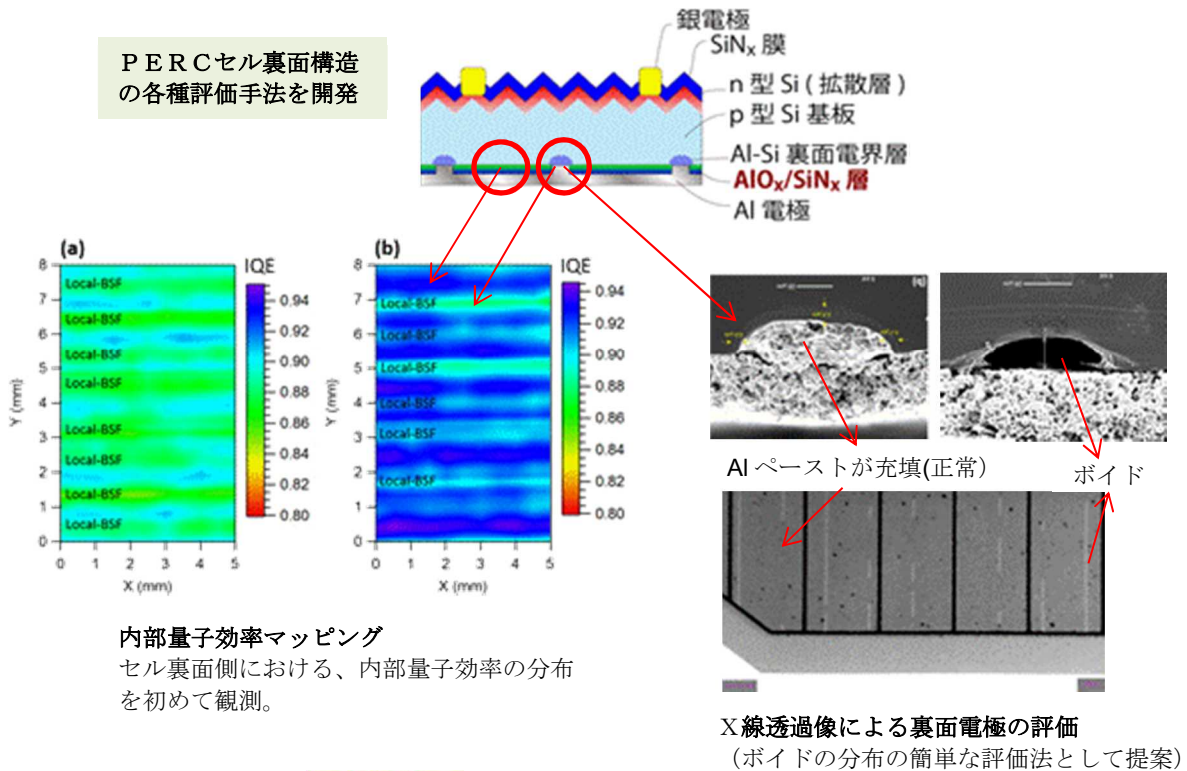
図 III-2-(二)-B-2 a-Si:H/c-Si/a-Si:H 構造における implied V_{oc} (i V_{oc}) のウェーハ厚依存性

②高効率・低コストセルプロセス技術に関する研究開発（連携先：(株)京セラ）

本課題においては、これから市場の中心となる P 型ウェーハを用いた PERC セル構造を基本とし、高効率化・低コスト化のための要素技術の開発を行った。特に、セル裏面構造について、SiN/A10 膜の作製条件や成膜後のアニール条件、高品質なローカル BSF 層形成技術の検討を産総研で開発した新しい評価法を取り入れながら行った。

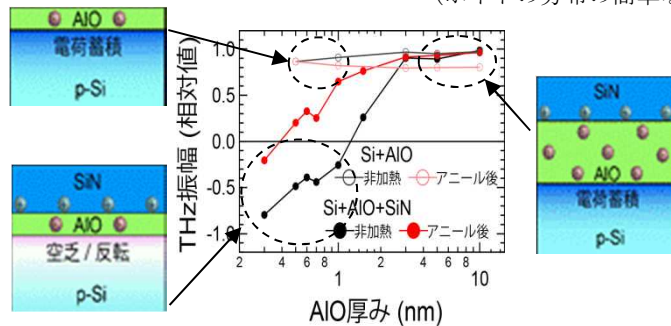
まず、A10 膜/P 型 Si 界面の特性を調べるため、レーザテラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM) を用いて、A10 膜の膜厚と A10 膜/Si 界面の状態を調べた (図 B-3)。A10 膜のみの場合では、膜厚にかかわらず界面に正孔の蓄積層が形成されているが、SiN/A10 膜の場合、A10 膜厚の増加と共に界面電場の状態が変化し、A10 膜厚が 4 nm 程度以上あれば、表面パッシベーションとして十分な正孔の蓄積層が形成されることが明らかとなった。また、内部量子効率マッピング法 ((2)①参照) により、PERC 型セル裏面の A1 電極部 (A1-BSF 部) と A10 膜によるパッシベーション部分とを分離して評価することに成功した。図 B-3 は、2 種類のセル (効率 (a) < (b)) における内部量子効率マッピングを示す。図では、コンタクト (BSF 層) 領域の方が、パッシベーション膜 (A10 膜) の領域より量子効率が低く、コンタクト領域面積の低減が効率向上に有効であることを明らかにした。また、X 線透過像により裏面電極部のボイドが観測でき、超音波を用いる方法よりも簡易にセルの全面の様子をとらえることが可能であることを示した。

これらの要素技術を基に、量産化プロセスで PERC セル (選択エミッタなし) を作製し、変換効率 20.5% を達成した (J_{sc} 39.3 mA/cm², V_{oc} 0.648 V, FF 0.806, 全面積 (ta) 244.3 cm²)。



内部量子効率マッピング
セル裏面側における、内部量子効率の分布を初めて観測。

X線透過像による裏面電極の評価
(ボイドの分布の簡単な評価法として提案)



レーザテラヘルツ放射顕微鏡(LTEM)による、AIO/Si、SiN/AIO/Si 界面電場の評価
AIO 膜の膜厚と界面電場との関係を初めて観測。

図 III-2-(二)-B-3 PERC セル裏面構造の各種評価方法の開発

③高効率・高信頼性モジュールに関する研究開発（連携先：(株)京セラ）

結晶シリコン太陽電池モジュールの長寿命化に関しては、産総研作製のモジュールだけでなく、連携先企業が作製した評価用モジュールを産総研（福島）に持ち込み、共同で信頼性試験を行った。まず、各種単体ストレス試験とその結果の分析を行った。現在は、複合ストレス試験とその解析を進めている。試験に用いたセルはA1-BSFセルで、モジュール構造はスーパーストレートである。

これらのストレス試験の分析結果は、劣化モードの把握だけではなく、連携先企業での寿命予測のシミュレーション開発のための基礎データとしても活用されている。

（1）PID試験

PID試験中での漏れ電流とFF劣化率の相関を明らかにした。漏れ電流を小さくすることでFF劣化率を低減できるが、漏れ電流を小さくするための方策としてカバー材料の高抵抗化や封止材の高抵抗化が有効であることが分かった。また、PIDの発生にはカバー材料に用いる白板強化ガラスから析出するNaが関与していることがわかっている。今回、カバーガラス無しのモジュールを作製し、試験を行ったところNaが存在しないにもかかわらず特性劣化が見られた。EVAの元素分析を行ったところCaとTiが検出された（図B-4）。このため、Na以外の元素でもPIDが起こる可能性があることが分かった。以上からPIDには2つのモードが考えられる。1つは従来から言われているNa起因によるPID、もう1つはNa以外の金属（例えばTiやCa）によるPIDである。今後これをさらに明確にするための検討を行う予定である。

（2）冷熱衝撃試験

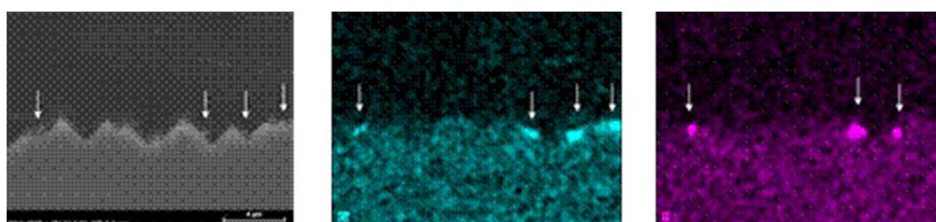
配線材として銅線に半田ディップした材料を用いているが、冷熱衝撃試験により、セルバスバー上の配線材については半田が粗大化しクラックが発生した。一方、セル間の配線材については屈曲が見られ弾性率が低下した結果、FFの劣化が生じた。これが進めば配線が断線する可能性がある。

（3）高温高湿試験

高温高湿試験がカバー材料に与える影響を調べた。カバー材にPETを用いた場合は、劣化が見られなかった。これはEVAから発生する酢酸が外部へ放出されることによると考えられる。また、配線材を半田溶着する際に用いるフラックスの影響についても調べた結果、フラックスの種類（塩素含有有無）や塗布法により劣化率が異なることを明らかにした。

（4）DML試験

DML試験により配線材を半田接合した場合と導電性フィルム(CF)接合の場合について調べた。導電性フィルム(CF)接合ではセルクラックを有効に低減できることが分かった。これは接合時のセルへの応力がCF接合の方が小さいからと考えられる。



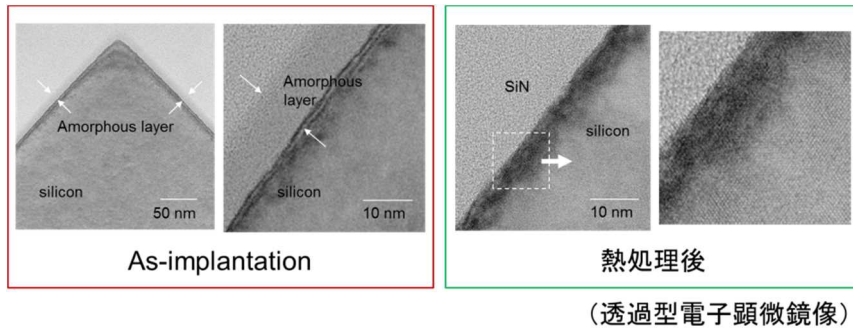
図III-2-(二)-B-4 カバーガラスの無いモジュールのPID試験後のSEM及びEDX分析結果
（左：SEM写真、中：Ca(EDX)、右：Ti(EDX)）

（2）共通基盤技術に係る技術開発(セル)

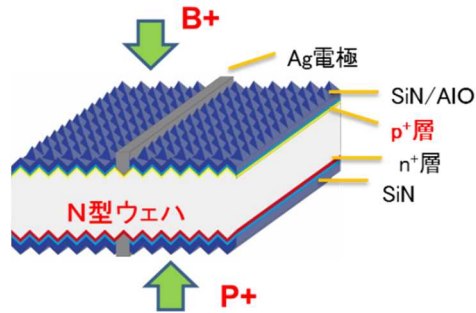
①イオン注入技術

イオン注入技術は、所定のイオンを注入後に、最適な熱処理を行い、注入時のダメージ層を回復させることが必要である。しかし、結晶シリコン太陽電池の表面にはテクスチャー構造が形成されているので、数 μm の凹凸のある表面にイオンを均一に注入する必要がある。このため、リン(P)、ボロン(B)とも、注入条件と熱処理の条件を変えて最適な条件を見出した。図B-5は、テクスチャー表面にリンを注入した直後のウェーハ断面と、これを熱処理した後の断面を示す。熱処理後では、ダメージ層での結晶性が十分回復していることがわかる。

イオン注入技術を用いたセル作製に関しては、リン(P)のイオン注入に引き続き、ボロン(B)のイオン注入の検討を進めた。まず、B拡散層、P拡散層ともに、イオン注入技術により形成したN型両面受光セルの高効率化を進め（図B-6）、イオンのドーズ量やアニール条件などの最適化を行った結果、 B^+ イオンの注入エネルギー：5 keV、ドーズ量： $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ において、セルの変換効率20.4%を達成した (J_{sc} 39.5 mA/cm², V_{oc} 0.648 V, FF 0.797, τ_a 239 cm²)。



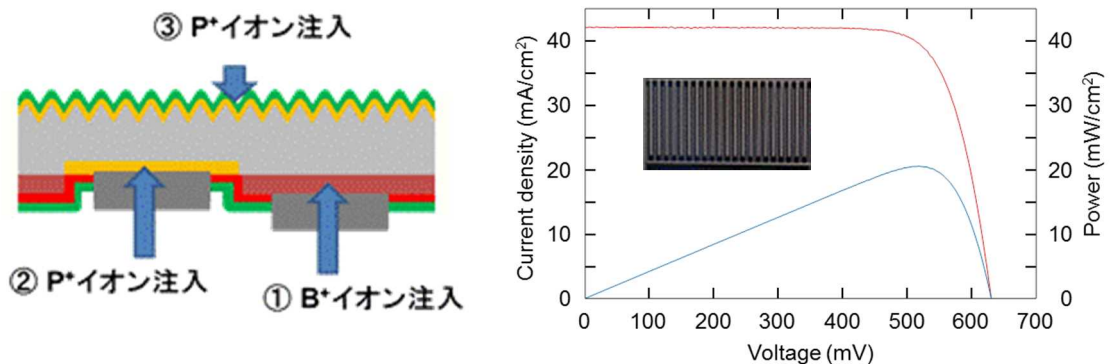
図Ⅲ-2-(二)-B-5 イオン注入直後と熱処理後の断面 TEM 写真



図Ⅲ-2-(二)-B-6 イオン注入技術で作製した両面受光セルの構造

また、N型バックコンタクトセルに関しては、セル構造や作製プロセスの検討を進め、エミッタ (B層)、FSF (P層)、BSF (P層)の形成すべてにイオン注入法を用いながら、フォトリソグラフィを用いたパターンニングが1回のみで簡易プロセスを開発し、セルを作製した。その結果、変換効率 20.5% (J_{sc} 42.1 mA/cm², V_{oc} 0.630 V, FF 0.773, 6.345 cm²(指定面積 da))を得た(図 B-7)。今後は、セル作製プロセスの最適化を進めることで、中間目標の 22%の達成を図る予定である。

さらに、バックコンタクトセルや両面受光セル等の作製プロセスの簡略化のため、注入マスクを用いたイオン注入技術の開発に着手した。産総研独自の注入マスクおよび注入マスク位置合わせ装置の設計・作製を行い、装置を導入した(図 B-8)。本装置によって、注入マスクとウェーハ間のあわせ精度が従来の数百μmから、数μmまで高精度化できることを検証した。

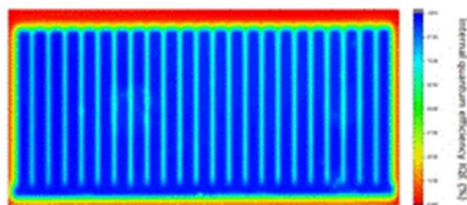


図Ⅲ-2-(二)-B-7 イオン注入技術で作製したバックコンタクトセルの構造



図Ⅲ-2-(二)-B-8 注入マスク位置合わせ装置装置と注入マスク

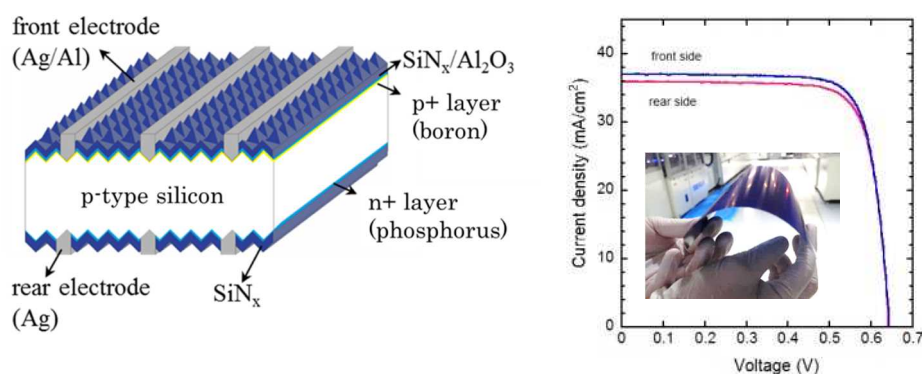
セル/モジュール評価技術については、太陽電池の表面側から裏面での内部量子効率が測定可能となる新規の測定手法を確立した（特願 2016-170095）。表面の反射率の影響を含んだ外部量子効率のマッピングはLBIC法などを用いて行われていたが、表面反射の効果を除いた純粋に太陽電池セル内部でのキャリアの再結合の様子を知るには、内部量子効率のマッピングは不可欠である。特に、バックコンタクトセルやPERCセルなどの特に裏面に構造を有する太陽電池の評価手法として有用である。図B-9にバックコンタクトセルの裏面側の内部量子効率マップの一例を示す。



図III-2-(二)-B-9 バックコンタクトセルの内部量子効率マッピング

②薄型（厚さ 80 μm）両面受光裏面接合セルの作製

バックコンタクトセルの薄型化の前に先行的に、サイズ 156 mm×156 mm、厚さ 80 μm、4本バスバーを有するP型両面受光裏面接合セル(p-type bifacial back-junction(p-BJ) cell)の作製を行い、作製プロセスの問題点などを抽出した。このセルの特徴は、裏面側にpn接合を有していることである。図B-10は、今回作製したセルの模式図とその電流-電圧特性である。今回のプロセスでは、熱拡散を用いた（イオン注入は用いていない）。セルが薄いため J_{sc} が低下しているが、 V_{oc} は通常のN型両面受光セルと同程度であった。また、P型のウェーハを用いているが、表面側と裏面側との変換効率の比（バイフェイシャリティ）は、96.8%と非常に高い値が得られた（表B-1）。

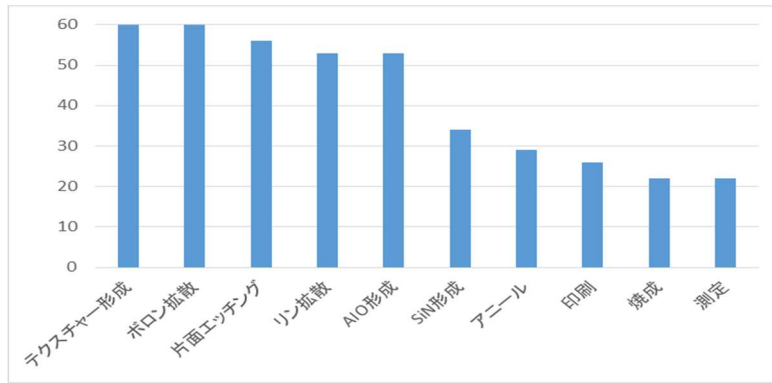


図III-2-(二)-B-10 厚さ 80 μm、P型両面受光裏面接合セルの構造と電気的特性

表III-2-(二)-B-1 厚さ 80 μm、P型両面受光裏面接合セルの特性

	Isc	Voc	FF	Eff	Jsc	Area	Bifaciality
	(A)	(V)		(%)	(mA/cm ²)	(cm ²)	
p側から測定	8.853	0.643	0.783	18.66	37.0	239	96.83%
n側から測定	8.604	0.642	0.781	18.07	36.0	239	

セル厚を 80 μm まで薄くすることで搬送系や治具等によるセルクラック、割れが非常に発生し易くなることが明らかとなった。図 B-11 に各プロセス工程での良品数を示す。プロセス起因による問題は少ないが、生産性を落とさずに量産するには、搬送系や治具等の開発が必要である。また、両面受光セルは、構造上表裏対称なのでセルの反りは殆どないが、この薄さでは、自重でたわみが発生するため、セルカセットの構造の検討も必要である。今回、産総研（福島）の試作ラインにおいて 80 μm 厚のウェーハを用いて初めてセルを作製したが、セルプロセスでの総合歩留は、36.7%（歩留にはセル特性や外観不良は含まない）であった。



図Ⅲ-2-(二)-B-11 各プロセス工程での良品数

(3) 共通基盤技術に係る技術開発 (モジュール)

①薄型セルを用いた高信頼性高効率モジュールに関する技術開発

両面ガラス構造モジュールの信頼性の向上のため、厚さ 170~180 μm の Al-BSF セルを用いて、両面ガラス構造のモジュール (ガラス(厚さ 0.85 mm)/EVA/セル/EVA/ガラス(厚さ 0.85 mm)) と参照用に通常の構造のモジュール (ガラス(厚さ 3.2 mm)/EVA/セル/EVA/バックシート) を作製した。これを用いて、シーケンス試験および単独試験を行った。具体的には、UV 試験、冷熱衝撃試験(TCT)、プレッシャークッカー試験(PCT)、PID 試験、DML 試験を行った。試験結果を表 B-2 に示すが、両面をガラス構造にすることで、信頼性の向上を図ることができた。

表Ⅲ-2-(二)-B-2 シーケンス試験の結果

	試験方法	ダブルガラスモジュールの優位性	備考
シーケンス試験	UV⇒TCT⇒DML	○	REFモジュールはTCT試験でFF低下
	UV⇒PCT⇒TCT	○	REFモジュールはTCT試験でFF低下
単独試験	PCT	○	REFモジュールはFF低下
	DML	○	REFモジュールはセルクラック発生

②薄型 (厚さ 80 μm) セルを用いたモジュール作製技術

厚さ 80 μm のセルを用いてモジュールを作製し、モジュール化プロセスでの課題抽出を行った。用いたセルはバイフェイシャルp-BJセルである。配線材料には鉛フリー半田/銅 200 μm /鉛フリー半田、タブ線幅 1.2 mm を用いた。モジュール構造はスーパーストレートタイプである。配線材の接合には導電性フィルム(CF)を用いた。

セル割れに対するプロセス上の問題はなかったがセルは非常に脆く量産化の場合、薄型セル対応のための装置側での対応が必要である。タブストリング作製ではセルに大きな反りが生じ、CF 本加圧での温度を変えることで反りの状態は変化した。加熱は上側と下側の両面で行っているが、上側と下側を同じ温度にした場合、上側に大きな反り (約 8 mm) を生じた。これは上側のタブ線と下側のタブ線



図Ⅲ-2-(二)-B-12 厚さ 80 μm のセルを用いて作製したモジュールとタブストリング作製でのウェーハの反りの様子

の冷却速度の違いによるものと考えられる。このため、上部側の温度を下げたところ反りは低減したが、逆方向への反りやうねりを生じ問題ないレベルまで低減するには至らなかった。この様子を図 B-12 に示す。薄型セルに対しては、反りやうねりを生じない接続方法の開発が必須で、具体的にはセルの電極設計、配線材、配線法等の見直しを行う必要があることが明らかとなった。

2. 実用化・事業化見通し

薄型ウェーハのセル評価プロセスの構築に関しては、原理実証を主眼とした小面積 a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型太陽電池にて開発を進め、厚さ 75 μm 以下の極薄ウェーハでも標準厚ウェーハと遜色ない発電効率が可能であることを示した。この成果は、連携先であるコマツ NTC(株)の技術開発（狭ピッチ・薄型ウェーハスライス技術）を強く支援するものである。

同じく連携先である(株)京セラとは、現在は特にモジュールの信頼性についての評価を共同で進めている。1の成果詳細の中にあるように、(株)京セラが作製したモジュールを産総研（福島）に持ち込んで信頼性試験を行っている。さらに、今後市場の主流となる PERC 型のセルについても、より進んだ議論ができるよう検討を開始している。(株)京セラとは、定期的に会議を開催し、そのなかで信頼性の評価についてなどの議論を行っている。

この様に、今後も、NEDO プロジェクトで得られた成果を連携先と共有することで、連携先企業の事業への支援を進めていく予定である。

3. 波及効果

薄型ウェーハのセル評価プロセスの構築に関しては、a-Si:H/c-Si ヘテロ接合型太陽電池において厚さ 75 μm 以下の極薄ウェーハでも標準厚ウェーハと遜色ない発電効率が可能であること、また高い V_{oc} が期待出来ることが示されており、コスト低減のみならず、温度特性に優れる高 V_{oc} に特化したセルの開発にも寄与し得る。また、並行して実施した基礎評価から得られた知見は、薄型セルのみに留まらず、広く発電効率向上に寄与し得る。

イオン注入技術と注入マスクとを用いたセル作製プロセスに関しては、高効率セルをより工程数の少ないプロセスで作製できることが大きな特徴となっている。このため、今後セルの高効率化が進むにつれて、セル構造がより複雑になり、プロセスの工程数も増えてくると想定されるが、このような複雑なプロセスにこそイオン注入技術の利点が活かされると考えられる。国内でイオン注入装置を有して太陽電池の開発を進めている唯一の公的機関として、NEDO プロジェクトの中で従来にない簡易なプロセスで効率向上が図られることを示すことと、イオン注入装置の低コスト化への道筋を示すことで、現在は海外の一部のメーカーのみがイオン注入技術を使用している状況から、標準的なプロセスとして国内外のメーカーへ導入が進むようになると期待される。

薄型セルに対応した、セルおよびモジュールの量産化技術については、海外でも進展がみられていないが、このプロジェクトでその方向性や解決方法を提示できれば、コスト低減の有力な方法として見直されるようになると考えている。

また、開発された評価手法に関しても、国内外の研究機関への展開が期待される。

4. 今後の展開

最終目標である「厚さ 50 μm のセル評価プロセスの確立」、「薄型セルを用いた高効率・高信頼性モジュール（変換効率 22%）の実現」に向けて、産総研のオリジナル技術を確立するとともに、企業との連携を一層深めた研究開発を進める。また、基礎的な評価も継続して進め、発電効率向上や生産性向上に繋がる知見を得る。これらの知見から、薄型セルならではの特長を活かした高効率化や新規太陽電池構造の提案を目指す。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	2	0	2 件
論文	2	2	2	6 件
研究発表・講演（うち国際会議）	5(4)	21(9)	5(5)	31 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	産業技術総合研究所	特願 2016-170095	国内	2016/8/31	出願	太陽電池の評価方法及び評価装置並びに太陽電池の評価用プログラム	望月敏光、坂田功、白澤勝彦、高遠秀尚
2	産業技術総合研究所	特願 2017-065927	国内	2017/3/29	出願	半導体装置、太陽電池及び太陽電池の製造方法	棚橋克人、森谷正昭、木田康博、高遠秀尚

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	T. Mochizuki, C. Kim, M. Yoshita, J. Mitchell, Z. Lin, S. Chen, H. Takato, Y. Kanemitsu, and H. Akiyama	産総研	Solar-Cell Radiance Standard for Absolute Electroluminescence Measurements and Open-Circuit Voltage Mapping of Silicon Solar Modules	Journal of Applied Physics 119, 034501(2016)	有	2016/1/19
2	S. Nunomura, I. Sakata, K. Matsubara	産総研	Impact of band tail distribution on carrier trapping in hydrogenated amorphous silicon for solar cell applications	J. Non-Cryst. Solids 436, 44 (2016).	有	2016/2/12
3	S. Joonwichien, K. Shirasawa, S. Simayi, K. Tanahashi, and H. Takato	産総研	Thermal treatment effects on flat-band voltage shift in atomic-layer-deposited alumina or aluminium oxide/Silicon nitride passivation stack	Energy Procedia (Vol. 92, PP. 353-358)	有	2016/7/1
4	S. Simayi, Y. Kida, K. Shirasawa, T. Suzuki, and H. Takato	産総研、 日本化成	Method of Removing Single-Side Doped Layer While Maintaining Pyramid Textured Surface of n-Type Bifacial Solar Cells	IEEE Journal of Photovoltaics (Vol. 7, No. 2, PP. 458-462)	有	2017/1/16

5	S. Nunomura, H. Katayama, and I. Yoshida	産総研	Hydrogen atom kinetics in capacitively coupled plasmas	Plasma Sources Sci. Technol. 26, 055018 (2017).	有	2017/4/6
6	K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, S. Utsunomiyai, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Impact of post-implantation annealing conditions on electrical characteristics of phosphorus-implanted emitter crystalline silicon solar cell	IEEE Journal of Photovoltaics (Vol. 7, No. 3, PP. 741-746)	有	2017/5/1

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	布村正太、坂田功、松原浩司	産総研	太陽電池用 a-Si:H のキャリア捕捉とデバイス特性	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015/9/14
2	K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, N. Suzuki, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Two-Dimensional Carrier Distribution in Phosphorus Implanted Emitter Observed by Scanning Capacitance Microscopy	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2015/9/14
3	T. Mochizuki	産総研	Voc Evaluation of Solar Cells and Modules Using Absolute El Images	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2015/9/17
4	S. Nunomura	産総研	Silicon-based thin-film and heterojunction solar cells	Symposium on Advanced Solar Cells, KVS (Plenary talk)	2016/2/17
5	S. Joonwichien, S. Simayi, K. shirasawa, K. Tanahashi, H. Takato	産総研	Thermal treatment effects on flat-band voltage shift in atomic-layer-deposited alumina or aluminum oxide/silicon nitride passivation	6 th international Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2016	2016/3/7
6	布村正太、坂田功、松原浩司	産総研	EFFECTS OF CARRIER TRAPPING ON SOLAR CELL PERFORMANCES	The Photovoltaic Technical Conference 2016	2016/5/11

7	S. Joonwichien, K. Shirasawa, S. Simayi, K. Tanahashi, and H. Takato	産総研	WET OXIDATION EFFECTS ON THE ELECTRICAL AND INTERFACE PROPERTIES OF ALD Al ₂ O ₃ AND ALD-AlO _x /SiN _x PASSIVATION STACKS FOR PERC SOLAR CELLS	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2016/6/20
8	K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, S. Utsunomiyai, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	IMPLANTATION OF PHOSPHORUS INTO PYRAMIDAL TEXTURE IN SILICON SOLAR CELL	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2016/6/20
9	S. Simayi, T. Fukuda, K. Shirasawa, N. Suzuki, and H. Takato	産総研	Optimize the front side boron emitter by removing the boron depleted area with less damages on the texture pyramids	32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC)	2016/6/20
10	S. Nunomura, I. Sakata, and K. Matsubara	産総研	Measurements of carrier transport and trapping in semiconductor films during plasma processing	15th International Conference on Plasma Surface Engineering	2016/9/14
11	望月敏光, Supawan Joonwichien, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	内部量子効率マッピングによる PERC 裏面の評価	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/16
12	棚橋克人, 森谷正昭, 木田康博, 宇都宮智, 福田哲生, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	イオン注入プロセスによる結晶シリコン太陽電池の高効率化	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/16
13	Shalamujiang Simayi, 木田康博, 白澤勝彦, 鈴木竜暢, 高遠秀尚	産総研, 日本化成	低濃度ボロン領域除去による、n-PERT 表面の改善	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/16
14	K. Tanahashi, M. Moriya, Y. Kida, S. Utsunomiyai, T. Fukuda, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Phosphorus-implanted emitter crystalline silicon solar cell with Al-BSF	21st International Conference on Ion implantation Technology	2016/9/26
15	T. Tachibana, K. Tanahashi, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Back contact n-type silicon solar cell with one side etching	CSSC-9&Si-Materials	2016/10/10

16	T. Mochizuki, S. Joonwichien, M. Jonathon, K. Tanahashi, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Evaluation of Rear Surfaces of PERC Solar Cells Using Internal Quantum Efficiency Mapping	The 26 th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10/26
17	望月敏光	産総研	ヘテロ界面の光学計測技術	学振 175 委員会 次世代シリコン太陽電池分科会 第 5 回研究会 (依頼)	2016/11/7
18	S. Nunomura, I. Sakata, and K. Matsubara	産総研	Carrier transport and trapping during a-Si:H growth - for more efficient solar cells- (招待講演)	The 26th annual meeting of MRS-J	2016/12/20
19	Shalamujiang Simayi、木田康博、白澤勝彦、高遠秀尚	産総研	n 型バイフェシナルセル用エッチバックボロンエミッタの再結合解析	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/15
20	Supawan. Joonwichien, 白澤勝彦, 木田康博, 宇都宮智, 森谷正昭, 高遠秀尚	産総研	Improving the local Al-contacts for PERC cells: void formation suppression using Al paste consisting of Si content, and it impacts on cell performance	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/14
21	立花福久, 望月敏光, 棚橋克人, 白澤勝彦, 高遠秀尚	産総研	量子効率マッピングを用いた裏面電極型 Si 太陽電池の評価	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/15
22	海汐寛史, 松井卓矢, 齋均, 櫻井岳暁, 松原浩司	産総研	太陽電池応用に向けたガラス基板上への液相結晶化シリコン薄膜の形成と評価	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/15
23	Adrien Bidiville, 松井卓矢, 齋均, 松原浩司	産総研	a-Si:H 太陽電池の局在準位評価 (2) -局在準位生成のフェルミ準位依存性	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/17
24	Adrien Bidiville, 松井卓矢, 齋均, 松原浩司	産総研	a-Si:H 太陽電池の局在準位評価 (3) -太陽電池のロス解析-	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/17
25	齋均 ¹ , 海汐寛史 ¹ , 布村正太 ¹ , 松井卓矢 ¹ , 河津知之 ² , 高遠秀尚 ¹ , 松原浩司 ¹	産総研, コマツ NTC	極薄ウェーハを用いた a-Si:H/c-Si ヘテロ接合太陽電池の検討	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/17

26	望月敏光 ¹ 、伊藤明 ² 、棚橋克人 ¹ 、中西英俊 ² 、川山巖 ³ 、斗内政吉 ³ 、白澤勝彦 ¹ 、高遠秀尚 ¹	1 産総研, 2SCREEN, 3 大阪大学	レーザーテラヘルツエミッション顕微鏡によるAlO/Si膜の電界効果パッシベーションの評価	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/3/17
27	S. Joonwichien, T. Mochizuki, K. Shirasawa, and H. Takato	産総研	Effects of different Al pastes with different particle sizes on rear local contact and passivated emitter and rear cell performance	7th international Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2016	2017/4/4
28	S. Nunomura, I. Sakata, K. Matsubara	産総研	Electronic transport properties of a-Si:H passivation layers for silicon hetero-junction solar cells	The 2017 E-MRS Spring Meeting and Exhibit	2017/5/22
29	S. Joonwichien, K. Shirasawa, S. Utsunomiya, and H. Takato	産総研	Effect of Si content in Al paste on Local Al Rear Contacts in PERC Cell	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017/6/26
30	H. Sai ¹ , H. Umishio ¹ , T. Matsui ¹ , S. Nunomura ¹ , H. Takato ¹ , T. Kawatsu ² , and K. matsubara ¹	1 産総研, 2 コマツ NTC	Potential of a a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells with very thin wafers	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017/6/28
31	A. Bidiville, T. Matsui, H. Sai, K. Matsubara	産総研	Investigation of interface and bulk localized states in a-Si:H solar cells	IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC-44)	2017/6/29

C Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発 (北陸先端科学技術大学)

1. 成果詳細

結晶シリコン(c-Si)太陽電池のエネルギー変換効率の向上と低価格化が図れる基盤技術の開発を目的とした研究である。具体的には、下地基板表面に損傷を与えないことで優れた界面が形成できる低温薄膜堆積法、Cat-CVD (Catalytic Chemical Vapor Deposition=触媒化学気相堆積)法、および、それから派生した、100℃以下の低温でリン(P)やボロン(B)を c-Si に導入できる新不純物ドーピング技術、Cat-doping (Catalytically Cracked Impurity Doping) 技術などの新技術を駆使、厚み 100 μm 以下の薄い c-Si 基板の使用にも対応できる、低価格で高効率なアモルファス・シリコン(a-Si)/c-Si ヘテロ接合裏面電極型 (Hetero-junction Back Contact=HBC) 太陽電池を作製する基盤技術の開発を目指す。

ここでは、特に、

(研究項目-1)「Cat-CVD 法を用いた超高性能パシベーション膜作製技術とその量産基礎技術の開発」、
(研究項目-2)「Cat-doping を用いたパシベーション性能の飛躍的向上、a-Si/c-Si ヘテロ接合界面特性の改善、その量産基礎技術の開発」、

の2研究項目を設定し、その目的を達成する。以下、その研究項目ごとに平成 27 年度から 29 年度までの3年間の研究成果を述べる。

(研究項目-1)「Cat-CVD 法を用いた超高性能パシベーション膜作製技術とその量産基礎技術の開発」 の成果:

この研究項目では、Cat-CVD 法を用いることで、高性能なヘテロ接合太陽電池を実現させることを目指している。本プロジェクト開始以前に、Cat-CVD 法により作られたシリコン窒化 (SiNx) 膜/a-Si 膜の積層膜で c-Si 表面を覆うと、c-Si 表面でのキャリア再結合が著しく抑制され、c-Si のキャリア寿命が大きく伸びることを見出していた。そこで、本プロジェクト発足後、早速、連携先企業 (シャープ株式会社) から、実際の太陽電池製造に使用している、光閉じ込めのための凹凸構造(テクスチャー構造)の付いた c-Si 基板を頂き、その上に Cat-CVD 法により SiNx/a-Si 積層膜の堆積を行った。連携先企業は、裏面電極型太陽電池の製造には実績があり、太陽光照射面のテクスチャー構造の作製にも優れている。我々が JAIST 内で作製したテクスチャー構造を持つ c-Si 基板上に Cat-CVD 法により SiNx/a-Si 積層膜を堆積した時のキャリア寿命は、本プロジェクト開始以前は、5-6 ms 程度、従来からの PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition=プラズマ支援化学気相堆積)法で SiNx/a-Si 積層膜を堆積した時のキャリア寿命が 3-5 ms であったが、送られてきた連携先企業の基板に我々が Cat-CVD 法で膜堆積した場合には、キャリア寿命は 0.1 ms にも満たなかった。

一方、すでに我々は、Cat-CVD 法と PECVD 法それぞれで作られた a-Si/c-Si 界面を透過型電子顕微鏡で詳細に観察し、PECVD a-Si/c-Si 界面は 1.8 nm 程度の界面荒れが存在するが、Cat-CVD a-Si/c-Si 界面にはそれが見られず、PECVD 法では、堆積時に、約 1.8 nm 程度の表面のシリコン(Si)原子の一部が飛ばされていることを示唆する結果を得ていた。このことは、PECVD 法では、基板の輸送中の多少の汚染物は、堆積時のプラズマ衝撃で除去できる可能性があるが、下地表面を傷めずソフトに膜堆積する Cat-CVD 法ではその効果が期待できず、Cat-CVD 法により優れた界面が作れる特長を活かすためには、膜堆積前の表面洗浄が、PECVD 法以上に重要であるとの結論を得た。そこで、Cat-CVD 法に適合する太陽電池基板用の洗浄技術の開発から、本プロジェクトを始めることとした。

c-Si 表面の洗浄法には、例えば、RCA 洗浄法と呼ばれる優れた洗浄法が、半導体集積回路製造のために開発されてきた。ところが、太陽電池は半導体集積回路と異なり、表面に光閉じ込めのための複雑なテクスチャー構造を持っている。すなわち、洗浄薬品が、それらテクスチャー構造の内側に均一に浸透するため、化学薬品の表面張力を制御する必要があると考えた。何種類かの薬液を調べた後、我々は、濃硫酸(H₂SO₄)溶液による洗浄が、テクスチャー構造自体に変化を与えない、優れた洗浄法であることを見出したが、その濃硫酸を 130-140℃に加熱して流動性を向上させることで、テクスチャー構造に対する洗浄力が飛躍的に向上することを発見した。さらに、それ以外の、例えば、弗酸(HF)や過酸化水素(H₂O₂)溶液には、メタノールを混入して、溶液の濡れ性(表面張力)を制御することで、洗浄の安定性が向上することも見出した。(H₂O₂とメタノールは純水で希釈して相互の反応を抑えている。) こうして開発した洗浄法を連携先企業から送られてきたテクスチャー基板に適用し、その基板両面に Cat-CVD 法で SiNx/a-Si 積層膜を堆積した時のキャリア寿命を、洗浄に用いた濃硫酸の温度の関数として、その濃硫酸の粘度とともに示したのが、図 III-2-(二)-C-1 である。平面基板に対しては、濃硫酸の温度の依存性はないが、テクスチャー構造では、薬液温度により粘性を調整して薬液の浸透を図ることの重要性を、この図は示している。また、この図には、同じ基板を用いた場合に、

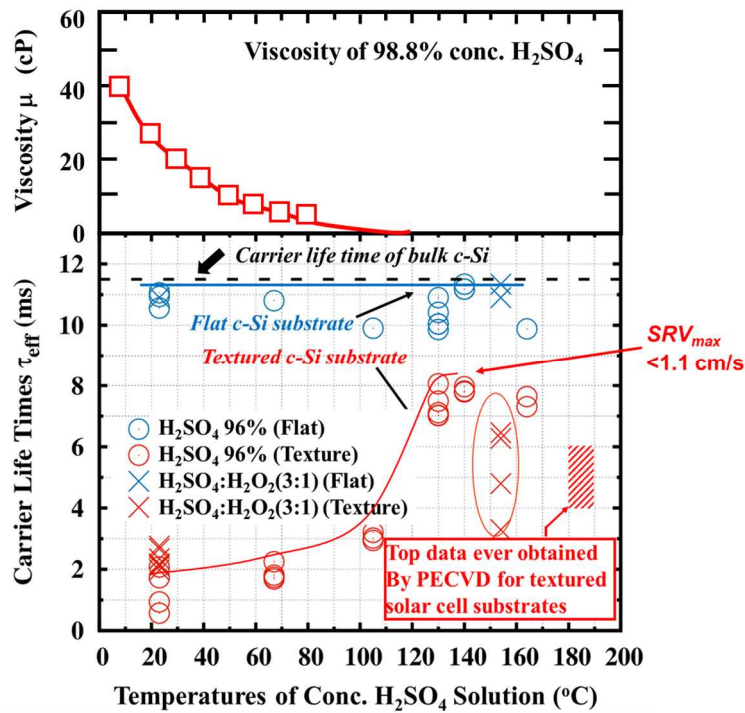


図 III-2-(二)-C-1. Cat-CVD 膜でパシベーションされた試料のキャリア寿命と H₂SO₄ の温度の関係

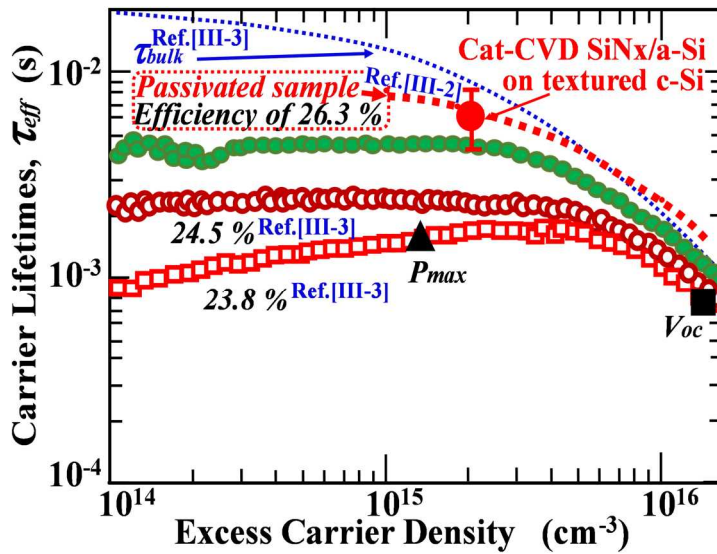


図 III-2-(二)-C-2. キャリヤ寿命の光生成キャリア密度依存性 (カネカ株式会社の効率 26.3%、24.5%、23.8%の太陽電池に対する結果を、我々のパシベーション膜の結果と比較している)

PECVD 法によって同様な膜を堆積した場合の結果も示しているが、濃硫酸の温度調整によっては、PECVD 法より、はるかに高いキャリア寿命が得られることも示している。この基板の厚みは 170 μm であり、基板内でのキャリアの再結合を無視した場合に予想される表面再結合速度(SRV)の最大見積値 (SRV_{max})は、1.1 cm/s とテクスチャー基板に対して今まで報告の無い、極めて低い値を実現した III-1。

一方、a-Si/c-Si ヘテロ接合により、26%以上の効率の太陽電池が、カネカ株式会社により作られている。図 III-2-(二)-C-2 に、そのカネカ株式会社が、26%以上の効率の HBC 太陽電池を作製した際に用いたパシベーション膜の特性を、キャリア寿命の光生成キャリア密度の依存性として表したものを III-2、彼らが以前、効率が 25%以下の太陽電池に関して報告した同様な値 III-3 と合わせてまとめている。図中の、「緑●印」は、作製された効率 26.3%の太陽電池の照射光強度依存性から算定したキャリア寿命の値を示しており、「赤- - -印」は、使われた太陽電池用基板を、効率 26.3%を実現したパシベーション膜で被覆した場合のキャリア寿命を示している。図には、我々の Cat-CVD 膜の結果も「赤

●」で示しているが、カネカ株式会社の報告値と比べて、少なくとも遜色はなく、我々のパシベーション膜が効率 26%以上の太陽電池製造にも適用できるものであることを示唆している。

現時点で、我々自身の手で、効率 25%以上の太陽電池の作製ができていないが、図 III-2-(二)-C-2 に示す結果は、本プロジェクトの中間目標「効率 25%以上の太陽電池の実現に資する基盤技術開発」は十分に達成できていることを示している。

(研究項目-2)「Cat-doping を用いたパシベーション性能の飛躍的向上、a-Si/c-Si ヘテロ接合界面特性の改善、その量産基礎技術の開発」の成果

加熱触媒体によりホスフィン(PH₃)やジボラン(B₂H₆)ガスを接触分解した種に c-Si 表面を曝すと、わずか 80°C で c-Si 中に P 原子や B 原子を導入できることを発見し、この新不純物ドーピング法を Cat-doping 法と名付けた III-4。この研究項目では、この Cat-doping 技術による c-Si 界面特性の向上に加え、裏面電極の安価な製造法の開発も併せて目指している。すでに平成 27 年度に、Cat-doping 法により P 原子を導入して表面ポテンシャルを調整した n 型 c-Si 上に SiN_x を堆積すると、SiN_x 単層膜としては世界最高レベル、SRV_{max}= 2 cm/s の優れたパシベーション特性が得られることを見出している。

一方、裏面電極型ヘテロ接合太陽電池は、26%以上の世界最高効率を実現するなど、本研究で着目した通り、高効率太陽電池のための基本構造である。しかし、現時点では、その裏面電極パターン形成は複雑で高価であり、低価格プロセスの開発は急務である。そこで、本プロジェクトでは裏面電極の安価な製造法に関わる技術開発にも注力した。その中心は、安価なハードマスク・プロセスが可能となるイオン注入技術の裏面電極形成への適用である。具体的には、n 型 c-Si 基板の裏面全面に p 型 a-Si(p-a-Si) / 真性 a-Si(i-a-Si) を堆積しておき、その一部に P 原子をイオン注入、その場所のみを n 型 a-Si(n-a-Si) に変換し、その後、n-a-Si、p-a-Si のパターンに沿ってプリント技術による金属電極形成を行うことで、裏面電極を安価に作製することを計画した。

一般的に、c-Si へのイオン注入では、注入時に発生する欠陥除去に 800°C 以上の高温熱処理を必要とする。ところが、a-Si 膜を含むヘテロ接合では、熱処理温度は 300°C 程度までしか上げられない。そこで、まず i-a-Si/c-Si 構造に 5 kV で、P 原子を、質量分離機能を持たない廉価なプラズマ・イオン注入装置を用いてイオン注入し、低温熱処理で、どの程度欠陥が回復できるのか、c-Si 基板のキャリア寿命から探ることにした。図 III-2-(二)-C-3 は、注入ドーズ量（質量分離を行っていないので、P 原子のドーズ量と一致する保証はない。） $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ の場合で、かつ、i-a-Si 膜厚、10、20 nm の場合の、イオン注入前のキャリア寿命 $\tau_{\text{eff}0}$ に対するイオン注入後、および、250°C、210 min の熱処理を加えた後、それぞれのキャリア寿命 τ_{eff} の比を示したものである。 $\tau_{\text{eff}0}$ はこの場合、2-3 ms である。図に示すように、わずか 250°C の熱処理で、キャリア寿命に影響する欠陥が完全に除去されることが見出された。

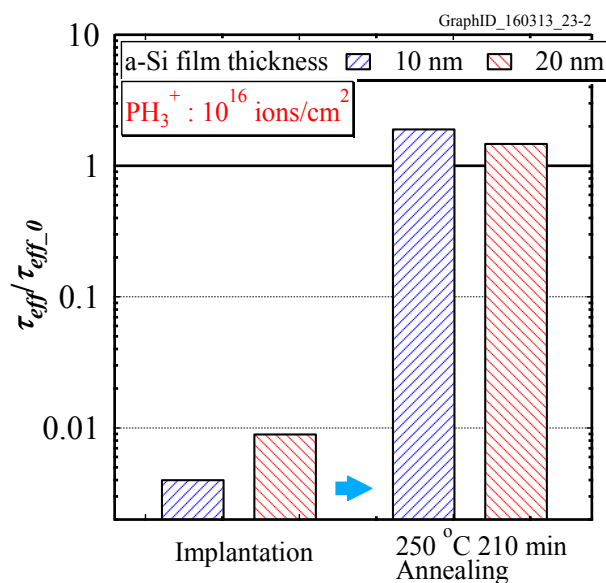


図 III-2-(二)-C-3. a-Si/c-Si ヘテロ界面に P 原子をイオン注入した直後、および 250°C 熱処理後の試料のキャリア寿命のイオン注入前の値との比較 (a-Si 層の厚み、10 nm と 20 nm の場合を示している)

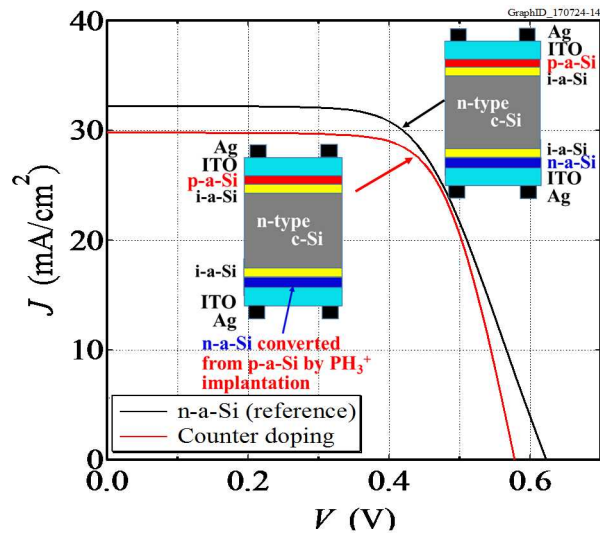


図 III-2-(二)-C-4. p-a-Si/n-c-Si/p-a-Si 試料の片面に P をイオン注入して形成した簡易型太陽電池の特性と、はじめから n-a-Si/n-c-Si/p-a-Si 構造の同じく簡易型太陽電池の特性の比較（まだ、鏡面基板を用いた初步的特性ではあるが、p-a-Si 層が n-a-Si 層に反転して、太陽電池が動作したことが確認される）

なお、その後の研究により、この低温熱処理が可能となったのは、質量分離機能がないイオン注入装置を用いたため、同時にイオン注入されてしまう水素(H)原子が、欠陥を消去することによることを明らかにしている。

次に、実際にこのプラズマ・イオン注入を用いて太陽電池を試作した。最終的には、裏面電極構造で確認すべきであるが、第一段階として、n 型 c-Si の両面に p-a-Si/i-a-Si を堆積し、その片面に P 原子を、プラズマ・イオン注入装置を用いてイオン注入、その後 250°C の熱処理を行い、透明導電膜(ITO)を堆積した後、金属電極を付けて太陽電池を作製した。その特性を図 III-2-(二)-C-4 に示す。イオン注入された p-a-Si 面が n-a-Si に反転し、太陽電池が機能することが確認される。すなわち、p-a-Si 層が反転し n-a-Si 層として機能していることを確認した。

また、通常、ヘテロ接合の a-Si 層と金属電極層の間には、ここでも示すように、透明導電膜を挟むが、工程がその分増えてしまう。そこで、次に、a-Si 層の上に直に金属を堆積して電極とする単純な工程の問題点の把握とその解決法の提案を行うこととした。その結果、p-a-Si 層の上に、接触面のポテンシャル調整のために、P 原子の Cat-dope 層、または、2 nm 厚以下の薄い n-a-Si 層を堆積してからアルミニウムを真空蒸着したところ、太陽電池の曲線因子(FF)と開放電圧(Voc)が改善し、金属材料直付けでも高性能な太陽電池が実現できる可能性を見出すなど、イオン注入法の研究と併せ、安価な HBC 太陽電池製造法開発の可能性を示す成果を得ることができた。

この（研究項目・2）は、将来の展開も目指すものであるが、目標通りの結果を得ることができている。

2. 実用化・事業化見通し

すでに、量産用大型 Cat-CVD 装置の開発は、2001 年 9 月から 2004 年 3 月の間に行われた、NEDO・戦略的産業技術実用化開発事業、「大型 Cat-CVD 装置の製作とその大面積薄膜形成技術の開発」（補助事業者；株式会社アルバック、研究支援連携機関；北陸先端科学技術大学院大学）によりなされ、その商品化に成功しており、Cat-CVD 量産装置自体は市場で購入できる態勢が整えられている。

実際、国内外で、すでに複数社が非公開のうちに、Cat-CVD 量産装置を使用している模様である。Cat-CVD 法の、①原料ガス使用量の少なさ、②クリーニング頻度の少なさ、などの量産上のメリットは導入企業には認識されており、Cat-CVD 技術普及の観点から見れば、実用化はこのまま拡大進行すると思われる。しかし、実験段階の検討はともかく、本研究で目指している、HBC 太陽電池製造に Cat-CVD 法を適用している企業は現時点では 1 社もなく、本研究の成果の展開が期待される。

現在、中国の大手太陽電池メーカーを中心に、熱拡散を中心とする従来型 c-Si 太陽電池製造ラインの構築が一段落したところで、一部、ヘテロ接合太陽電池用の製造ラインの構築を始めている企業もあるが、まだ、その開発意欲は高くはない。HBC 太陽電池が、次世代太陽電池の本命であるとの認識

は広くなされているので、従来型太陽電池の製造ラインの老朽化に伴い、おおよそ、5年程度の期間を経て、本研究成果の本格的な事業化が始まると予想している。

また、本研究の最初の成果である、太陽電池用のテクスチャー基板に適した洗浄法は、上に述べた太陽電池製作に協力いただいた企業をはじめ、すでに検討が行われている。

イオン注入法の適用による裏面電極構造の廉価な作製法の開発に関しては、特に、中国を中心に国外企業の関心が高く、我々のデータ次第では、短期間のうちに実用化が進行するものと思われる。

3. 波及効果

本研究の成功により広く Cat-CVD 技術が普及することは、太陽電池のみならず、有機 EL のパシベーション分野などへの Cat-CVD 技術の展開に道を拓く基盤となる。また、本研究で開発中の Cat-doping 技術は、低温での不純物導入を目指す、例えば高温処理の必要なシリコン・カーバイトなどを用いた電力用デバイス開発などにも適用できる可能性もあり、今後の展開が期待される。

また、わずか 250°C の熱処理でイオン注入欠陥が除去できるとの本研究の成果は、広く一般のデバイス作製に展開できる可能性も秘めており、半導体産業全体への大きな波及効果も期待できる。

4. 今後の展開

まず、(研究項目-1) に関しては、Cat-CVD パシベーション膜を用いた太陽電池の試作を企業と組んで進めており、Cat-CVD 技術をベースとした効率 25%、26% の HBC 太陽電池の実現とその事業化に近づいており、今後もこの努力を継続する。

一方、(研究項目-2) は、まだ開発途上の項目も多く含んでいる。例えば、イオン注入による HBC 太陽電池製造に関する基礎データは、現在かなり集めてはいるが十分ではない。また、裏面電極の安価な作製工程に関する検討も、昨年度始めたばかりで、事業化を企業に決断させるのには、さらに、2、3 年の継続した研究が必要である。今後も、現在検討中の方向に沿った研究開発を行っていく。

[参考文献]

- III-1 C.T. Nguyen, K. Koyama, K. Higashimine, S. Terashima, C. Okamoto, S. Sugiyama, K. Ohdaira, and H. Matsumura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **56**, (2017), 056502.
- III-2 K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, and K. Yamamoto, *Nature Energy*, **2**, (2017), 17032.
- III-3 D. Adachi, J.L. Hernandez, and K. Yamamoto, *Appl. Phys. Letters*, vol.107, (2015), 233506.
- III-4 H. Matsumura, T. Hayakawa, T. Ohta, Y. Nakashima, M. Miyamoto, T.C. Thi, K. Koyama, and K. Ohdaira, *J. Appl. Phys.*, **116**, (2014), 114502.

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	1	0	1 件
論文	6	4	1	11 件
研究発表・講演（うち国際会議）	13(4)	20(9)	1(1)	34 件
展示会への出展	1	1	0	2 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学 法人北陸 先端科学 技術大学 院大学	特願 2017- 047376	国内	2017 年 3 月 13 日	出願	ヘテロ接合型太陽電池の製造方法、ヘテロ接合型太陽電池およびヘテロ接合型結晶シリコン電子デバイス	松村英樹・ 大平圭介・ 小山晃一

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	T. Ohta, K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Low temperature boron doping into crystalline silicon by boron-containing species generated in Cat-CVD apparatus.	Thin Solid Films, vol.575, pp.92-95	有	2015/04
2	T.C. Thi, K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Effect of hydrogen on passivation quality of SiNx/Si-rich SiNx stacked layers deposited by catalytic chemical vapor deposition on c-Si wafers	Thin Solid Films, vol.575, pp.60-63	有	2015/04
3	H. Matsumura, K. Higashimine, K. Koyama, K. Ohdaira.	JAIST	Comparison of Crystalline-Silicon/Amorphous-Silicon Interface Prepared by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition and Catalytic Chemical Vapor Deposition	J. Vac. Sci. Tech. B, vol.33, [no.3], pp.031201-1-4	有	2015/05
4	S. Tsuzaki, K. Ohdaira, T. Oikawa, K. Koyama, H. Matsumura	JAIST	Improvement in passivation quality and open-circuit voltage in silicon heterojunction solar cells by the catalytic doping of phosphorus atoms	Japanese Journal of Applied Physics, 54, 072301-1-5	有	2015/06

5	T. Oikawa, K. Ohdaira, K. Higashimine, H. Matsumura	JAIST	Application of crystalline silicon surface oxidation to silicon heterojunction solar cells	Current Applied Physics, 15, 1168-1172	有	2015/10
6	L. T. Anh, N. T. Cuong, P. T. Lam, M. Manoharan, H. Mizuta, H. Matsumura	JAIST	First-principles study of hydrogen-enhanced phosphorus diffusion in silicon	Journal Applied Physics, 119, 045703	有	2016/01
7	J. Seto, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Catalytic doping of phosphorus and boron atoms onto hydrogenated amorphous silicon films	Japanese Journal of Applied Physics, 55, 04ES05	有	2016/04
8	S. P. Le, T. Ui, T. Q. Nguyen, H.-A. Shih, T. Suzuki	JAIST	Low-frequency noise in AlTiO/AlGaN/GaN metal-insulator-semiconductor heterojunction field-effect transistors	Journal of Applied Physics 119, 204503	有	2016/05
9	Keisuke Ohdaira, Takafumi Oikawa, Koichi Higashimine, Hideki Matsumura	JAIST	Suppression of the epitaxial growth of Si films in Si heterojunction solar cells by the formation of ultra-thin oxide layers	Current Applied Physics vol.16, pp.1026-1029	有	2016/09
10	T. Ohori, M. Akabori, S. Hidaka, S. Yamada	JAIST	Characterization of spin-orbit coupling in gated wire structures using Al ₂ O ₃ /In _{0.75} Ga _{0.25} As/In _{0.75} Al _{0.25} As inverted heterojunctions	Journal of Applied Physics 120, 142123	有	2016/09
11	Cong T. Nguyen, Koichi Koyama, Shigeki Terashima, Chikao Okamoto, Shuichiro Sugiyama, Keisuke Ohdaira, Hideki Matsumura,	JAIST, SHARP	Novel chemical cleaning of textured crystalline silicon for realizing surface recombination velocity <0.2 cm/s using passivation Cat-CVD SiNx/a-Si stacked layers	Japanese Journal of Applied Physics 56, 056502	有	2017/04

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	K. Koyama, K. Higashimine, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Photo-Carrier Generation at a-Si Layer in SiNx/a-Si Stacked Passivation with Extremely Low Surface Recombination Velocity.	42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2015年 06月
2	Trinh Cham Thi, K. Koyama, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST	Defect Termination on c-Si Surfaces by Hydrogen for Improvement in the Passivation Quality of Cat-CVD SiNx and SiNx/P Cat-Doped Layers.	5th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies	2015年 06月
3	小山 晃一、 寺嶋 茂樹、 東嶺 孝一、 大平 圭介、 松村 英樹	JAIST	SiNx/a-Si 積層パッシベーションにおける Cat-CVD 法と PECVD 法の比較	第 12 回 Cat-CVD 研究会	2015年 07月
4	Trinh Cham Thi Koichi Koyama, Keisuke Ohdaira, Hideki Matsumura	JAIST	Reduction in interface state density at the interfaces of Cat-CVD SiNx/c-Si and SiNx/P Cat-doped layer/c-Si structures	第 12 回 Cat-CVD 研究会	2015年 07月
5	瀬戸 純一、 大平 圭介、 松村 英樹	JAIST	Cat-doping 法を用いた a-Si 膜への B および P のドーピング	第 12 回 Cat-CVD 研究会	2015年 07月
6	及川 貴史、 大平 圭介、 東嶺 孝一、 松村 英樹	JAIST	極薄酸化膜形成による a-Si 堆積時のエピタキシャル成長抑止	第 12 回 Cat-CVD 研究会	2015年 07月
7	H. Matsumura, K. Higashimine, K. Koyama, K. Ohdaira, S. Yokoyama	JAIST	Atomic Scale Study on Interface of Amorphous-Silicon/Crystalline-Silicon	26th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors	2015年 09月
8	瀬戸 純一、 大平 圭介、 松村 英樹	JAIST	P の Cat doping を施した a-Si 膜に対する活性化アニール	第 76 回応用物理学会秋季学術講演会	2015年 09月
9	Cong Thanh Nguyen, Koichi Koyama, Shigeki Terashima, Chikao Okamoto, Shuichiro	JAIST , SHARP	Effect of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface Recombination Velocity on Textured	2016 MRS Spring Meeting & Exhibit	2016年 03月

	Sugiyama, Keisuke Ohdaira, Hideki Matsumura		Structure		
10	瀬戸 純一、 大平 圭介、 松村 英樹	JAIST	a-Si パッシベーション膜 への Cat-doping による結 晶 Si の少数キャリア寿命 の変化	第 63 回応用物理学会春季 学術講演会	2016 年 03 月
11	小山 晃一、 山口 昇、 田中 美和、 鈴木 英夫、 大平 圭介、 松村 英樹	JAIST , ALVAC	a-Si/c-Si ヘテロ接合太陽 電池の a-Si 層へのプラズ マドーピング	第 63 回応用物理学会春季 学術講演会	2016 年 03 月
12	Cong Thanh Nguyen, Koichi Koyama, Shigeki Terashima, Chikao Okamoto, Shuichiro Sugiyama, Keisuke Ohdaira, Hideki Matsumura	JAIST , SHARP	Effect and Optimization of Chemical Cleaning before Deposition of Cat-CVD Passivation Films to Realize Extremely Low Surface Recombination Velocity on Flat and Textured Structures	第 63 回応用物理学会春季 学術講演会	2016 年 03 月
13	Huynh Thi Cam Tu, Koichi Koyama, Shigeki Terashima, Hideki Matsumura	JAIST	Low Temperature Cat- Doping of Phosphorous Atoms into Crystalline Silicon through Ultrathin SiO ₂ Layer	第 63 回応用物理学会春季 学術講演会	2016 年 03 月
14	Cong T. Nguyen, Koichi Koyama, Shigeki Terashima, Chikao Okamoto, Shuichiro Sugiyama, Keisuke Ohdaira, Hideki Matsumura	JAIST , SHARP	Cat-CVD Passivation Realizing Extremely Low Surface Recombination Velocity < 0.2 cm/s in Solar Cell Structure	IEEE Photovoltaic Specialist Conference	2016 年 06 月
15	T. C. T. Huynh, S. Terashima, K. Koyama, C. T. Nguyen, H. Matsumura	JAIST	Combination of Plasma- Damage-Less Cat-CVD with a New Low Temperature Impurity Doping Method, Cat-Doping, for Improvement of Solar Cell Performance	Euro-Photovoltaic Science and Technology Conference	2016 年 06 月

16	小山 晃一、 山口 昇、 田中 美和、 鈴木 英夫、 大平 圭介、 松村 英樹	JAIST , ALVAC	Cat-CVD a-Si 膜へのプラ ズマイオンドーピング	第 13 回 Cat-CVD 研究会	2016 年 07 月
17	大平 圭介、 瀬戸 純一、 松村 英樹	JAIST	a-Si への Cat ドーピング のパッシベーション能力へ の影響	第 13 回 Cat-CVD 研究会	2016 年 07 月
18	Huynh Thi Cam Tu, Koichi Koyama, Shigeki Terashima, Cong Thanh Nguyen, Hideki Matsumura	JAIST	Phosphorous Cat-doping for Improving Performance of Ultra- thinThermal-SiO _x /Cat-CVD SiN _x Stacked Passivation	第 13 回 Cat-CVD 研究会	2016 年 07 月
19	H. T. Pham, M. Akabori	JAIST	Morphological, structural and optical properties of ZnO nanowires on (111) oriented masked substrates by electrochemical method	第 3 回有機・無機エレクト ロニクスシンポジウム	2016 年 07 月
20	Huynh Thi Cam Tu, Koichi Koyama, Shigeki Terashima, Cong Thanh Nguyen, Hideki Matsumura	JAIST	Improving of passivation quality of Cat-CVD silicon-nitride single layer on crystalline- silicon: How can Cat- doping be applied?	9th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition	2016 年 09 月
21	Koichi Koyama, Noboru Yamaguchi, Miwa Tanaka, Hideo Suzuki, Keisuke Ohdaira, Hideki Matsumura	JAIST , ALVAC	A Plasma Ion Implantation to Cat-CVD -Si Passivation Films	9th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition	2016 年 09 月
22	Cong Thanh Nguyen, Koichi Koyama, Shigeki Terashima, Huynh Thi Cam Tu, Keisuke	JAIST	Chemical Resistant Silicon Nitride Prepared by Cat-CVD for Solar Cell Application	9th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition	2016 年 09 月

	Ohdaira, Hideki Matsumura				
23	Keisuke Ohdaira, Trinh Thi Cham, Koichi Koyama, Junichi Seto, Hideki Matsumura	JAIST	Cat-CVD Silicon Nitride Films and Catalytic Impurity Doping for Application to Silicon- Based Solar Cells	9th International Conference on Hot Wire (Cat) and Initiated Chemical Vapor Deposition	2016 年 09 月
24	X. T. Pham, M. Schmidt, T. T. Phan, M. Akabori, M. Koyano	JAIST	Fabrication of suspended ultrathin layer of MoO ₃ .97NbO ₃ S ₂ for measurement of thermal conductivity	第 13 回日本熱電学会学術 講演会	2016 年 09 月
25	Huynh Thi Cam Tu, Koichi Koyama, Cong Thanh Nguyen, Shigeki Terashima, Hideki Matsumura	JAIST	How do We Apply Cat- doping to Improve Passivation Quality of SiNx Single Layer Prepared by Cat-CVD on Crystalline Silicon?	第 77 回応用物理学会秋季 学術講演会	2016 年 09 月
26	小山 晃一、 山口 昇、 田中 美和、 鈴木 英夫、 大平 圭介、 松村 英樹	JAIST , ALVAC	イオン注入を用いた裏面電 極ヘテロ接合太陽電池製造 工程の簡略化 —— a- Si/c-Si パシベーション電 極の伝導型制御	第 77 回応用物理学会秋季 学術講演会	2016 年 09 月
27	H. T. Pham, M. Akabori	JAIST	Selective area growth of well-ordered ZnO nanowires on (111) oriented masked substrates by electrochemical method	第 77 回応用物理学会秋季 学術講演会	2016 年 09 月
28	K. Koyama, N. Yamaguchi, M. Tanaka, H. Suzuki, K. Ohdaira, H. Matsumura	JAIST , ALVAC	Simple fabrication of back contact hetero- junction solar cells by plasma-ion-implantation	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016 年 10 月
29	K. Ohdaira, J. Seto, H. Matsumura	JAIST	Catalytic phosphorus and boron doping to amorphous silicon films	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016 年 10 月
30	H. T. Pham, M. Akabori	JAIST	Raman and Photoluminescence spectra of ZnO nanowires growth on (111) oriented masked substrates by electrochemical method	The 5th International Conference on Nanostructures, Nanomaterials and Nanoengineering	2016 年 10 月

31	小山 晃一	JAIST	Cat-CVD 法とイオン注入を用いたヘテロ接合太陽電池の安価な作製法	学振 175 委員会・次世代シリコン太陽電池分科会第 5 回研究会	2016 年 11 月
32	小山 晃一、 山口 昇、 田中 美和、 鈴木 英夫、 大平 圭介、 松村 英樹	JAIST , ALVAC	非質量分離型イオン注入による a-Si/c-Si ヘテロ接合界面の P, H 分布	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017 年 03 月
33	Cong Thanh Nguyen, Koichi Koyama, Huynh Thi Cam Tu, Shigeki Terashima, Hideki Matsumura	JAIST	Quick Formation of Sub-Micron Scale and Low Reflectivity Texture Structures for Crystalline-Silicon Solar Cells	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	2017 年 03 月
34	Koichi Koyama, Keisuke Ohdaira, Hideki Matsumura	JAIST	Entrance of Low Cost Fabrication of Back-Contact Heterojunction Solar Cells by Using Plasma Ion Implantation	IEEE Photovoltaic Specialist Conference	2017 年 06 月

【展示会への出展】

番号	出展者名	展示会名	開催年月
1	北陸先端科学技術大学院大学 大平研究室	PVJapan 2015	2015 年 7 月
2	北陸先端科学技術大学院大学 大平研究室	PVJapan 2016	2016 年 6 月

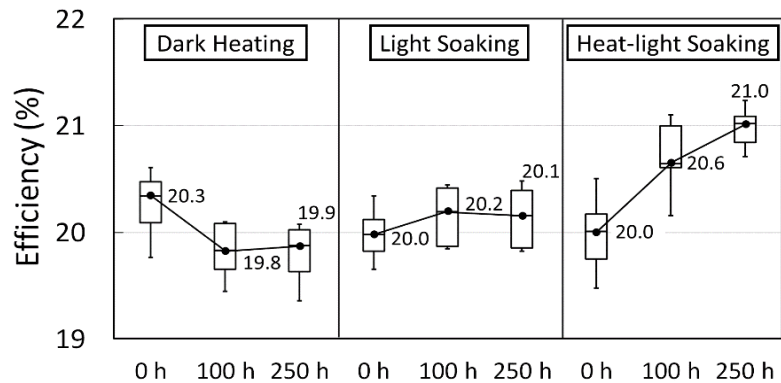
D CIS太陽電池高性能化技術の研究開発

(産業技術総合研究所、東京工業大学、立命館大学、東京理科大学、筑波大学、
鹿児島大学、龍谷大学)

1. 成果詳細

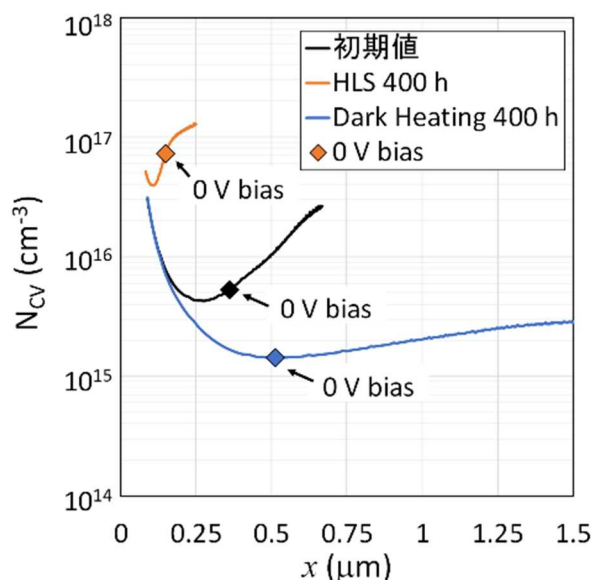
【1】産業技術総合研究所

産総研は、CIS太陽電池を高効率化するための新しい技術と視点を開発した。それは光強度 0.5 Sun 程度の白色光を照射し続けながら、高純度窒素の雰囲気の中で、温度 95°C で数 100 時間の加熱処理を行うという技術である。以下においては、この処理を HLS (Heat Light Soaking) 処理と呼ぶ。現時点ではこの HLS 処理によって、CIS太陽電池の変換効率を、HLS 処理前の値と比較して、絶対値で 1% 程度向上させることが可能である。その結果として、この新技術を適用することにより、現時点において CIS太陽電池の変換効率として (自家測定値であるが) 21.4% という値を得ている。但し、この新技術の意義は、単に変換効率を絶対値で 1% 向上させるだけでなく、CIS という物質の電気的な性質として今まで殆ど注目されて来なかった、正孔濃度の双安定性 (bistability) という新しい側面に光を当てたことであり、これは今後 CIS太陽電池を更に高性能化させるために本質的な示唆を与えると考えられる。言い換えるならば、この HLS 効果の発見は、将来的に CIS太陽電池の高効率化技術に新しいブレークスルーを起こす鍵となる可能性があり、この HLS 効果のメカニズムを詳しく解明することにより、CIS太陽電池の変換効率を従来よりも一段階高い水準に押し上げることが可能になると考えられる。従って、現時点においては、達成されている変換効率の値 (21.4%) は中間目標の値 (22.0%) には到達してはいないが、更に HLS 処理条件の最適化を行うことにより、近い将来に中間目標を達成できる可能性は高いと考えられるのみならず、中間目標を超える性能を実現することも可能であると考えられる。以下においては、HLS によって得られた実験結果を述べる。



図III-2-(二)-D-1 DH、LS、HLS 後の変換効率の処理時間依存性

CIS太陽電池の作製方法としては、まず三段階法により Mo/SLG 基板上に CIS 層を堆積した後、基板温度 350°C にて KF-PDT および NaF-PDT 処理を行った。KF-PDT および NaF-PDT 処理とは、CIS 製膜後に製膜装置の中で KF および NaF の蒸気を CIS 表面に照射する処理である。その後、MgF₂/Al grid/Al-doped ZnO / i-ZnO / CdS を堆積させ太陽電池構造とした。その後、露点 -50°C、酸素濃度 100ppm 以下の窒素中にて、白色光 5 万 lx (0.5 Sun) を照射しながら、温度 95°C の HLS を行った。比較のため、光照射を行わずに温度を 95°C にした加熱処理のみを行う DH (Dark Heating) 処理、および加熱処理を行わずに室温で光照射のみを行う LS (Light Soaking) 処理を施した試料も用意した。図III-2-(二)-D-2-(二)-D-1 に DH、LS、HLS 後の変換効率の処理時間依存性を示す。試料数はそれぞれ 16 個であり、図中に示された数値は、16 個の試料が示した変換効率の中央値である。HLS 後の 16 個のデバイスの変換効率の中央値は 21.0% であるが、最高値は 21.4% であった。図III-2-(二)-D-2-(二)-D-1 から明らかのように、DH 処理および LS 処理は CIS太陽電池の変換効率に良い影響を与えないが、HLS 処理は CIS太陽電池の変換効率に顕著な改善をもたらしている。この結果は、単独の加熱処理もしくは光照射だけでは変換効率を向上させることは不可能であり、両方を組み合わせることに重要な意義があることを示している。但し、加熱処理と光照射を時間的に同時に行うことが必要条件ではないことも明らかになりつつあり、実際のところ、DH 処理を先行して行いその後に LS 処理を行うことでも、HLS 処理とほぼ同様の変換効率の改善が得られることが判明している。逆に、LS 処理を先行して行いその後に DH 処理を行った場合は、変換効率の改善は全く得られない。



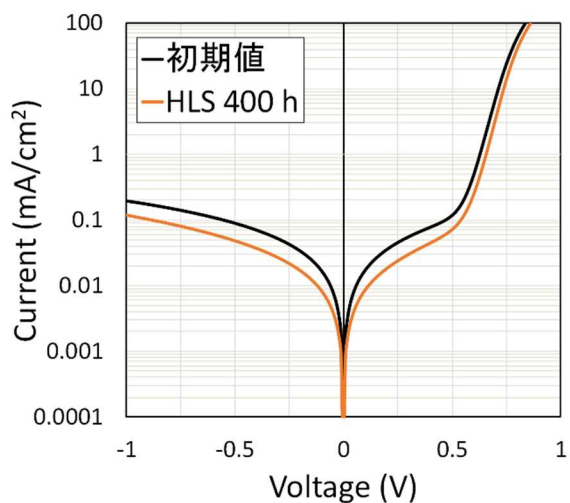
図Ⅲ-2-(二)-D-2 Capacitance-Voltage 測定より求めた CIS 薄膜中のホール濃度の深さ方向プロファイル

図Ⅲ-2-(二)-D-2 に Capacitance-Voltage (CV)測定より求めた CIS 薄膜中のホール濃度 (N_{CV}) の深さ方向プロファイルを示す。0 V bias における N_{CV} の値は、初期値は $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ であるが、HLS によって $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ となる。従って、LS 処理によって CIS 薄膜中のホール濃度は顕著に増大することが分かる。また、DH 処理を行った場合は N_{CV} の値は $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 程度にまで低下している。この結果から判断すると、CIS 薄膜中のホール濃度は一種の双安定性を持っており、十分な DH 処理を施して系が完全に基底状態に移行するとホール濃度は $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 程度まで低下するが、LS 処理によって系は高ホール濃度状態に移行し、400 時間の LS 処理ではホール濃度は 2 桁近く増大すると解釈される。言い換えるならば、CIS は顕著な永続的光伝導 (Persistent Photoconductivity) 性を持つことが、図Ⅲ-2-(二)-D-2 から分かる。実際のところ、DH 処理と LS 処理によるホール濃度の変化は完全に可逆であり、DH 処理と LS 処理を交互に繰り返すことにより、高ホール濃度状態と低ホール濃度状態の間を、自由自在に往復することが可能である。

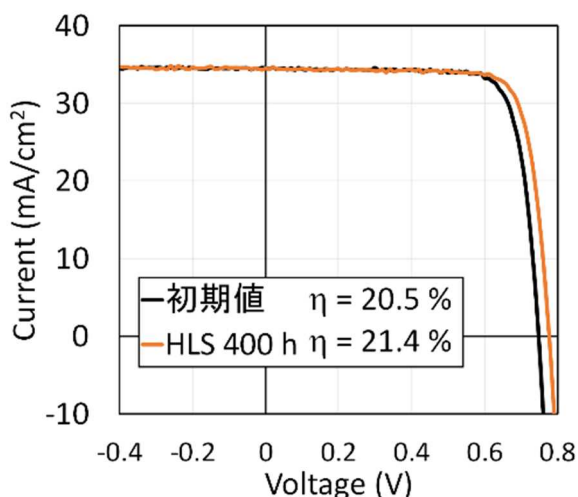
図Ⅲ-2-(二)-D-1 を見ると、単独の DH 処理では変換効率は減少しているが、このときは V_{oc} と FF が減少しており、DH 処理によって CIS のホール濃度が低下したと整合する結果が得られている。但し重要な事実として、DH 処理を行うと、暗状態の $J-V$ 特性における、逆方向飽和電流密度 J_0 とダイオード理想係数 n の値に改善が見られたことを指摘しておく。これは、DH 処理の加熱によって、CdS/CIS 界面におけるキャリア再結合が抑制されたことを意味しているが、何らかの意味での CdS/CIS 界面の結晶品質の改善が起こったことを示唆している。それにもかかわらず変換効率が低下した理由は、ホール濃度が低下した影響の方が支配的であったためであると考えられる。また図Ⅲ-2-(二)-D-1 を見ると、単独の LS 処理では変換効率は僅かに増大しているが、このときは V_{oc} と FF が増大しており、LS 処理によって CIS のホール濃度が増大したと整合する結果となっている。但し、単独の LS 処理では、 J_0 と n の改善は起こらず、結果として変換効率の向上は顕著ではない。それらに対して、HLS 処理の場合は、 J_0 と n の増大およびホール濃度の増大を同時に実現することが可能であり、結果として図Ⅲ-2-(二)-D-1 に示すように変換効率の顕著な向上が得られている。また、前述のように、LS 処理→DH 処理という順番では変換効率が向上しないが、DH 処理→LS 処理という順番では変換効率が向上する理由も、上記の解釈で理解することができる。すなわち、DH 処理は CdS/CIS 界面の結晶品質を向上させて J_0 と n を増大させるが、同時に系を基底状態に移行させて系を低ホール濃度状態へ移行させるために、最後に行う処理が DH 処理である場合は、高い変換効率を得られない。それに対して、前述のように高ホール濃度状態と低ホール濃度状態の間の変化は完全に可逆なので、最後に行う処理が LS 処理である場合は、CdS/CIS 界面の結晶品質を向上させた状態で系を高ホール濃度状態へ移行させることが可能となり、高い変換効率を得ることができる。

HLS 処理されたデバイスの暗状態における $J-V$ 曲線を図Ⅲ-2-(二)-D-3 に示す。HLS 後は、 J_0 は $5 \times 10^{-9} \text{ mA/cm}^2$ から $1 \times 10^{-9} \text{ mA/cm}^2$ 、 n は 1.28 から 1.24 と改善する。ホール濃度の増大は 100 時間後には飽和するが、 J_0 と n の向上は、400 時間後に飽和するという結果が得られている。HLS 処理されたデバイスの光照射下の $J-V$ 曲線を図Ⅲ-2-(二)-D-4 に示す。変換効率の初期値は 20.5%であったが、HLS 後

は、 J_{sc} : 34.5 mA/cm²、 V_{oc} : 0.776 V、FF: 0.799、変換効率: 21.4%となった。以上より、数 100 時間の HLS 処理によって、ホール濃度が増大し、同時に J_0 と n が改善することで、変換効率の大幅な向上が得られたと考えられる。



図Ⅲ-2-(二)-D-3 HLS 処理されたデバイスの暗状態における J - V 曲線



図Ⅲ-2-(二)-D-4 HLS 処理されたデバイスの光照射下の J - V 曲線

結論として、本研究で得られた成果の意義は、以下のように整理される。まず CIS が顕著な永続的光伝導 (Persistent Photoconductivity) 性を持ち、LS 処理と DH 処理を組み合わせることによって、高ホール濃度状態と低ホール濃度状態の間を可逆的に往復でき、それが太陽電池の変換効率と強い関係を持つことを実証できたことが重要である。例えば、これまでは太陽電池の作製条件と変換効率の間に必ずしも明瞭な相関関係が得られないことが少なからずあったが、その理由の一端が、このホール濃度の双安定性にあったと考えられる。すなわち、CIS 太陽電池の変換効率は、それを測定する直前の太陽電池の熱履歴に大きく依存するため、デバイス化工程の熱履歴およびデバイス化後の保管状態の熱履歴によって変換効率が大きく変化すると考えられるが、その観点が今まで全く無かったことが、必ずしも系統的な実験結果が得られなかった理由の一端である可能性が高い。また、当然であるが、高い変換効率を得るためには適切な値のキャリア濃度が必要であるが、今回の発見は LS 処理と DH 処理を適切に組み合わせることにより CIS のホール濃度を人為的に制御する方法を提供しており、高効率な CIS 太陽電池を実現するためには不可欠な技術であると考えられる。但し、現時点で実現できているホール濃度は本質的に双安定性に起因する準安定なホール濃度であり、これを真に安定なホール濃度とするためには、双安定性を生み出している要因を解明し、高いホール濃度を維持しながら双安定性を解消することが必要であるが、これは将来に残された課題である。なお、ホール濃度の双安定性を生み出している要因は CIS 結晶格子の何らかの不完全性であると考えられるが、それを解消することは、同時に CIS 結晶の品質の向上と太陽電池性能の向上につながると考えられる。次に、95°C 程度の熱処理を数 100 時間行うことにより、CdS/CIS 界面の品質の改善が起り、CdS/CIS 界面におけるキャリ

ア再結合が抑制されることを実証したことが重要である。デバイス化後の熱処理によりデバイス性能が向上することは、理論的には容易に予想されるが、これまでは必ずしも予想と合致した結果は得られてはいなかった。現時点においては、その理由が上記のホール濃度の双安定性にあったことは明白である。従って、DH 処理と LS 処理と組み合わせることにより、デバイス化後の熱処理が CdS/CIS 界面の品質の改善に直結していることを、本研究によって実証できた意義は大きいと考えられる。

【2】東京工業大学

東京工業大学では、界面制御として①表面・界面制御、②表面・界面改質、③裏面制御に取り組んできた。ここでは、①表面・界面制御及び②表面・界面改質の成果をまとめる。

① 表面・界面制御

表面及び粒界の再結合成分を抑制することにより、太陽電池の変換効率は向上する。そこで、表面及び粒界の Cu 組成に注目した。Cu 組成が低い Cu(InGa)Se₂ (Cu-poor 相) はワイドバンドギャップ半導体であり、Cu(InGa)Se₂ (CIGS) との間で価電子帯オフセット (ΔE_v) が生じることにより多数キャリアである正孔を界面から光吸収層に追い返し、再結合電流成分が抑えられることで CIGS 太陽電池の変換効率が向上するとのモデルを提案した。また、CIGS 光吸収層表面への Cu-poor 相形成手法として Se インターバル法を新たに開発し、変換効率 19.8% の CIGS 太陽電池の作製に成功、中間目標を達成した。

CIGS 太陽電池は、3 段階法により作製される。1 段階目では Mo 付き青板ガラス基板上に (InGa)₂Se₂ を製膜し、2 段階目において Cu-Se を供給、これにより CIGS 薄膜が形成される。この 2 段階目の最終段階において膜の表面組成は Cu-rich へと変化する。相図上、この 2 段階目の最終段階において Se を供給することにより、組成が定まった Cu_{2-x}Se 固相 (x が一定) と Cu-Se 液相との共存状態が得られる。この 2 相共存状態を制御することにより、CIGS 光吸収層表面は Cu 欠損状態となり、最終段階において再び In, Se を供給すると Cu_{2-x}Se 固相が均一な Cu-poor 相へと変化し、CIGS 表面状態の精密な制御が可能になると考えた。具体的には、2 段階目と 3 段階目との間に Se のみを照射する時間、Se インターバル時間を設けることにより 2 段階目の表面状態を制御した。

図 III-2-(ニ)-D-5 に、Se インターバル時間を 0 分から 10 分まで変化させた時の CIGS 太陽電池の特性変化を示す。Se インターバル時間を設けることにより、開放電圧 Voc が改善する。さらに、曲線因子 FF が顕著に向上する。この結果、Se インターバル時間を 5 分とすることにより、変換効率 19.8% (Voc=0.672V, Jsc=38.6mA/cm², FF=0.762) の太陽電池の作製に成功した。ただし、Se インターバル時間を長くすると変換効率は再び低下する。変換効率低下の原因は、過剰な Cu-Se 液相が表面に存在することにより液相が CIGS 固相を侵食、組成が定まった Cu_{2-x}Se 層の均一性を低下させるためであると考えている。

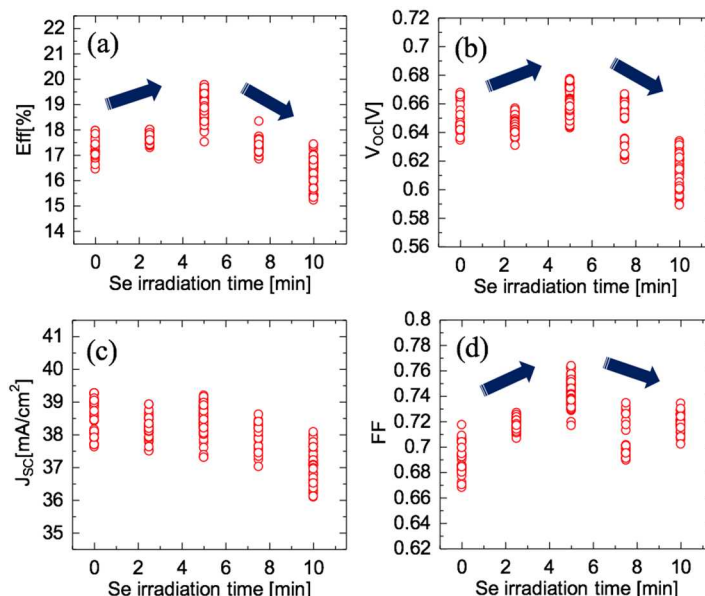


図 III-2-(ニ)-D-5 Se インターバル時間に対する太陽電池の特性変化

②表面・界面改質

CIGS 太陽電池の表面・界面改質手法として、チオ尿素処理を開発した。現状、チオ尿素処理は Se 空孔 (V_{Se}) のパッシベーションを行い、膜質並びに太陽電池の変換効率向上に有効であるとの結論が得られている。

図 III-2-(ニ)-D-6 にチオ尿素処理の有無による変換効率の変化を示す。チオ尿素処理に用いたサンプルは、通常の CIGS 太陽電池及び表面に Cu-poor 層を設けた CIGS 太陽電池である。チオ尿素処理により V_{oc} は低下した。しかしながら、曲線因子である FF が大きく向上し、結果として変換効率は大きく向上した。また、チオ尿素処理を行った CIGS 太陽電池の変換効率は、Cu-poor 層を設けた太陽電池と同程度であったものの、Cu-poor 層を有する太陽電池をチオ尿素処理することにより、さらなる変換効率向上が見られた。以上より、Cu-poor 層有りのサンプルをチオ尿素処理することにより、18.5%の高い変換効率を得ることに成功した。

次にチオ尿素処理の効果を明確にするため、チオ尿素処理後のサンプルのキャリア濃度を SCM (Scanning Capacitance Microscopy) 法により求めた。その結果、処理により CIGS 膜内のキャリア濃度が向上するとの結果を得た。そこで、さらに膜断面の CL (Cathode Luminescence) スペクトルを測定した。CL スペクトルからは、欠陥準位等を介した発光スペクトルを得ることができる。初めにこの発光スペクトルより、CIGS 太陽電池はダブル傾斜構造のバンドプロファイルを有しており、光吸収層内部からのキャリアの収集効率が高められていること、表面のバンドギャップが広ギャップ化することにより表面再結合速度が抑えられていることが確認された。さらに、バンドギャップ最小値を有する領域からの CL 発光に着目したところ、チオ尿素処理前に比べチオ尿素後は、その発光エネルギーが 1.05eV から 1.10eV へと高エネルギー側にシフトすることを見出した。CL 発光が高エネルギー側にシフトした原因としては、バンドギャップ内の V_{Se} による欠陥準位を介した発光からバンド端発光へと変化したためと考えている。このため、チオ尿素処理により CIGS 内の V_{Se} が S 元素により埋められ V_{Se} が減少、ドナー性欠陥である V_{Se} が減少したため CIGS の正孔濃度が増加したことが推測される。この結果は、チオ尿素処理によりキャリア濃度が増加するとの SCM 測定とも一致しており、処理による V_{Se} のパッシベーションにより CIGS 光吸収層のキャリア濃度が増加、これにより変換効率が向上したと結論された。

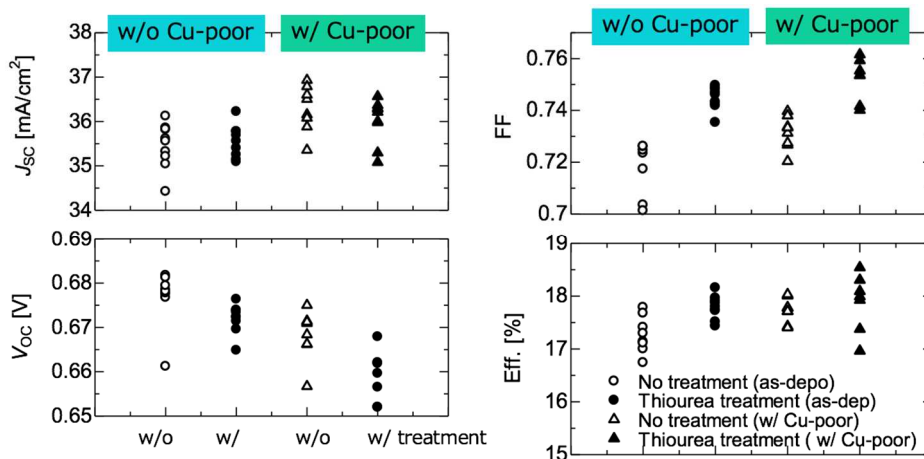


図 III-2-(ニ)-D-6 チオ尿素処理による CIGS 太陽電池の変換効率の変化

【3】立命館大学

pn 接合界面のキャリア再結合低減によって開放電圧 (V_{oc}) を向上させるには、界面欠陥低減とバンド制御によるキャリア分離が有効である。CIS 太陽電池に用いられている Zn 系透明電極 (2 元) である ZnO:B は、CIS よりも伝導帯位置が 0.1eV 程度低いと考えられる。バッファ層が厚い場合や CIS 表面で埋込型接合が形成されている場合には、バッファ層と CIS 間の伝導帯不連続量 (CBO) が界面のキャリア再結合に大きな影響を与える。一方、バッファ層での光吸収を抑えて短波長損失を極限まで低下させるにはバッファ層の薄膜化が効果的であるが、この場合には pn 接合がバッファ層/CIS 間で完全に形成されるのではなく、透明電極が影響するため、透明電極と CIS 間の CBO を整合させる必要がある。

また、透明電極はバッファ層よりもキャリア濃度が高いために、バッファ層/CIS 間よりも、透明電極/CIS 間で pn 接合を形成した方が拡散電位を大きくすることができると考えられる。本研究では、伝導帯位置を制御できる材料として(Zn,Mg)O に Al や B をドーピングした Zn 系 3 元混晶薄膜を用いて、CBO 制御可能な透明電極を開発した。ソフトな成膜法である有機金属気相成長 (MOCVD) 法と従来検討が進んでいるスパッタ法を用いた。また、最適なバッファ層の組成、複数のバッファ層の組み合わせを検討した。

まず、MOCVD 法による(Zn,Mg)O:B の成膜方法・条件の検討を行い、Mg 濃度が低い条件では低抵抗が得られることを確認した。MOCVD 条件の最適化に先立って、既に本研究室で装置が立ち上がっているスパッタ法を用いて、CIS に対する最適なバッファ層、透明電極層の検討を行った。スパッタ法は量産に適したプロセスであるため、スパッタ法による数値目標の達成は産業化にも魅力的である。ここでは、ソーラーフロンティア社によって作製された CIS/Mo/ガラス基板を用いて検討を行った。まず、第一バッファ層として化学析出法による(Cd,Zn)S、第二バッファ層としてスパッタ法による(Zn,Mg)O の II 族組成比の最適化検討を行い、それぞれ $Zn/(Cd+Zn)=0.25$, $Mg/(Zn+Mg)=0.21$ の時に高い効率が得られることを明らかにした。続いて、透明電極の伝導帯位置を制御するために、スパッタ法による(Zn,Mg)O:Al を用いた太陽電池を作製し、Mg 比 $[Mg/(Zn+Mg)]$ の最適化検討を行った。この時、上記のように第一バッファ層に $Cd_{0.75}Zn_{0.25}S$ を、第二バッファ層に $Zn_{0.79}Mg_{0.21}O$ を用いた。また、従来構造として、ZnO:Al/ZnO/CdS を透明電極、第二バッファ、第一バッファとする比較のための太陽電池を作製した。図 III-2-(二)-D-7 に(Zn,Mg)O:Al の Mg 比を 0.00~0.20 まで変化させたときの太陽電池パラメータを示す。Voc は Mg 比の増加によって上昇し、Mg 比が 0.12 の時に最大で 694mV という従来構造よりも 21mV 高い値が得られた。この時の(Zn,Mg)O:Al の禁制帯幅 (Eg) は 3.76eV であった。また、この時に変換効率も最大となり 20.6% が得られた。Voc と短絡電流密度 (Jsc) の積は $27.5mW/cm^2$ であった。これらの数値 (Eg、Voc の上昇値、 $Voc \times Jsc$ 値) は全て中間目標値を達成した。

今回の検討では、Mg 比が 0.12 を超えると(Zn,Mg)O:Al の抵抗率の上昇により曲線因子が低下し、高効率を得ることができなかつた。今後 (研究の後半である中間評価後) は、高 Mg 比の(Zn,Mg)O:Al の低抵抗化の可能性を検討するとともに、ダメージの低減が期待できる MOCVD 法の条件を煮詰める。さらに、デバイス内の総合的なバンドラインナップ最適化を実現するために、同材料系を用いた高抵抗バッファ層の開発を行う。これに加えて、デバイス内 (界面、空乏層、バルクなど) の詳細なキャリア再結合解析を行うことで材料組成・プロセス・堆積条件と太陽電池性能の相関を定量的に明らかにし、太陽電池作製条件の最適化を精度良く行うことで、最終目標達成を目指す。

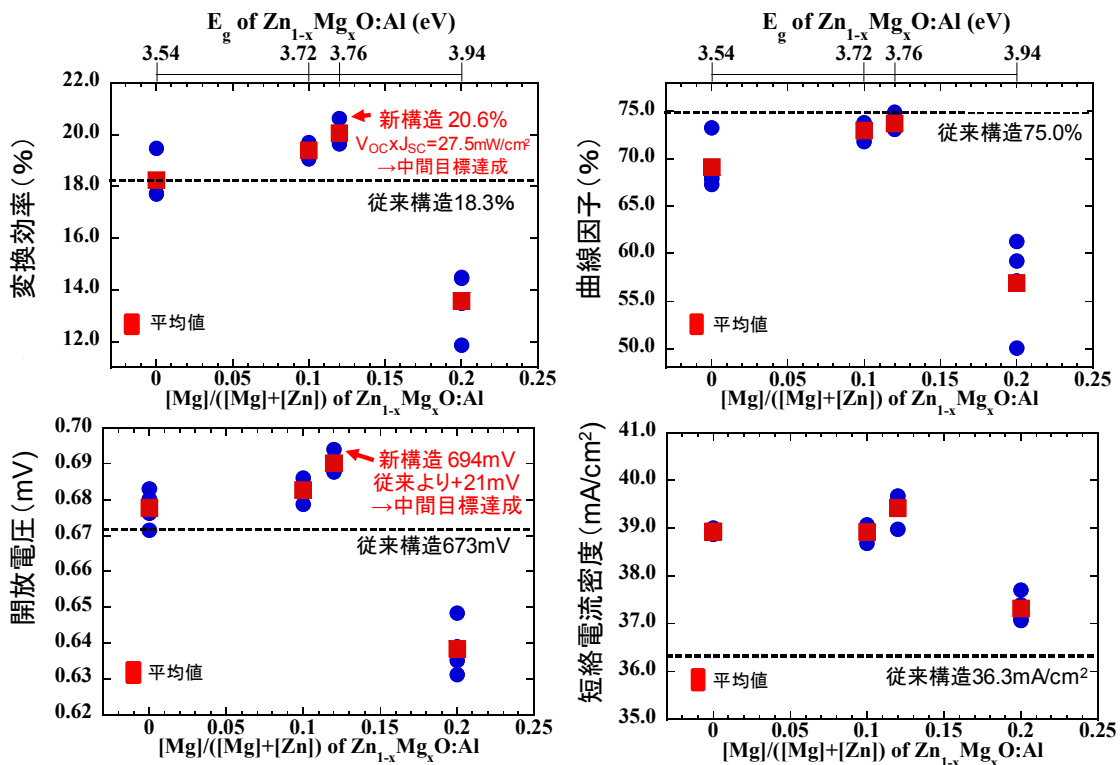
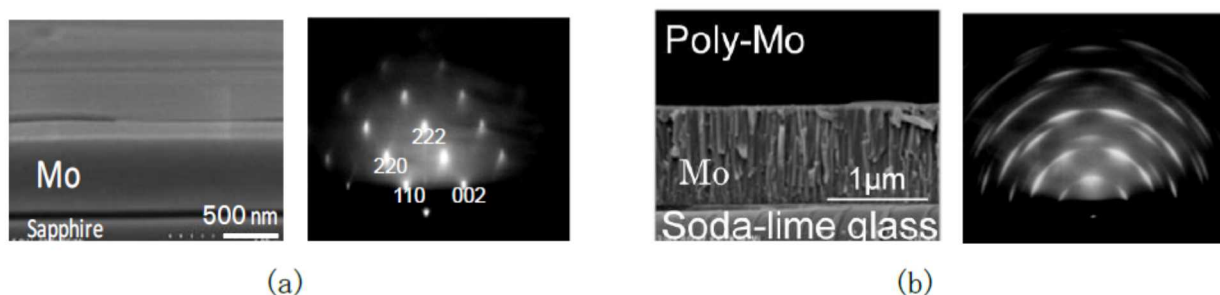


図 III-2-(二)-D-7 (Zn,Mg)O:Al の Mg 比を変化させたときの(Zn,Mg)O:Al/ $Zn_{0.79}Mg_{0.21}O$ / $Cd_{0.75}Zn_{0.25}S$ /CIS 太陽電池の性能パラメータ

【4】東京理科大学

① Mo 裏面電極層のエピタキシャル成長技術開発

エピタキシャル CIGS 薄膜の作製に先立ち、その下地となる Mo 薄膜について、低温バッファ層を導入した新規スパッタ法を開発した。具体的にはサファイア(0001)単結晶基板を用い、DC マグネトロンスパッタ法により低温製膜温度を 400°C、高温製膜温度を 800°C、全体の膜厚を 400nm 一定の条件で製膜した。その結果、図Ⅲ-2-(ニ)-D-8 に示すように、結晶粒界が無く、表面平坦性に優れたエピタキシャル Mo 薄膜を得ることに成功した。また、反射電子回折像から Mo(111)面がサファイア (0001)面に平行に成長したエピ膜である事が分った。



図Ⅲ-2-(ニ)-D-8 本研究で得られた(a)エピタキシャル Mo 薄膜、および(b)従来の多結晶 Mo 薄膜の SEM 写真および反射電子回折像

② CIGS 光吸収層のエピタキシャル成長技術開発

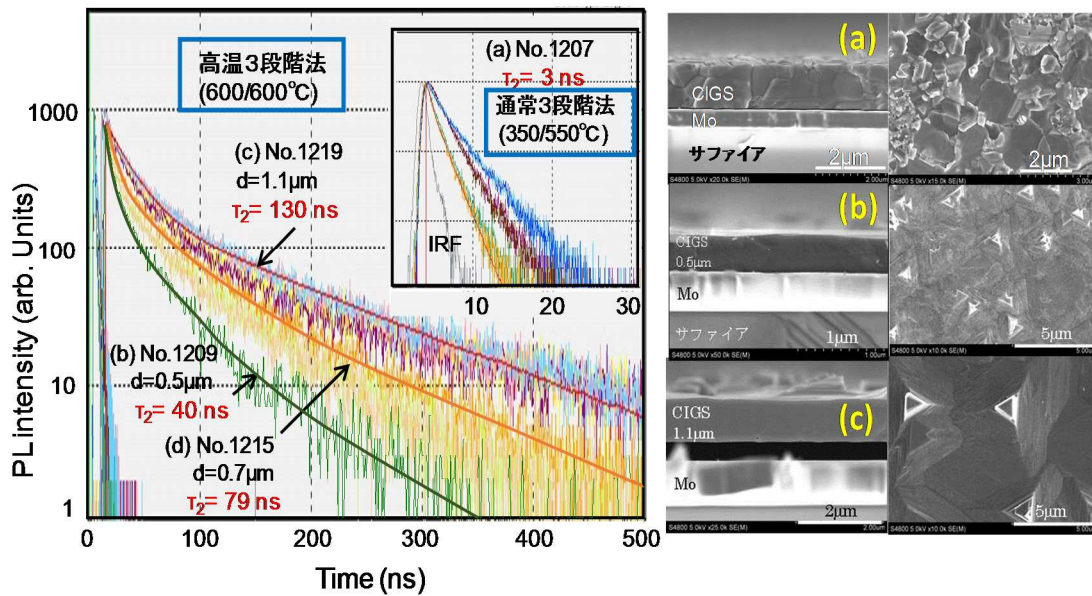
CIGS エピタキシャル薄膜は MBE 装置を用い、従来の 3 段階法および新たに開発した高温 3 段階法で作製した。図Ⅲ-2-(ニ)-D-9 は(a)通常 3 段階法(350/550°C)および(b)(c)(d)高温 3 段階法 (600/600°C)でエピタキシャル Mo(111)/サファイア (0001) 基板上に成長した CIGS 薄膜の室温 TRPL (時間分解フォトルミネッセンス法) によるキャリアライフタイム τ_2 (左) と対応する SEM 写真 (右) を示す。この図から分かるように、従来法で作製した CIGS 薄膜のキャリアライフタイムは数 ns 程度であったが、高温 3 段階法によりキャリアライフタイム τ_2 が飛躍的に長くなり、最終目標値 >100ns を達成した。また、断面 SEM 写真から、粒界の無い膜であることが分る。

③ エピ成長 CIGS セル作製技術開発と特性評価

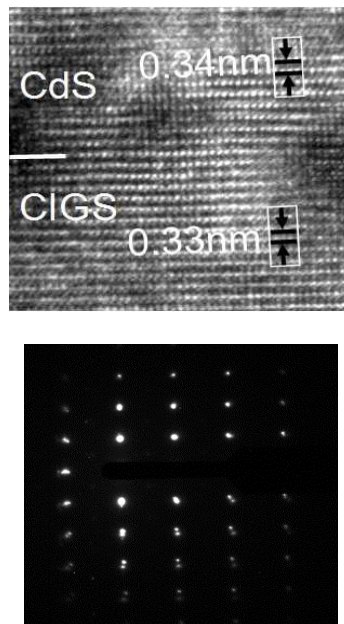
得られたエピタキシャル CIGS 薄膜の上に CBD 法を用いて CdS バッファ層を堆積し、高分解 TEM/制限視野電子回折 (SAED) 観察を行った。

その結果、CIGS {112} // MoSe₂ {0001} // Mo {110} // サファイア {0001} のエピタキシャル関係にあることが分った。また、図Ⅲ-2-(ニ)-D-10 の SAED 像(下)から、CdS と CIGS の逆格子面がほぼ一致しており、さらに、CdS/CIGS 界面の格子像(上) から CdS/CIGS 界面の連続性が非常に良好であることが分る。これらの結果は今回作製した CdS/CIGS 界面は格子欠陥がない理想的な接合界面を示唆し、キャリア再結合の極めて少ないデバイスへの展開が期待できる。また、TEM/EDS 分析から、Cd の CIGS 中への拡散が予想以上に深い 100nm 程度であり、この結果は開放電圧に関する Cd の拡散が粒界を介さずに結晶粒内で起こることを示唆するものである。

次に、Ni/Al/ZnO:Al/ZnO/CdS/CIGS/Mo/サファイア構造の CIGS エピタキシャル太陽電池を試作し、その初期データを取得した。その結果、現段階のセル性能は、SLG 基板上に作製した多結晶 CIGS 太陽電池より低い変換効率であった。この理由の一つとして、CIGS エピタキシャル太陽電池は Na を含まないため、キャリア密度 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ と低いことが挙げられる。今後、別途実験を進めているアルカリ金属ドーピングがセルパラメータに及ぼす影響に関する実験を実施する予定である。



図III-2-(二)-D-9 (a)通常3段階法(350/550℃)、および(b)(c)(d)高温3段階法(600/600℃)でMo(111)/サファイア(0001)基板上に成長したCIGSエピタキシャル薄膜のキャリアライフタイム(τ_2) (左)と対応するSEM写真(右)。



図III-2-(二)-D-10. CdS/CIGS 接合界面の格子像(上)とSAED像、CdS(111)/CIGS(112)

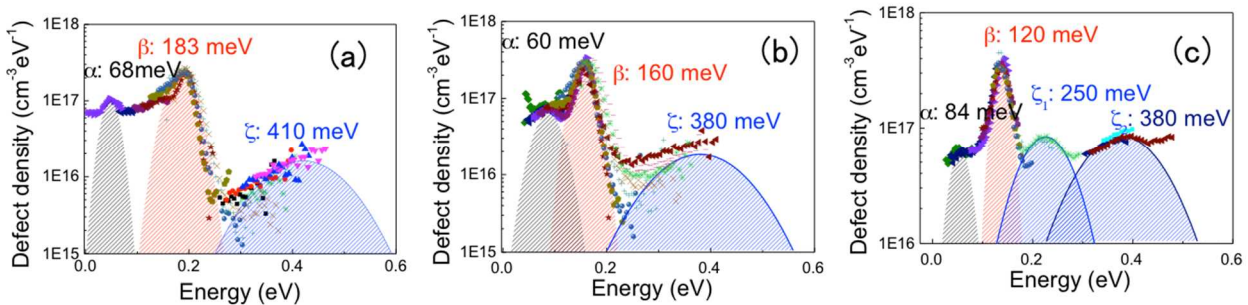
【5】筑波大学

(1) KF-Post Deposition Treatment (KF-PDT)を施したCIS太陽電池の欠陥準位解析

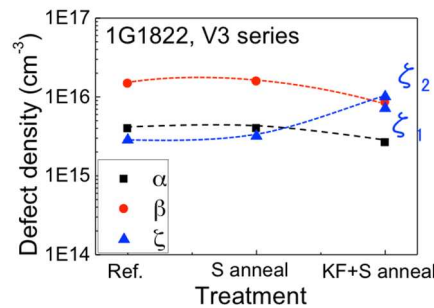
セレン化硫化(SAS)法により成膜したCIS試料(ソーラーフロンティア社提供)にKF-PDTを施すと、開放起電圧が約30 mV向上し、変換効率の向上に寄与する。本実験項目ではKF-PDTの有無に伴う試料の欠陥分布の変化を観測し、開放起電圧の向上する要因について考察を行った。

- ① アドミッタンススペクトロスコピー法を用いた浅い欠陥準位 (<~400 meV) の評価

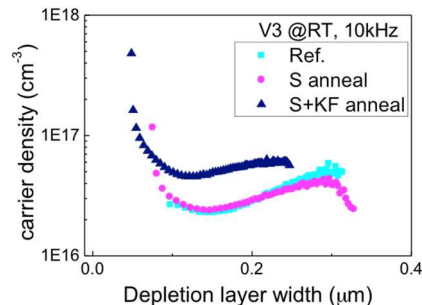
SAS 法により作製された CIS 試料の成膜後(a)未処理、(b)硫黄雰囲気(H₂S : キャリアガス)アニール、(c)硫黄雰囲気+KF アニールでの欠陥準位密度スペクトルを図Ⅲ-2-(二)-D-11に示す。この欠陥準位密度はアドミッタンススペクトロスコーピー法により見積もった。図Ⅲ-2-(二)-D-11 よりすべての試料で α , β , ζ の3つの欠陥準位ピークを確認した。三段階法 CIGS からの類推から α は Cu 空孔に起因した浅いアクセプタ準位($E_V + 60$ meV)、 β はバッファ層/CIS 界面に起因した応答、 ζ は CIGS バルクのアクセプタ性欠陥($E_V + 250\sim 400$ meV)と同定した。続いて、各欠陥準位の捕獲断面積を見積もったところ $10^{-18}\sim 10^{-17}$ cm² 程度となった。Shockley-Read-Hall (SRH)再結合を引き起こす欠陥の捕獲断面積は通常 $>10^{-14}$ cm² であることから、これらの欠陥は光生成キャリアの再結合を引き起こすものではない。図Ⅲ-2-(二)-D-12に各欠陥準位密度の後処理依存性、図Ⅲ-2-(二)-D-13に電気容量-電圧 (CV)法により見積もられたキャリア密度の深さ分布を示す。これより、KF アニール処理を施した試料では、アクセプタ性欠陥の ζ 成分が増加する様子が見え、これに伴い正孔濃度も KF 処理後に増加することがわかる。



図Ⅲ-2-(二)-D-11. セレン化法により作製された試料の欠陥準位密度スペクトル
(a) 未処理、(b)硫黄雰囲気(H₂S)アニール、(c)硫黄雰囲気+KF アニール



図Ⅲ-2-(二)-D-12. 欠陥準位密度の後処理依存性



図Ⅲ-2-(二)-D-13. キャリア密度の深さ分布

一般的に、正孔濃度の増大は疑フェルミレベルが価電子帯に近づくことを意味し、開放時のフェルミレベル差($E_{Fn}-E_{Fp}$)が大きくなるため開放起電圧が上昇する効果が現れる。他方、少数キャリアが放射再結合によりエネルギーを失うとすると、この寿命は $\tau=1/BN_A$ (B は再結合定数、 N_A はアクセプタ濃度) で表されることから、正孔濃度の増大に伴い再結合速度が速くなるはずである。なお、今回の

測定試料では、KF 処理後に蛍光寿命が延びることが確認された。このことは、擬フェルミエネルギーの変化だけでなく、KF 処理による接合の改質効果を示唆している。

② Steady State PhotoCapacitance (SSPC)法を用いた深い欠陥準位 (~700 meV) の評価

続いて、深い欠陥準位の定量評価に有効な SSPC 法により価電子帯上端(E_V)から 0.7 eV の位置にある深い欠陥準位の検出を試みた。過去の研究より、深い欠陥準位の捕獲断面積は $\sim 10^{-14} \text{ cm}^2$ と見積もられており、この欠陥準位はデバイス特性の劣化に対応する SRH 再結合を引き起こす可能性がある。他方、欠陥準位の光吸収係数はバンド間遷移と比較し数桁小さいため、本手法は界面に局在する欠陥よりむしろ、薄膜全体に広がる欠陥準位の検出に有効である。SSPC 測定の結果、 $E_V+0.7 \text{ eV}$ に存在する欠陥準位密度は KF 処理前後でほとんど変化せず、 $2\sim 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 程度であると見積もられた。アドミッタンススペクトロスコピー法ならびに蛍光寿命測定の結果と組み合わせると、KF 処理により改善したのはバルクよりむしろバッファ/CIS 接合界面近傍である可能性が示唆された。

③ 光フラックス-開放起電圧の波長依存性計測によるキャリア再結合解析

CIS 太陽電池において、光生成キャリアが主にどの部位で再結合するのかを判定するため、光フラックス-開放起電圧の波長依存性を測定した (図 III-2-(ニ)-D-14)。短絡電流(I)と開放起電圧(V_{oc})の間には $V_{oc} = nkT/q \cdot \ln(I/I_0+1)$ の関係 (n はダイオード理想因子、 k はボルツマン定数、 T は温度、 q は電気素量、 I_0 は逆方向飽和電流) があり、 $n = q/kT(dV_{oc}/d\ln I)$ となる。この関係式は、光フラックス (photon flux $\propto I$) の変化に対する V_{oc} の変動が大きい (傾きが大きい) ほどダイオード理想因子 (再結合電流) が大きいことを示唆する。なお、CIS 薄膜の光吸収係数は $\lambda=500 \text{ nm}$ で $1.1 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\lambda=950 \text{ nm}$ では $1.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ であり、これより CIS 膜への光の侵入長はそれぞれ約 $100 \text{ nm} (\lambda=500 \text{ nm})$ と $700 \text{ nm} (\lambda=950 \text{ nm})$ と見積もることができる。 $\lambda=500 \text{ nm}$ と 950 nm の単色光をデバイスに照射し、photon flux の変動に対する V_{oc} の変化を測定した (図 III-2-(ニ)-D-14)。その結果、プレリミナリーな結果であるが 500 nm の光照射時の方が V_{oc} の $\log(\text{photon flux})$ に対する傾きが大きいことが判明した。このことは、CIS 太陽電池で界面再結合成分が大きいことを示唆していると思われ、先の①②の結果と矛盾しない。以上の結果を踏まえ、今後界面再結合の定量評価とその抑制に関する研究を進める予定である。

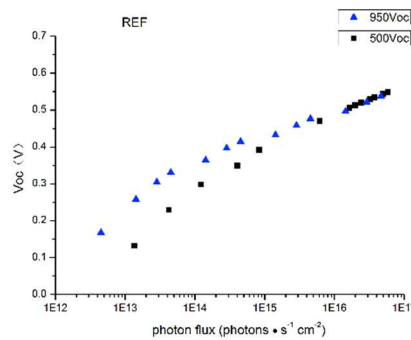


図 III-2-(ニ)-D-14. 光フラックス- V_{oc} 波長依存性 (黒:500 nm, 青:950 nm の単色光)

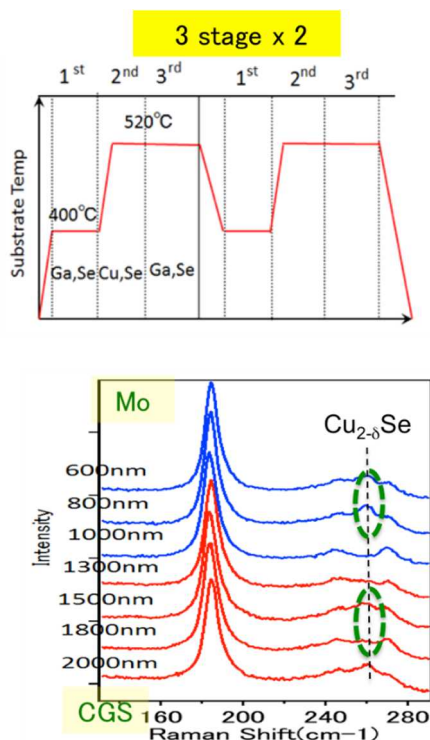
(2) 三段階法により成膜した CIGS 太陽電池の Ga 組成と再結合解析

本実験項目では産業技術総合研究所にて三段階法で成膜した CIGS 試料を用い、この Ga 組成の変調が欠陥準位や再結合電流にどのように影響するかを電気・光学特性評価により調査した。

① Ga/III 比の異なる三段階法試料の欠陥準位と異相解析

Ga/III 比の異なる CIGS 試料の浅い欠陥準位 ($< \sim 400 \text{ meV}$) ならびに深い欠陥準位 ($\sim 800 \text{ meV}$) の定量評価をそれぞれアドミッタンススペクトロスコピー法と SSPC 法により行った。その結果、浅い欠陥準位についてはスペクトル形状が多少変化するものの絶対値には大きな違いはなく、かつ捕獲断面積が $10^{-18} \sim 10^{-16} \text{ cm}^2$ 程度となり、SRH 再結合を積極的に引き起こすものではないことが判明した。一方、 $E_V+0.8 \text{ eV}$ に存在する深い欠陥準位については、捕獲断面積が $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ cm}^2$ と大きく、かつその密度が Ga/III 比が増えるのに従い上昇することが判明した。なお、エネルギー位置からみても、 $E_V+0.8 \text{ eV}$ は

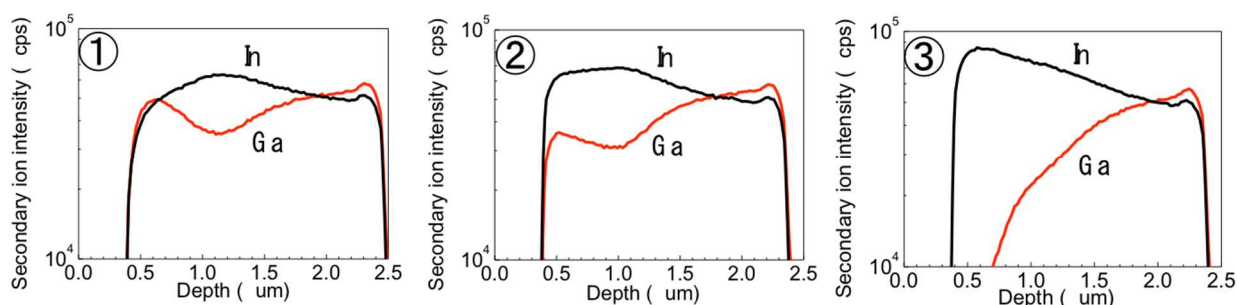
CuGaSe₂ 膜でバンドギャップ中央近傍に対応するため、再結合中心の有効候補と考えることができる。Ga 組成が大きな試料で深い欠陥準位密度が大きくなる原因を探るため、図III-2-(ニ)-D-15のように三段階法による成膜を2回繰り返した試料の共焦点ラマン分光（深さ分解能約 100 nm）を計測した。ブロモメタノール処理により試料をエッチングしながらこの計測を行うと、Cu_{2-x}Se に相当する 260 cm⁻¹ のピークが三段階法の繰り返し回数に応じて深さ方向に形成している様子が明らかになった。CIGS の成膜において、同じ III 族元素の In は拡散速度が速いが、Ga は相対的に拡散しにくい。三段階法では III 族元素の膜内での拡散を想定して作製されるため、この拡散不足により Ga 欠乏領域（Cu 過剰）が深さ方向に出現したと考えられる。このような不純物相が混入する条件において、Ga_{Cu} アンチサイト欠陥が出現し、深い欠陥準位が形成されると考えられる。



図III-2-(ニ)-D-15. 三段階法を2回連続して行ったCGS薄膜試料の共焦点ラマン分光
(上：成膜温度プロフィール、下：ラマン分光の深さ依存)

② Ga グレーディングを変化させた試料の再結合解析

三段階法を利用した成膜において、第一段階(裏面近傍)でのフラックス比 (Ga/In 比) を 0.4 に固定し、第三段階(表面近傍)のフラックス比を①0.4, ②0.2, ③0 と変化させた太陽電池試料を評価した(図III-2-(ニ)-D-16)。その結果、第三段階での Ga/In 比 0.2 の試料②が最も変換効率が高く(18.5%)、Ga/In 比 0 の試料③が最も変換効率が低い(17.6%)。また、試料③ではほかの二つの太陽電池と比較して並列抵抗 R_{sh} が小さく、再結合電流が流れやすくなることが明らかになった(試料①2200 Ohm、試料②1800 Ohm、試料③1300 Ohm)。これらの試料の蛍光スペクトルの入射光波長依存性を計測した結果、入射光の波長、すなわち光の侵入長にかかわらず、第三段階の Ga/In 比 0.4, 0.2 の試料①、②では膜中の最小バンドギャップに相当する 1050 nm(1.18 eV)に蛍光ピークが観測されたのに対し、Ga/In 比 0 の試料③では 1200 nm(1.03eV)の位置にピークが観測された。なお、Ga/In 比 0.4, 0.2 の試料①、②では、試料のバンドギャップの最小位置は表面から約 500 nm の位置に存在するのに対し、Ga/In 比 0 の試料③では表面近傍が最小バンドギャップに対応する(図III-2-(ニ)-D-16)。このことは、CIGS 層の最小バンドギャップ位置に光生成キャリアが集まり、キャリア再結合が起こりやすいことを示唆している。言い換えると、界面再結合が高い確率で起こるとされるヘテロ接合試料において、表面と裏面が高い Ga 濃度のダブルグレーディング構造にすると界面再結合が緩和され、太陽電池特性が向上する。現在、この現象をさらに解明するため、光照度-開放起電圧計測 (Suns-Voc) による再結合電流解析に取り組んでいる。



図III-2-(二)-D-16. 評価に用いた太陽電池試料の二次イオン質量分析結果（左：表面、右：Mo 電極）
第三段階のフラックス比：①Ga/In=0.4, ②Ga/In=0.2, ③Ga/In=0

【6】鹿児島大学

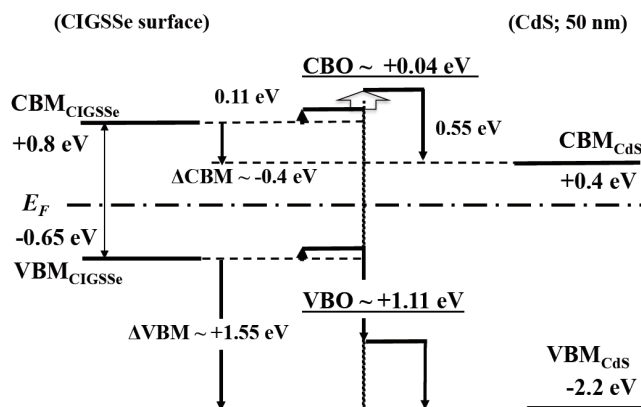
CIS系太陽電池は開放電圧を数十mV向上させることにより23%以上の変換効率が期待されることが示されている。その増大のためには開放電圧の上限を規定するCIS光吸収層から窓層に至る積層構造における拡散電位と、界面損失の主な支配要因となっている同構造内のヘテロ界面・粒界・深さ方向におけるバンドプロファイルの定量的評価が必要とされ、本研究開発においては、これらの本質的電子構造の解明とCIS層形成後の処理を含む電池作成プロセスの関連性の解明・改善指針の導出を目標とし、これらを通じた電池・モジュール性能の向上に貢献することを目指した。

研究開発の結果、CIGSSe～半絶縁層バンドプロファイルの初めての観測を含む、以下の成果を得た。まず、共同提案組織およびソーラーフロンティア社から提供された高品質なCu(In, Ga)(S, Se)₂ [CIGSSe] 光吸収層の本質的表面を露出させるためのダメージレス清浄化技術を開発し、1) 清浄化表面をプラットホームとして表面状態・n型バッファ層とのバンド接続状態の*in-situ*評価により、高い変換効率が得られた光吸収層表面の組成・電子構造の特徴がCu欠損相の少ないカルコパイライト相、高いS置換率、高い伝導帯下端 (CBM) にあること、CdSバッファとの界面に誘起される大きなバンド湾曲により界面伝導帯接続がほぼフラットとなり、高効率化に有益なバッファ/CIGSSe界面バンド接続が実現されていることを明らかにした。また、大面積モジュール内での分散の検証のため、表面・バッファ界面電子構造の面内均一性の評価を行い、高性能モジュールに用いられている光吸収層表面、バッファ界面が高い均一性を有することを確認した。続いて、2) 半絶縁層・窓層の*in-situ*形成技術開発を行い、光吸収層/バッファ/半絶縁層/窓層まで完結した電池構造における上部界面のバンド接続状態の*in-situ*決定を行い、上層の界面におけるバンド接続の*in-situ*決定に初めて成功した。このとき、高性能電池構造においても半絶縁層/CdSバッファ界面の伝導帯オフセットが負であり、さらなる改善の余地があることを明らかにした。3) 効率の更なる向上をもたらすとされる光吸収層成長後のアルカリハライド処理が電子構造に及ぼす影響を調べ、KF処理がホール濃度の向上をもたらしていることを*in-situ*評価により明らかにした。また、4) 電池構造において超平坦な縦貫断面の形成技術を開発し、積層方向バンドプロファイルのケルビンプローブ顕微鏡を用いた可視化技術を開発した。以下に主要成果の詳細を示す。

1) 光吸収層表面、バッファ界面状態のモジュール面内・モジュール間依存性の評価

CIGSSe表面はエネルギー数 keVのイオンを用いる通常のイオンエッチングを行うとIn、Cu等が金属化し固有の状態の評価が困難となる。本研究開発ではエネルギー50–100 eVの低エネルギー Ar⁺ビームを用いたエッチングを採用したところ、高品質なCIGSSe層に対して構成元素の化学的変成無しで表面付着物がX線光電子分光 (XPS) の検出限界程度に抑制された清浄表面を露出可能であることを見出した。これは離間システムで成膜された光吸収層に対して本質的状态の評価を可能とする手法の開発として位置付けられる。この手法を用いて清浄化した効率20%以上の電池に用いられるCIGSSe層 (成膜：ソーラーフロンティア社) の表面評価を行い、その組成的特徴が低Ga濃度 (Ga/III族比 約5%) のカルコパイライト相の組成を持ち、三段階蒸着法によるCIGS膜表面に通常みられるCu欠損相が存在しないこと、S置換率が55%程度と高いことにあること、また、電子構造の特徴がバンドギャップエネルギー E_g がS置換率 約50–60%のカルコパイライト相として妥当な1.3~1.45 eVの範囲にあること、CBMがフェルミ準位を基準として~0.80 eVと高く、n型バッファと

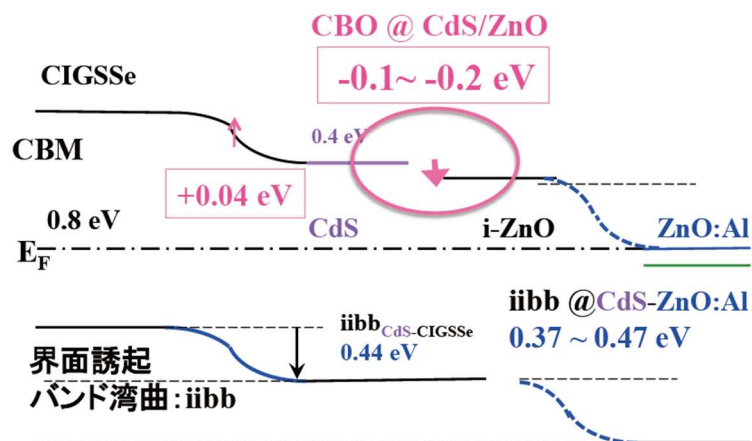
の界面に於いてキャリアの界面損失が抑制される伝導帯オフセット (CBO) が正の界面バンド接続を実現するためには界面誘起バンド湾曲 (iibb) が下降方向且つ大きいことが必要なことを明らかにした。続いて、CdS層をCIGSSe清浄化処理面上に*in-situ*ステップMBE堆積したCdS/CIGSSe界面のバンド接続を*in-situ* XPS、紫外光電子分光 (UPS)、逆光電子分光 (IPES) を用いた決定を行ったところ、CIGSSe上に堆積したCdSのCBMは0.4 eVとCIGSSeのそれより0.4 eV低いが、iibbは下降方向且つ0.55 eVと大きいことが判明した。これらから決定したCIGSSeとCdS n型バッファ界面のバンド接続を図III-2-(ニ)-D-17に示す。CBM下降量をiibbが上回ることによりCBOは+0.04 eVとほぼフラットな伝導帯接続となっている。これは高効率電池に用いられているCIGSSeとCdSバッファの界面が、界面バンドギャップの縮小が無く、電子伝導障壁が小さく且つキャリア分離の駆動力となる電位差が大きい、界面損失抑制・キャリア輸送促進の両者に有益なバンド接続を持つことを示しており、高い変換効率に対応するものである。続いて、CIGSSe表面、CdS/CIGSSe界面に関してモジュールの総合性能の向上に重要な指標である試料面内、試料間分散の評価を実施した。ソーラーフロンティア社製の複数個のCIGSSe試料、各試料の面内2～4点の組成分析を行ったところ、表面組成、表面電子構造、界面バンド接続の全てにおいて試料面内・試料間共に優れた均一性を持つことが明らかとなった。一方、今回確認されたゼロ近傍のCBOは、立命館大学 峯元教授らによる変換効率—CBO関係に関するバッファ/光吸収層界面の欠陥を考慮したシミュレーションにおいてCBOの最適領域の下限に位置しており、僅かのCBO低下により特性低下が始まることが推定される。大面積モジュールにおける組成・電子構造の揺らぎが増大する可能性を考慮するとき、今回得られた結果はCBOの正の方向への変調がモジュールの総合性能・歩留まりの向上に有効なことを示唆している。



図III-2-(ニ)-D-17 *in-situ* UPS、IPES、XPSにより決定したソーラーフロンティア社製CIGSSe表面電子構造、CdSバッファ/CIGSSe界面のバンド接続状態

2) バッファ/半絶縁層界面バンド接続状態の*in-situ*決定

電池特性の理解のためにバッファ界面に加え、上部界面におけるバンド接続、開放電圧の上限となる拡散電位の決定が望まれてきた。本研究開発では、まず、半絶縁ZnO [i-ZnO]及びAlドープZnO [AZO]層の*in-situ*スパッタ堆積装置を開発、分析システムに統合し、続いてCdSバッファとの間に異相が無く、電荷移動が発現するi-ZnO層形成条件及び低抵抗AZO層形成条件を確立した上で前項と同様の手法を用いてi-ZnO/CdS界面のバンド接続の*in-situ*評価を実施した。図III-2-(ニ)-D-18にUPS、IPES、XPSスペクトルのi-ZnO、AZOの層厚依存性から得られたバンド端、iibbにより決定したAZO/i-ZnO/CdS/CIGSSe電池構造におけるバンド接続の概略図を示す。CdS~AZOの領域のiibbは0.37~0.47 eVとCdS/CIGSSe界面と同レベルの大きな値となっており、CIGSSe層の空乏層領域から窓層に至る広い領域で光励起キャリア輸送を促進する優れたバンドプロファイルが実現されていることが明らかとなった。CIS系において、以上の複数の界面を含む電池構造を縦貫するバンドプロファイルの*in-situ*法による決定は本研究開発の成果が初めてである。しかしながらi-ZnO/CdS界面のCBOは-0.1~-0.2 eVと負値であり、両層間の電位差の一部が有効利用されておらず、改善の余地があることが有ること、i-ZnOのCBMを0.1~0.2 eV上昇させることで、この界面の最適されることが明らかとなった。また、この結果は、共同研究機関である立命館大学グループにより見出された窓層CBMを従来型窓層のCBMより上記量程度上昇させることで電池特性が向上する結果と良く対応している。



図III-2-(ニ)-D-18 *in-situ* UPS、IPES、XPS により測定したバンド端・内殻準位シフトを用いることで初めて直接法により決定された AZO 窓層/*i*-ZnO 半絶縁層/CdS バッファ/CIGSSe 層構造のバンドプロファイル；複数界面に置けるバンドオフセット、界面誘起バンド湾曲 iibb。

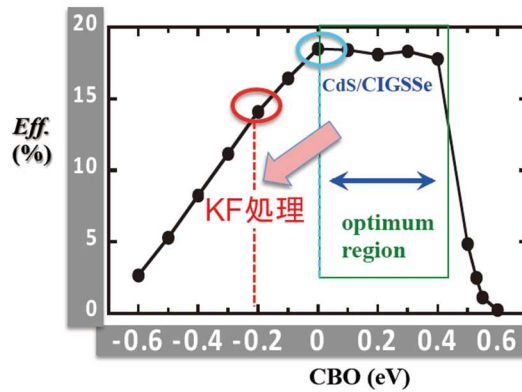
3) 光吸収層成長後のアルカリハライド (KF) 処理による電子構造変調の評価

CIGSSe層形成後にKF堆積とアニール、硫化を併用することで主に開放電圧が改善されることが報告されている。その電子構造上の起源を検討するため、ソーラーフロンティア社製のCIGSSeについて*in-situ* KF処理による表面電子状態の変調を評価した。*in-situ*観測したスペクトルからKF処理により内殻、価電子帯、伝導帯の電子エネルギーが約0.1-0.2 eV上昇（真空順位方向）することが見出された。これらシフトはほぼコヒーレントであり、フェルミ準位のバンドギャップ内降下によることを示している。項目2で述べたようにソーラーフロンティア社製の高品質CIGSSe層表面はフェルミ準位ピン止めが弱いことを考慮すると、この電子構造変化は表面でのホール濃度の上昇によるものと考えられ、KF処理が開放電圧上昇をもたらすことと対応している。ホール濃度増大は電池特性に対して好ましい変調であるが、KF処理の追加によるバンド端の上昇により上部界面におけるバンド接続も変化することに留意する必要がある。KF処理CIGSSeとCdSバッファの界面バンド接続に関する初動実験では予想されたようにマイナスのCBOが観測された。この様子を図III-2-(ニ)-D-19に示す。KF処理無しのCIGSSe層上ではほぼフラット（水色の円）であった伝導帯接続がKF処理追加によりクリフ型となる。即ち、バッファ材料としてCdSを用いる場合、KF処理はキャリア濃度向上とバンド接続の不適合の相反する効果をもたらすと考えられる。本項目で得られた結果は、このトレードオフを解消するためにはCBMがCdSより0.2 eV程度高い新規バッファを併用することが有効なことを示唆している。

項目2、3の結果は変換効率の更なる向上に向けて、電子構造の改善の余地：アルカリハライド処理によるホール濃度の増大効果とバンド接続の最適化を両立、があることを示している。具体的改質方針としては、処理によるCIGSSe表面のCBMの上昇を補償するためにバッファのCBMを上昇させること、同時に半絶縁層のCBMをCdSバッファとの間で観測された負のオフセットにアルカリハライド処理対応のための上昇分を加えた量（総量 $+0.3 \sim +0.4$ eV）上昇させることが有効となることを示唆される。

4) 積層方向バンドプロファイルの可視化技術の開発

電子構造戦隊の電子構造を可視化する手法として、Mo裏面電極~窓層までの積層構造の凹凸が層面内方向で5 nm、積層方向で20 nm以下の平坦な断面の形成手法を開発し、走査ケルビンプローブ顕微鏡を用いることで、CIGSSe層内のバンドギャップ傾斜に対応する仕事関数の谷構造など、予想される積層方向プロファイルに対応するイメージの取得に成功した。これは完成後の電池構造における縦貫断面のバンドプロファイル評価するための足掛りが位置付けられる成果である。



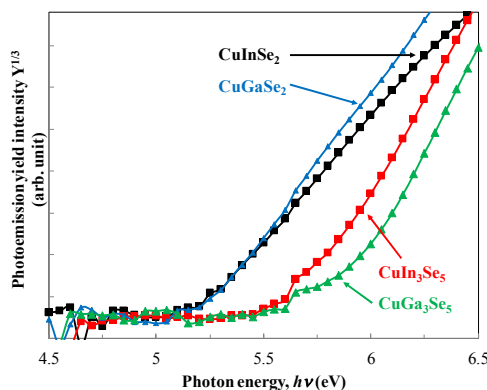
図III-2-(二)-D-19 CdS/KF 処理無し CIGSSe 界面 (水色円)、CdS/KF 処理あり CIGSSe 界面 (赤色円) の伝導帯オフセット CBO の電池変換効率-CBO 関係シミュレーション ; Minemoto *et al.*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells **67** (2001) 83-88. における位置づけ。

【7】 龍谷大学

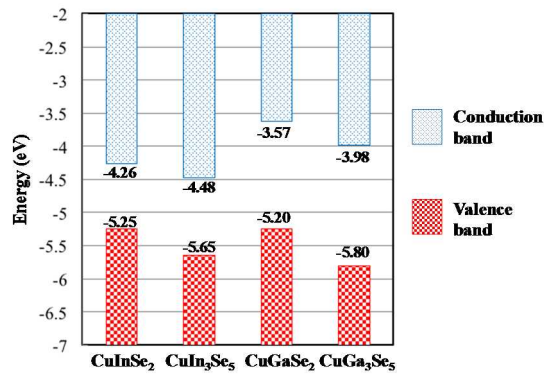
(a) $\text{Cu}_2\text{Se-In}_2\text{Se}_3$ 系および $\text{Cu}_2\text{Se-Ga}_2\text{Se}_3$ 系化合物

CuInSe_2 の Cu 不足側の組成である $(1-x)\text{Cu}_2\text{Se-xIn}_2\text{Se}_3$ 系化合物の結晶構造と電子構造について詳細に研究した。結晶構造は $x=0.5$ (CuInSe_2 に相当) ~ 0.55 はカルコパイライト相、 $x=0.60\sim 0.65$ はカルコパイライトとスタンナイトの混合相、 $x=0.70\sim 0.75$ (CuIn_3Se_5 に相当) はスタンナイト相、 $x=0.80\sim 0.85$ はスタンナイトと六方晶の混合層相、 $x=0.90\sim 0.95$ は 1-5-8 相 (六方晶相) と In_2Se_3 の混合相と変化した。それに対して、 $(1-x)\text{Cu}_2\text{Se-xGa}_2\text{Se}_3$ 系の場合には、カルコパイライト相 \rightarrow スタンナイト相 $\rightarrow \text{Ga}_2\text{Se}_3$ と変化した。

CuInSe_2 , CuIn_3Se_5 , CuGaSe_2 および CuGa_3Se_5 の拡散反射スペクトルから求めた禁制帯幅を求め、光電子収量分光 (PYS: Photoelectron Yield Spectroscopy) 法でイオン化エネルギーを求めた。スタンナイト型 CuIn_3Se_5 の禁制帯幅 (1.17 eV) は、カルコパイライト型 CuInSe_2 の値 (0.99 eV) よりも広く、スタンナイト型 CuGa_3Se_5 の禁制帯幅 (1.82 eV) もカルコパイライト型 CuGaSe_2 の値 (1.63 eV) よりも広い。図III-2-(二)-D-20 に CuInSe_2 , CuIn_3Se_5 , CuGaSe_2 および CuGa_3Se_5 の光電子収量スペクトルを示し、図III-2-(二)-D-21 にイオン化エネルギーと禁制帯幅から求めたそれらの化合物のバンドダイアグラムを示した。図III-2-(二)-D-20 よりスタンナイト型 CuIn_3Se_5 や CuGa_3Se_5 のイオン化エネルギーは、カルコパイライト型 CuInSe_2 や CuGaSe_2 の値よりも大きいことがわかる。それで、 CuIn_3Se_5 の価電子帯上端 (VBM: Valence Band Maximum) の位置 (-5.65 eV) は、 CuInSe_2 の位置 (-5.25 eV) よりも深く、 CuGa_3Se_5 の VBM の位置 (-5.80 eV) も CuGaSe_2 の位置 (-5.20 eV) よりも深い。これらの結果から、CIGS 光吸収層の表面や粒界に Cu(In,Ga)Se_2 の Cu 不足側の組成の化合物であるスタンナイト型 $\text{Cu(In,Ga)}_3\text{Se}_5$ が存在すると、 Cu(In,Ga)Se_2 光吸収層との価電子帯のオフセットの効果により光吸収層で生成した正孔が表面や粒界に近づきにくくなり、伝導電子と正孔の再結合が抑制されることがわかった。



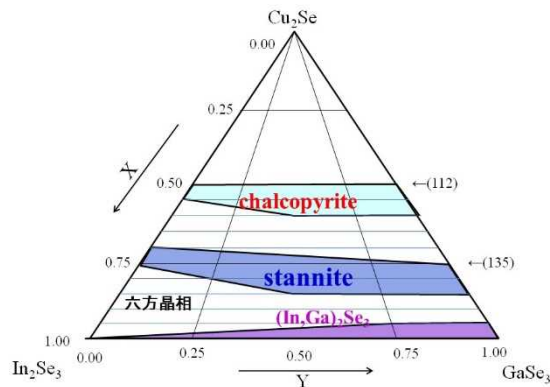
図III-2-(二)-D-20 CuInSe_2 , CuIn_3Se_5 , CuGaSe_2 および CuGa_3Se_5 の光電子収量スペクトル



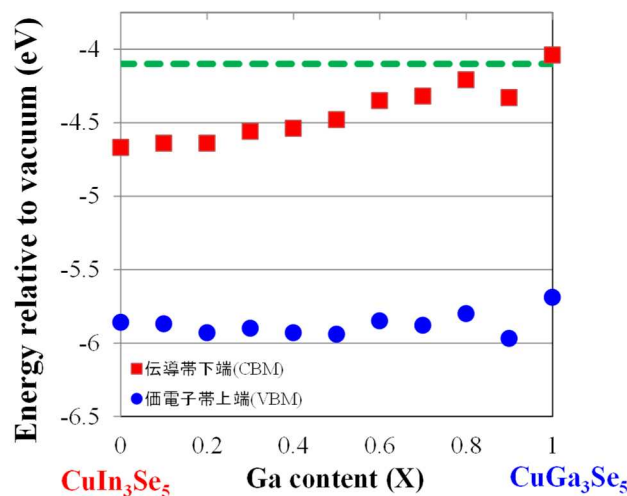
図III-2-(二)-D-21 CuInSe₂, CuIn₃Se₅, CuGaSe₂ および CuGa₃Se₅ のバンドダイアグラム

(b) Cu₂Se-(In, Ga)₂Se₃ 系化合物の結晶構造と電子構造

高効率 CIGS 太陽電池では、CuInSe₂ の In の一部を Ga に置換した Cu(In,Ga)Se₂ 膜が用いられる。それで、(a)の Cu₂Se-In₂Se₃ および Cu₂Se-Ga₂Se₃ 擬二元系につづいて、Cu₂Se-In₂Se₃-Ga₂Se₃ 擬三元系化合物について研究した。図III-2-(二)-D-22 に(1-x)Cu₂Se-(x)(In_{1-y}Ga_y)₂Se₃ 系の相の変化を示す。いずれの Ga 量でも結晶構造は、カルコパイライト型 1-1-2 相(x=0.5)からスタンナイト型の 1-3-5 相(x=0.75)に変化する。そして、Ga 量が増えるとカルコパイライト相の存在領域が広がることがわかった。(1-x)Cu₂Se-(x)In₂Se₃ 系(y=0.0)では、X=0.8 以上で六方晶系相が存在するが、Ga を固溶 (y≧0.25) すると六方晶系相が存在しなくなり、スタンナイト相の領域が広がることがわかった。



図III-2-(二)-D-22 (1-x)Cu₂Se-(x)(In_{1-y}Ga_y)₂Se₃ 系の相の変化

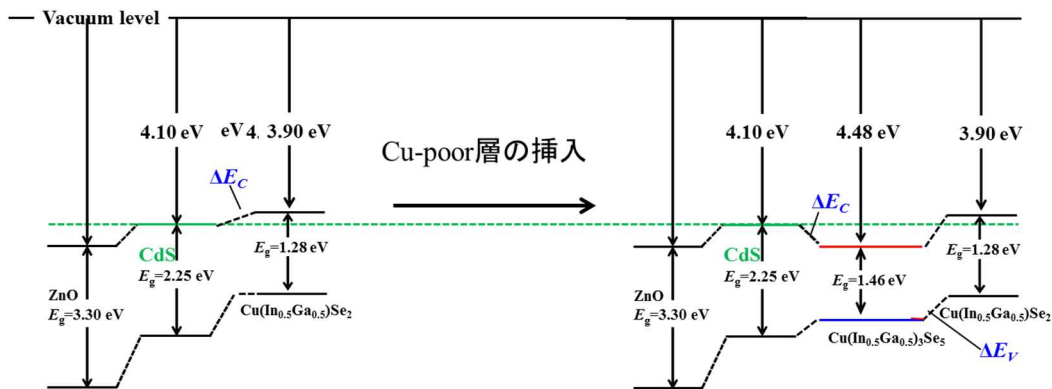


図III-2-(二)-D-23 Cu(In_{1-x}Ga_x)₃Se₅ の VBM と CBM の変化

(1-x)Cu₂Se-(x)(In_{1-y}Ga_y)₂Se₃ 系の場合にも、拡散反射スペクトルから禁制帯幅を、PYS 法でイオン化エ

エネルギーを測定した。求めたイオン化エネルギーから VBM の位置を決定し、さらに VBM に禁制帯幅を加えることで伝導帯下端(CBM: Conduction Band Minimum)の位置を決定した。図III-2-(ニ)-D-23 にスタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)_3\text{Se}_5$ 系固溶体の VBM と CBM の組成依存性を示した。VBM の位置は Ga の固溶量が増加してもほとんど変化しない。これは、カルコパイライト型 $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ 系固溶体の場合と同様である。これに対して、スタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)_3\text{Se}_5$ 系固溶体の CBM の位置は Ga の固溶量が増加するとともに上昇した。この傾向も、カルコパイライト型 $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ 系固溶体の場合と同様であった。しかし、スタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)_3\text{Se}_5$ 系固溶体の CBM の位置は、カルコパイライト型 $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ 系固溶体の場合よりも全体に低く、CdS の CBM の値と等しくなるのはカルコパイライト型 $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ 系固溶体の場合には $x=0.2$ であるのに対して、スタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)_3\text{Se}_5$ 系固溶体の場合には $x=0.8$ であった。

CIGS 太陽電池においては、CdS バッファ層の CBM の位置が CIGS 光吸収層の CBM よりも高い位置にあるスパイク構造の伝導帯のオフセットの場合に高効率 CIGS 太陽電池が得られることが知られている。図III-2-(ニ)-D-24 左に、CdS バッファ層とカルコパイライト型 $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})\text{Se}_2$ 光吸収層界面のバンドダイヤグラムとそれらの界面にスタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_3\text{Se}_5$ 層を挿入した場合のバンドダイヤグラムを比較して示した。スタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_3\text{Se}_5$ 層を挿入することで、以下の二つの効果が期待できることがわかった。①スタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_3\text{Se}_5$ の VBM がカルコパイライト型 $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})\text{Se}_2$ の VBM よりも低くなるので、CIGS 光吸収層で生じた正孔がスタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_3\text{Se}_5$ 層を通過して CdS 層との界面に近づきにくくなり、その結果として CdS バッファ層と CIGS 光吸収層の界面でのキャリアの再結合を抑制する。②カルコパイライト型 $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})\text{Se}_2$ の CBM の位置は CdS の CBM の位置よりも高くなり CdS バッファ層と CIGS 光吸収層の伝導帯のオフセットがクリフ構造になることから、高 Ga 濃度の CIGS 太陽電池で高い変換効率は期待できない。しかし、CdS バッファ層と CIGS 光吸収層の界面にスタンナイト型 $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_3\text{Se}_5$ を挿入することで、CdS との伝導帯のオフセットがスパイク構造になり、高い変換効率の CIGS 太陽電池が期待できる。



図III-2-(ニ)-D-24 CdS 層と $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})\text{Se}_2$ 層界面とそれらの界面に $\text{Cu}(\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_3\text{Se}_5$ 層を挿入したバンドダイヤグラム

(c) $\text{Cu}_2\text{Se}-\text{In}_2\text{Se}_3-\text{In}_2\text{S}_3$ 系

$\text{CuInSe}_2-\text{In}_2\text{Se}_3-\text{In}_2\text{S}_3$ についてカルコパイライトとスタンナイト相の存在領域について研究し、Se サイトに S を置換すると、スタンナイト相の存在領域が非常に狭くなることを見いだした。硫黄系の場合には、スピネル型構造の CuIn_5S_8 が生成する。スピネル型 $(\text{Cu}_{1/2}\text{In}_{1/2})\text{In}_2\text{S}_8$ は $(\text{Cu}_{1/2}\text{In}_{1/2})$ は S の作る正四面体 (4 配位) サイトに入るが、残りの 4/5 の In は正八面体サイト (6 配位) を占有する。これは、S の正四面体の中に入るには In 原子が大きすぎるからであると考えられる。

(d) CuInS_2 の Cu サイトへの Li の固溶

$\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) 太陽電池の変換効率は NaF および KF のポストデポジション処理により 21.7% まで向上した。我々は、第一原理計算を用いて CuInS_2 (CIS) 中の各種構成元素に対するアルカリ金属 (Li, Na, K) の置換エネルギーを計算した。その結果、CIS の Cu に対する Li 置換 (Li_{Cu}) のエネルギーは Na_{Cu} や K_{Cu} の置換エネルギーに比較して非常に小さいことがわかった。その結果から、Li は Na や K と異なり、CIGS 膜の Cu と置換する可能性があると考えた。それで、手始めに CuInS_2 の Cu を一部 Li で置換した $(\text{Cu}_{1-x}\text{Li}_x)\text{InS}_2$ を合成し、結晶構造の詳細な解析から、Li は $x=0.1$ まで固溶することを見いだした。そして、 $(\text{Cu,Li})\text{InS}_2$ の禁制帯幅は、Li の固溶量の増加に従い 1.43 eV からほぼ直線的に増加した。

(Cu_{1-x}Li_x)InS₂ 固溶体のイオン化エネルギーは、Li の固容量の増加とともに大きくなり、VBM が Li の固容量の増加とともに大きく低下することがわかった。これらのことから、Cu サイトに Li を固溶させることでも CuInS₂ の電子構造が制御できることがわかった。

(e) 光吸収層と Mo 裏面電極界面に生成する MoSe₂ と MoS₂ の電子構造の評価

CIS 太陽電池の裏面電極には Mo が使用される。そして、CIS と Mo 電極の界面に MoSe₂ が生成することが知られている。我々は分子間力(van der Waal's: vdW 力)を考慮した第一原理計算を用いて Mo-Se 系化合物の反応エンタルピーを評価することで、光吸収層/Mo 界面には MoSe₂ が容易に生成する事を確認した。次に、ハイブリッド汎関数の Heyd-Scuseria-Ernzerhof (HSE) 関数を用いて、MoSe₂ の電子構造を評価した。MoSe₂ は、価電子帯の上端が Γ 点で伝導帯の下端が Γ -K の中間点に位置する間接遷移型の半導体で、間接遷移の禁制帯幅は 1.09 eV で、この値は実験値の 1.06~1.12 eV とほぼ一致した。一方、直接遷移は K 点で起こり、この時の求めた禁制帯幅は 1.57 eV であった。この値は実験値の 1.35~1.40 eV より大きかった。

2. 実用化・事業化見通し

本研究で開発された技術や知見は、NEDO 研究の連携先であるソーラーフロンティア社へ直ちに引き渡し、実用化・事業化に資する体制が構築されている。HLS 効果については、数 100 時間という長い処理時間が実用化の際にハードルの一つとなるが、HLS 処理を DH 処理と LS 処理を分割すれば、DH 処理は多くの枚数を同時にバッチ処理で実行することが可能となり、また LS 処理も他の方法で代替できる可能性があるため、実用化は困難ではないと考えられる。

3. 波及効果

【1】産業技術総合研究所

ここで発見された HLS 効果は、CIS の成膜方法等に依存しない普遍的な性質であると考えられるため、将来的には CIS 太陽電池の高効率化技術に新しいブレークスルーを起こす鍵となる可能性がある。まだメカニズムが解明されていないために、最終的に量産化に適用されるときの方法は不明であるが、大きな可能性を秘めていると考えられる。

【2】東京工業大学

現在、CIGS 太陽電池の高効率化技術として KF 処理が広く研究されている。しかしながら KF 処理においては、処理時に有毒な Se-F 化合物が生成し、量産化に適さない。本研究が開発した Se インターバル技術は製膜手法の改善であり、余分なプロセスを発生しないため低コストであり、また有害な副生成物を発生しないため量産化に適している。

【3】立命館大学

本研究によって、(Zn,Mg)O を用いた透明電極のワイドギャップ化と伝導帯位置制御は短波長光の利用拡大による Jsc 向上と再結合低減による Voc 向上に効果的であることが実証された。従来の ZnO に Mg を少量 (10%程度) 添加した本材料は、材料を大きく変えずに現在の製造プロセスに適用できる可能性が高いため、本技術の波及効果は高い。

【4】東京理科大学

本研究で開発した単結晶 Mo 薄膜は、CIS 太陽電池のみならず、他の材料の化合物薄膜太陽電池を含む各種デバイスへの応用が可能である。また、エピタキシャル CIGS 薄膜は、太陽電池のみならず、光センサーや撮像デバイスなど各種光デバイスへの応用が可能である。

【5】筑波大学

結晶格子欠陥を検出し同定する技術は、産総研が発見した HLS 効果のメカニズムを解明する上で重要な技術であり、それは HLS 処理技術を量産化に応用する方法を開発するためにも必要であり、HLS 効果を通しての波及効果は大きいと考えられる。

【6】鹿児島大学

CIS 系電池内の複数界面を含む多層構造のバンドプロファイルの初めての決定に成功した電子構造評価技術は多様な積層型半導体デバイス、特に機能層がバンドギャップの変動を伴うデバイスの電子構造の解明・最適化のためにも有効であり、当該技術・最適化のための知見が類縁分野でも展開・活用されると期待される。

【7】龍谷大学

CIS 系化合物の結晶構造の安定性や電子構造は、詳細な理解がされないままに残されて来た経緯があり、本研究によって解明された事実は、今後の CIS 太陽電池の高効率化の研究に対して大きな波及効果を与えると考えられる。

4.今後の展開

【1】産業技術総合研究所

HLS 処理条件の最適化を更に進めて CIS 太陽電池の高効率化を推進すると共に、HLS 効果のメカニズムを解明し、現時点においては準安定状態である高ホール濃度状態を真に安定化させる技術を開発する。また、HLS 処理により CdS/CIS ヘテロ接合界面が高品質化されるメカニズムを解明し、高品質化を更に進める技術を開発する。

【2】東京工業大学

現在までのところ、CIGS 表面は Cu-poor 相の形成により再結合速度が抑えられていると考えている。数値シミュレーションからは、現状、CIGS 表面の再結合よりもバルク内再結合が効率を制限しているとの結果が得られている。今後は、粒界並びにバルク内の再結合を抑える必要があり、チオ尿素処理が一つの方策と考えている。

【3】立命館大学

(Zn,Mg)O:Al は従来の透明電極よりもワイドギャップであり短波長領域で透過率が高い。透明電極のワイドギャップ化は短絡電流密度の向上に有効であり、様々な太陽電池（ヘテロ接合型結晶 Si、薄膜 Si、CdTe、CZTS、ペロブスカイト）などにも展開できると考えられる。

【4】東京理科大学

エピタキシャル成長によるワイドギャップ CIGS 薄膜太陽電池への展開を進める。また、不純物ドーピングがセル特性に及ぼす効果を解明する。

【5】筑波大学

高効率な低 Ga 濃度試料では界面再結合が重要であることが判明しており、この定量化と抑制法開発を評価の立場から支援する。これにより、変換効率 23%の達成に貢献する。

【6】鹿児島大学

光吸収層/バッファ/窓層の改善過程をバンドプロファイルの直接観察により評価することで最適化に寄与する。また、裏面電極近傍及び光吸収層内バンドプロファイルの決定を上記に加えることで電子構造の総合的最適化・本研究開発の最終目標達成に貢献する。

【7】龍谷大学

CIS バルクや CIS/バッファ層ヘテロ接合界面に形成されていると考えられる Cu 不足組成の CIS 化合物について、引き続き結晶構造の安定や電子構造を実験と理論計算の両面から詳しく解明し、高い変換効率を得るための指針を提供する。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	1	1	2 件
論文	12	13	8	33 件
研究発表・講演（うち国際会議）	29(12)	61(28)	9(9)	99 件
受賞実績	1	0	0	1 件
展示会への出展	1	1	0	2 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	産総研	特願 2017-122558	国内 外国 PCT	2017/6/22	出願	太陽電池および その製造方法	西永慈郎、柴 田肇、仁木栄
2	学校法人 立命館	特願 2017-24303	国内	2017/2/13	出願	薄膜太陽電池	峯元高志、 チャンタナ ジャカパン

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査 読	発表年 月
1	鯉田 崇、上 川 由紀子、 山田 昭政、 柴田 肇、仁 木 栄	産総研	Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells with amorphous oxide semiconducting buffer layers	IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, 5- 3, pp.956-961	有	2015/05
2	T. Nishimura	Tokyo Institute of Technology	Fabrication of Cu(In,Ga)Se ₂ solar cells with a single graded band profil	Physica Status Solidi, 252, 1235~1238	有	2015/05
3	寺田 教男	鹿児島大学	Characterization of electronic structure of oxysulfide buffers and band alignment at buffer/absorber interfaces in Cu(In,Ga)Se ₂ -based solar cells	Jpn. J. Appl. Phys. vol.53, pp.05FW09-1 - 05FW09-5	有	2015/06
4	T. Nishimura	Tokyo Institute of Technology	Control of Valence Band Offset at a CdS/Cu(In,Ga)Se ₂ Interface by Inserting Wide Bandgap Materials for Suppression of Interfacial Recombination in Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys., 54, 08KC08	有	2015/07

5	上川 由紀 子、Noriko Yamada (新日 鐵住金株式會 社)、 Yukihiro Yamamoto (新 日鐵住金株式 會社)、 Sawako Yamaguchi (新日鐵住金 株式會社)、 柴田 肇	産業技術總 合研究所 太陽光発電 (工学) 研 究センター	Fabrication of Cu(In,Ga)Se Solar Cells on Stainless Steel Foils with Sol-Gel Barrier Layer	EU PVSEC Proceedings		2015/11
6	M. A. Halim, M. M. Islam, X. Luo, T. Sakurai, N. Sakai, T. Kato, H. Sugimoto, H. Tampo, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto.	筑波大学、 産総研	Electroluminescence Study of Cu ₂ ZnSn(S,Se) ₄ and Cu(in,Ga)Se ₂ Thin Film Solar Cells	Proceedings at European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2015), pp.1074-1076	有	2015/11
7	M. M. Islam, A. Yamada, K. Matsubara, S. Niki, T. Sakurai, K. Akimoto	筑波大学、 ソーラーフ ロンティ ア、産総研	Effect of Se Flux on the Properties of Polycrystalline CuInSe ₂ Thin Films and Solar cells	Proceedings at European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2015), pp.1246-1248	有	2015/11
8	寺田 教男	鹿児島大学	Characterization of electronic structure of Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ absorber layer and CdS/Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ interfaces by in-situ photoemission and inverse photoemission spectroscopies	Thin Solid Films vol.582, pp.166-170	有	2015/12
9	上川 由紀 子、西永 慈 郎、石塚 尚 吾、柴田 肇、仁木 栄	産業技術總 合研究所 太陽光発電 (工学) 研 究センター	Effects of Mo surface oxidation on Cu(In, Ga)Se-2 solar cells fabricated by three- stage process with KF postdeposition treatment	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 55, pp.022304-1- 022304-6	有	2016/01
10	Akira Uedono, Muhammad M. Islam, Takeaki Sakurai,	筑波大学、 ハレ大学 (独)	Vacancy behavior in Cu(In _{1-x} Ga _x)Se ₂ layers grown by a three-stage coevaporation process probed by monoenergetic positron beams	Thin Solid Films 603, (2016) 418- 423.	有	2016/03

	Christoph Hugenschmidt, Werner Egger, Roland Scheer, Reinhard Krause-Rehberg, Katsuhiro Akimoto					
11	Mohammad Abdul Halim, Muhammad Monirul Islam, Xianjia Luo, Takeaki Sakurai, Noriyuki Sakai, Takuya Kato, Hiroki Sugimoto, Hitoshi Tampo, Hajime Shibata, Shigeru Niki, and Katsuhiro Akimoto,	筑波大学、 産総研、 ソーラーフ ロンティア	A comparative study on charge carrier recombination across the junction region of $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ and $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ thin film solar cells	AIP Advances 6, (2016), 035216.	有	2016/03
12	T. Maeda, W. Gong, T. Wada	龍谷大学 理工学部	Crystallographic and optical properties and band structures of CuInSe_2 , CuIn_3Se_5 , and CuIn_5Se_8 phases in Cu-poor Cu_2Se - In_2Se_3 pseudo-binary system	Jpn. J. Appl. Phys., 55, 04ES15 (2016).	有	2016/03
13	Shogo Ishizuka, Paul J. Fons, Akimasa Yamada, Yukiko Kamikawa-Shimizu, and Hajime Shibata	産総研	Interface oxygen and heat sensitivity of $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ and CuGaSe_2 solar cells	Appl. Phys. Lett. 108, 203902 (2016)	有	2016/05

14	Ishwor Khatri, Hirofumi Fukai, Hiroshi Yamaguchi, Mutsumi Sugiyama and Tokio Nakada	Tokyo University of Science	Effect of the potassium fluoride post-deposition treatment on Cu(In,Ga)Se ₂ thin films and solar cells fabricated onto sodalime glass substrate	Solar Energy Materials and Solar Cells, 155 (2016) 280-287.	有	2016/06
15	X. Hao, K.T. Chowdhury, T. Sakurai, Y. Kamikawa-Shimizu, S. Ishizuka, A. Yamada, H. Shibata, K. Akimoto	筑波大学、産総研	The Influence of Sodium in High Ga-Content Cu(In _{1-x} ,Ga _x)Se ₂ (CIGS) Solar Cells	Proceedings at European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC 2016), pp. 1213-1215	有	2016/06
16	T. Umehara	Tokyo Institute of Technology	Investigation of the effects of rear surface recombination on the Cu(In,Ga)Se ₂ solar cell performances	Electronic Materials Letters., 12, p. 479-483	有	2016/07
17	T. Nishimura	Tokyo Institute of Technology	Interfacial quality improvement of Cu(In,Ga)Se ₂ thin film solar cells by Cu-depletion layer formation	Applied Physics Express., 9, 92301	有	2016/08
18	鯉田 崇、西永 慈郎、樋口 博文、黒川 温子、飯岡 正行、上川 由紀子、山田 昭政、柴田 肇、仁木 栄	産総研	Comparison of ZnO:B and ZnO:Al layers for Cu(In,Ga)Se-2 submodules	THIN SOLID FILMS, 614-Part B, pp.79-83	有	2016/09
19	T. Umehara	Tokyo Institute of Technology	Impact of roll-over-shaped current-voltage characteristics and device properties of Ag(In,Ga)Se ₂ solar cells	Jpn. J. Appl. Phys., 56, 012302-1	有	2016/12
20	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	Ritsumeikan University, Solar Frontier K. K.	Time-resolved photoluminescence of Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ thin films and temperature dependent current density-voltage characteristics of their solar cells on surface treatment effect	Curr. Appl. Phys. 17 (2017) 461-466.	有	2017/01

21	K. Ueda, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学 理工学部	Crystallographic and optical properties of CuGa3S5, CuGa3Se5 and CuIn3(S, Se)5 and CuGa3(S, Se)5 systems	Thin Solid Films, 633, 23-30 (2017).	有	2017/01
22	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	Ritsumeikan University, Solar Frontier K. K.	Thin-film Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ -based solar cell with (Cd, Zn)S buffer layer and Zn _{1-x} Mg _x O window layer	Prog. Photovolt. 25 (2017) 431-440.	有	2017/03
23	寺田 教男	鹿児島大学	Electronic structures of Cu2ZnSnSe4 surface and CdS/Cu2ZnSnSe4 heterointerface	Jpn. J. Appl. Phys. vol.56, pp.065701-1-5	有	2017/03
24	T. Maeda, C. Zhao, T. Wada	龍谷大学 理工学部	Crystallographic, optical, and electronic properties of (Cu, Li)InS2 system	Thin Solid Films, 633, 172-178 (2017).	有	2017/03
25	T. Maeda, Y. Yu, T. Wada	龍谷大学 理工学部	Crystallographic and optical properties and band diagrams of CuGaS2, CuGa3S5, and CuGa5S8 phases in Cu-poor Cu2S-Ga2S3 pseudo-binary system	Jpn. J. Appl. Phys., 56 , 04CS12 (2017).	有	2017/03
26	J. Chantana, T. Minemoto	Ritsumeikan University	Recent Progress of Cu(In, Ga)Se ₂ and Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ -based Solar Cells	AAPPS Bulletin 27 (2017) 7-13.	有	2017/04
27	Ishwor Khatri, Mutsumi Sugiyama and Tokio Nakada	Tokyo University of Science	Effects of combined additional indium deposition and potassium fluoride post-deposition treatments on Cu(In, Ga)Se ₂ thin film solar cells	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 10.1002/pip.2892	有	2017/04
28	寺田 教男	鹿児島大学	Electronic structure of Cu2ZnSn(SxSe1-x) ₄ surface and CdS/Cu2ZnSn(SxSe1-x) ₄ interface	Phys. Stat. Solid.	有	2017/04
29	T. Maeda, W. Gong, T. Wada	龍谷大学 理工学部	CuInSe ₂ , CuIn ₃ Se ₅ , and CuIn ₅ Se ₈ phases in Cu-poor Cu ₂ Se-In ₂ Se ₃ pseudo-binary system - their crystal structures, optical properties and electronic structures	Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry 4, 77-83 (2017).	有	2017/04

30	T. Ogihara	Tokyo Institute of Technology	Control of valence band offset of Cu (In, Ga) Se ₂ solar cells with single-graded band profile	Japanese Journal of Applied Physics 56 (6), 062301	有	2017/05
31	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	Ritsumeikan University, Solar Frontier K. K.	Aluminum-doped Zn _{1-x} Mg _x O as transparent conductive oxide of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ -based solar cell for minimizing surface carrier recombination	Prog. Photovolt. published online. https://doi.org/10.1002/pip.2911 .	有	2017/06
32	Xia Hao, Shenghao Wang, Katsuhiko Akimoto, Takuya Kato, Hiroki Sugimoto, Takeaki Sakurai	筑波大学、ソーラーフロンティア	An optimized photolithography recipe for Cu(In _{1-x} Ga _x) ₂ (S _y Se _{1-y}) ₂ (CIGSSe) solar cells	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 2017), in press	有	2017/06
33	Muhammad M. Islam, Shogo Ishizuka, Hajime Shibata, Shigeru Niki, Katsuhiko Akimoto, Takeaki Sakurai	筑波大学、産総研	Study of Defect Properties in CuGaSe ₂ Thin-film Solar-cells Using Admittance Spectroscopy	Proceedings of the 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 2017), in press	有	2017/06

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	鯉田 崇、上川 由紀子、山田 昭政、柴田 肇、仁木 栄	産総研	Transparent amorphous oxide semiconductor as an n-type buffer layer in Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	European PV Solar Energy Conference 2015 (EU PVSEC 2015)	2015/09
2	上川 由紀子、Noriko Yamada (新日鐵住金株式会社)、Yukihiro Yamamoto (新日鐵住金株式会社)、Sawako Yamaguchi (新日鐵住金株式	産業技術総合研究所 太陽光発電(工学)研究センター	Fabrication of Cu(In, Ga)Se Solar Cells on Stainless Steel Foils with Sol-Gel Barrier Layer	31st European PV solar Energy Conference (EU PVSEC)	2015/09

	会社)、柴田 肇				
3	上川 由紀子、西永 慈郎、山田 昭政、柴田 肇、仁木 栄	産業技術総合研究所 太陽光発電(工学)研究センター	CIGS solar cells fabricated on Mo back-contacts/SLG with varied Mo surface conditions	31st European PV solar Energy Conference (EU PVSEC)	2015/09
4	荻原知寛	東京工業大学	単傾斜構造を有するCu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池の界面価電子帯制御による高効率化	第76回応用物理学会 秋季学術講演	2015/09
5	Ishwor Khatri, Hiroshi Yamaguchi, Mutsumi Sugiyama, Tokio Nakada	東京理科大学	Investigation of the Potassium Fluoride Post-deposition Treatment with and without Se Vapor on CIGS Solar Cell Performance	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/09
6	M. A. Halim, M. M. Islam, X. Luo, T. Sakurai, N. Sakai, T. Kato, H. Sugimoto, H. Tampo, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto.	筑波大学、 産総研	Electroluminescence Study of Cu ₂ ZnSn(S, Se) ₄ and Cu(in, Ga)Se ₂ Thin Film Solar Cells	The 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016.	2015/09
7	M. M. Islam, A. Yamada, K. Matsubara, S. Niki, T. Sakurai, K. Akimoto	筑波大学、 ソーラーフロンティア、 産総研	Effect of Se Flux on the Properties of Polycrystalline CuInSe ₂ Thin Films and Solar cells	The 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2015.	2015/09
8	繁實 章夫, 和田 隆博	龍谷大学 理工学部	化合物薄膜太陽電池の光吸収層とMo裏面電極界面に生成するMoSe ₂ とMoS ₂ の第一原理計算による電子構造の評価	第76回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/09
9	T. Maeda, W. Gong and T. Wada	龍谷大学 理工学部	Crystallographic and optical properties, and band-diagrams of CuInSe ₂ , CuIn ₃ Se ₅ , and CuIn ₅ Se ₈ phases in Cu-poor Cu ₂ Se-In ₂ Se ₃ pseudo-binary system	International Conference Solid State Devices and Materials (SSDM) 2015	2015/09

10	鯉田 崇、上川 由紀子、山田 昭政、柴田 肇、仁木 栄	産総研	Effect of post-annealing on the performance of n-type amorphous (In,Ga) ₂₀₃ / p-type Cu(In,Ga)Se ₂ heterojunction solar cells	The 9th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOEO-9)	2015/10
11	鯉田 崇、西永 慈郎、樋口 博文、黒川 温子、飯岡 正行、柴田 肇、仁木 栄	産総研	Comparison of MOCVD-ZnO:B and sputtered ZnO:Al layers for CIGS submodules	The 9th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOEO-9)	2015/10
12	T. Umehara	Tokyo Institute of Technology	Investigation of the effects of rear surface recombination on the Cu(In,Ga)Se ₂ solar cell performances	PVSEC-25	2015/11
13	Ishwor Khatri, Hirofumi Fukai, Mutsumi Sugiyama, Tokio Nakada	東京理科大学	Investigation on the cell performance of potassium fluoride modified CIGS solar cell	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-25)	2015/11
14	土岐 爽真	東京工業大学	CIGS 太陽電池の高効率化に向けた結晶粒界評価による再結合抑制効果の検証	「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会	2015/12
15	渡辺 基	東京工業大学	Al ₂ O ₃ パッシベーションを有する Cu(In,Ga)Se ₂ 太陽電池の作製	「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会	2015/12
16	首藤晃佑, 山上 武, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	Cu(In,Ga)Se ₂ 太陽電池の効率向上に向けた KF-PDT の検討	東京理科大学 総合研究院 太陽光発電技術研究部門 第6回シンポジウム	2016/01
17	橋本健史, 清酒泰介, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	高移動度 In ₂₀₃ :Ti 薄膜の製膜と Cu(In,Ga)Se ₂ 太陽電池への応用	東京理科大学 総合研究院 太陽光発電技術研究部門 第6回シンポジウム	2016/01
18	石塚尚吾、上川由紀子、西永慈郎、柴田肇	産総研	CuGaSe ₂ 太陽電池のデバイス化工程の影響評価	第63回応用物理学会春季学術講演会	2016/03
19	鯉田 崇	産総研	Transparent conductive and semi-conductive oxides for photovoltaics	Japanese Swiss Energy Materials Workshop	2016/03

20	荻原 知寛	東京工業大学	低温製膜における単傾斜構造を有する Cu(In, Ga)Se ₂ 薄膜太陽電池の界面価電子帯制御による高効率化	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
21	梅原 猛	東京工業大学	高開放電圧、高曲線因子を目指した Ag(In, Ga)Se ₂ 薄膜太陽電池の開発	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
22	土岐 爽真	東京工業大学	Cu(In, Ga)Se ₂ /CdS 界面への Cu(In, Ga) ₃ Se ₅ 挿入による Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池の高効率化	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
23	古田 健人	東京工業大学	Cu(In, Ga)Se ₂ 薄膜太陽電池の光吸収層へのチオ尿素溶液処理	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
24	A. Yamada	Tokyo Institute of Technology	High Efficiency Cu(InGa)Se ₂ Thin-Film Solar Cells with a Cu-poor Layer	CMD&R-WS	2016/03
25	Ishwor Khatri, Mutsumi Sugiyama and Tokio Nakada	東京理科大学	Effect of Additional Indium Deposition after Cu(In, Ga)Se ₂ Thin Film Growth for Potassium Fluoride Post-deposition Treatment	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
26	山上武, 寺本真浩, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	Mo エピタキシャル膜に及ぼす低温バッファ層の効果	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
27	前田 毅, 宮イゲン, 西谷幹彦, 和田 隆博	龍谷大学 理工学部	CuIn ₃ Se ₅ および CuGa ₃ Se ₅ の電子構造	2016 年第 63 回 応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
28	上田健太, 前田毅, 和田隆博	龍谷大学 理工学部	CuIn ₃ Se ₅ および CuGa ₃ Se ₅ への硫黄の固溶効果	2016 年第 63 回 応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
29	細木恵, 前田 毅, 西谷幹彦, 和田隆博	龍谷大学 理工学部	Cu(In, Ga)S ₂ 系固溶体の光学評価とバンドラインナップ	2016 年第 63 回 応用物理学会 春季学術講演会	2016/03
30	石塚尚吾	産総研	Developments in CuGaSe ₂ solar cells toward highly efficient wide-gap Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	2016 European Materials Research Society Spring Meeting	2016/05
31	鯉田 崇	産総研	Amorphous and crystalline In ₂ O ₃ -based transparent conducting films for photovoltaics	European Materials Research Society Spring Meeting 2016	2016/05

32	上川 由紀子、西永 慈郎、柴田 肇、仁木 栄、松原 浩司	産業技術総合研究所 太陽光発電(工学)研究センター	CIGS 太陽電池における KF-PDT 中のアニール効果に関する研究	第 13 回 「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
33	川端晃樹、 Jakapan Chantana、 Theerarat Suwansichon、加藤拓也、杉本広紀、峯元高志	立命館大学、 ソーラーフロンティア株式会社	フォトルミネッセンスを用いた Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池のスパッタリングダメージの定量化	第 13 回 「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
34	Ishwor Khatri, Mutsumi Sugiyama and Tokio Nakada	東京理科大学	Effect of rinsing processes of potassium fluoride treated CIGS thin film before chemical bath deposition of buffer layer	第 13 回 「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
35	山上武, 寺本真浩, Ishwor Khatri, 金子智, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	低温バッファ層を用いた裏面電極用 Mo スパッタ膜のエピタキシャル成長	第 13 回 「次世代の太陽光発電システム」 シンポジウム	2016/05
36	寺田 教男	鹿児島大学	Characterization of electronic structure of Ag(In, Ga)Se ₂ surface and CdS/Ag(In, Ga)Se ₂ interface	2016 Spring Meeting European Materials Research Society	2016/05
37	K. Ueda, T. Maeda, T. Wada	龍谷大学 理工学部	Crystallographic and optical properties of CuIn ₃ (S, Se) ₅ and CuGa ₃ (S, Se) ₅ systems	E-MRS 2016 Spring Meeting	2016/05
38	T. Maeda, C. Zhao, A. Kai, T. Wada	龍谷大学 理工学部	Crystallographic and optical properties of (Cu, Li)InS ₂ and (Cu, Li)GaS ₂ systems	E-MRS 2016 Spring Meeting	2016/05
39	鯉田 崇、西永 慈郎、樋口 博文、飯岡 正行、黒川 温子、上川 由紀子、柴田 肇、仁木 栄	産総研	Comparative studies of transparent conductive oxide layers for application in Cu(In, Ga)Se ₂ modules	EU PVSEC 2016	2016/06
40	上川 由紀子、西永 慈郎、石塚 尚吾、柴田 肇、仁木 栄	産業技術総合研究所 太陽光発電(工学)研究センター	Effects of Thermal Annealing and KF Post Deposition on Photovoltaic Property of CIGS Solar Cell.	32nd European PV solar Energy Conference (EU PVSEC)	2016/06
41	S. Toki	Tokyo Institute of Technology	Improvement of Cu(In, Ga)Se ₂ photovoltaic performance by adding Cu-poor compounds Cu(In, Ga) ₃ Se ₅ at	IEEE PVSC 43rd	2016/06

			Cu(In, Ga)Se ₂ /CdS interface		
42	X. Hao, K.T. Chowdhury, T. Sakurai, Y. Kamikawa-Shimizu, S. Ishizuka, A. Yamada, H. Shibata, K. Akimoto	筑波大学、産総研	The Influence of Sodium in High Ga-Content Cu(In _{1-x} , Ga _x)Se ₂ (CIGS) Solar Cells	The 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2016.	2016/06
43	T. Sakurai	筑波大学	<Invited> Study of Defects in Widegap CIGS Solar Cells	The International Union of Materials Research Societies-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM)	2016/07
44	上川 由紀子、西永 慈郎、石塚 尚吾、柴田 肇、仁木 栄、松原 浩司	産業技術総合研究所 太陽光発電(工学)研究センター	Effects of alkali treatments and thermal annealing on the property of CIGS solar cell	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials	2016/09
45	T. Nishimura	Tokyo Institute of Technology	Structural, Electrical, and Compositional Analysis of Surface and Grain Boundary for Cu(In, Ga)Se ₂ Solar Cells by EBSD/SSRM/TEM-EDX	ICTMC-20	2016/09
46	西村 昂人	東京工業大学	三段階法におけるインターバル時間導入によるCu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池の高効率化	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/09
47	杉浦 大樹	東京工業大学	Cu(In, Ga) ₃ Se ₅ 層を有する Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池における CdSO ₄ 表面処理による Cd 拡散効果の実験的検証	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/09
48	梅原 猛	東京工業大学	ハイブリッドバッファ層導入による高バンドギャップ・高効率 Ag(In, Ga)Se ₂ 薄膜太陽電池の開発	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/09
49	渡辺 基	東京工業大学	チオ尿素処理を施した Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池における TRPL 測定	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/09

50	安藤優汰, 山上武, 首藤晃佑, 松浦純平, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	CIGS エピタキシャル薄膜のフォトルミネッセンス特性	2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
51	松浦純平, 首藤晃佑, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	KF 処理を行った CIGS 太陽電池への熱・光照射効果	2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
52	Ishwor Khatri, Mutsumi Sugiyama and Tokio Nakada	東京理科大学	Diffusion behavior of alkali metals after KF-PDT on CIGS thin films fabricated onto sodalime glass substrates	2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
53	M. Islam, A. Uedono, T. Sakurai, C. Hugenschmidt, W. Egger, R. Scheer, A. Dalla, R. Krause-Rehberg, K. Akimoto	筑波大学、産総研	Post-growth Se-annealing on the Properties of CuGaSe ₂ -layers Grown by Three-stage Evaporation Process	2016 International conference on Solid State Materials and Devices (SSDM)	2016/09
54	Xia Hao, Hideki Hagiya, Takeaki Sakurai, Akimasa Yamada, Shogo Ishizuka, Yukiko Kamikawa, Hajime Shibata, Shigeru Niki, Katsuhiko Akimoto	筑波大学、産総研	The device performance improvement by reducing the secondary phase of Cu _{2-δ} Se in Cu(In _{1-x} , Ga _x)Se ₂ (CIGS) solar cells	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
55	Muhammad Monirul Islam, Akira Uedono, Takeaki Sakurai, Christoph Hugenschmidt, Werner Egger, Roland Scheer, Ayham Dalla, Reinhard Krause-Rehberg, Katsuhiko Akimoto	筑波大学、ハレ大学(独)	Effect of Post-deposition Se-annealing on the defect distribution in CuGaSe ₂ Thin-films and Solar-cells	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
56	櫻井岳暁, Islam Md., Hao Xia, 秋本克洋, 石塚尚吾, 反保衆志, 柴田肇, 仁木栄, 酒井紀行, 加藤拓	筑波大学、産総研、ソーラーフロンティア	<招待講演>電気・光学的評価法による多元系化合物の物性解明	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09

	也、杉本広紀				
57	寺田 教男	鹿児島大学	Electronic Structure of CdS/Cu ₂ ZnSnSe ₄ Interface	20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds	2016/09
58	寺田 教男	鹿児島大学	Electronic Structure of Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ Surface and CdS/Cu ₂ ZnSn(S _x Se _{1-x}) ₄ Interface	20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds	2016/09
59	寺田 教男	鹿児島大学	正・逆光電子分光法による多元化合物・デバイスの評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会シンポジウム	2016/09
60	寺田 教男	鹿児島大学	Cu(In, Ga)(S, Se)表面, CdS/Cu(In, Ga)(S, Se)界面の電子構造評価	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
61	Maeda, W. Gong, M. Nishitani, T. Wada	龍谷大学理工学部	Optical properties and electronic structures of CuIn ₃ Se ₅ and CuGa ₃ Se ₅	20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (ICTMC-20)	2016/09
62	前田毅、上田健太、辻健助、和田隆博	龍谷大学理工学部	CuGaSe ₂ -Ga ₂ Se ₃ 系化合物の結晶構造と光学的性質	2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016/09
63	和田隆博	龍谷大学理工学部	CuInSe ₂ 系太陽電池-高効率化技術と材料科学-	触媒学会(東日本支部)主催 第1回 東日本キャタリシスセミナー	2016/09
64	T. Maeda, Y. Yu and T. Wada	龍谷大学理工学部	Crystallographic and optical properties and band diagrams of CuGa ₂ S ₂ , CuGa ₃ S ₅ , and CuGa ₅ S ₈ phases in Cu-poor Cu ₂ S-Ga ₂ S ₃ pseudo-binary system	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2016)	2016/09
65	石塚尚吾、上川由紀子、西永慈郎、柴田肇	産総研	Effects of post p-n junction formation process conditions on CuGaSe ₂ thin-film solar cells	PVSEC-26	2016/10
66	T. Nishimura	Tokyo Institute of Technology	Interface-quality Improvement by Controlling Cu _(2-x) Se layer in Three-stage Method for High Efficiency Cu(In, Ga)Se ₂ Solar Cells	PVSEC-26	2016/10

67	M. Watanabe	Tokyo Institute of Technology	Thiourea treatment for Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	PVSEC-26	2016/10
68	T. Umehara	Tokyo Institute of Technology	High Efficiency Ag(In, Ga)Se ₂ Thin Film Solar Cells by Hybrid Buffer Layer	PVSEC-26	2016/10
69	J. Chantana, T. Suwansichon, K. Kawabata, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	Ritsumeikan University, Solar Frontier K. K.	Investigation of heterointerface recombination of Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ solar cells with different buffer layers.	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition	2016/10
70	T. Wada	龍谷大学理工学部	Crystallographic and optical properties of CuInSe ₂ , CuIn ₃ Se ₅ , and CuIn ₅ Se ₈ phases in Cu-poor Cu ₂ Se-In ₂ Se ₃ pseudo-binary system	The 26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-26)	2016/10
71	T. Sakurai	筑波大学	<Invited> Characterization of carrier recombination processes in Cu(In, Ga)Se ₂ solar cells	International Conference on Technologically Advanced Materials and Asian Meeting on Ferroelectricity	2016/11
72	T. Sakurai	筑波大学	<Invited> Impact of deep defects in Cu(In, Ga)Se ₂ based solar cells	EMN Meeting on Energy and Sustainability 2016	2016/11
73	石塚尚吾	産総研	CIGS 太陽電池の表面・界面に残された課題	平成 28 年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会	2016/12
74	安藤佑太、Xia Hao、萩谷秀樹、Muhammad Monirul Islam、上川由紀子、石塚尚吾、山田昭政、柴田肇、秋本克洋、櫻井岳暁	筑波大学、産総研	Cu(In _{1-x} , Ga _x)Se ₂ 太陽電池の欠陥相の膜厚プロファイルと低減効果	平成 28 年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会	2016/12
75	Islam Muhammad Monirul、Ishizuka Shogo、Shibata Hajime、Niki Shigeru、Akimoto Katsuhiro、Sakurai Takeaki	筑波大学、産総研	Photoluminescence Study of Polycrystalline CuGaSe ₂ Thin-Films Grown by Three-stage Evaporation Method	平成 28 年度 応用物理学会「多元系化合物・太陽電池研究会」年末講演会	2016/12

76	黒田健輔, 山上武, Ishwor Khatri, 金子智, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	低温バッファ層を用いた裏面電極用 Mo スパッタ膜のエピタキシャル成長	東京理科大学総合研究院 太陽光発電技術研究部門 第7回シンポジウム	2017/01
77	木下裕貴, 首藤晃佑, 松浦純平, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	KF 処理を行った CIGS 太陽電池への熱・光照射効果	東京理科大学総合研究院 太陽光発電技術研究部門 第7回シンポジウム	2017/01
78	Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	Effect of alkali metal post-deposition treatment on CIGS thin film solar cells	東京理科大学総合研究院 太陽光発電技術研究部門 第7回シンポジウム	2017/01
79	和田隆博	龍谷大学理工学部	CIS 系太陽電池の課題と展望	応用物理学会結晶工学分科会 第21回結晶工学セミナー	2017/01
80	西村昂人	東京工業大学	Cu(In, Ga)Se ₂ 表面 Cu 欠損層制御による Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池高効率化	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
81	杉浦大樹	東京工業大学	Cu-poor 層を有する Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池における Cd 及び Zn 拡散効果の実験的検証	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
82	J. Chantana, T. Kato, H. Sugimoto, T. Minemoto	Ritsumeikan University, Solar Frontier K. K.	Application of Zn _{1-x} Mg _x O:Al to transparent conductive oxide of Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cell	第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
83	T. Minemoto, J. Chantana T. Kato, H. Sugimoto	Ritsumeikan University, Solar Frontier K. K.	Conduction band control of transparent electrode in Cu(In, Ga) (S, Se) ₂ solar cells	Global Photovoltaic Conference 2017	2017/03
84	松浦純平, 首藤晃佑, Ishwor Khatri, 杉山睦, 中田時夫	東京理科大学	KF 処理 CIGS/CdS 太陽電池の熱・光照射効果	2017年 第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
85	Ishwor Khatri, Kosuke Shudo, Junpei Matsuura, Mutsumi Sugiyama, Tokio Nakada	東京理科大学	Comparative study of heat-light soaking on KF- and CsF-treated CIGS solar cells	2017年 第64回応用物理学会春季学術講演会	2017/03
86	T. Sakurai, M. Islam, A. Uedono, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto	筑波大学、産総研	<Invited> Characterization of properties of defects in CIGS based solar cells	Grobal PhotoVoltaic Conference (GPVC 2017)	2017/03

87	T. Sakurai, M. Islam, A. Uedono, S. Ishizuka, H. Shibata, S. Niki, K. Akimoto	筑波大学、 産総研	<Invited> Impact of growth condition on defect generation in Cu(In, Ga)Se ₂	DPG (Deutsche Physikalische Gesellschaft) Conferences 2017	2017/03
88	Islam Muhammad Monirul、 Ishizuka Shogo、 Shibata Hajime、 Niki Shigeru、 Akimoto Katsuhiko、 Sakurai Takeaki	筑波大学、 産総研	Study of the electrical properties of CuGaSe ₂ thin-film solar-cells using admittance spectroscopy	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/03
89	安藤佑太、Xia Hao、Muhammad Monirul Islam、 石塚尚吾、柴田肇、 秋本克洋、櫻井岳暁	筑波大学、 産総研	高効率 Cu(In, Ga)Se ₂ 太陽電池のための禁制帯グレーディング制御	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/03
90	前田 毅、中島成太郎、 和田隆博	龍谷大学 理工学部	第一原理計算を用いた CuIn ₅ Se ₈ , CuGa ₅ Se ₈ , CuIn ₅ S ₈ , CuGa ₅ S ₈ の相の評価と電子構造	2017 年第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/03
91	T. Minemoto, J. Chantana T. Kato, H. Sugimoto	Ritsumeikan University, Solar Frontier K. K.	(Zn, Mg)O transparent electrode and buffer layer for junction control in Cu(In, Ga) (Se, S) ₂ solar cells	2017 MRS Spring Meeting and Exhibition	2017/04
92	T. Wada, T. Maeda, M. Watanabe	龍谷大学 理工学部	Optical properties and band structures of Cu-deficient phases, Cu(In, Ga) ₃ Se ₅ , Cu(In, Ga) ₅ Se ₈ in Cu-poor Cu ₂ Se-(In, Ga) ₂ Se ₃ pseudo-binary system	2017 MRS Spring Meeting & Exhibit	2017/04
93	T. Maeda, S. Nakashima, K. Ueda, T. Wada	龍谷大学 理工学部	First-principles studies of CuIn ₅ Se ₈ , CuGa ₅ Se ₈ , CuIn ₅ S ₈ , and CuGa ₅ S ₈	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/05
94	K. Ueda, T. Maeda, and T. Wada	龍谷大学 理工学部	Crystallographic and optical properties of Cu(In, Ga) ₃ Se ₅	E-MRS 2017 Spring Meeting	2017/05
95	J. Chantana, Y. Ishino, T. Minemoto	Ritsumeikan University	Investigation of Zn _{1-x} Mg _x O:Al film by Ratio Frequency Magnetron Co-Sputtering as Transparent Conductive Oxide layer	44th IEEE Photovoltaic Specialist Conference	2017/06

96	Takeru Yamagami, Yuta Ando, Ishwor khatri, Mutsumi Sugiyama, Tokio Nakada	東京理科大学	Growth and properties of epitaxial Cu(In,Ga)Se ₂ thin films deposited by three-stage process for solar cells	IEEE, 44th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC- 44), Marriott Wardman Park Hotel, Washington D.C., USA	2017/06
97	Xia Hao, Shenghao Wang, Katsuhiko Akimoto, Takuya Kato, Hiroki Sugimoto, Takeaki Sakurai	筑波大学、 ソーラーフ ロンティア	An optimized photolithography recipe for Cu(In _{1-x} Ga _x)Se ₂ (Sy, Se _{1-y}) ₂ (CIGSSe) solar cells	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 2017)	2017/06
98	Muhammad M. Islam, Shogo Ishizuka, Hajime Shibata, Shigeru Niki, Katsuhiko Akimoto, Takeaki Sakurai	筑波大学、 産総研	Study of Defect Properties in CuGaSe ₂ Thin-film Solar-cells Using Admittance Spectroscopy	The 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 2017)	2017/06
99	T. Wada, T. Maeda	龍谷大学 理工学部	Optical properties and band structures of Cu(In,Ga)Se ₂ and Cu- deficient Phases, Cu(In,Ga) ₃ Se ₅ and Cu(In,Ga) ₅ Se ₈	The 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2017)	2017/06

【受賞実績】

番号	所属	名称	学会名	年月日
1	産業技術総合研究所 太陽光 発電(工学) 研究センター	第 6 回女性研究者研究業績賞 (小館香椎子賞)	応用物理学会	2016年3月

【展示会への出展】

番号	氏名	所属	名称	年月日
1	和田研究室	龍谷大学 理工学部	PVJapan2015	2015年7月29-31日
2	和田研究室	龍谷大学 理工学部	PVJapan2016	2016年6月29-7月1日

(ホ) 共通基盤技術

【A 太陽電池性能高度評価技術の開発】

(産業技術総合研究所、電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、東京理科大学、立命館大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度* 1	備考
産業技術総合研究所 新型太陽電池評価技術の開発	・新型太陽電池の性能評価再現性±0.5% (1σ) 以内を達成する。 ・WPVS をホスト機関として実施する。根幹ラボ間の定量的な一致度を明らかにする。	・ペロブスカイト、新型 CIGS 系、新型結晶 Si を含む各種新型太陽電池で高精度性能測定技術の開発・実施・実証。標準化、測定デモ等含めた普及促進。 ・構造精緻型 WRR 絶対放射計、超高温定点黒体炉、6 分岐ファイバ型分光放射計の導入により校正技術を高度化し、一次基準セル校正の不確かさ (U95) を 0.6% 台に改善する目処を得た。WPVS 根幹ラボ間で国際比較を開始。	○	・新型結晶 Si etc. では更に高精度化検証。ペロブスカイト、CIGS etc.) ではヒステリシス有無確認・低減等。 ・WPVS 再校正は 14 年ぶり (前は 2003 年 PTB がホスト)。
産業技術総合研究所 屋外高精度評価技術の開発	・結晶 Si 太陽電池モジュールの屋外測定再現性±1.0% (1σ) 以内を実証する。 ・PVMS び構造、設置方法等が測定精度に及ぼす影響を明らかにし、高精度化に必要な条件を定量化する。	・屋外測定再現性±1% 以内の目処を得て各種モジュールで連続検証中。ストリング評価への応用検討開始。 ・PV モジュール日射センサ PVMS の構造、設置方法等が測定精度に及ぼす影響と高精度化条件を明らかにした。	○	※最近の検討で、ストリング測定への応用時に温度、スペクトル変動等が測定全体精度のボトルネックとなる可能性が明らかになり、対応が課題である。
電気安全環境研究所 屋外実性能高能率測定技術の開発	結晶 Si 系市販太陽電池モジュールのオンサイトにおける測定再現性精度±2% (1σ) 以内が達成可能な装置仕様及び手順を明確にする。	産総研の成果を基にした高速 IV 測定機による JET 屋上 (横浜) での測定結果をまとめ、測定再現性精度±2% (1σ) 以内を達成できる目処を得た。さらに高精度・高能率化を狙うにあたって実際の PV サイトでの測定実績を基に誤差要因を精査する必要がある。	○	※と同じ
岐阜大学 日射変動解析技術の開発	屋外計測や気象モデルから雲エッジ部日射増大等の日射変動と大気状態との関係を解析し、屋外 IV 計測のための気象条件を定量化する	・複数の PVMS と上空カメラ、気象観測機器設置し、屋外モジュール評価に雲による日射場所むらが影響することを初めて明確化。 ・日射時間変動と場空間変動の定量的解析により、日射強度変動中の日射ムラ低減 (フィルタ) 法を開発。	○	※と同じ

宮崎大学 太陽電池温度の高精度測定技術開発	太陽電池モジュールの実温度測定精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内を達成する。	<ul style="list-style-type: none"> ・風洞および屋外実験により、有風時におけるモジュール内やシステム内温度分布を実測しデータベースを構築した。 ・COMSOL 熱解析シミュレーションを構築しモジュール内温度実測値を精度良く再現した。 ・温度センサを内挿したSi 太陽電池モジュールを作製し、屋外におけるモジュール内セル温度を実測した。 ・簡便な方法によりセル温度を導出する手法を開発し、太陽電池モジュール内セルの実温度測定精度$\pm 2^{\circ}\text{C}$以内を達成した。 	屋外において実用性のある高精度温度計測技術を確立するために、屋外計測において必ず発生する風の影響およびモジュール面内・厚み方向の温度分布を考慮した太陽電池温度の定義および高精度温度計測技術が必要である。
立命館大学 スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発	屋外測定スペクトルミスマッチによる出力電流測定誤差を補正無しの場合の2分の1に高精度化	<ul style="list-style-type: none"> ・結晶Si系PVモジュールではPVMSによる照度補正と同時にスペクトルミスマッチも補正され、従来の日射計を用いた場合に対して、Isc 測定誤差を4分の1以下に高精度化できることを統計的に示した。 ・PVMS 日射計測とスペクトルミスマッチ係数 (MMF)を用いた MMF 補正を行い、CdTe 太陽電池で Isc 測定誤差を2.9分の1に高精度化に成功した。 	日射変動時に短時間だがスペクトルミスマッチが急変することが研究のなかで明らかになり、これに今後対応する。
東京理科大学 PV日射計測によるシステム性能測定手法開発	PVアレイおよびシステムの評価に展開するために必要な日射、温度、電流-電圧特性等計測法に対する要求事項を明らかにする。本要求事項を満たした場合の屋外におけるアレイ発電性能の測定精度として、算出値と測定値との誤差 $\pm 3.0\%$ 以内を達成する。	モジュール毎および4直列ストリングの屋外における実測値と、屋外測定と同一の日射・温度条件での理論I-Vカーブの比較において、最大出力の誤差 $-0.1\sim 1.6\%$ を得たことにより、照度ムラが少ない状態で測定精度3%以下の見通しを得た。ストリング、アレイ一括での高精度測定技術(要素技術)の検討として、北杜メガソーラにて結晶シリコン系システムのストリングI-Vカーブ測定を実施し、開発手法の適用可能性を検証した。	※と同じ

* 1 達成度 ◎:大きく上回って達成、○:達成、△:達成見込み、×:未達

【B 太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発】

(産業技術総合研究所、デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社、東レ株式会社、石川県工業試験場、岐阜大学、東京農工大学、北陸先端科学技術大学院大学、東京理科大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度* 1	備考
産業技術総合研究所 ①モジュール劣化メカニズムの解明	長期屋外曝露されたモジュール内酢酸量と発電量低下の関係を定量的に評価する。 高温高湿試験と紫外光照射試験の組合せ試験を施したモジュールの発電量と試験条件の関係を定量的に評価する。	長期屋外曝露モジュールならびに高温高湿試験と紫外光照射試験の組合せ試験等を施したモジュールを分析し、酢酸量、封止材/セル界面での自由体積空隙サイズ、発電量を定量的に評価した。 長期屋外曝露モジュールでの酢酸による劣化機構が、加速試験同様、電極腐食にともなう電極直下のギャップ形成と、電極直下に残留した銀ピラーの整流性への特性変化の二段階で進行することを見出した。	◎	
産業技術総合研究所 ②各種加速試験法の開発	太陽電池モジュールの性能 25 年を予測できるとともに、屋外曝露に対して 70 倍以上の加速係数を有する試験方法を実現する。 本 NEDO 事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴（メリット、デメリット）を明らかにする。	セルを酢酸蒸気に曝露することにより、モジュール化せずとも寿命予測可能な方法を新たに開発し、交流インピーダンス法等で詳細に解析した結果、セルの酢酸蒸気曝露試験は、屋外曝露に対して 4500 倍以上の加速となることを明らかにした。この手法により、セル電極の酢酸耐性を評価可能なことも明確化し、波及的効果として、高品質セル開発のための指針ならびに手法を提示できた。 光照射時の電圧誘起劣化（PID）の振舞いを詳細に調査し、波長依存性を明確化するとともに、部分影の影響を見出した。PID 試験時の紫外光照射の必要性が示された。	◎	
産業技術総合研究所 ③国際標準化とワークショップの創設	計 2 回のワークショップを開催する。日本電機工業会の委員会から 2 件以上の技術テーマについて国際標準化に向けて提案する。	本 NEDO 事業を行う他機関と連携し、「PV モジュール信頼性国際ワークショップ（SAYURI-PV）」を、2016 年 10 月 4 日～5 日に開催した。第 2 回は 2017 年 11 月 11 日～12 日に開催する。セルの酢酸蒸気曝露試験については、SEMI 標準化が決定した。当該試験は寿命予測法としても IEC で国際標準化予定である。	○	

<p>デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社</p> <p>①紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析</p>	<p>紫外線を含む複合加速試験による封止材の劣化の定性的・定量的な指標を見出し、各種加速試験による劣化指標と酢酸発生量との関係性を見出す。</p>	<p>サンプルモジュールの裏面材の違いによる EVA 封止材の紫外線劣化がどのように異なるか確認をした。低湿度条件においても紫外線照射により十分な量の酢酸が発生することを確認し、湿度条件に関わらず紫外線による酢酸発生が生じ、劣化に大きな影響を与える可能性を見出した。さらに、EVA 封止材の紫外線透過率の違いが紫外線照射による発生酢酸量に影響を与えることを見出した。</p>	<p>◎</p>
<p>デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社</p> <p>②屋外曝露モジュールの劣化調査と複合劣化現象との相関性の検証</p>	<p>屋外曝露モジュールの発電量低下の原因調査、および封止材の劣化分析を行う。①の結果と比較を行い、屋外曝露における劣化因子を調査し、紫外線を含む加速試験方法の方向性を明らかにする。</p>	<p>曝露年数が異なる（0～12 年）屋外曝露モジュールを入手し、非破壊及び破壊分析を行った。①で見出した分析手法を用いて封止材の劣化度の調査を行い、実曝露モジュールにおいても EVA 封止材の紫外線耐性の違いが酢酸生成量に影響を与える可能性を見出し、紫外線を含む加速試験方法の方向性を明らかにした。</p>	<p>○</p>
<p>デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社</p> <p>③試験法開発</p>	<p>本 NEDO 事業を行う他の研究機関と連携し、開発している評価試験法の特徴を明らかにする。 70 倍以上の加速係数を有する試験法の開発に貢献する。</p>	<p>①、②の結果をもとに、紫外線透過性の異なる EVA 封止材及びセルを入れたミニモジュールサンプルを作製し、紫外線照射試験を実施することで、EVA 封止材の紫外線耐性の違いによる酢酸生成と出力への影響を確認した。今後、より屋外曝露を忠実に再現する試験法開発につなげる。</p>	<p>○</p>
<p>東レ株式会社</p> <p>①曝露環境の検討</p>	<p>劣化要因となった環境ストレスの定量化。</p>	<p>ストレス量を屋外曝露環境下から加速試験下に換算するシミュレーション式を立式し、裏面材が受ける環境ストレス（光照射、湿熱）の定量化手法を確立した。</p>	<p>○</p>
<p>東レ株式会社</p> <p>②屋外曝露モジュールの分析</p>	<p>環境ストレスにより劣化した裏面材パラメータの特定。</p>	<p>・初期状態および曝露環境がトレーサブルな 5.5 年曝露モジュールの裏面材を分析し、分子量分布がストレス量の追跡指標として特に適することを見出した。 ・屋外曝露後の分子量分布は光照射試験後の結果と近いことから、屋外曝露で裏面材が受ける主たるストレスは光照射であることが示唆された。</p>	<p>○</p>

<p>東レ株式会社 ③複合加速試験の開発</p>	<p>25年の耐久性を判断できる加速試験の開発（加速係数100倍以上）。</p>	<p>・裏面材に対する加速試験に関し、キセノン光を用いた光照射試験により屋外曝露での劣化状態を再現でき、加速係数は199倍であることを確認した。 ・モジュールに対する加速試験に関し、メタルハライドランプを用いた高強度光照射とHAST試験により、短期間で劣化を起こすことができ、本複合試験は100倍以上の加速係数を持つ可能性があることと示唆された。</p>	<p>◎</p>
<p>東レ株式会社 ④国際標準化への取り組み</p>	<p>得られた知見、成果を基礎とした国際標準化会議等での意見・提案。</p>	<p>本研究開発結果を基に、IEC/TC82/WG2会合にて国際規格IEC61730等に関し協議を実施。光照射試験条件や採用すべきアルベド値について意見し、規格の適正化に貢献した。</p>	<p>◎</p>
<p>石川県工業試験場 ①屋外でのPID実証試験</p>	<p>・高システム電圧で稼動する太陽電池のI-V特性の2年間分以上の測定データをまとめる。 ・PID誘発試験データから、PID発生時における特性の挙動を、1特性以上見出す。</p>	<p>・高システム電圧で稼動する太陽電池のI-V特性を不定期で測定中。 ・屋外PID加速試験を実施し、4セルモジュールでPID劣化を確認。 ・屋内PID加速試験により、高温高湿環境が、結晶系Si太陽電池のPIDに影響を与えることを見出した。また、PIDが湿熱劣化を加速させる可能性を示す実験結果を得た。 ・これらの結果から、熱帯などの過酷環境に設置する場合には、気候が温和な地域に設置する場合よりもPID対策が重要であることが示唆された。</p>	<p>◎</p>
<p>石川県工業試験場 ②太陽電池の解析</p>	<p>・シミュレーション解析を基にモジュール内においてPIDを誘発し、易い箇所・部材を見出し、PID現象による劣化メカニズムの解明を目指す。 ・解析結果を基にPIDに有効な対策案を1つ以上見出す。</p>	<p>・解析に必要なEVAの体積抵抗率を測定し、これを基に2次元の太陽電池モジュールモデルを作成した。 ・PID試験時におけるモジュール内の電流分布を2次元解析した結果からは、セル端部において電流集中が見られる。 ・電流集中箇所は、セル端—フィンガー電極端の間であり、この距離が長くなることで電流集中箇所も拡大する解析結果を得た。 ・3次元解析した結果からも、セル端部のセル端—フィンガー電極間において電流集中する解析結果を得た。</p>	<p>◎</p>

<p>岐阜大学</p> <p>①PID のメカニズムの解明</p>	<p>樹脂中拡散過程、太陽電池へのナトリウム化合物の拡散と光起電力低下に関する総合的に微視的な PID 現象発現機構を明らかにする</p>	<p>XPS(ビーム径$\sim 30\mu\text{m}$)によるセル表面の Na 分布評価により、</p> <p>(a) PID 加速試験時間に依存して Na 量が増加し、窒化膜表面近傍($\sim 20\text{nm}$)に留まっている。(b) フィンガー電極のエッジから離れるにしたがい Na 量が減少。(c) Na はラミネート前のセル窒化膜表面に存在し、ラミネート後には増加する。(d) 回復試験により窒化膜上から Na が減少。(e) 窒化膜内の Na 拡散係数は小さいことがわかり、Na 拡散バリアとして利用可能であることがわかった。</p>	<p>○</p>
<p>岐阜大学</p> <p>②PID 発生箇所の特定制の特定方法に関する研究開発</p>	<p>PID 発生箇所の特定制の特定方法に関する研究開発</p>	<p>順&逆バイアス EL、サーモグラフィ、LBIC、I-V 特性から、</p> <p>(a) 新品のセルのエッジ部分に疑似的シャント抵抗を付与し、PID と同様な特性を再現できることを実証した。(b) 1セルモジュールに逆バイアスをかけることで、PID 発生箇所のシャント抵抗成分に選択的に電流を流し、PID 発生箇所を汎用のサーモグラフィで容易に特定できることを示した。(c) 逆バイアス EL 測定から、PID 発生箇所を特定可能であり、セルエッジ部分の局所的な箇所で PID が発生することがわかった。</p>	<p>◎</p>
<p>岐阜大学</p> <p>③PID の回復技術と抑止技術の開発</p>	<p>・②で構築した PID 発生箇所特定制を応用し、局所的レーザー加熱装置を開発。</p> <p>・レーザー加熱による拡散過程を評価。</p> <p>・室温環境下にて PID 回復を加速するための、印加電圧とレーザー照射条件を検討。</p> <p>・ガラスの両面に液体ガラス層を形成し、ナトリウム化合物拡散バリアとして使用。</p>	<p>PID 回復技術として、レーザーおよび高出力 LED 光照射アシスト逆バイアス回復法と逆バイアスパルス回復法を開発した。</p> <p>(a) 高出力 LED 光照射アシスト逆バイアス印加によりセル特性を回復可能であり、回復に要する時間を数時間に短縮した。(b) 高出力 LED による光照射を用いた際のセル温度は 120°C 程度に上昇する。同温のヒーター加熱のみ(光照射無し)による回復効果に比べて約 6 倍のシャント抵抗の回復が観測された。温度上昇だけでなく、光により回復が加速されることを示した。(c) 逆バイアスパルス電流をセルに直接印加することにより、高速な回復現象を見いだした。回復に要する時間が数秒程度に短縮できることを見だし、PID を効率よく短時間で回復できることがわかった。(d) 逆バイアス電流パルスのみでは PID を起こす前の初期効率までは回復できず、回復条件を改良することでほぼ完全に回復できることを確認した。(e) 回復の時間依存性は Single Exponential Function では表現できず、複数のプロセスを考える必要がある。また、回復後の長期信頼性についても評価する必要がある。</p>	<p>◎</p>

<p>東京農工大学 太陽電池モジュールの湿熱劣化の実時間観測手法の開発</p>	<p>3種の酢酸センサ基板のうち最適なセンサ基板を抽出すること、もしくはハイブリッド化によって、3000時間の耐久性と100～5000ppmの酢酸濃度検出を達成すること</p>	<p>蛍光色素 pH センサおよび錫酢酸センサによって4000時間超の耐久性と100～12000ppmの酢酸濃度を検出できることを示し、中間目標値を大きく上回る成果を得た。このことにより、高温高湿試験に伴うモジュール内部での酢酸発生と酢酸の拡散動態を十分明らかにした。既存の計測法は破壊分析であったり、定量性や感度などの課題があるのに対して、本手法により、非破壊でモジュール内部の酢酸の発生と挙動を100時間程度の時間間隔でかつ2次元的に明らかにできたことは、世界初の成果である</p>	<p>◎</p>
<p>北陸先端科学技術大学院大学 リアエミッター型太陽電池モジュールに関するPIDの機構解明</p>	<p>PID特性の明確化と、その抑制のための指針を明らかにする。</p>	<p>負電圧のPID試験で、開放電圧(V_{oc})がわずかに減少し、その後飽和する傾向を示すことを明らかにした。正電圧では、劣化の程度はさらに小さく、やはり飽和傾向であることを見出した。また、これらの劣化の原因が、光入射側の表面再結合速度増大であることを、少数キャリア寿命の変化から実験的に確認した。飽和後の変換効率の劣化率は7%程度であり、PID試験時間を延ばしてもさらなる劣化が確認されないことから、汎用のモジュール部材を用いても、20%以内のモジュール変換効率劣化率を達成できる見込みを得た。</p>	<p>◎</p>
<p>北陸先端科学技術大学院大学 ヘテロ接合型太陽電池モジュールに関するPIDの機構解明</p>	<p>PID特性の明確化と、その抑制のための指針を明らかにする。</p>	<p>負電圧のPID試験で、短絡電流密度(J_{sc})のみがまず低減する特徴的な振る舞いを示すことを、産総研と共同で明らかにした。この現象に関し、透明導電膜であるWドーパ酸化インジウム(IWO)が一部還元されていることを実験的に明らかにした。また、さらに長いPID試験において、V_{oc}の低減も見られた。PID発現までに要する時間は他種のモジュールと比べて長く、優れたPID耐性を有することも確認した。</p>	<p>◎</p>
<p>北陸先端科学技術大学院大学 フロントエミッター型太陽電池モジュールに関するPIDの機構解明(前倒しで実施)</p>	<p>PID特性の明確化と、その抑制のための指針を明らかにする。</p>	<p>負電圧のPID試験において、V_{oc}とJ_{sc}が低下し、その後一旦飽和する振る舞いを示すことを明らかにした。この劣化は、85°C、-1000Vの条件では2min以内に飽和することを見出した。さらに長時間のPID試験で、曲線因子(FF)とV_{oc}の低下が起きることも明らかにした。FFの低下はダイオードの理想因子の上昇によるものであり、p型セルで見られるシャントパス形成がないことも見出した。</p>	<p>○</p>

<p>東京理科大学 発電データ分 析によるシス テム信頼性お よび劣化率評 価</p>	<p>北杜サイトの第 1 期設置システムに ついて発電特性の 分析を継続できる 環境を整備・維持 しデータ分析を行 うとともに、シス テムの発電データ 分析 および モ ジュールの屋内外 測定により設置後 10 年を迎えるシス テムの劣化状況を 明らかにする。モ ジュールの屋内測 定結果から算出し た年劣化率に対 し、屋外測定デー タを用いたモ ジュール年劣化率 の算出精度として ±10%以内(平均)を 実現する。</p>	<p>北杜メガソーラのデータ取得について、 北杜市より平成 31 年度末までのデータ 取得許可を得て、システム(系統連系)お よびモジュール(I-V 計測)のデータ分析 を継続的に実施している。 第 1 期設置分のモジュールの抜き取りに よる屋内測定を実施し、結晶シリコン系 5 種の平均値として初期測定からの出力 低下が約 7 年間で 2.2%であったが、2.2 年目~7 年目の期間の劣化が測定誤差の 範囲内と非常に小さいことを確認した。 システムの発電データ分析により、8 年 目時点での結晶シリコン系 47 システム における平均的な年劣化率の算出結果と して、-0.4%/年(8 年間で約 3.2%の劣 化)を得た。この中から屋内測定と同一 種 19 システムを抽出し 7 年間の劣化に 換算した値は 2.2%であった。この結果 は、屋内測定結果と極めて良く一致し、 算出精度±10%以内との中間目標を大幅 に上回る結果を得た。 最終目標の確実な達成に向け、「大規模 太陽光発電システム導入のための検討支 援ツール」(通称 STEP-PV)について、 ユーザビリティの向上に向けた改修を実 施した。</p>	<p>◎</p>
---	---	--	----------

* 1 達成度 ◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×：未達

【C 太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発】

(産業技術総合研究所、電力中央研究所、日本気象協会、佐賀大学)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度* 1	備考
産業技術総合研究所 ①各種太陽電池の経年劣化調査と発電量推定技術の開発（電力中央研究所と共同実施）	結晶シリコン系太陽電池アレイにおいて、劣化特性を考慮した定量的な発電量評価手法を開発し、±5%の精度で発電量を推定する技術を開発する。	結晶シリコン太陽電池の経年劣化を、屋外データと室内データを用いて検証した。劣化の主要因は、ヘテロ接合系では開放電圧の減少、バックコンタクト系では高電位のモジュールにおける電圧誘起劣化であることを見出した。また、PERCでは曝露初期に光誘起劣化に起因して大きな出力低下が観測された。（電力中央研究所と共同）。 薄膜系太陽電池についても計画を前倒して検証し、5年間の屋外曝露にともなう劣化挙動、季節変動の要因、プレコンディショニング時や暗所保管時における過渡的出力変化について明確化した。 各種有機太陽電池の屋外発電性能を評価するとともに、有機薄膜太陽電池において、光照射にともなう出力上昇と、暗所保管による出力低減を観測した。 単結晶シリコン太陽電池モジュールに対して、屋外劣化特性を踏まえて発電量を推定したところ、実発電量との誤差は-2.16%となり、中間目標値である±5%の精度を上回った。	◎	
電力中央研究所 ①各種太陽電池の発電量評価技術の開発（産業技術総合研究所と共同実施）	各種太陽電池モジュールの発電性能の経年劣化率を1%程度の精度で算出することを可能にする長期信頼性評価技術を開発する。	各種結晶シリコン太陽電池の年劣化率を、0.5%以内の差異で高精度に評価できることを2016年末までのデータを用いて確認した。新規に導入した新型結晶シリコン太陽電池の初期発電性能の推移を評価した。	◎	
電力中央研究所 ②メガソーラーの発電量診断手法の開発	メガソーラーの発電性能の経年劣化を2%程度の精度で算出可能な発電量診断技術を開発する。	合計7つのメガソーラーの発電データを入手した。このメガソーラーの発電データの解析を行ない、2%以内の精度で年劣化率が算出可能であることを明らかにした。	○	

<p>電力中央研究所</p> <p>③ IEC/TC82/WG2 における発電量定格（IEC 61853）の確立</p>	<p>IEC/TC82/WG2 にて、IEC 61853 シリーズにて規格成立に向けて審議に参加する。IEC 61853-4 に日本の気象データを提供し、日本を発電量定格の1つの気候区として採用されるために規格審議を行なう。</p>	<p>IEC/TC82/WG2 奈良会議（2017年5月）において、IEC 61853-4 CDV（案）における、世界の6ヶ所の気象データの1つに、日本の気象データが採用された。</p>	○
<p>日本気象協会</p> <p>①5地点における日射スペクトル等の観測</p>	<p>5地点における日射量観測システムの維持・管理に努めるとともに、⑤で述べるデータベース用のデータとして整備する。</p>	<p>5地点における日射量観測システムの維持・管理に努めるとともにデータの品質管理を実施した。また、日射スペクトルデータの計測異常を判定する手法を開発した。</p>	○
<p>日本気象協会</p> <p>②日射量データベース整備の迅速化</p>	<p>MONSOLA-11 に準ずる月平均日射量データを迅速に整備する手法を開発し、利便性の高い日射量データベースを構築する。</p>	<p>日照時間と日射量の年による違いを定量的に整理した。最近の日射量が MONSOLA-11 に比べて高くなっている傾向について日本太陽エネルギー学会の研究発表会で発表するとともに、データベースの更新頻度について検討している。迅速化の取組みの一環として、2016年の日射量の傾向をニュースリリースとして発表した。</p>	○
<p>日本気象協会</p> <p>③日射量データベースの高密度化</p>	<p>「ひまわり8号」のデータを用いた日射量推定技術の開発を行い、1年分の日射量データベースとして整備する。</p>	<p>ひまわり8号の観測データを収録するストレージを購入し、地上で観測された日射量データとの関係を用いて日射量の推定モデルを開発した。また、NEDOの観測地点における観測データを用いて、積雪の影響による推定誤差を低減する手法についても開発した。これらの研究成果を踏まえ、2016年の1年分の1kmメッシュの日射量データベース（日射量マップ）を作成した。</p>	◎
<p>日本気象協会</p> <p>④日射量データベースの高精度化および日射量データベースの更新</p>	<p>5地点の気象観測地点における日射量の観測データを用いて、日射量データベースの作成に用いた各種日射量推定モデル等の検証・改良を行う。</p>	<p>従来の日射量データベースの作成に用いた日射量推定モデルについて検証したところ、日照時間から日射量を推定するモデル（日照-日射モデル）の精度を向上させることが重要であることがわかった。日照-日射モデルの推定式に用いるパラメータの変更等により、推定精度を大きく改善することができた。</p>	○

<p>日本気象協会</p> <p>⑤ 日射スペクトルデータベースの更新と全国整備</p>	<p>NEDO のホームページで公開した日射スペクトルデータベースについて、ユーザーへのヒアリング等を実施し、2013 年以降の観測データを収録した日射スペクトルデータベースを整備する。また、実測データを基に日射スペクトル推定モデルの改良を行う。</p>	<p>観測データを用いて水平面の全天日射から日射スペクトルを推定するモデルの開発を行った。</p> <p>研究成果を研究論文として日本太陽エネルギー学会誌に投稿し、2017 年 3 月号に掲載された。また、2015 年 12 月までの観測データを、日射スペクトルデータベース (VER-3) として整備した。</p>	<p>○</p>
<p>佐賀大学</p> <p>① 屋外曝露メガソーラーで利用可能な高速測定システムの開発</p>	<p>屋外曝露メガソーラーにおいて利用可能なリアルタイム発電量、日射量データの高速測定システムを試作し、様々な方式による性能比較を行い、最も性能の高い方式を提案すること、測定間隔 1 秒を中間目標とする。高速測定システムの実用化の観点から、最適な測定時間間隔を決定する。</p>	<p>・屋外曝露メガソーラーの 10 kW システムにおいてアレイ毎に発電量 (電流、電圧)、温度、日射量、風速、風向の高速測定システムを構築した。平成 28 年 3 月から本格的なデータ取得を開始した。測定間隔は 10 ミリ秒であり、中間目標である測定間隔 1 秒以内を大幅に上回る成果を得た。</p> <p>・高速測定システムの測定データを 1 年以上にわたって蓄積した。</p> <p>・自力開発している解析ソフトウェアが、高速測定システムの測定データに対応できるように拡張した。</p> <p>・高速測定システムの測定データを解析し、晴天日では最適な測定時間間隔は 20 ミリ秒であることを明らかにした。</p>	<p>◎</p>

<p>佐賀大学</p> <p>② 発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアの開発</p>	<p>発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアを試作し、様々な数理工学的手法による補完アルゴリズムの性能比較を行い、試験データに対する補完誤差が 10%を中間目標とする。</p>	<p>・発電量、日射量の可視化ソフトウェアを自力で開発した。それに多項式補間法のプログラムを実装した。それを太陽光発電量のような変動の激しいデータの補完に適用し、変動の少ない滑らかなデータの補完に比べて補完誤差が大きくなることを確認した。</p> <p>・離散フーリエ変換を用いた周波数領域における補完アルゴリズムを考案し、ソフトウェアに実装した。試験データに対する補完誤差は 14.0%となった。</p> <p>・日射量測定値を用いた改良補完アルゴリズムで、試験データに対する補完誤差 12.6%を達成した。晴天日では、9.06%を達成した。</p> <p>・ウェーブレットを用いた補完法を試作し、補完誤差 17.8%の結果を得た。</p> <p>・日射量測定値を用いた改良補間アルゴリズムで、晴天日では、補間誤差 9.06%となり、中間目標である誤差 10%以内を達成した。</p>	<p>○</p>
<p>佐賀大学</p> <p>③ 発電量、日射量データの解析ソフトウェアの開発</p>	<p>発電量、日射量データの解析ソフトウェアを作成し、試験データ・推定データ間の誤差が 20%を中間目標とする。</p>	<p>・屋外曝露メガソーラー発電所の大規模測定データへのアクセス、可視化、解析するソフトウェアを自力開発した。</p> <p>・このソフトウェアを用いてストリング発電量の偏差値推移を計算することで、出力低下を検出するアルゴリズムを開発した。</p> <p>・太陽電池セルの温度を高精度に推定する手法を見出し、その成果が IEEE Journal of Photovoltaics(2016 年 9 月)に掲載された。</p> <p>・解析ソフトウェアに、メガソーラー内のストリング発電量の空間的依存性を可視化するためのマップ表示機能を追加した。</p> <p>・晴天日に対し発電量を推定する方法を開発した。この誤差が 0.194%となったため、中間目標である誤差 20%以内を大幅に上回る成果を得た。</p>	<p>◎</p>

* 1 達成度 ◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×：未達

【D ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術の開発】

(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	備考
①ZEB 適用を想定した長期信頼性試験の開発	過剰あるいは繰り返し発生するサイクル負荷が及ぼす影響を明らかにし、設置形態における環境負荷を考慮した長期信頼性試験を開発する。	新規に開発した温度サイクルに関する加速負荷試験（ATC試験）によって半田接続部の剥がれやタブ配線断線といった長期信頼性上リスクのある劣化モードも加速され、試験時間として8分の1以下に短縮可能である事を見出した。	○	
②建材寿命を考慮した長期耐久性、長期発電性能評価技術の開発	ZEB適用型太陽電池モジュールの30年間以上わたる発電量を推定する評価方法を確立する。評価に要する期間は100日以内とする。	30年から40年に至る機能劣化因子の屋外での劣化加速係数と、①で開発される長期信頼性試験による劣化加速係数の妥当性検証を進めている。屋外曝露試験後に続いてのATC試験と、初期負荷試験（UV照射）に続いての個別負荷試験との、シーケンス試験にて寿命評価を進めた。	○	
③低コスト高信頼性太陽電池モジュールの耐久性評価	ZEB適用型太陽電池モジュールとして、発電コスト7円/kWhを達成するためのコスト目標と課題を明確化する。	ATC試験における熱応力解析から、ガラス封止構造や建材で用いられている合わせガラス構造を有するZEB適用型太陽電池モジュールが、セル間接続線の断線不良モードに対して優位であることが推定された。各種信頼性試験にて、耐久性評価を実施中。	○	
④標準化活動への反映	ZEB適用型太陽電池モジュールの耐久性を評価する試験方法と基準を、BIPV国際標準化委員会に提案する。	BIPV国際標準化委員会にて、建築サイズの大面積モジュールを対象にリテストガイドラインに関する提案を行った。「代表サンプル試験」によって実試験体を代用できる試験体仕様と試験方法について提案を行った。	○	

* 1 達成度 ◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×：未達

【E レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発】
 (日清紡メカトロニクス株式会社、奈良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	備考
日清紡メカトロニクス株式会社 ①発電劣化メカニズムの解明	①経年発電劣化メカニズムの解明 ②PID発生メカニズムの解明 ③再現性良好なPID試験条件の決定	AIST所蔵経年劣化モジュールの破壊分析より、発電劣化は、銀フィンガー電極の「細線薄肉化」が集電抵抗増加に繋がり、性能が低下する現象。その電極は、電氣的にガラスからNaイオンを引き寄せ、自己腐食する。Naイオンは、アルカリ性下、EVA封止材の劣化を促進し、ガラスからセルへのNaイオンの移動を容易とし、その副産物として、「黄変」や「デラミ」が発生する。	○	
日清紡メカトロニクス株式会社 ②設置される環境を考慮したラボ加速試験方法の開発	環境因子に応じた劣化加速係数の算出	ガラスからセルへのNaイオン移動の量と速度が実発電劣化率と相関する。つまり、電圧を加えた状態で、温度と湿度を加える試験：PID試験法は、実フィールド環境の加速試験である。この試験では、「漏れ電流」を計測、報告すること、試験体に加えるアルミ箔電極への圧力均一化のため、パネルは水平設置で、再現性良好な試験結果が得られる試験法を開発した。	○	
日清紡メカトロニクス株式会社 ③30年発電性能の寿命予測技術の確立	①レーザー技術による太陽電池モジュールの寿命を予測する技術を提案 ②30年寿命ラボ加速試験条件で、発電劣化率5%未満を達成	封止材の劣化度指標：ラマン分光/蛍光強度比值と発電劣化率（結晶系/約300パネル）の関係を検討した結果、蛍光強度比130を超えてから、発電劣化率と相関した。現場発電プラントにて、蛍光強度比值とIV計測器で測定したPmaxの関係から、設置場所での寿命予測検量線が得られる。グラフより、ラマン計測結果のみで発電劣化率を推測できる。また、稼働年数との関係のグラフから、20年、30年経過後の発電劣化率を推定可能な技術を開発した。	○	
奈良先端科学技術大学院大学 ④標準化を目指した寿命予測試験法の検討と劣化メカニズムのモデル化	・P型、N型、PERC型Si太陽電池におけるモジュール劣化メカニズムモデルを構築 ・発電素子の寿命評価技術を確立	P型及びN型Si太陽電池モジュールのPID試験後の劣化箇所・劣化度の評価をEL、TAS、 μ -PCD法等で実施した。P型Si太陽電池において、PID試験後、劣化メカニズムから推測されたEL非発光部でのキャリア寿命値減少をTAS法、 μ -PCD法にて検知した。N型Si太陽電池においても、PID試験後、 μ -PCD法にてセルの実効的キャリア寿命値低下検知に成功した。 μ -PCD法は、PID現象を発現したセルの検知技術として期待できる。	○	

奈良先端科学技術大学院大学 ⑤寿命予測技術の標準化に向けた規格提案	・信頼性・寿命予測技術の開発し、評価試験法の特徴をテーマ全体で明らかにする。	産総研鳥栖での屋外曝露モジュールのμ-PCD法による「その場測定」を実施。本手法のメリット・デメリットの抽出を検討中。素子の経年劣化、周辺部材の経年劣化、PID現象に区分けし、劣化メカニズム、寿命予測技術の特徴を検討中。	○	
--------------------------------------	--	--	---	--

* 1 達成度 ◎：大きく上回って達成、○：達成、△：達成見込み、×：未達

A 太陽電池性能高度評価技術の開発（産業技術総合研究所、電気安全環境研究所、岐阜大学、宮崎大学、東京理科大学、立命館大学）

1. 成果詳細

I) 新型太陽電池高精度性能評価技術

① 各種新型太陽電池性能評価技術の開発

・NEDO 開発品等新型太陽電池約 70 サンプル（結晶シリコンペアセル、ペロブスカイト、新型 CIGS 系等）の高精度評価を実施し、各デバイスに最適な評価技術を開発・検証した。主にペロブスカイト太陽電池の性能評価条件の多数サンプルによる検証と CIGS 太陽電池高精度測定のためのヒステリシス効果の影響の検討等を実施した。以下にその概要を述べる。ペロブスカイト太陽電池はその変換効率の向上が急速に進んで注目を集めており、性能を高精度に評価するための技術を開発することが喫緊の課題である。本研究で得た以下の高精度測定手順の指針について、複数機関からの様々な構造のサンプル（民間、大学、国研）を用いて検証した。安定なサンプルについては $\pm 0.5\%$ (σ) 以内の測定再現性を確認した。

A. 広い範囲の掃引時間で IV 特性を測定（両方向）し、ヒステリシスの概要を把握。

B. 掃引方向の差が顕著な場合は電圧を固定して安定な P_{max} を検証。

検証結果の例を図 III-2-(ホ)-A-1-①-1 (a)~(c) に示す。ヒステリシスが顕著なペロブスカイト太陽電池においても、上記 A. B. の手順を用いることによって、その効果を $\pm 1\%$ 以内に抑えて正確に IV 特性と P_{max} を測定でき、上記の手順がペロブスカイト太陽電池の性能評価に広く適用可能であることを確認できた。今後は更にヒステリシスが顕著な可能性のあるモジュール構造での検証等が必要である。

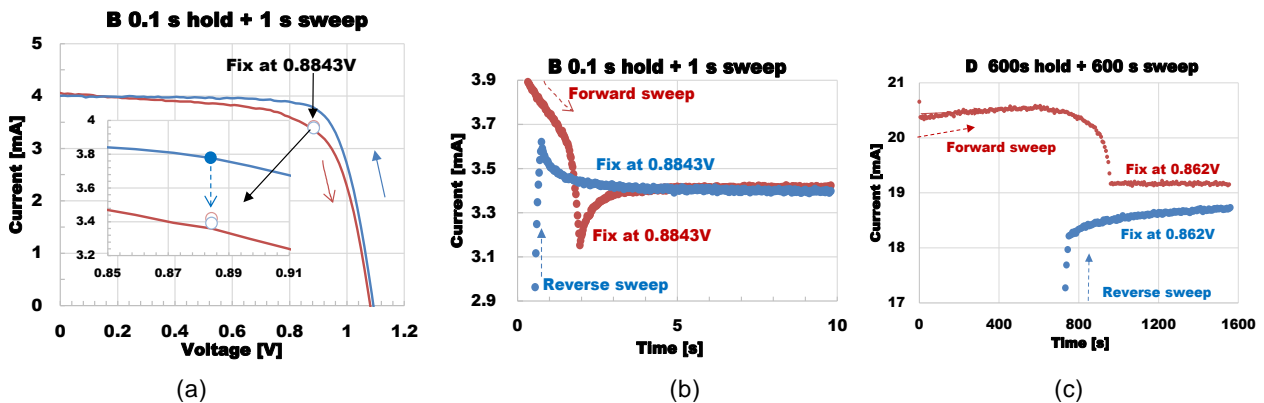
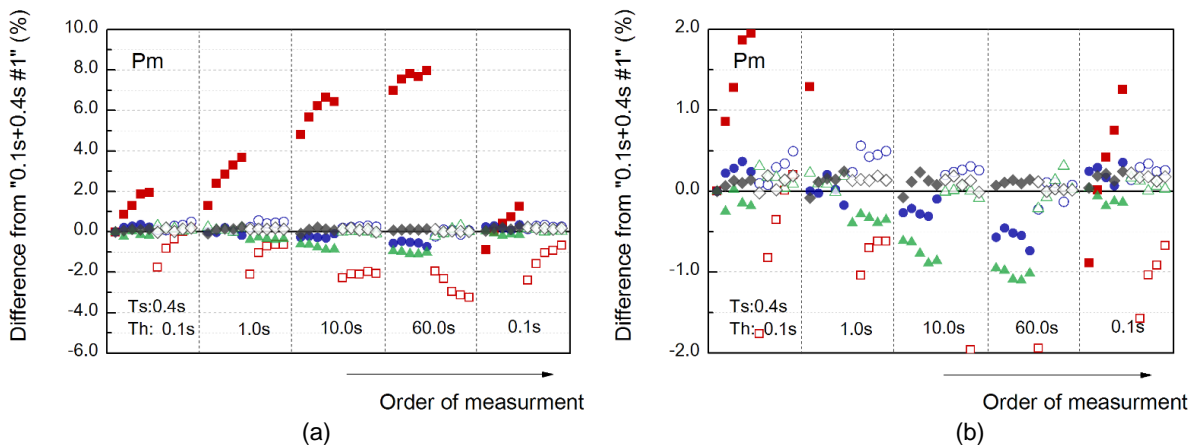


図 III-2-(ホ)-A-1-①-1 (a) (b) ペロブスカイト太陽電池の IV 特性及び P_{max} を本文記載の手順 A. B. で測定した結果の一例。(c) ヒステリシスの特に顕著なサンプルにおける測定結果の一例。

CIGS 太陽電池についても、従来から知られている数時間～数十時間程度以上にわたる光照射効果に加えて、1 秒以内～数十秒程度の中に 1% ～ $数\%$ のヒステリシスの効果が存在することが本研究で明らかにすることができた（図 III-2-(ホ)-A-1-①-2）。この効果は色素増感太陽電池 DSC やペロブスカイト太陽電池に比べると遥かに小さいが、高効率化が進むデバイスの高精度な評価手法を確立するためには無視できず、その影響を定量的に把握する必要がある。複数の機関が作製した各種 CIGS 太陽電池について検討したところ、多くのサンプルでは従来知られているような光照射効果は顕著でなかった。しかし詳細に観察すると掃引方向による P_{max} の差が見られた。これは通常の光照射効果とは異なり、バイアス状態の履歴が影響する現象（つまりヒステリシス）と思われる。 P_{max} を正確に評価するためには、この効果を考慮して IV 測定条件を選択する必要があることが明らかになった。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-1-①-2 (a)各種CIGS太陽電池のIV特性測定時間と測定回数が P_{max} 測定結果に及ぼす影響。図中の各記号の色が各サンプルに対応し、塗りつぶしは順方向、白抜きは逆方向の掃引を示す。(b)は(a)の縦軸を拡大したもの。

ペロブスカイト、CIGS、結晶シリコン両面受光太陽電池について、民間試験所で実施可能な手順を指定して高精度化技術を検証した結果、ほぼ1%以内の範囲で同じ結果が得られた。CIGSについては光照射効果や上記のヒステリシスに起因すると思われる測定結果のばらつきが見られた。また両面受光太陽電池では裏面からの光入射効果に起因すると思われる測定結果の差が見られたが、いずれもほぼ2%以内の一致度であった。これらは世界に先駆けた初の成果であり、今後IEC等の標準化等を検討していく。今後はこれらの効果を明確化して測定手順に反映させることが必要と思われる。モジュールの高出力化に対応したIV特性測定装置を導入して、400W以上のモジュールの性能評価を可能とした。また小面積太陽電池の実効面積を明確化するためにLBICを用いた面積測定装置による検証を可能とした。更に国際的な整合・普及を図るためにNREL、ISE等との太陽電池測定に関する国際比較測定を複数件継続実施中である。

上述のように新型太陽電池では、測定条件・バイアス履歴・光照射効果などに起因すると考えられるヒステリシスがIV特性に見られる。そのようなヒステリシスの起源の詳細は依然未解明のままである。そこで、ペロブスカイト太陽電池の性能評価に重要な電圧変化に対する応答速度と照度変化に対する応答速度を検討した。IV測定での電圧変化に対する応答では数秒～数分に亘るヒステリシスが観測されているが、入射光の照度変化に対する応答は1ミリ秒程度以内と、非常に速いことを確認した。今後はこの効果を考慮した高精度測定の手順が重要である。

②一次基準太陽電池校正技術の高度化

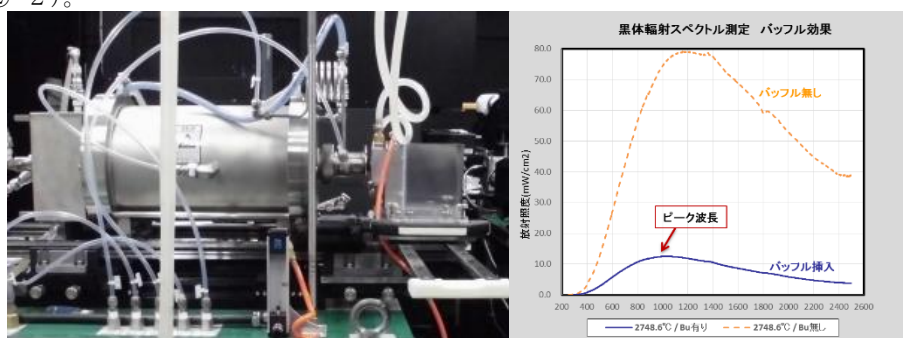
基準太陽電池の校正値の不確かさは、各種太陽電池評価技術の妥当性の根拠として、また、トレーサビリティを通じて製品の銘板値やPVモジュール日射センサ(PVMS)を用いたO&Mの信頼性を担保する重要なパラメータである。つまり、不確かさの抑制は、基準太陽電池の校正値や太陽電池の測定値の信頼性を向上することである。近年、主要研究機関において開発競争が行われている。日本法であるソーラシミュレータ法において支配的な不確かさ要因は、基準太陽光とソーラシミュレータの間のスペクトルミスマッチ補正係数の不確かさであり、その内訳は、分光放射照度標準電球の校正の不確かさと光強度に対する分光放射計の応答非直線性が主である(図Ⅲ-2-(ホ)-A-1-②-1)。本研究では前者を改善する手段として分光放射照度標準電球の上位標準である超高温定点黒体炉の使用、後者を改善する手段として6分岐ファイバ型分光放射計を用いた基準太陽電池校正の高度化技術を開発している。具体的には超高温定点黒体炉運転条件の最適化や基準光源として利用するための具体的な光学系の設計及びその測定、光強度に対する分光放射計の応答非直線性を高精度に評価するための技術開発を行い、一次基準セルの不確かさの抑制と、その推定精度の向上を図っている。現在までの研究開発により、拡張不確かさ(U95)は0.6%台(従来は0.72%)に改善可能な目処を得た。校正値の不確かさ推定の妥当性についてはWorld PV Scale(WPVS)をホスト機関として主催して検証し、国際的なプレゼンスを更に高める。根幹ラボであるNREL及びJRC-ESTIと個別に比較校正を行い、パフォーマンス統計を定量的に評価して、最高校正能力が満足なレベルにあることを予備的に検証した。



図Ⅲ-2-(ホ)-A-1-②-1 基準太陽電池の一次校正における不確かさ要因と技術課題。拡張不確かさ(U95)0.65%はこれらの項目すべての不確かさ要因の二乗和の平方根を2倍したものである。

基準太陽電池の一次校正の不確かさ要因として支配的なスペクトルミスマッチ補正係数の不確かさの主要素の一つである絶対分光放射計の対光応答非直線性の評価に関して、基準太陽光近似の白色光の重畳法を原理とする高均一でスペクトル変化の無い対光直線性校正装置を実現し、その性能を評価した後に6分岐ファイバ型絶対分光放射計でその分光放射照度を測定した。解析の結果、6分岐絶対分光放射計の対光直線性は太陽電池の感度波長帯域において、 $0.1 \text{ kW/m}^2 \sim 1.2 \text{ kW/m}^2$ の照度範囲で十分に高いことが実証された。この結果から、応答非直線性に関わる不確かさ要因が従来の5分岐ファイバ型放射計よりも大幅に低減され、超高温定点黒体炉の基準光源化技術との組み合わせにより、最能測定能力(校正の不確かさ)が従来の0.72%($k=2$)から0.6%オーダー($k=2$)に向上可能な見通しを得た。更に、積分球とLED光源を組み合わせた単色光の重畳法によるディテクタリニアリティ評価装置を改良し、絶対分光放射計を構成する6台の分光器と組み合わせている各種ディテクタ単体での対光非直線応答を高精度に検証した。また、平成27年度に生成した高分解能基準太陽光スペクトルのシミュレーション技術を利用し、基準太陽電池の一次校正の不確かさ要因におけるスペクトルミスマッチ補正係数の不確かさを推定する際の基本データとなる、基準太陽電池の分光感度特性とソーラシミュレータの分光放射照度を測定する分光器のスリット幅と波長送りの影響度の定量化を行った。

超高温定点黒体炉については、挿入バップルユニットの内部光学系の光学シミュレーション・設計・製作を行った。挿入バップルユニット内部の反射を抑制するため、内径11mmで処理可能な低反射被膜塗装技術を調査した結果、波長範囲300nm~2600nm間で3%未満の反射率を実現する黒酸化クロム被膜処理(レイデント®処理)が可能であることが判り、採用した。これらの組み合わせにより、挿入バップルユニットを炉内に挿入して測定した輻射のピーク波長がプランクの式から求められる理論計算の結果とほぼ一致することを確認した(図Ⅲ-2-(ホ)-A-1-②-2)。



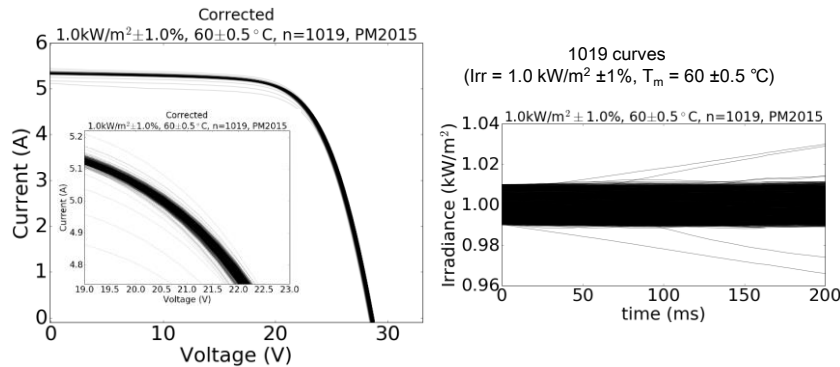
図Ⅲ-2-(ホ)-A-1-②-2 (左) バップルユニットを黒体炉内に挿入。(右) 挿入バップルユニットの効果。

II) 屋外性能高度評価技術の開発(屋外高精度評価技術の開発)

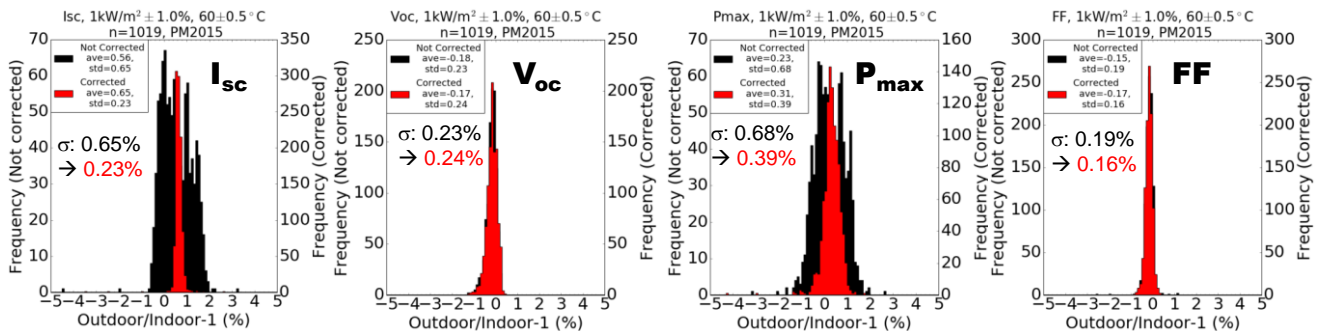
PVの進展によって、屋外の実稼動条件での太陽電池性能を正確に評価する技術へのニーズが益々高まっている。PVモジュール日射センサ(PVMS: PV Module Irradiance Sensor)と高速IV測定等の技術を用いた太陽電池屋外性能評価の精度を複数メーカーの結晶シリコン太陽電池モジュールを用いて検証し、従来は測定精度、測定機会共に不十分であった屋外測定で、再現性良く高精度な性能評価が可能であることが確認できた。更に高精度化するための知見を得て、中間目標を達成した。主な内容は以下のとおりである。

①屋外性能評価技術の高精度化

0.2 秒程度の高速 IV 特性測定、PVMS による日射計測、高精度モジュール温度測定等の技術を用いることにより、屋外でPVモジュールが実際に移動する日射変動日を含めた幅広い日射強度・温度範囲で、高精度な屋外性能評価が基本的に可能であることを世界に先駆けて明らかにした。更にその成果を基に、晴天日だけでなく晴時々曇、曇時々晴等、日本の天候で頻りに現れる各種気象条件において、太陽電池モジュールの高精度測定を実施し、測定精度を検証した。測定結果の一例を図Ⅲ-2-(ホ)-2-①-1に示す。約6ヶ月間に亘る約200万以上のIV測定データから、照度が $1.0 \pm 0.01 \text{ kW/m}^2$ 、モジュール温度が $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲にある約1,000のIV特性を全て示したものである。これらのIV特性の P_{max} の標準偏差は0.39%、屋内高精度測定との平均差は0.31%と、非常に良い再現性と精度が得られた。 P_{max} 以外のパラメータ(短絡電流 I_{sc} 、開放電圧 V_{oc} 、曲線因子FF)についても同等以上の再現性が得られた(図Ⅲ-2-(ホ)-2-①-2)。これらの結果により、本研究の測定手法、すなわち0.2秒程度の高速IV測定、PVMSによる日射計測、高精度モジュール温度測定により、1%以内の屋外性能測定再現性が基本的に実現可能であることが検証できた。



図Ⅲ-2-(ホ)-2-①-1 (左図) 本研究で測定した市販多結晶シリコン太陽電池モジュールのIV特性の一例。測定期間2016年3月～8月(約6ヶ月間)、総IV特性数約200万のうち、PVMS測定照度が $1.0 \pm 0.01 \text{ kW/m}^2$ 、モジュール裏面の中心温度が $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ の範囲にある約1,000のIV特性を全てプロットしたもの。(右図)左図のIV特性測定中の照度変動。



図Ⅲ-2-(ホ)-2-①-2 図Ⅲ-2-(ホ)-2-①-1の屋外IV特性の屋外高精度測定結果との比較。黒色は照度補正前の生データ、赤色は照度補正後の値である。

上図のように従来の快晴日(地域により年間約7~59日)だけでなく日射変動日(同160~250日)にも再現性1%以内の高精度な測定が可能であり、高精度化(従来通常は3~10%程度)と共に測定機会の大幅増を達成した。更に様々な太陽電池モジュールと条件下での精度検証と測定条件の確認を実施した。その結果PVMSと同一のセル・部材を使用したモジュールでは上図より更に高精度な結果が確認できた。一方でより高効率タイプの単結晶シリコンモジュールでは、屋内測定との相対差が-1.5%~+1%程度と、やや大きな誤差が観測された。これらの結果は、本研究の屋外測定技術によって太陽電池モジュールの種類や季節に関わらず高精度な屋外測定が可能であることを示すとともに、残る小さな誤差にはPVMSとMUTの照度差に加えて、モジュールの構造(カバーガラスやセルの表面処理、線形性、分光感度、熱的特性等)が関係していることを示唆するものである。PVMSとMUTの照度差に関しては、時間変動と空間変動の関係を解析し、その結果を利用して現実的に照度差の少ない条件での測定結果の選択、補正する方向で検討を進めている。この傾向は複数モジュールやシステム性能測定では顕著になることが予想される。現在更に多くのモジュール、条件における検証と高精度化をプロジェクト参画機関と共同して実施中である。

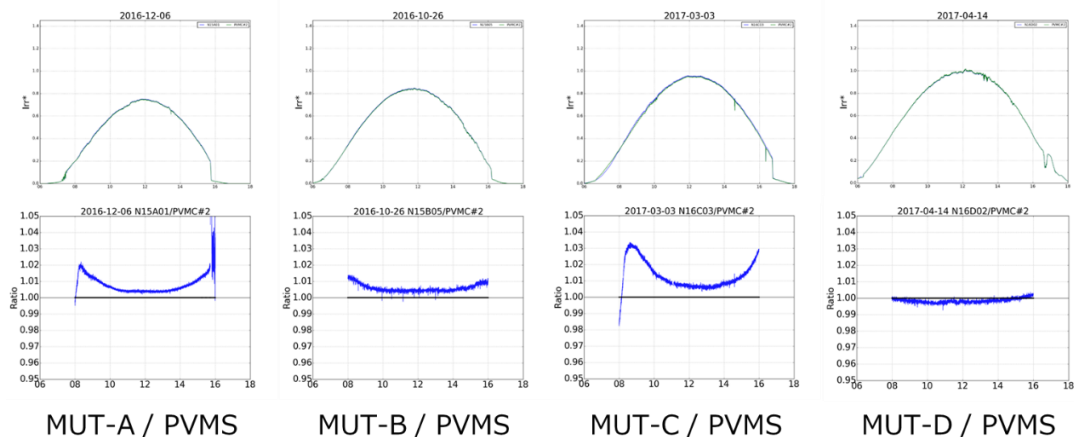
②屋外高精度性能評価用PVモジュール日射センサ構造検証

上述のようにPVMSを用いて高精度な屋外測定が可能であることが明らかになった。更にその実用化・普及のために重要な、高精度な測定のために必要なPVMSの構造について、ダミーセルのサイズやアルミフレームまでの余白の影響について評価を行い、構造の光電流の関係について以下の点を明らかにした。

- ・屋内試験の結果：斜め入射光の場合は、余剰開口部が僅かに増えるだけで、PVMSの電流が大幅に増加する。
- ・屋外実験の結果：フルマスク条件(センサセルのみ取得電流に寄与)の場合、朝夕の入射角が大きいと誤差が

生じた。これらの結果を基に様々な構造の PVMS を試作・評価した結果、いずれの PVMS 構造を採用しても、構造による相対光電流の違いは数%以内と従来の日射計に比べて小さいことが明らかになった。特に 10 時～14 時の間であれば、±1%の差に入り、屋外高精度測定に好適であることも確認できた。

PVMS の以上のような基本的な特性の知見を基に、測定精度に直影響する PVMS と被測定モジュール (MUT: Module Under Test) との光電流の比較を実施した。図Ⅲ-2-(ホ)-2-①-1 は、4 種の MUT の PVMS に対する、快晴日の屋外における光電流の相対感度を示したものである。ここに示した MUT はいずれも 2015 年～2016 年に市販されていた最近の型式である。この結果から、最近の一部のモジュール (MUT-A, MUT-C 等) は、斜め入射光に対する光感度や光閉じ込め効果が大きいものがあり、特に MUT-C においては、入射角の小さい南中前後でも 1%弱の、入射角の大きい朝夕では 3%程度の利得増があることが明らかになった。特殊な無反射コート等を用いた MUT を屋外測定する際に、どのような PVMS を用意するかは、今後の検討課題である。モジュールそのものの光学特性に加えて、PVMS 同士や MUT～PVMS 間の相対感度において、朝に高く夕方に低く出る S 字形状や、朝夕が高く出る U 字形状が見られるが、これについては、設置角の 0.2～0.3° 程度のわずかな差異 (平板の法線ベクトルのズレ) の影響も無視できないことが、シミュレーションと実験によって明らかになった。



図Ⅲ-2-(ホ)-2-①-1 各種 MUT との比較 (上: 換算日射、下: PVMS #2 に対する相対感度)。

③ 太陽電池温度の高精度測定技術開発

太陽電池モジュールの変換効率は温度に強く影響を受ける (約-0.4%/°C)。そのため、太陽電池モジュール出力の高精度評価のためには、温度を高精度で測定することが必須となる。従来技術では以下の点を考慮した屋外太陽電池温度測定の手法と精度が明確になっておらず、屋外高精度化の上で大きな課題であった。

- (1) 実環境下においては常に有風状態であり太陽電池モジュール面内に温度分布が生じる。
- (2) 屋外におけるモジュール内部のセル温度を高精度に計測 (推定) する必要がある。(室内計測では恒温槽を用いて温度特性を評価するため、モジュールバックシートとセル温度はほぼ等しいが、屋外では異なる)

(1) 有風時における太陽電池モジュール面内温度分布の評価・解析

本研究では、宮崎大学が有する風洞実験施設において、バイアス印加により加熱した単結晶シリコン太陽電池モジュールに風を当て、風向・風速を変えることで様々な風況におけるモジュール面内温度分布を調査した。各セルの裏側中心に熱電対をカプトンテープで貼り付け、温度を合計 36 カ所計測しモジュール内の温度分布を評価した。モジュール真横から風を当てた場合のモジュール裏面温度測定結果を図Ⅲ-2-(ホ)-2-③-1 (a) に示す。左側が風上、風速は 4 m/s である。風上である左側の温度は低く、風上である右側の温度が高い。しかしながら、最も左側において温度が高くなっている部分がある。このような、有風時におけるモジュール内の温度分布を詳細に解析するため、COMSOL Multiphysics を用いた熱流束シミュレーションを行った。実験と同様の条件において計算した結果を図Ⅲ-2-(ホ)-2-③-1 (b) に示す。計算結果は実験結果と同様の傾向を示し、風上において温度が低く、風上において温度が高い。この計算では、各部分での風の流れも示すことができ、図の左から照射された風はいったんモジュールから離れ (剥離)、再度モジュールの中央より少し左の部分に当たる (再付着) ことが示された。具体的にはまず、最もモジュールの左部分のフレーム部が風により直接冷却され温度が低くなる、その後風は剥離するため、風上にもかかわらず温度の高い部分が生じる。さらにその右側に風が再付着し温度が低くなり、その後、右に行くに従い風下であるために温度が高くなる。このように、シミュレーションにより、屋外で太陽電池モジュールの温度を計測する際のモジュール面内温度分布を解析することが可能となった。

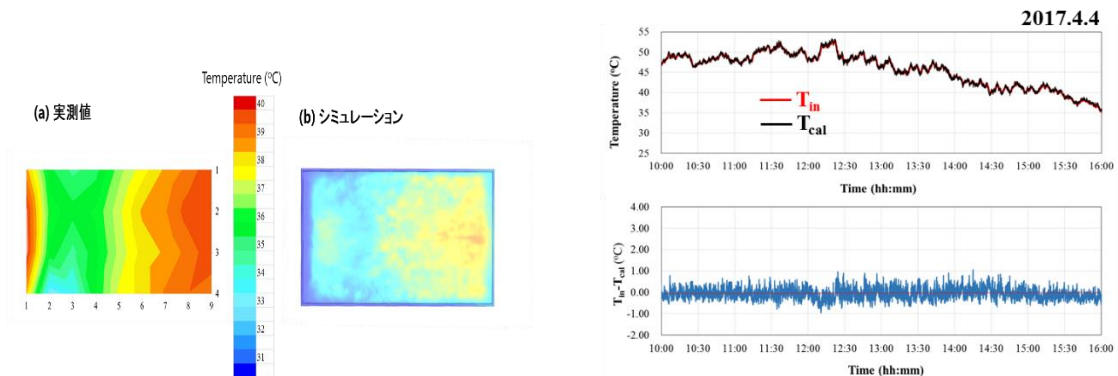
(2) 太陽電池モジュール内セル温度の低コスト高精度測定技術

これまでに用いられている太陽電池モジュールの温度測定手法としては下記が挙げられる。

- ・開放電圧 V_{oc} から温度を予測する手法 (IEC 60904-5:1993) : V_{oc} の温度特性が明らかであれば、 V_{oc} を計測することにより太陽電池セルの温度を導出することができる。しかし、あらかじめ屋内測定で各日射量、温度での V_{oc} の値付けが必要であり、長時間を要し高コストであり汎用性が低い。システムへの応用を考慮した場合、動作時には V_{oc} は計測できず、また、長期屋外評価の場合 V_{oc} が劣化すると正確な温度が導出できない。

・バックシートに温度センサを設置して温度計測する手法(IEC 60891:2009)：最も一般的に用いられている手法であるが、モジュール構造内の太陽電池セルに対して、モジュール外部の温度を計測しているため、どうしても 1°C 以上 Under estimate してしまう。

そこで上記の課題を解決し、低コスト高精度で太陽電池温度を計測するために以下の研究を実施した。まずモジュール構造内のセルに温度センサ(熱電対)が直接接触するように内挿し、屋外評価においてセルの温度を直接計測した。また、比較のため、モジュールバックシート上に温度センサをテープにより貼り付けた。結果として温度センサを内挿したモジュールを作製することによりセル温度を正確に計測することができることを確認できた。しかしこのような特注モジュールの作製にはコストがかかり、汎用性が低い。そこで、簡便に得られるアルミテープ及びカプトンテープで熱電対温度センサを貼り付けた裏面温度 (T_{Al} 及び T_{Kapton}) から、セル温度 T_{in} を正確に予測する手法を考案した。センサとセルの間にある層は EVA とバックシートであり、これらの層の厚さと熱伝導率がわかれば、熱流束式を解くことにより、 T_{Al} を用いて T_{in} を導出することができる。 図 III-2-(ホ)-2-③-2 に 2017 年 4 月 4 日における実測の T_{in} および、 T_{Al} と EVA およびバックシートの物性値のみを用いた計算により導出したセル温度 (T_{cal}) を示す。実測値と計算値は精度よく一致し、 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内の精度を達成した。以上のように簡便に得られるバックシート上の温度からモジュール構造内のセル温度を精度よく予測することに成功した。モジュール全体としての出力特性、さらにはシステムの出力特性を評価する場合、さらに面内における温度分布を考慮した温度の計測が必要となるため、これまでの知見をもとに更に研究を進める。



(左) 図 III-2-(ホ)-2-③-1 有風時における太陽電池モジュール面内温度分布の(a)実測値および(b)計算値。

(右) 図 III-2-(ホ)-2-③-2 実測セル温度 T_{in} および熱流束計算により導出したセル温度 T_{cal} 。

④ 日射変動解析技術の開発

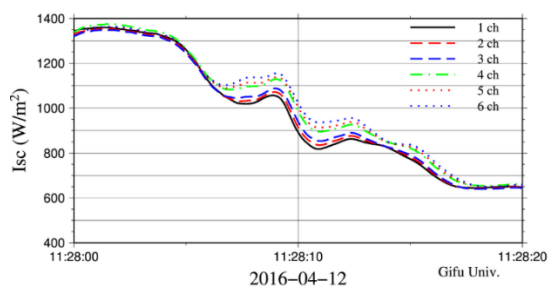
日射変動日には雲による日射の時間変動・空間変動が存在し、高精度化のためにはこれらの考慮が本質的である。従来は太陽電池モジュールサイズ(1m オーダー)での日射変動は考慮されていなかったが、本研究では屋外高精度 IV 計測での $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内の測定精度を保証しうる気象条件を定量化することが目的であり、そのような高精度測定では小さな日射変動も重要になると思われる。そのために影響を及ぼす、雲による太陽光の透過や散乱による日射変動を検証した。更に屋外日射観測結果から、日射強度変動と上空大気特性との物理関係を検討した。岐阜大学に設置された PVMS (図 III-2-(ホ)-2-④-1) と上空カメラを用いて日射強度の観測を行った。100 Hz の高速計測により、上空の雲移動に伴う地表面の雲の影の移動を捉えることができる。上空カメラを用いて雲の分布や移動、天気の変化を把握した。



図 III-2-(ホ)-2-④-1 PVMS の設置状況。東西、南北方向にそれぞれ 6 つの PVMS を 1.145 m 間隔で配置。

(1) 日射変動の観測結果

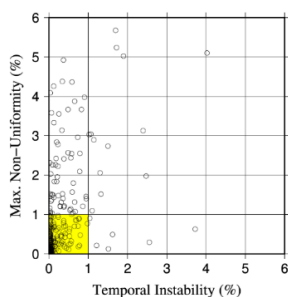
日射変動の時間変動が顕著であった日の日射変動 (20 秒間) を図 III-2-(ホ)-2-④-2 に示す。日射強度が大きく変動しながら 20 秒間で半減している。またこの変動は Ch. 6 (東端) PVMS の時間変動に追従するように各チャンネルの PVMS の計測値が変化している。この時間遅れから、北北西に 12.1 m/s の速度で雲の影が移動していることが推定できた。また、同一時刻における各 PVMS の日射強度の差は、日射の空間ムラに対応している。この時は最大 1.8 \%/m の空間ムラが検出され、単一モジュールの性能評価に影響を与えることが初めて実証された。



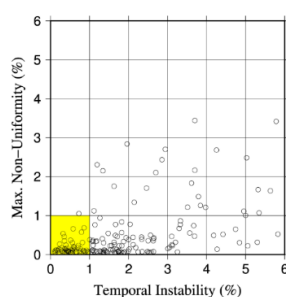
図Ⅲ-2-(ホ)-2-④-2 日射強度時間変動 (2016年4月12日, 11:28:00-11:28:20の20秒間)

(2) 日射の時間変動と空間ムラ

1つのPVMSによって計測時間中に得られる日射の時間変動と、2つのPVMS(間隔5.725m)の日射強度の差を示す空間ムラとの関係を図Ⅲ-2-(ホ)-2-④-3(a)に示す。計測時間は200msとした。日射の時間変動が顕著な日(2016年4月12日)を対象としたため、時間変動、空間ムラとも大きな値を示している。次にこの計測を5秒間隔で5回計測し、計測データを一括して解析した結果を図Ⅲ-2-(ホ)-2-④-3(b)に示す。(a)に見られる時間変動が少なくにもかかわらず空間ムラの大きいイベントが図(b)では削減され、時間変動が1%以内のイベントでは空間ムラも1%以内となっている(図中黄色の部分)。すなわち1つのPVMSで計測時間200msの計測を5回計測し、その時間変動が1%以内のイベントを抽出すれば、5.725mの距離で、空間ムラも1%以内を満足していることがわかる。このような単一のPVMSのみでも時間変動、空間ムラとも条件を満たすイベントを抽出できる手法が明らかになった。



(a) 一回計測



(b) 5回計測一括解析

図Ⅲ-2-(ホ)-2-④-3 日射の時間変動と空間ムラ (2016年4月12日, 計測時間200ms, PVMS間隔5.725m)

⑤ スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術開発

太陽電池はその発電層の材料あるいは構造によって分光感度が異なるため、太陽光スペクトルの形状によって太陽電池の出力電流が相対的に変化する。つまり、様々な種類の太陽電池の屋外性能を高速・高精度で測定するには、スペクトルの高速・高精度測定が必要となる。本研究では、スペクトルを考慮した屋外実性能評価技術を開発した。太陽光スペクトルを統計的な解析に適した次元の量に変換するために、平均フォトンエネルギー(Average Photon Energy: APE)を用いた。APEとは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である。本研究では、APEを用いたスペクトルミスマッチ補正技術を開発した。

本研究では、単結晶Si太陽電池モジュールをPVMSとして使用した。同じAPE値であれば太陽光スペクトル形状がほぼ一致することを確認した上で、各種モジュールのPVMSに対するスペクトルミスマッチファクター(MMF)のAPE依存性を明らかにした(図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑤-1)。結晶Si系太陽電池である多結晶Si、バックコンタクト型、HITのMMFのAPE依存性はAPE=1.85~1.96eVの範囲で0.995~1.005程度と小さかったが、分光感度の若干異なるCISでは0.995~1.020程度、大きく異なるCdTeでは0.985~1.065程度と比較的大きいことが明らかになった。

このMMFのAPE依存性を用いて、三種類の補正方法；

(1)温度補正と照度補正(日射計)、(2)温度補正と照度補正(PVMS)(3)温度補正と照度補正(PVMS)とMMF補正、の比較を行った。図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑤-2に晴天日および曇天日における多結晶SiのIscの一日の変化を示す。天気、太陽電池種にかかわらず、(1)の熱電式の日射計に比べて、(2)のPVMSを用いることで大きく精度が向上した。多結晶SiについてはPVMSと分光感度が近くMMFのAPE依存性が小さいために、(3)のMMF補正を加えても補正精度の確かな向上は見られなかった。ただし、今回の分光感度、スペクトルデータが波長350~1050nmの範囲で計算しているために、改善が得られなかった可能性がある。なおCdTeは曇天日のAPEが1.95V付近でありMMF補正の効果が大きく見られ、大きな補正精度の向上が見られた。

続いて、統計的にMMF補正の効果を検証するために、1年間の測定データから統計的な検討を行った結果からも、統計データの傾向は図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑤-2と同様であることが分かった。つまり、PVMSと分光感度の近い結晶Si系ではPVMSによる照度補正で同時にほぼスペクトルミスマッチも補正され、Isc測定誤差を4分の1以下に低減可能であることを統計的に示すことに成功した。一方でCdTeにおいてはMMF補正が効果的であり、中央値はMMF補正無し(2)の2.51%に対してMMF補正(3)によって-0.87%となりスペクトル補正によって誤差が2.9分の1に改善された。この値は中間目標である2分の1よりも優れた値であり中間目標値を達成した。

今後(研究の後半である中間評価後)は、各種PVモジュールの信頼性評価に重要なIsc経時変化の高精度把

握技術の開発、スペクトル測定波長範囲の拡大（300～1300nm）による MMF の高精度化を行うことで最終目標達成を目指す。また、日射変動時に短時間だが散乱光が主となることでスペクトルミスマッチが急変する場合があります、太陽電池の出力に大きな影響を与えることが明らかになり、この場合に対応することも必要である。さらに今後は、これまでの高価な分光放射計を用いた APE 測定に代わり、結晶 Si 系太陽電池・光学フィルタから成る APE センサを開発・利用して、高速・安価・高精度に APE を測定する技術を開発する。さらに本スペクトルミスマッチ補正技術の分光感度が異なる新型高性能 CIS や CdTe への対応、また新たに市場に登場する PV（ペロブスカイト、有機、多接合系）への展開を行う。

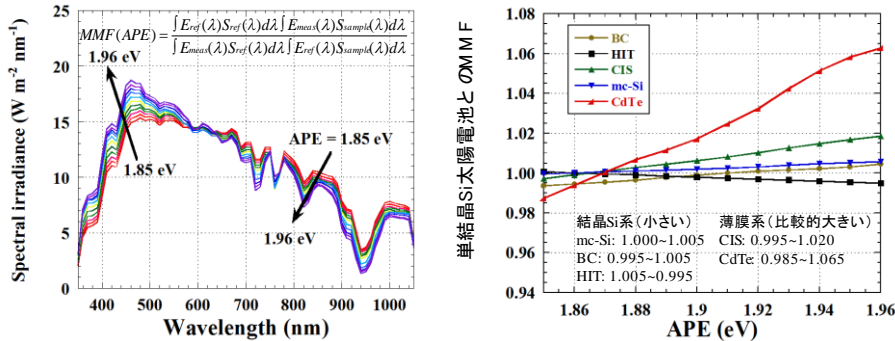


図 III-2-(ホ)-2-⑤-1

(左) 様々な日射スペクトル及び (右) 各種モジュールの PVMS に対する MMF の APE 依存性。

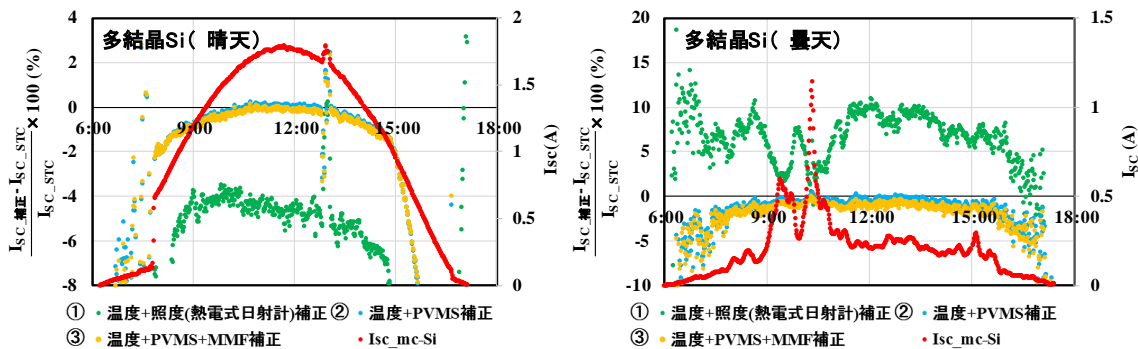


図 III-2-(ホ)-2-⑤-2 (左) 晴天日・(右) 曇天日における多結晶 Si の Isc 補正の一日の推移。

⑥ PV 日射計測によるシステム性能測定手法開発

(1) システム屋外性能高精度評価のための測定手法の開発

屋外における太陽電池モジュールやストリング、アレイの電流-電圧 (I-V) 特性の測定と発電性能の高精度評価に向け、PV モジュール日射センサ (PVMS) を照度センサとして用いる手法について、屋外システムにおける測定手法の検討を行った。図 III-2-(ホ)-2-⑥-1 には、PVMS を設置した状態の東京理科大学葛飾キャンパスに導入した屋外評価装置の外観を示す (PVMS は左上段)。

PVMS からの出力はセンサとして用いるセルの短絡電流として出力される。測定用抵抗の値が大きいと短絡電流ではなく少し出力電圧がある状態での測定となるため、できるだけ低い抵抗値のシャント抵抗を用いて、シャント抵抗両端の電圧を計測することとした。太陽電池モジュール温度は、代表モジュール中央部付近のセルの中央部裏面に熱電対を貼付ける方法で測定した。I-V 特性の計測には、いくつかの異なる測定方式・型番の I-V 特性測定装置を用い、測定装置間の差や測定方式の違いが測定結果に与える影響を確認した。結果、当初からの目的である高速測定に対しては、挿引時間の設定が可能な電子負荷が優れることが確認できた。また、短絡電流から最大出力動作点までの間の測定点が多い方が、ストリングの測定時にモジュール間の性能差や不具合を見つけやすいことが確認できた。コンデンサ負荷式を含むいくつかの測定装置では、この区間の測定点数が疎であるため、高精度な評価には測定点のサンプリング間隔などの調整が有効と考えられる。また、端子部から計測部までのケーブルの直列抵抗や計測部に存在する直列抵抗により、短絡電流まで挿引できない場合があることや、計測結果に違いが出ることも確認できた。また、I-V 特性測定の前後で日射 (PVMS からの出力) を計測することで挿引中の日射変動が確認できるため、より高精度な測定が可能となることを提案し、本提案手法は一部の計測機器に実装された。

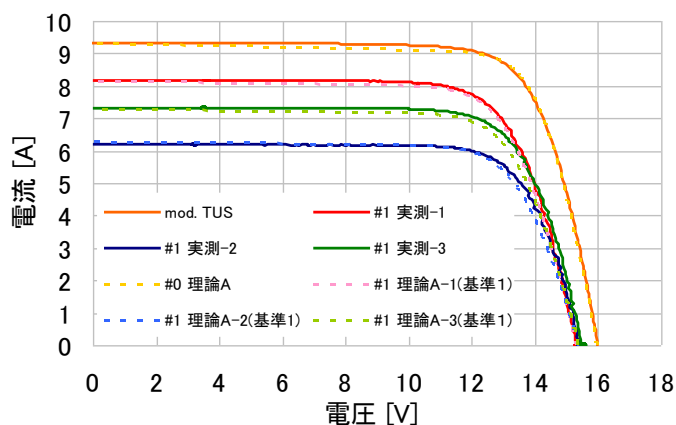
(2) PV モジュール日射センサを用いた PV システム測定データ解析手法の開発

PV システムの I-V 特性の解析手法の開発として、屋外における I-V 特性測定時に、PVMS を用いて測定した日射条件とモジュール裏面にて測定したモジュール温度を入力データとして、太陽電池アレイの構成要素となる各モジュールの同条件下での参照基準用 I-V 特性を算出する手法の開発を行った。開発は結晶シリコン系の太陽電池を対象とし、測定対象となる太陽電池モジュールのデータシート (銘板) に記載されている特性値 (開放電圧、

短絡電流，最大出力，最大出力動作電圧，最大出力動作電流)と短絡電流および開放電圧の温度係数を用いて、太陽電池の1ダイオードモデルにおける未知の5パラメータを算出する手法とする事で、多くの太陽電池に適用可能な手法とした。式(1)に1ダイオードモデルの基本式を示す。

$$I_{out} = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V_{out} + R_s I_{out}}{nV_{th}} \right) - 1 \right\} - \frac{V_{out} + R_s I_{out}}{R_{sh}} \quad (1)$$

ここで、出力電流： I_{out} ，出力電圧： V_{out} ，熱電圧： V_{th} ，光電流： I_{ph} ，逆方向飽和電流： I_0 ，直列抵抗： R_s ，並列抵抗： R_{sh} ，ダイオード係数： n である。未知の5パラメータとなる光電流、逆方向飽和電流、直列抵抗、並列抵抗、ダイオード係数については、理論式を順番に解く手法を用いた。参照基準用 I-V 特性の算出精度検証として、産業技術総合研究所において標準試験条件における出力を測定したモジュールを用い、このモジュールの屋外における実測 I-V 特性を真値として、屋外測定と同じ照度・温度条件下において算出した参照基準用 I-V 特性と比較することで、算出精度を評価した。結果を図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑥-2に示す。結果より、異なる4つの照度・温度条件下において、中間目標である3%以下の誤差で最大出力が算出できている事が確認できた。



(左) 図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑥-1 理科大に導入した屋外評価装置の外観。
(右) 図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑥-2 算出した参照基準用 I-V 特性と実測 I-V 特性の比較結果。

(3) メガソーラにおける開発手法の適用可能性検証

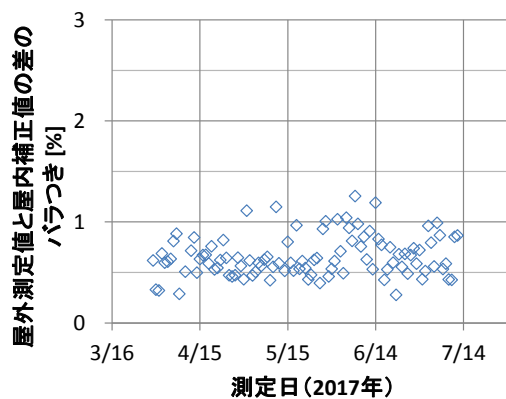
開発した測定手法、および解析手法の実際のメガソーラへの適用可能性検証として、北杜メガソーラにて PVMS を照度センサとして用い、結晶シリコン系システムのストリング I-V カーブ測定を実施し、結果を評価することで、測定を高精度かつ効率的に行うための機器の設置方法やデータ取得方法に関する課題抽出を行った。

⑦ 屋外実性能高能率測定技術の開発

産総研の成果を基に、測定時間 0.2 秒で測定を行う IV 高速測定と、太陽電池セルを用いた高速応答の PV モジュール日射センサ PVMS を用いて、JET 屋上（横浜）で太陽電池モジュールの屋外 IV 測定を実施した（図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑦-1）。図の計測系は多枚数、ポータブル等高能率な測定を想定して設計したものである。被測定モジュールは事前に屋内においてソーラシミュレータで2条件（暗状態および 1000 W/m^2 ，AM1.5G， 25°C ）での IV 測定を行い、線形補間法を用いて各照度・温度における最大出力など各種特性を算出した。温度特性は典型的な結晶シリコン太陽電池モジュールと理論式を用いて推定した。これらの屋内特性と、屋外で実測した IV 特性を、同一の日射強度とモジュール温度において比較した。この結果、最大出力において、測定日ごとにバラつきを計算すると、すべての測定日で標準偏差（ 1σ ）は2%以下であった。以上によって測定再現性精度 $\pm 2\%$ （ 1σ ）以内を達成する目処を得た。今後は高能率モジュール計測及びシステム計測への展開を考慮して、更に広い範囲に設置された多種のモジュールでの屋外高能率測定の精度検証を行う。



図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑦-1 JET 屋上における測定系。



図Ⅲ-2-(ホ)-2-⑦-2 屋外測定と屋内測定による太陽電池モジュール最大出力測定値の相対差の再現性。

2. 実用化・事業化見通し

I) 新型太陽電池高精度性能評価技術

・開発成果の IEC, JIS 規格等への標準化を推進して、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 (IEC 規格 6 件の審議に参加し議論が進んでいる)。

II) 屋外性能高度評価技術の開発 (屋外高精度評価技術の開発)

・開発成果が業界団体や IEC, JIS 規格等に標準化される形で実用化する。
 ・現在本研究技術を反映した I-V テスタ、PV モジュール日射センサが一部実用化されている。更に開発した太陽電池モジュール屋外高精度測定技術、温度測定技術等が設置時試験やオンサイト性能測定に、計測値の精度を保証する標準的手法使用されることにより、モジュール測定的大幅な低コスト化が見込まれる。

3. 波及効果

I) 新型太陽電池高精度性能評価技術

・本プロジェクトによって大幅に改善された新型太陽電池評価技術、一次基準太陽電池校正技術開発の成果がメーカー、試験所等に普及することにより、太陽電池デバイス開発・高効率化・低コスト化が促進される。国際整合性が確保されることと併せて、太陽光発電の社会的信頼性と価値が改善される。

II) 屋外性能高度評価技術の開発 (屋外高精度評価技術の開発)

・本プロジェクト開発した技術によって、実際のモジュール、ストリング、アレイが銘板値に対してどのくらいの発電性能を維持しているかを屋外測定において評価可能とすることで、測定時間の短縮など効率的な維持管理が可能になることが期待できる。改正 FIT 法により発電事業者に求められる維持管理において、本手法を用いることにより、太陽電池モジュールを取り外して屋内測定が可能な施設まで運搬し屋内測定装置を用いて出力を測定することなく、屋外において実環境下で出力を測定し、出力が低下したモジュールの保証適用の判断を行うことが可能となれば、取り外し、運搬、屋内測定などの維持管理のためのコストの低減が期待できる。

4. 今後の展開

I) 新型太陽電池高精度性能評価技術

・新たに開発される新型太陽電池に対応した測定技術開発と共に、世界的な動きとして基本的な測定精度 (不確かさ) の改善が進む。

II) 屋外性能高度評価技術の開発 (屋外高精度評価技術の開発)

・開発した手法を用いて北杜メガソーラにおける I-V 特性の測定結果と参照基準用 I-V 特性を比較した結果、太陽電池セルの種類、電極構造の違い、モジュールの構造の違いなどにより、短絡電流の推定値と実測値の差が大きい場合があった。これは屋外における直達・散乱日射比の違いや入射角の影響を受けている事が原因として考えられるため、引き続き高精度化に向けたモデルの開発を継続する。
 ・今後の研究によって開発技術の応用により、モジュールを複数直列した PV ストリングや稼働中の高精度システム計測の実現が期待される。
 ・本研究の成果を応用して、PVMS を用いたシステムの瞬時性能の高精度高速測定の実現等、現状技術に比べて大幅な O & M の低コスト化・高精度化、および不具合検出の迅速化・高精度化が実現可能となる。その際にシステムサイズでの日射スペクトル変動補正技術、温度計測補正技術等がより重要となる。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
論文	2	6	8	16 件
研究発表・講演（うち国際会議）	13(3)	28(10)	48(23)	89 件
新聞・雑誌等への掲載	1	2	1	4 件
その他	2	0	0	2 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	菱川、土井、比嘉、山越、大島、増田、若林	産総研，JET	太陽電池屋外高精度評価技術～幅広い日射強度・温度範囲における高精度測定の検討～	日本太陽／風力エネルギー講演論文集(2015)25-28	無	2015/11/26
2	菱川、志村、上田、佐々木、石井	産総研	ペロブスカイト太陽電池の高精度性能評価技術	日本太陽／風力エネルギー講演論文集(2015)49-52	無	2015/11/26
3	土井、菱川、比嘉、大島、山越	産総研	PVモジュール日射センサー構造の最適化～ダミーセルサイズの影響評価に関する予備試験結果	日本太陽／風力エネルギー講演論文集(2015)29-31	無	2015/11/26
4	菱川、比嘉	産総研	薄膜太陽電池の照射効果を含めた性能評価技術	日本太陽／風力エネルギー講演論文集(2015)53-56	無	2015/11/26
5	武智龍斗、今井健太、太田靖之、西岡賢祐	宮崎大学	太陽電池モジュールの高精度温度測定方法の検討	日本太陽／風力エネルギー講演論文集(2015)35-38	無	2015/11/26

6	Y. Hishikawa, K. Yamagoe, H. Ohshima et al	産総研	New Technology for Precise Outdoor PV Module Performance Measurements	42nd IEEE PVSC, New Orleans (2015) DOI: 10.1109/PVSC.2015.735583 7	無	2015/6/14
7	Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop	産総研	Solar cell efficiency tables (version 46)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 23-7 (2015. 6) 805-812	有	2015/6/16
8	Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop	産総研	Solar cell efficiency tables (version 47)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 24-1 (2015. 11) 3-11	有	2015/11/24
9	北川 晃宏, 植田 譲	東京理科 大学	銘板値を用いた1ダ イオードモデルとIV カーブ屋外測定によ る PV 発電性能の測 定手法	平成28年電気学会全国大会 講演予稿集 2p.	無	2016/3/16
10	Y. Hishikawa, H. Shimura, T. Ueda, A. Sasaki, Y. Ishii	産総研	Precise Performance Characterization of Perovskite Solar Cells	Current Applied Science 16 (2016) 896-904	有	2016/5/8
11	薛、猪狩	産総研	高分解能太陽光スペ クトルの生成	第13回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム予稿集(2016)276-277	無	2016/5/19
12	猪狩、高 瀬、小久 保、渡邊、 周	産総研	トレーサビリティ技 術開発と基準太陽電 池校正技術の高度化	第13回「次世代の太陽光 発電システム」シンポジウ ム予稿集(2016)276-277	無	2016/5/19

13	Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop	産総研	Solar cell efficiency tables (version 48)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 24-7 (2016. 6) 905-913	有	2016/6/17
14	Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe. H. Ohshima, K. Masuda and H. Wakabayashi	産総研	Precise Outdoor PV Performance Measurements at Various Irradiance Levels	Proceedings of the 43rd IEEE PVSC, Portland (2016) 987-991	無	2016/6/1
15	Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, and H. Ohshima	産総研	Precise Outdoor PV Module Performance Characterization Under Unstable Irradiance	IEEE J. Photovol. 6-5 (2016) 1221-1227	有	2016/6/10
16	Satoshi Nakamura, Kensuke Nishioka	宮崎大	Reduction of temperature in silicon photovoltaic module using thermal radiation coating	MATEC Web of Conferences, 65, 04004	有	2016/7/6
17	小園茂平、 西岡賢祐	宮崎大学	フラット型追尾式太陽光発電システムの平均空力特性と特有の効果	日本機械学会論文集, Volume 82, Number 839, 16-00023	有	2016/7/25

18	Y. Hishikawa, H. Ohshima, M. Higa, K. Yamagoe, and T. Doi	産総研	Precise Determination of the STC I-V Curves by Wide-Range Linear Extrapolation of Outdoor I-V Curves on Partly Sunny Days	Proceedings of the 32nd EUPVSEC (2016) (5D0. 11. 4), 1716-1719	無	2016/6/1
19	菱川、土井、比嘉、武内、大島、山越、増田、若林、	産総研、JET	太陽電池屋外高精度評価技術によるモジュール IV 特性の高精度測定	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集 (2016) 37-40	無	2016/11/24
20	森岡佐知子、坂本一将、太田靖之、西岡賢祐	宮崎大学	屋外太陽電池モジュール温度計測の応答性を向上させる温度センサーの検討	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集 (2016) 27-28	無	2016/11/24
21	奥本知記、坂本一将、太田靖之、西岡賢祐	宮崎大学	有風時における太陽電池モジュール面内温度分布の計測および検討	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集 (2016) 247-248	無	2016/11/24
22	菱川、増田、土井、植田	産総研、東京理科大	太陽電池屋外高精度評価技術の PV システム高精度計測、診断への応用	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集 (2016) 293-296	無	2016/11/24
23	志村、石井、吉田、菱川	産総研	両面受光型太陽電池の片面および両面照射時における実測電流値の線形性	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集 (2016) 335-338	無	2016/11/24
24	土井、菱川、比嘉、武内、大島、山越	産総研	PV モジュール日射センサーによる日射計測において法線ベクトルのズレが日射計測に及ぼす影響	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会講演論文集 (2016) 37-40	無	2016/11/24
25	張浚芳	岐阜大学	PV モジュールセンサーによる日射変動の高速測定と大気状態との関係	太陽／風力エネルギー学会論文集 443-446	無	2016/11/24

26	増田 幸治	JET	太陽電池アレイ中の 太陽電池モジュール 屋外出力測定方法の 検討	太陽／風力エネルギー学 会論文集 345-346	無	2016/11/24
27	浅井 大輝, 植田 謙, 菱川 善博	東京理科大 学	PV 日射センサ及び I-V カーブ高速測定 によるアレイ発電性 能の高度測定	平成 29 年電気学会全国 大会講演予稿集 2p.	無	2017/3/15
28	小畑 圭弘, 植田 謙, 菱川 善博	東京理科大 学	日射強度と温度及び I-V カーブ測定によ る PV モジュール性 能の測定手法の検討	平成 29 年電気学会全国 大会講演予稿集 2p.	無	2017/3/15
29	張浚芳	岐阜大学	太陽光パネル屋外性 能評価に関わる日射 強度急変時の解析	平成 29 年電気学会全国 大会講演予稿集 2p.	無	2017/3/15
30	Martin A. Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop	産総研	Solar cell efficiency tables (version 49)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25-1 (2017. 1) 3-13	有	2017/2/17
31	Martin A. Green, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl - Ebinger, Anita W. Y. Ho - Baillie	産総研	Solar cell efficiency tables (version 50)	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25 (2017)	有	2017/6/21

32	Y. Horio, Md. M. Rahman, Y. Imai, Y. Hishikawa, T. Minemoto	立命館、産 総研	Impact of average photon-energy coefficient of solar spectrum on the short circuit current of photovoltaic modules	Curr. Appl. Phys. 17 (2017) 1341-1346.	有	2017/7/10
33	J. Chantana, H. Mano, Y. Horio, Y. Hishikawa, T. Minemoto	立命館、産 総研	Spectral mismatch correction factor indicated by average photon energy for precise outdoor performance measurements of different-type photovoltaic modules	Renewable Energy 114(B) (2017) 567-573.	有	2017/7/17
34	Yoshihiro Hishikawa, Takuya Doi, Michiya Higa, Hironori Ohshima, Takakazu Takenouchi and Kengo Yamagoe	産総研	Effects of synchronous irradiance monitoring and correction of I-V curves on the outdoor performance measurements of PV Modules	Jpn. J. Appl. Phys. 56-8S2 (2017 Jul 27) 08MD07	有	2017/7/27
35	H. Mano, Md. M. Rahman, A. Kamei, T. Minemoto	Ritsumeikan University	Impact estimation of average photon energy from two spectrum bands on short circuit current of photovoltaic modules	Solar Energy 155 (2017) 1300-1305.	有	2017/8/1

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Y. Hishikawa, K. Yamagoe, H. Ohshima et al	産総研	New Technology for Precise Outdoor PV Module Performance Measurements	42nd IEEE PVSC, New Orleans (2015)	2015/6/15
2	菱川	産総研	太陽電池の高精度性能評価技 術～ペロブスカイト太陽電池 評価の特徴	学振第 175 委員会 有機系太陽電池分科 会 第 2 回研究会	2015/7/16

3	菱川	産総研	太陽電池性能評価技術の現状	第 11 回有機太陽電池シンポジウム 京都大学宇治キャンパス	2015/7/17
4	坂本一将, 坊屋敷憂香, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	放熱塗装によるヒートシンクへの冷却効果	第 7 回半導体材料・デバイスフォーラム	2015/11/14
5	Y. Hishikawa, A. Sasaki, H. Shimura, T. Ueda, Y. Ishii	産総研	ccurate performance measurement procedure for Perovskite solar cells	PVSEC-25, Busan (2015)	2015/11/15
6	H. Mano, A. Kamei, D. Hironiwa, T. Minemoto	立命館	Impact of average photon energy on short circuit current of Si photovoltaic modules from calculation	PVSEC-25, Busan (2015)	2015/11/17
7	菱川、土井、比嘉、山越、大島、増田、若林	産総研, JET	太陽電池屋外高精度評価技術～幅広い日射強度・温度範囲における高精度測定の検討～	平成 27 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/25
8	菱川、志村、上田、佐々木、石井	産総研	ペロブスカイト太陽電池の高精度性能評価技術	平成 27 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/25
9	菱川、比嘉	産総研	薄膜太陽電池の光照射効果を含めた性能評価技術	平成 27 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/25
10	土井、菱川、比嘉、大島、山越	産総研	PV モジュール日射センサー構造の最適化～ダミーセルサイズの影響評価に関する予備試験結果	平成 27 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26
11	武智龍斗, 今井健太, 太田靖之, 西岡賢祐	宮崎大学	太陽電池モジュールの高精度温度測定方法の検討	平成 27 年度日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/26
12	北川 晃宏, 植田 譲	東京理科大学	銘板値を用いた 1 ダイオードモデルと IV カーブ屋外測定による PV 発電性能の測定手法	平成 28 年電気学会全国大会	2016/3/16
13	猪狩、高瀬、小久保、渡邊、周	産総研	分光放射照度測定高精度化等による一次基準太陽電池セル校正技術の高度化	平成 28 年電気学会全国大会	2016/3/18
14	Satoshi Nakamura, Kensuke Nishioka	宮崎大学	Reduction of Temperature in Silicon Photovoltaic Module Using Thermal Radiation Coating	5th International Conference on Advanced Materials and Engineering Materials	2016/4/16

15	薛、猪狩	産総研	高分解能太陽光スペクトルの生成	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
16	猪狩、高瀬、小久保、渡邊、周	産総研	トレーサビリティ技術開発と基準太陽電池校正技術の高度化	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
17	Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, K. Masuda and H. Wakabayashi	産総研	Precise Outdoor PV Performance Measurements at Various Irradiance Levels	43rd IEEE PVSC, Portland (2016)	2016/6/5
18	猪狩真一 他	産総研	基準太陽電池校正技術の高度化	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2017/6/15
19	土井 卓也 他	産総研	太陽電池屋外高精度測定用PV日射計測	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2017/6/15
20	比嘉道也 他	産総研	屋外高精度性能評価技術	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2017/6/15
21	佐々木あゆ美 他	産総研	ペロブスカイト太陽電池測定技術	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2017/6/15
22	薛 雁群 猪狩 真一	産総研	高分解能太陽光スペクトルの生成	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2017/6/15
23	Y. Hishikawa, H. Ohshima, M. Higa, K. Yamagoe, and T. Doi	産総研	Precise Determination of the STC I-V Curves by Wide-Range Linear Extrapolation of Outdoor I-V Curves on Partly Sunny Days	32nd EUPVSEC (2016)	2016/6/20
24	Nawwar Ahmad, Kensuke Nishioka, Yasuyuki Ota	宮崎大学	Influence of wind speed and direction on cooling effect for concentrator photovoltaic module investigated using wind tunnel	2016 International Conference on Advanced Electronic Science and Technology	2016/8/20
25	Y. Hishikawa, H. Ohshima, M. Higa, K. Yamagoe and T. Doi	産総研	Effects of Synchronous Irradiance Monitoring and Correction of I-V Curves on the Outdoor Performance Measurements of PV Modules	PVSEC-26, Singapore (2016)	2016/10/26

26	Y. Horio, H. Mano, Md. R. Mijanur, Y. Hishikawa, T. Minemoto	立命館大学、産総研	Impact estimation of average photon energy of solar spectrum on short circuit current of Si based photovoltaic modules	PVSEC-26, Singapore (2016)	2016/10/27
27	H. Mano, Y. Horio, Md. R. Mijanur, Y. Hishikawa, T. Minemoto	立命館大学、産総研	Correlation of short circuit current ratio of various photovoltaic modules and average photon energy of solar spectrum	PVSEC-26, Singapore (2016)	2016/10/27
28	T. DOI, Y. HISHIKAWA, M. HIGA, H. OHSHIMA and K. YAMAGOE	産総研	PV Module Irradiance Sensor for Outdoor Precise Irradiance Measurement - Structure and Response Property to the Module Under Test -	PVSEC-26, Singapore (2016)	2016/10/27
29	Tomonao Kobayashi	岐阜大学	Characteristics of Solar Irradiance Fluctuation and Corresponding Weather Condition	PVSEC-26, Singapore (2016)	2016/10/27
30	増田 幸治	JET	Investigation into Spatial Distribution of Irradiance for Performance Measurement of Photovoltaic Modules at Photovoltaic Systems	PVSEC-26 Singapore	2016/10/27
31	森岡佐知子、坂本一将、太田靖之、西岡賢祐	宮崎大学	屋外太陽電池モジュール温度計測の応答性を向上させる温度センサーの検討	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
32	奥本知記、坂本一将、太田靖之、西岡賢祐	宮崎大学	有風時における太陽電池モジュール面内温度分布の計測および検討	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
33	菱川、土井、比嘉、武内、大島、山越、増田、若林、	産総研、JET	太陽電池屋外高精度評価技術によるモジュール IV 特性の高精度測定	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
34	菱川、増田、土井、植田	産総研、東京理科大	太陽電池屋外高精度評価技術の PV システム高精度計測、診断への応用	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
35	志村、石井、吉田、菱川	産総研	両面受光型太陽電池の片面および両面照射時における実測電流値の線形性	日本太陽エネルギー学会／風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
36	土井、菱川、比嘉、武内、大島、山越	産総研	PV モジュール日射センサーによる日射計測において法線ベクトルのズレが日射計測に及ぼす影響	日本太陽エネルギー学会／日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24

37	小林智尚	岐阜大	PV モジュールセンサーによる日射変動の高速測定と大気状態との関係	日本太陽エネルギー学会／日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/25
38	増田 幸治	JET	太陽電池アレイ中の太陽電池モジュール 屋外出力測定方法の検討	日本太陽エネルギー学会／日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/25
39	浅井 大輝, 植田 譲, 菱川 善博	東京理科大学	PV 日射センサ及び I-V カーブ高速測定によるアレイ発電性能の高度測定	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/15
40	小畑 圭弘, 植田 譲, 菱川 善博	東京理科大学	日射強度と温度及び I-V カーブ測定による PV モジュール性能の測定手法の検討	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/15
41	張浚芳	岐阜大学	太陽光パネル屋外性能評価に関わる日射強度急変時の解析	平成 29 年電気学会全国大会	2017/3/16
42	菱川善博, 土井卓也, 比嘉道也, 武内貴和, 大島博典, 山越憲吾	産総研	太陽電池屋外高精度評価技術	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13
43	土井卓也, 菱川善博, 比嘉道也, 武内貴和, 大島博典, 山越憲吾	産総研	太陽電池屋外高精度測定用 PV 日射計測	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13
44	猪狩真一、高瀬滝男、小久保順一、渡邊良一、周泓	産総研	一次基準太陽電池校正の高度化	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13
45	猪狩真一、渡邊良一、小久保順一	産総研	超高温度定点黒体炉の測光標準利用技術	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13
46	渡邊良一、猪狩真一、小久保順一、周泓	産総研	6 分岐ファイバ型絶対放射計の応答非直線性評価	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13
47	上田孝、吉田正裕、菱川善博	産総研	LBIC による受光面積境界評価	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13
48	志村陽哉、石井勇希、吉田正裕、菱川善博	産総研	両面受光太陽電池の両面照射時における実測電流値の線形性	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13
49	佐々木あゆ美、上田孝、志村陽哉、石井勇希、吉田正裕、菱川善博	産総研	ペロブスカイト太陽電池の高精度性能測定手法の開発と検証	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13

50	吉田正裕・ 佐々木あゆ 美・上田孝・ 志村陽哉・石 井勇希・菱川 善博	産総研	新型太陽電池高精度性能評価 技術	AIST 太陽光発電研 究 成果報告会 2017	2017/6/13
51	宮村、秋富、 千葉、増田、 西岡	宮崎大 学、産総 研	内挿温度センサーによる太陽 電池モジュール内セルの高精 度温度計測	AIST 太陽光発電研 究 成果報告会 2017	2017/6/13
52	G. Siefer, Y. Hishikawa	産総研	Solar Cell and Module Characterization	Tutorial, 44th IEEE PVSC (2017/6/25) Washington DC	2017/6/25
53	Sakutaro Miyajima, Kensuke Nishioka, Yoshihiro Hishikawa	宮崎大 学、産総 研	Non-contact Voltage Measurement of Solar Cell with Electrostatic Voltmeter	44th IEEE PVSC (2017)	2017/6/26
54	Y. Hishikawa, M. Yoshita, H. Shimura, A. Sasaki and T. Ueda	産総研	Precise I-V Curve Measurement Procedure for Perovskite Solar Cells: Application to Various Types of Devices	44th IEEE PVSC (2017)	2017/6/26
55	Y. Hishikawa, H. Ohshima, M. Higa, K. Yamagoe, T. Takenouchi, T. Doi	産総研	Extended linear interpolation/extrapolation procedure for accurate and versatile translation of the I-V curves of PV cells and modules	44th IEEE PVSC (2017)	2017/6/27
56	今井佑里恵, 堀尾雄平, 達 雅基, Md. R. Mi janur, 菱 川善博, 峯元 高志	立命館大 学, 産総 研	短絡電流値補正による屋外設 置太陽電池の発電性能の経時 変化解析	第 14 回 「次世代 の太陽光発電システ ム」 シンポジウム	2017/7/20
57	堀尾雄平, 今 井佑里恵, 達 雅基, Md. R. Mi janur, 菱 川善博, 峯元 高志	立命館大 学, 産総 研	スペクトル指標を用いた薄膜 太陽電池の短絡電流値補正の 高精度化	第 14 回 「次世代 の太陽光発電システ ム」 シンポジウム	2017/7/20
58	宮島 朔太 郎, 西岡 賢 祐, 菱川 善 博	宮崎大 学、産総 研	静電電位計を用いた太陽電池 モジュール内セルの非接触高 精度電圧計測	第 14 回 「次世代 の太陽光発電システ ム」 シンポジウム	2017/7/20
59	奥本 知記, 西岡 賢祐	宮崎大学	屋外有風条件下における太陽 電池モジュール温度分布の検 討	第 14 回 「次世代 の太陽光発電システ ム」 シンポジウム	2017/7/20

60	Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, T. Takenouchi, H. Ohshima and K. Yamagoe	産総研	Reproducible outdoor I-V curve measurement by the use of PV module irradiance sensors and comparison with indoor results	EUPVSEC 2017	2017/9/25
61	Yoshihiro HISHIKAWA, Masahiro YOSHITA, Hironori OHSHIMA et al.	産総研	Temperature dependence of the short circuit current and spectral response of various kinds of crystalline silicon pv devices	PVSEC-27	2017/11/12
62	Yoshihiro HISHIKAWA, Takuya DOI, Michiya HIGA, Takakazu TAKENOUCI et al.	産総研	Factors for improving the precision of outdoor photovoltaic performance measurement	PVSEC-27	2017/11/12
63	Takuya DOI, Yoshihiro HISHIKAWA, Michiya HIGA et al.	産総研	PV module irradiance sensor for precise outdoor measurement- structure, response similarity and angular dependence comparison with the module under test -	PVSEC-27	2017/11/12
64	Masahiro Yoshita, Ayumi Sasaki, Takashi Ueda, Haruya Shimura, and Yoshihiro Hishikawa	産総研	Fast temporal responses of spectral responsivities in emerging perovskite solar cells	PVSEC-27	2017/11/12
65	Masahiro Yoshita, Ayumi Sasaki, Takashi Ueda, Haruya Shimura, and Yoshihiro Hishikawa	産総研	Validation of measurement protocols applicable to performance characterization of various emerging solar cells	PVSEC-27	2017/11/12

66	Haruya Shimura, Masahiro Yoshita, Yoshihiro Hishikawa	産総研	Shading effect in performance evaluations of crystalline silicon bare cells	PVSEC-27	2017/11/12
67	Zhang Junfan, Kota Watanabe, Jun Yoshino, Tomonao Kobayashi et al.	岐阜大学、産総研	Filtering method of detecting solar irradiance conditions for pv module performance characterization under unstable irradiance	PVSEC-27	2017/11/12
68	Zhang Junfan, Kota Watanabe, Jun Yoshino, Tomonao Kobayashi et al.	岐阜大学、産総研	Short time and space variations of solar irradiance under clouds	PVSEC-27	2017/11/12
69	Zhang Junfan, Kota Watanabe, Jun Yoshino, Tomonao Kobayashi et al.	岐阜大学、産総研	Solar irradiance enhancement due to cloud edge effect	PVSEC-27	2017/11/12
70	Zhang Junfan, Kota Watanabe, Jun Yoshino, Tomonao Kobayashi et al.	岐阜大学、産総研	Short-period fluctuations of solar irradiance and cloud conditions	PVSEC-27	2017/11/12
71	Kensuke Nishioka, Kazuyuki Miyamura, Yasuyuki Ota et al.	宮崎大学	Accurate measurement and estimation of solar cell temperature in photovoltaic module operating in real environmental conditions	PVSEC-27	2017/11/12
72	Kazuki Okumoto, Kensuke Nishioka	宮崎大学	Temperature distribution in photovoltaic module operating in real environmental conditions	PVSEC-27	2017/11/12
73	Sakutaro Miyajima, Yasuyuki Ota, Yoshihiro Hishikawa, Kensuke Nishioka	宮崎大学、産総研	Accurate voltage measurement of solar cells in module structure using a non-contacting electrostatic voltmeter	PVSEC-27	2017/11/12

74	Yuhei Horio, Yurie Imai, Masaki Tsuji et al.	立命館大 学、産総 研	Precise short circuit current correction of thin-film photovoltaic modules using spectral index	PVSEC-27	2017/11/12
75	Yurie Imai, Yuhei Horio, Masaki Tsuji, Md. Mijanur Rahman et al.	立命館大 学、産総 研	Analysis of temporal change in outdoor photovoltaic performance using the corrected short circuit current	PVSEC-27	2017/11/12
76	Takatoshi Kawase, Yuzuru Ueda	東京理科 大	Statistical analysis of aging characteristics of pv module output using linear interpolation method	PVSEC-27	2017/11/12
77	Daiki Asai, Yuzuru Ueda, Yoshihiro Hishikawa	東京理科 大	Measurement Method of the PV Array Performance by using PVMS and Outdoor Measured I-V Curve	PVSEC-27	2017/11/12
78	Kohji MASUDA, Tadashi OBAYASHI, Yoshihiro HISHIKAWA	J E T, 産総研	Procedures for precise and highly efficient outdoor performance- measurement of photovoltaic modules	PVSEC-27	2017/11/12

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産総研	太陽電池屋外測定の高精度化	PVTEC ニュース 72 巻(2016. 3)9- 11	2016/3/15
2	産総研	太陽電池の屋外における迅速・低コストな 測定を実現する技術	JPEA 会報誌「光 発電」No. 39 (2016) 160- 165	2016/4/25
3	産総研	太陽電池性能測定のコツ	応用物理 第 85 巻 第 10 号 p. 901	2016/10/10
4	産総研	0.2 秒単位で日射測定、産総研が新型セン サーを開発・製品化	日経テクノロ ジーオンライン	2017/6/16

【その他】

番号	年度	タイトル		
1	H27-29 年度	NEDO 開発品等新型太陽電池等約 80 サンプル/年の新型太陽電池の高精度評価を実施。デバイス開発に貢献		
2	H27-29 年度	IEC, JIS 等約 10 件の性能評価関係国際標準、国内標準の議論に参画して技術的に貢献		

B 太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発（産業技術総合研究所、デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社、東レ株式会社、石川県工業試験場、岐阜大学、東京農工大学、北陸先端科学技術大学院大学、東京理科大学）

1. 成果詳細

【国立研究開発法人産業技術総合研究所】

①モジュール劣化メカニズムの解明

長期屋外曝露された結晶シリコン（Si）太陽電池モジュールでは、封止材に使用されているエチレン-酢酸ビニル共重合樹脂（EVA）とモジュール内に浸入した水分との加水分解反応で発生した酢酸により、経年劣化することが知られている。本劣化現象を模擬・加速するために、結晶 Si 太陽電池セルを湿熱環境下で酢酸蒸気に曝露する手法を用い、劣化メカニズムの解明を試みた。酢酸蒸気曝露において発現する新たなインピーダンス成分に対するバイアス電圧の影響を解析することにより、結晶 Si 太陽電池モジュールに用いられるセルの電極腐食機構を検討した。

酢酸蒸気曝露によってセルの交流等価回路に新たなインピーダンス成分が発現し、発電特性の変化にともない、新たな成分も変化した。交流インピーダンス測定による詳細な解析の結果、電極腐食機構は電極直下のギャップ形成過程と電極直下に残存した銀ピラーの電気特性が整流性へと変化する過程に分離でき、前者は曲線因子の低下を、後者は短絡電流の低下をとともなうことを明らかにした。

この他、高温高湿試験や紫外光照射試験により劣化させたモジュールから取り出した EVA について、陽電子消滅寿命測定により自由体積空隙サイズの解析を行った。その結果、脱酢酸反応に起因した自由体積空隙サイズの減少が観測され、出力低下と相関することを明らかにした。また、高温高湿試験後のモジュールについては、セルとの界面で脱酢酸反応が促進されていたことから、バックシートから浸入した水蒸気がセル界面を拡散し、界面で優先的に EVA を加水分解して酢酸を発生させるメカニズムを提唱した。さらに、高温高湿試験前に紫外光照射試験を施したモジュールでは、短時間の高温高湿試験でも自由体積空隙サイズが顕著に減少した。このことから、光反応により生成した酢酸等が触媒成分として働き、短時間の高温高湿試験でも加水分解反応が顕著に進行した可能性が示唆された。

②各種加速試験法の開発

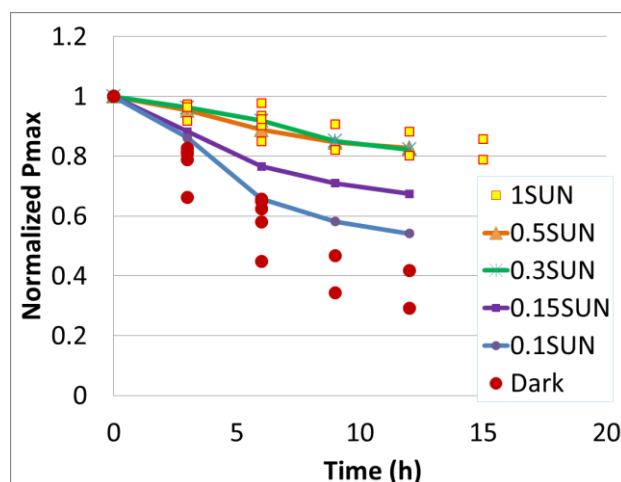
高温高湿試験を施したモジュールならびに、長期に屋外曝露されたモジュールにおいても、セルの電極には、①項で述べた酢酸蒸気曝露と同等の腐食が生じていることを明らかにした。セルの酢酸蒸気曝露、モジュールの高温高湿試験、モジュールの屋外曝露における、発電パラメータならびに交流インピーダンス成分を比較したところ、三者が類似の劣化挙動を示すこと、さらには、温度 85℃、相対湿度 85%の高温高湿試験は宮古島での屋外曝露に対して約 65 倍の加速係数を有すること、酢酸蒸気曝露試験は当該高温高湿試験に対して約 70 倍の加速係数を有すること、結果的にセルの酢酸蒸気曝露試験は宮古島での屋外曝露に対して約 4500 倍の加速係数を有することを明らかにした。

太陽電池モジュールの急激な出力低下を引き起こす電圧誘起劣化（PID）現象を再現する加速試験法についても検討した。これまでに、屋内で PID を再現する様々な加速試験法が開発されている。しかし屋外での曝露条件が PID に与える影響については明らかにされていない点が多く、系統的なデータの取得が求められている。本研究では、屋外曝露時の最も重要な因子である光照射が PID に与える影響について、波長依存性や湿度、影の効果等も含め系統的に調査した。

図Ⅲ-2-(ホ)-B-1 には、キセノンランプ光照射下で PID 試験を行った p 型結晶 Si 太陽電池モジュールにおける一定時間経過後の最大出力の変化を示す。0.3SUN 以上のキセノンランプ光照射を行った場合には、光照射を行わない場合に比べて明確な PID 抑制効果が観測された。PID 抑制効果の波長依存性を調べたところ、PID 抑制は可視光では生じず、400 nm 程度以下の紫外光成分が PID 抑制に必須であることが明らかとなった。実際の屋外曝露環境では、発電時すなわち光照射時しか、セルに高電圧は印加されない（部分影を除く）。これらの結果は、暗所での PID 試験が、実際よりも過剰な試験となっている可能性を示唆するものである。屋外での PID を再現する加速試験には、電圧印加時の紫外光照射が必要であるといえる。

0.3SUN の紫外光照射下と暗所において、85℃、10%以下と 85℃、85%の 2 つの温湿度条件で PID 試験を行った場合は、紫外光照射の有無に関わらず、高湿度のほうが低湿度よりも劣化が大きく、ガラス表面の導電性が上がることで PID が促進されていると考えられる。一方で、高湿度条件下でも紫外光照射による PID 抑制効果が確認できた。

さらに、モジュールの一部に影となる部分を設け、光照射を行いながら、PID 試験を実施した。屋外では電圧発生時には必ず光が照射されているものの、部分影がかかることもあるからである。影の面積が大きいほど最大出力の低下が大きく、影の部分からエレクトロルミネセンス (EL) 像の暗部が発生することがわかった。このことから、屋外においても定常的に部分影がかかるモジュールでは、PID が発生しやすいことが示唆された。



図III-2-(ホ)-B-1 光照射下ならびに暗中之でのPID試験による規格化最大出力 P_{max} の試験時間依存性。

この他にもPID試験についての各種検討を実施した。PID試験時にp型結晶Si太陽電池セルのpn接合に0.4~0.8Vの順方向バイアスを印加するとPIDが抑制されるものの、-0.2~-0.6Vの逆方向バイアスを印加するとPIDが促進され、それぞれバイアス電圧が大きいほど、抑制もしくは促進の効果が大きいことを見出した。n型フロントエミッタ単結晶Si太陽電池モジュールの屋外PID試験では、わずか-115Vの低電圧において7日間の屋外曝露を施すことにより、最大出力が8%低下した。短絡電流と開放電圧が低下し、曲線因子が維持されることから、n型セルに典型的な電荷蓄積に基づくPIDと推測される。このモジュールにおいては、屋外曝露と屋内加速試験を対比させることで、屋内加速試験の屋外曝露に対する加速係数は200~600倍程度と算出された。薄膜Si系太陽電池のPIDは透明導電膜の剥離に起因することも見出した。

③国際標準化とワークショップの創設

①項ならびに②項で述べた酢酸蒸気曝露試験は、SEMIで国際標準化投票が可決され、2017年秋までに標準化されることが決定した(SEMI Draft Document #6016, New Standard: Test Method for Exposure Durability of PV Cells to Acetic Acid Vapor)。当該試験はモジュール寿命予測にも適用できるため、新たに寿命予測法としてIEC TC82 WG2を通じて国際標準化を図る。

日本電機工業会との共催のもと、平成28年10月4日~5日に、茨城県つくば市においてInternational Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules, 2016(略称: SAYURI-PV 2016)を開催した。本ワークショップでは、米国ならびに欧州で毎年開催される太陽電池モジュール信頼性に関するワークショップとの連携を図り、科学的な知見に基づき、国際標準化に貢献することを目的としている。今回のワークショップには、世界4ヶ国から110名が参加した。講演件数は口頭講演22件、ポスター講演20件であった。モジュールの劣化現象、モジュール部材、信頼性試験法開発、国際標準化等に関して議論した。第2回は、27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-27)のサテライトとして、平成29年11月11日~12日に滋賀県大津市で開催する。第2回ワークショップでは、モジュール部材の評価に関して集中的に議論する予定であり、現在プログラムを策定している。

【デュポン・スペシャルティ・プロダクツ株式会社】

太陽電池の長期信頼性の実現のためには、屋外曝露モジュールの劣化メカニズムを正確に理解し、屋外環境におけるモジュールやモジュール構成部材の劣化現象を再現する加速試験によるモジュールおよび部材評価が欠かせない。産業技術総合研究所とデュポンは多くの屋外曝露モジュールの分析結果から、紫外線がモジュール構成部材のみならず発電量にも大きな影響を及ぼ

すことを過去の NEDO 委託事業で示してきた。本研究ではさらに詳細に紫外線の影響の調査を行い、モジュール構造を模したサンプルでの紫外線照射試験を継続する中で、EVA 封止材について様々な分析手法を適用し、劣化現象の理解、および劣化指標となる劣化度の解明に取り組んだ。

①紫外線を含んだ環境因子による複合劣化現象の解析

試験サンプルモジュールには異なる裏面材を用い、水蒸気透過率などの影響も同時に評価した。紫外線照射だけでなく、紫外線照射後に高温高湿試験を行う複合試験を行い、複合劣化試験における EVA 封止材の劣化現象を主に酢酸量の観点から調査した。さらに、異なる湿度条件で紫外線照射試験を行い、酢酸量の違いから紫外線劣化における湿度の影響評価を行った。

EVA の黄変度は紫外線照射の影響が大きいことが確認された。また、紫外線照射と高温高湿試験の複合試験、また紫外線照射と温度サイクル試験との複合試験においても、それぞれ高温高湿試験や温度サイクル試験の時間が長くなるほど、添加剤の劣化や EVA の劣化により新たな吸収体を持つことが示唆された。

EVA に対する紫外線照射により、酢酸エステルの加水分解だけでなく、高分子主鎖自体も劣化していることが確認された。また、紫外線照射時間が長いほど劣化度が大きいことも確認され、紫外線による劣化が経年的に進行する可能性を確認した。

EVA の分解による酢酸の発生については、赤外分光スペクトルのカルボキシル基やカルボン酸塩由来のピークなどからも確認された（図Ⅲ-2-(ホ)-B-2）。また、高分子主鎖の劣化については、電子スピン共鳴法により、共役系が発達した炭素ラジカルが検出されていることから確認された。

さらに、出力低下に影響を与える酢酸量に関して、紫外線との関係を調査した。裏面材の種類に関わらず、紫外線曝露量の増加とともに酢酸量が多くなった。また、相対湿度の異なる 2 条件（7%、30%相対湿度）での比較より、紫外線照射のみによる酢酸発生量には大きな違いは見られなかった。特に、水蒸気を全く透過させないガラスを裏面材として用いた場合でも酢酸量には大きな違いが見られなかったことから、発生酢酸量に対しては、湿度などよりも紫外線が最も重要な影響を及ぼす可能性が示された。

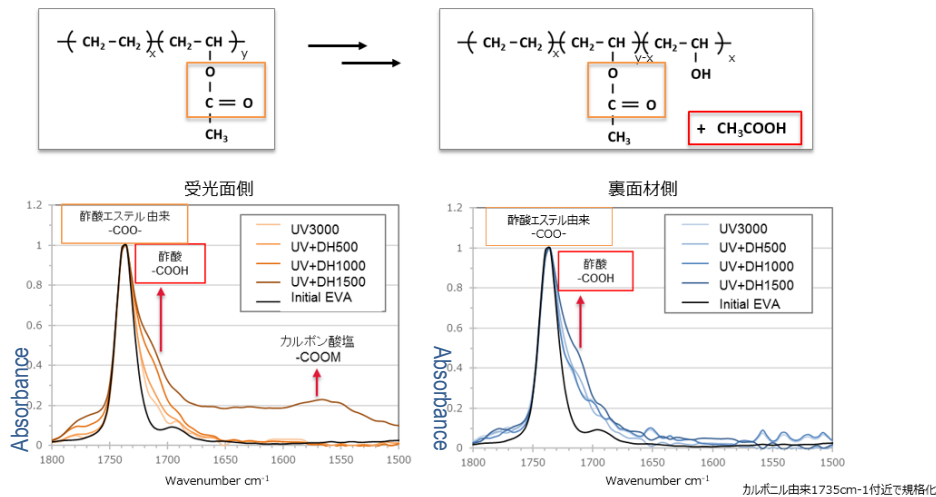
紫外線曝露による劣化度の指標化の手法として、新たにパルス核磁気共鳴法により EVA の架橋点を分析した。その結果、紫外線照射により EVA の運動性が低下していることが確認されたが、これは電子スピン共鳴法によりラジカル成分が検出されたことと一致する傾向であった。

②屋外曝露モジュールの劣化調査と複合劣化現象との相関性の検証

曝露年数が異なる（0～12 年）屋外曝露モジュールを入手し、①で見出した分析手法を用いて封止材の劣化度を調査した。EVA 中の残留酢酸量は、モジュールの裏面側に比べて受光面側で圧倒的に多かったことから、酢酸生成には裏面側からの水蒸気浸入による加水分解よりも、紫外線の影響が大きいことを確認した。また、EVA の透過率の違いが紫外線照射による発生酢酸量に影響を与える可能性を見出した。すなわち、近年、太陽電池の出力を少しでも高めるために光透過性を高めた EVA（高透過 EVA）が用いられる傾向があるが、高透過 EVA を使用した屋外曝露モジュールの方が劣化が大きく、残存酢酸量も多いことを見出した。

③試験法開発

上記の結果をもとに、紫外線耐性や透過性の異なる EVA を用いたミニモジュールを作製し、キセノン紫外線照射と高温高湿試験の組合せ試験を実施した。高透過 EVA の方が、残存酢酸量が多いという結果が得られ、屋外曝露モジュールの解析結果と一致した。今後、EVA の紫外線耐性や透過性の違いによる酢酸生成と出力への影響を確認し、屋外曝露を一層忠実に再現する試験法開発に結び付ける。以上の結果より、長期信頼性加速試験には紫外線照射を含んだ複合加速試験が今後ますます必要とされ、標準化されていく必要があることが提示できた。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-2

赤外分析法による EVA 封止材の構造解析結果（受光面側 EVA（左）、裏面材側 EVA（右））

【東レ株式会社】

①曝露環境の検討

モジュール裏面が受ける紫外線照射量は、「モジュール表面の紫外線照射量」×「床材の紫外線反射率（紫外線アルベド）」により推定する方法が一般的であるが、この方法の妥当性を検証すべく、滋賀県大津市（34° 59' N 135° 54' E）において、設置角 25°、真南向きの野立て架台にモジュールを設置し、モジュール表面と裏面の紫外線照射量を定量評価した。その結果、「モジュール裏面の紫外線照射量／モジュール表面の紫外線照射量」は「床材の紫外線アルベド」の約 1/3 程度になることを確認した。

高温高湿試験に関し、雰囲気温度や相対湿度をストレス指標として劣化を議論する例は多くあったが、屋外曝露環境下においてモジュール温度は雰囲気温度に対し高温となることから、温度や湿度としてどのパラメータを用いるべきか十分に議論が尽くされていなかった。そこで、雰囲気温度、サンプル温度、相対湿度、水蒸気圧を変えた高温高湿試験を透明 PET フィルムに対して行い、破断伸度保持率を評価することで、どのパラメータが湿熱劣化と直接関わるか検証した。その結果、サンプル温度と雰囲気中の水蒸気圧が同じであれば、雰囲気温度や相対湿度が異なっても同じ劣化挙動となることから、サンプル温度と水蒸気圧をストレス指標とすることが有用であると示唆された。

上記透明 PET フィルムの引張破断伸度を物理量とし、劣化シミュレーションを行った。劣化シミュレーションは、上記の結果をもとに、温度としてサンプル温度を、湿度として水蒸気圧を用い、反応速度 k を式Ⅲ-1 のように仮定した。また、引張破断伸度の劣化速度は試験時間に対してあまり変化が見られないことから、反応速度次数は 0 次であると仮定した。

$$\text{式Ⅲ-1} \quad k = A \times \exp\left(-\frac{E_h}{\kappa T}\right) \times (P_{H_2O})^n + D \times \exp\left(-\frac{E_l}{\kappa T}\right) \times (P_{H_2O})^m \times (Irr)^\alpha$$

[A：係数、 E_h ：湿熱劣化の活性化エネルギー(eV)、 κ ：ボルツマン定数(eV/K)、 T ：サンプルの絶対温度(K)、 P_{H_2O} ：水蒸気圧(hPa)、 n ：次数、 D ：係数、 E_l ：光劣化の活性化エネルギー(eV)、 m ：次数、 Irr ：紫外線照度(300-400 nm) (W/m^2)、 α ：次数]

温度、湿度、照度を変えた加速試験を行い、各加速試験における引張破断伸度半減期から、式Ⅲ-1 における各係数、次数を求めた。その結果、引張破断伸度 y は式Ⅲ-2 のように得られた。

式Ⅲ-2

$$y = y_0 - \left[4.1 \times 10^3 \times \exp\left(-\frac{0.59}{\kappa T}\right) \times (P_{H_2O})^{1.12} + 1.4 \times 10^5 \times \exp\left(-\frac{0.46}{\kappa T}\right) \times (P_{H_2O})^{0.07} \times (Irr)^{0.75} \right] \times t$$

[y ：引張破断伸度(%)、 y_0 ：引張破断伸度初期値(%)、 t ：時間(h)]

式Ⅲ-2 において、湿熱劣化のファクタは光劣化のファクタと比べて非常に小さいことから、主たる劣化ファクタは光劣化であることが示唆される。また、本式でのシミュレーション結果と屋外曝露下での引張破断伸度の測定結果を比較したところ、両者は比較的一致しており、本方法にてシミュレーションできることを確認した。すなわち、式Ⅲ-2 を用いることにより、昼夜等の変動がある屋外曝露下で受けるストレス量を、条件が安定した加速試験下でのストレス量に換算できるといえる。

②屋外曝露モジュールの分析、裏面材に対する加速試験の開発

各機関等により屋外曝露モジュールの分析が行われてきたが、初期状態や設置環境がトレーサブル

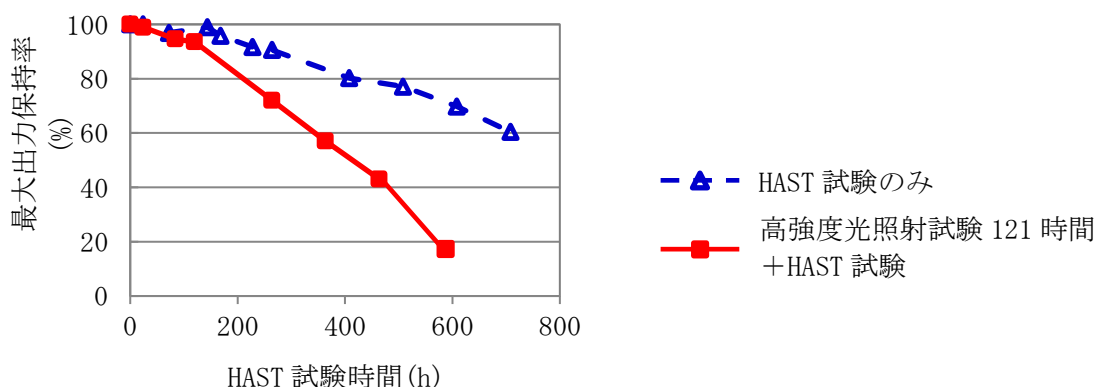
な分析事例は少ない。そこで、床材としてアスファルト（紫外線アルベド 6%）を用いた①記載の設置環境において、透明 PET フィルムを最外層に有するモジュールを 5.5 年間曝露し、破壊分析を行った。初期状態と HAST 試験（120℃、100%RH）、光照射試験（キセノン光照射、紫外線照度 60 W/m²、雰囲気温度 38℃、相対湿度 50%RH）後の状態を比較した結果、湿熱と光照射とでは、分子量分布の劣化挙動が異なることを確認し、ストレス量の追跡指標として特に適することを見出した。また、屋外曝露 5.5 年後のモジュールからサンプリングした透明 PET フィルムの分子量分布は光照射試験後の結果と近いことから、屋外曝露で裏面材が受ける主たるストレスは光照射であることが示唆された。すなわち、屋外曝露下での裏面材の劣化は上記光照射試験で代替できるといえる。さらに、式Ⅲ-2 を用いて、屋外曝露下および光照射試験時の半減期を求めると、それぞれ 56160 時間、282 時間となった。このことから、光照射試験による加速係数は 56160/282=199 倍と目標の 100 倍以上であることを確認した。

③モジュールに対する複合加速試験の開発

従来、モジュールに対する加速試験は、高温高湿試験（85℃、85%RH）を数 1000 時間にわたって行うことが一般的であり、試験時間が長い点や、実際の屋外曝露環境との乖離がある点が課題であった。そこで、モジュールに対して事前に光照射試験を行い、その後高温高湿試験を行う複合試験を実施し、劣化挙動を評価した。85℃、85%RH における水蒸気透過率（WVTR）の異なる 3 種類の裏面材

（PET/Al/PET: WVTR 非常に小、SiO_x BS: WVTR 1 g/m²day、PVF/PET/PVF: WVTR 30 g/m²day）を用いたモジュールと、WVTR が非常に大きいと考えられる裏面材のないモジュールを作製し、光照射試験はキセノン光照射、紫外線照度 90 W/m²、ブラックパネル温度 63℃、相対湿度 30%RH 以下の条件で行った。複合試験の結果、以下の知見が得られた。（i）高温高湿試験単独の試験時間より短時間で出力低下が発生した。（ii）高温高湿試験単独の場合と異なり、水蒸気透過率によらず同程度の高温高湿試験時間にて出力低下が発生した。（iii）光照射時間を長くした場合、出力低下発生後の低下速度も水蒸気透過率によらず概ね同程度となった。すなわち、光照射ストレスは湿熱ストレスによる劣化を速め、その加速効果は裏面材の水蒸気透過率に左右されない可能性がある。高温高湿試験と複合試験とで劣化挙動の違いが見られることから、両試験の劣化メカニズムが異なる可能性が示唆された。屋外での太陽光曝露による劣化の再現には、高温高湿試験と光照射試験の併用が重要であることが示された。

また、より高加速度の試験方法を確立すべく、メタルハライドランプによる高強度光照射試験（紫外線照度 1600 W/m²、ブラックパネル温度 63℃、相対湿度 50%RH）と HAST 試験（120℃、100%RH）を組み合わせた複合試験を、ETFE フィルムを裏面材に用いたモジュールに対して実施した。図Ⅲ-2-(ホ)-B-3 に示すように、高強度光照射試験も、湿熱ストレスによる劣化を速める効果があることを確認した。さらに、合計試験時間 700 時間程度での最大出力保持率は 20%程度であり、仮に本複合試験が 100 倍の加速係数を持つとすると約 8 年の負荷に相当するが、約 8 年の屋外曝露で高い出力を維持しているモジュールは数多いことから、本複合試験は 100 倍以上の加速係数を持つ可能性があることが示唆された。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-3 高強度光照射試験+HAST 試験を行った際の最大出力保持率の推移。

④国際標準化への取り組み

国際電気標準会議 (IEC) メンバーとして TC82/WG2 会合へ出席した。国際規格 IEC61730 等について協議し、曝露環境下における裏面材への紫外線照射量測定結果や光照射試験中のサンプル温度測定結果をもとに、光照射試験条件や採用すべきアルベド値について意見し、規格の適正化に貢献した。国際規格に関する協議は電話会議ならびに国際規格会議にて実施した [会議実績および予定; H27 年度: 11 月 (南アフリカ)、H28 年度: 5 月 (台湾)、10 月 (米国)、H29 年度: 5 月 (日本)、10 月 (スイス)]。

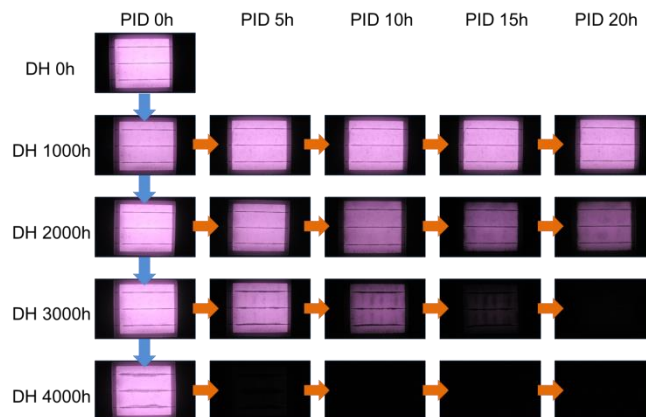
【石川県工業試験場】

①屋外でのPID実証試験

実環境でのPIDの実証試験を目的に、石川県工業試験場太陽光発電システムにおいて約18年間使用した太陽電池モジュール30台を直列に接続することで開放電圧を約1000V(従来は約400V)に高めた太陽電池ストリングを構成し、平成28年2月から継続して発電量を計測している。中間目標である2年間の測定データは、平成30年1月末までに得られる。日射量1kWh/m²あたりの1日の発電量は約2.5kWhで推移している。夏季の方が冬季よりも約20%発電量が低下するが、太陽電池モジュールの温度特性が約-0.5%/°Cであることから、夏季のモジュール温度が70°C以上まで上昇するのに対し、冬季のモジュール温度は40°C程度に留まるためと考える。

太陽電池の屋外曝露による劣化がPIDに及ぼす影響を検証するため、85°C、85%rhの高温高湿試験を1000~4000時間実施したp型多結晶Siの1セルモジュールに対して、PID試験を20時間実施した。高温高湿試験1000時間毎とPID試験5時間毎にEL画像を観察し、発電特性を測定した。撮影したEL画像を図III-2-(ホ)-B-4に示す。高温高湿試験単独で4000時間実施しても、著しいEL暗部の発生は確認できず、最大出力の低下は5%程度に留まった。一方、高温高湿試験後のPID試験では、事前の高温高湿試験時間が長くなるに従い、EL暗部の発生が速くなり、最大出力の低下度も大きくなった。また、高温高湿試験を4000時間実施した後のシャント抵抗は試験前と概ね一致したが、高温高湿試験後のPID試験時間が長くなるに従い、シャント抵抗は小さくなる傾向を示し、PIDが確実に進行していることが確認できた。これらのことから、事前の高温高湿試験によってモジュールがPIDを生じ易い状態へ変化したと考える。その理由は明確ではないが、高温高湿試験時にモジュール内部に浸入する水分によって、EVAの電気抵抗率が低くなることや、EVAの加水分解によって生じる酢酸の影響が考えられる。

本研究の中間目標としているPID発生時における特性の挙動として、湿熱環境に曝すことでPIDが生じ易くなるという結果を得た。これらの結果は、p型結晶Si系太陽電池において、高温多湿の地域であるほどPIDが起こり易く、太陽電池の設置環境によりPIDの起こり易さが異なることを示唆している。熱帯などの過酷環境に設置する場合には、気候が温和な地域に設置する場合よりもPID対策が重要であることが示唆される。



図III-2-(ホ)-B-4 EL画像

②太陽電池の解析

PIDの一因とされる太陽電池表面のガラスに含まれるナトリウム(Na)は、電流の経路に沿って移動し、太陽電池セルに到達することでPIDを発生させると推測できる。しかし、太陽電池に高電圧が印加された際の太陽電池モジュール内部における電流の分布や電流の経路は、未だ不明確である。これらを明確化できれば、PID発生箇所の特特定やPID対策の検討に活用できる。一方、モジュール部材として使用されるガラス、EVA、バックシートは、いずれも絶縁体であり、これらに流れる電流値が微小であることや、電流経路が不明であることから、電流の測定に適した箇所の特特定は困難である。また、電流センサをモジュールに組み込むと、その影響で電流経路が変化することや太陽電池の発電特性の評価が困難になることも課題である。

そこで、モジュールに対して高電圧が印加された際のモジュール内部における電流の分布と電流の経路をANSYS Maxwellで解析した。モジュールの断面モデルに対し、PID試験を模擬し、ガラス表面に対してインターコネクタへ直流-1000Vを印加した際の電流分布を解析した。その結

果、導電体部を除けば、セル端部において電流密度が高くなり、特にセル端とフィンガー電極端にかけてのセル内部の電流密度が高くなることがわかった。セル端部周辺の電流経路を解析した結果、ガラスとセルが対向している間に存在する EVA 内部では、ガラスから垂直下向きに電流が流れてセル表面のフィンガー電極へ到達する。垂直下方向にフィンガー電極が存在しない箇所では、電流は EVA からセルを経由してフィンガー電極へ到達する経路となる。ガラスに対向するセルが存在しない箇所においては、ガラスから垂直下向きに流れた電流が屈曲してセル端部からセル内部を経由してフィンガー電極へ到達する経路が主流となることがわかった。この経路により、セル端部周辺において電流が集中し、電流密度が高くなると考えられる。なお、屈曲してセル裏面のフィンガー電極へ直接到達する経路も確認できるが、セル表面のフィンガー電極に直接到達する経路や、セル端部を経由してフィンガー電極に到達する経路と比較して電流密度が小さいことから、セル裏面のフィンガー電極に直接到達する経路の電流が PID に及ぼす影響は、他の経路と比較して小さいと考える。

セル端部では、EVA からセル内部に向けて比較的高密度の電流が流れることもわかった。Na が電流の経路を移動するならば、電圧印加により Na はセル端部に集まり易く、セル端部付近において Na 濃度が高くなることが考えられる。Na のセル端部への集中は、セル端部において局所的に PID が発生する可能性や、セル端部を発端として PID が進行する可能性を示唆している。なお、岐阜大学においてセル端部における PID の局所発生を屋内実験で確認しており、傾向が一致していると考えられる。今後、セル端部に対する PID 対策案も併せて検討する。

【国立大学法人岐阜大学】

①PIDのメカニズムの解明

太陽電池モジュールの出力低下を引き起こす PID 現象は、太陽電池モジュールのカバーガラス中の Na、もしくはセル表面に汚染物質として存在する Na が原因の一つとされている。しかし、Na の移動過程など PID 発生メカニズムの詳細は明らかになっていない。本研究では Na の移動過程に注目し、太陽電池モジュールを構成するカバーガラス、EVA、セルのそれぞれにおいて、PID 加速試験前後の Na の分布評価を行った。

「カバーガラス」、「カバーガラス+EVA」、「カバーガラス+EVA+セル(太陽電池モジュール)」のそれぞれの構造において PID 加速試験を行った。PID 加速試験および回復試験は、アルミニウム法(± 2000 V, 85°C)を用いた。試料の評価には、X線光電子分光(XPS)法を用いた。

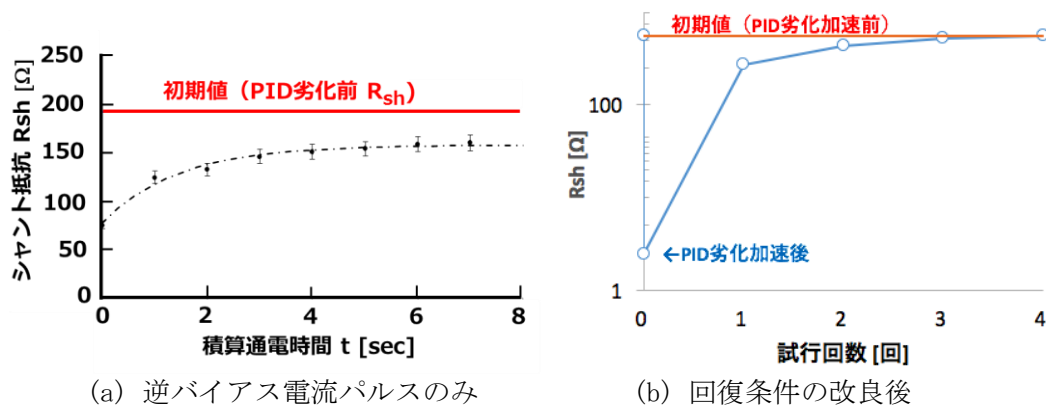
「カバーガラス」および「カバーガラス+EVA」の PID 加速試験前後の評価では、それぞれ電界印加によるガラス内部からの Na の析出および EVA 中への拡散を確認した。太陽電池モジュールにおける PID 加速試験前後の窒化膜表面の組成分析を行ったところ、Na は PID 加速試験前から存在していた。また、PID 加速試験時間が長くなるに従い、Na/Si 組成比が増加した。PID 加速試験(-2000 V, 12 時間)に引き続き PID 回復試験($+2000$ V, 6~48 時間)を行ったところ、Na/Si 組成比が減少した。このとき、PID 回復試験時間が 24 時間、48 時間の場合は、回復試験後の Na/Si 組成比が加速試験前以下にも関わらず、発電特性の明確な回復は見られなかった。XPS による検出限界以下もしくは、窒化膜表面より内部の Na が PID に強く影響していると考えられる。

②PID発生箇所の特定方法に関する研究開発

逆バイアスブレイクダウン EL 法における逆バイアス電圧を調整することで、PID 発生箇所のシャント抵抗に選択的に電流を注入し、局所的な発光像として特定できることを示した。可視光で照明して拡大撮影するとセル端部の発光が確認できた。

③PIDの回復技術と抑止技術の開発

逆バイアス電流パルスによって、PID 発生箇所のシャント抵抗に選択的に電流を注入して加熱することにより、複合的な PID メカニズムのうち、自己的な回復現象が誘起されるとの仮説に辿り着いた。②に示した方法により、PID 加速劣化前の発光箇所、PID 加速劣化後に生じたセル端部の発光、逆バイアス電流パルスによるセル端部の発光の消失を確認した。図Ⅲ-2-(ホ)-B-5 には本回復技術における回復の時間特性を示す。図Ⅲ-2-(ホ)-B-5(a)は逆バイアス電流パルスのみで回復した場合であり、シャント抵抗の回復に伴い注入できる電流値が減り、加熱による効果が飽和すると考えられる。図Ⅲ-2-(ホ)-B-5(b)はその対策として、条件を改良して回復を複数回試行した結果である。試行の度に回復が進み、3~4 回の試行でほぼ初期値まで回復することが示されている。



図III-2-(ホ)-B-5 逆バイアス電流パルスによるPID高速回復法(回復の時間特性)

【国立大学法人東京農工大学】

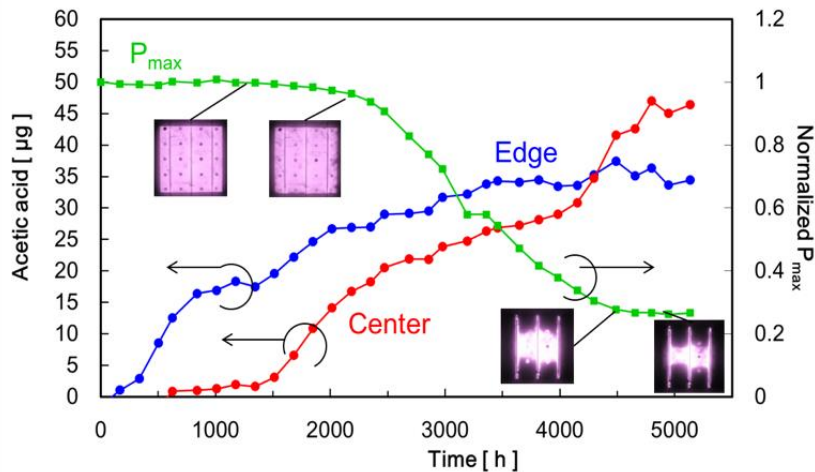
高温高湿試験中に太陽電池モジュール内に浸入する水分と封止材との加水分解反応によって発生、滞留する酢酸は、太陽電池セルのフィンガー電極の腐食を進行させ、発電性能劣化の主要な原因の一つと報告されている。そこで、本研究では、モジュールの外部から非破壊非接触でモジュール内部の酢酸発生状況を光学的に計測できる新規な酢酸検出センサの開発を目的とした。このために、①蛍光色素 pH センサ、②錫薄膜酢酸センサ、③表面プラズモン共鳴 (SPR) 酢酸センサを開発するとともに、それらを組み込んだ太陽電池モジュールを試作し、高温高湿試験中における酢酸センサ応答を実時間検出することで、モジュール内の酢酸発生経路と発生量を明確化する。これによって屋外でのモジュール劣化を再現可能な屋内加速試験方法を確立するとともに、当該加速試験法の屋外曝露に対する加速係数を算出することで太陽電池モジュール寿命の予測法の提案に寄与する。

①蛍光色素 pH センサの開発

フッ素樹脂メンブレンフィルターに pH 感受性蛍光色素 (SNARF-4F) を滴下して乾燥させた pH センサ 20 枚を大きさ 156 mm 角の太陽電池セルの上面に等間隔で配置するとともに、EVA を封止材とするモジュールを作製し、高温高湿試験 (85°C, 85%RH) における各 pH センサの蛍光スペクトルを計測して 2 波長蛍光強度比 (FIR) の値を記録した。得られた FIR 値から検量線により pH を算出して酢酸イオン濃度の変化を高温高湿試験時間に対して求めた。その結果、高温高湿試験開始から 800 時間程度までは、モジュール外周部は中央部に比べて酢酸イオン濃度の上昇率がほぼ倍であることがわかった。これはモジュールのバックシートから浸入した水分拡散の時間的遅れを表している。また、2600 時間過ぎから中央部の濃度が飽和傾向にあることがわかった。

②錫酢酸センサの開発

直径 8 mm のガラス基板に錫薄膜を厚さ 70 nm で成膜し、それらを 156 mm 角の太陽電池セル上に等間隔配置したモジュールに対して高温高湿試験を実施し、試験時間に対する錫酢酸センサの相対反射率変化を観測した。検量線を用いて酢酸発生量に変換した結果を図 III-2-(ホ)-B-6 に示す。ここでは、外周部センサと中央部センサの平均値を、また、電流-電圧特性から得られた最大出力の時間特性を示す。図 III-2-(ホ)-B-6 から、外周部では高温高湿試験初期から急激に酢酸量が上昇しているのに対して、中央部では 1500 時間ほど遅れて酢酸量の増加が見られる。また、高温高湿試験 4200 時間程度で外周部と中央部の酢酸量の逆転が見られる。この理由として、中央部に酢酸が滞留するのに対し、外周部の酢酸はモジュール端部から一部外部に放出されるため飽和傾向になることが考えられる。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-6 高温高湿試験時間に対する酢酸量と規格化最大出力 P_{max}

さらに、本研究申請時には計画していなかったが、実際の屋外曝露試験に近い状態での新たな加速評価試験法として、モジュールに予め紫外光を長期照射したのち高温高湿試験を実施し、酢酸の発生状況を調査することにした。紫外光照射を480時間実施したモジュールと、紫外光を照射していないモジュールに対する高温高湿試験開始から336時間までの規格化相対反射率を測定した。その結果、紫外光を照射することでモジュールエッジ部では約2倍の酢酸生成量であることや、中央部でも酢酸濃度が増加していることが明らかとなった。この原因として、紫外光照射することでEVA中に酢酸前駆体が生成され、高温高湿試験で浸入した水分により加水分解が促進された可能性が考えられる。

③表面プラズモン共鳴酢酸センサ

初期に提案した構造の金ナノ粒子局在表面プラズモン共鳴(LSPR)酢酸センサの特性を実験的に明らかにし、高温水だけで波長シフトが生じることが明らかとなった。この問題を解決するため、回折結合型プラズモンセンサを考案した。プラズモンは金属薄膜上の物質の屈折率に敏感であるため、EVAを接触させておけば、湿熱によるEVAの劣化による屈折率変化をプラズモン共鳴波長の変化として測定できる。実際に直径1 µmのシリカ粒子懸濁液をガラス基板上に滴下して作製した粒子配列構造上に、クロム膜(5 nm)と金薄膜(50 nm)を蒸着してSPRセンサを製作し、反射光度スペクトルを測定した。その結果、単位屈折率当たり842 nm/RIUの感度が得られた。今後、SPRセンサを内挿したモジュールの高温高湿試験を実施する予定である。

本研究における中間目標数値は、高温高湿試験3000時間のセンサ基板耐久性と100~5000ppmの酢酸濃度検出を達成することである。これに対して、本研究の実施により蛍光色素pHセンサおよび錫酢酸センサによって4000時間超の耐久性と100~12000ppmの酢酸濃度を検出できることが明らかとなった。即ち、高温高湿試験に伴うモジュール内部での酢酸発生と酢酸の拡散動態を十分明らかにできていた。既存の計測法であるイオンクロマトグラフィー法やラマン散乱分光法は、破壊的であったり、定量性や感度などの課題があるのに対して、本研究により、モジュール内部の酢酸の発生と挙動を100時間程度の時間間隔でかつ2次元的に明らかにできたことは、世界でも初の成果であり、モジュールの屋内加速試験法の開発と寿命予測法の提案に大きく貢献できると考えられる。

【国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学】

①リアエミッター型モジュールのPID

n型リアエミッター型結晶Si太陽電池モジュールの、85°C、-1000 V印加における1 sun下での電流密度-電圧特性変化を観測したところ、1時間のPID試験により、開放電圧がわずかに減少するが、その後の計24時間のPID試験において、開放電圧の減少は飽和傾向にあった。短絡電流密度および曲線因子のわずかな減少も見られたが、n型リアエミッター型結晶Si太陽電池モジュールのPIDは、主に短時間での開放電圧の低下で特徴づけられることを見出した。また、外部量子効率スペクトルにおいて、PID試験後に短波長領域でのわずかな低減を確認した。この結果は、光入射側の表面における少数キャリア再結合が促進されたことを示しており、これが開放電圧低減の原因であると考えられる。この表面再結合速度の増大は、カバーガラスなどから結晶Si内に侵入したNaが再結合中心として働

いたためと考えられる。

②Si ヘテロ接合モジュールの PID

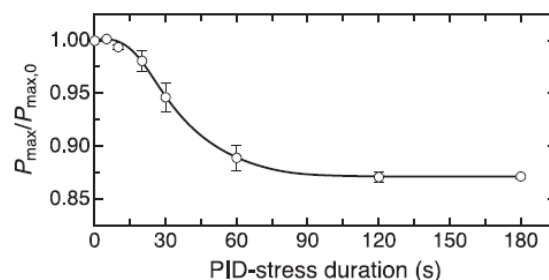
Si ヘテロ接合 (SHJ) モジュールの、85°C、-1000 V 印加における 1 sun 下での電流密度-電圧特性の変化を観測した。PID 試験時間の増大に従い、短絡電流密度のみが低減する振る舞いが確認された。一方、開放電圧や曲線因子に大きな変化は見られなかった。外部量子効率スペクトルでは、全波長領域における低減が見られ、光学損失に起因する短絡電流密度低下であることが示唆された。PID 試験により、SHJ セル表面のタングステン添加酸化インジウム (IWO) 膜が還元され、金属インジウムが析出したことを、X 線吸収微細構造解析で確認しており、これが光学損失の原因であると考えられる。また、PID 試験を続けることで、開放電圧の低下も発現する。これは、結晶 Si 内に侵入した Na が再結合中心として働いたためと考えられる。結晶 Si への Na の侵入は、二次イオン質量分析で確認した。

③フロントエミッター型モジュールの PID

図Ⅲ-2-(ホ)-B-7 に、n 型フロントエミッター型結晶 Si 太陽電池モジュールにおける、85°C、-1000 V 印加の PID 試験による 1 sun 下での初期値で規格化した最大出力の変化を示す。電流密度-電圧特性から、短絡電流密度と開放電圧の低下に特徴づけられる PID が発現していることを確認している。また、これらの劣化は 120 秒以内の短時間で急速に進行し、その後飽和する傾向にあることを見出した。短絡電流密度と開放電圧の低下は、負バイアス印加によるセル表面の窒化 Si 膜への正電荷蓄積に起因すると考えると矛盾なく説明できる。劣化が飽和する現象は、窒化 Si 膜の蓄積電荷量に上限があることを示している。このことは、印加するバイアスを変化した場合に、劣化の速度のみが変化し、飽和値は一致する結果からも示唆される。また、さらに長時間の PID 試験を行うと、曲線因子と開放電圧の低下が新たに起きることも明らかにした。曲線因子の低下は、ダイオードの理想因子の上昇によるものであり、p 型セルで見られるような、並列抵抗の低下による PID ではないことも明らかにした。

④セルレベルでの PID 試験装置の開発

セルレベルでの PID 試験が行える装置を構築した。モジュール構造を模してガラス/封止材/セルを積層した構造を接地した下部金属電極上に置き、密着性を高めるために、上から錘電極を載せ、下部電極との間にバイアスを印加する。上部電極への正バイアス印加は、通常の PID 試験において、セルに対し負バイアスを印加することに対応する。本試験により、シャントパス形成による曲線因子の低下に特徴づけられる汎用の p 型結晶 Si 太陽電池モジュールにおける PID と、短絡電流密度と開放電圧の急速な低減が見られる n 型フロントエミッター型結晶 Si 太陽電池モジュールの PID を再現できることを確認した。モジュールでの PID 試験では、EVA で強固に封止されているセルを取り出して分析を行うのが困難であった。本手法の確立により、セルへの Na 侵入や積層欠陥形成の微細観察、SHJ セルにおける透明導電膜の還元の単膜試料での確認など、材料物性を直接分析することが可能となった。



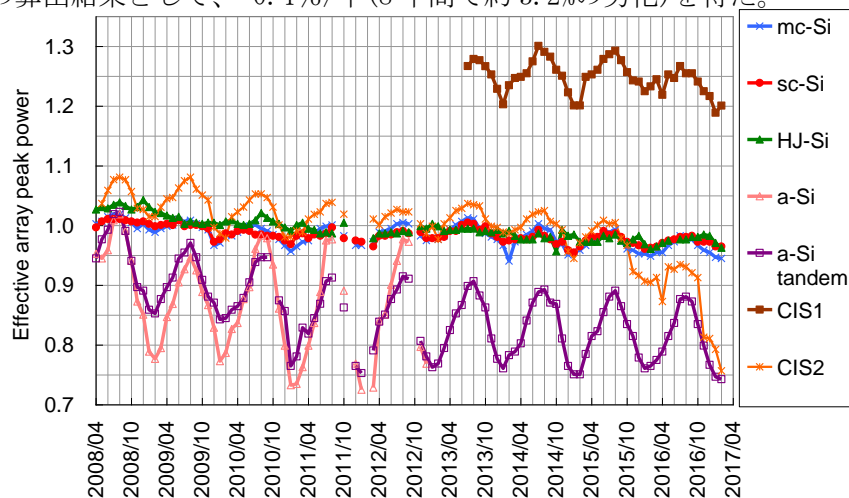
図Ⅲ-2-(ホ)-B-7 n 型フロントエミッター型モジュールの PID 試験による規格化最大出力 P_{\max} の変化

【学校法人東京理科大学】

①北杜メガソーラの発電データの取得および分析の実施

山梨県北杜市にて 2008 年より運用を行っている北杜メガソーラにおいて、北杜市の協力を得て発電データ等の取得を行い、第 1 期設置システム(モジュールおよびシステム)について発電特性の分析を実施できる環境を整備した。取得したデータを用いて発電特性を分析した結果として、2008 年からの分析結果とあわせて太陽電池の種類毎に代表的なシステムのシステム出力係数を算出した。また、劣化状況の分析結果として、SV 法(Level 5)におけるアレイ実効最大出力係数の算出結果を図Ⅲ-2-(ホ)-B-8 に示す。アレイ実効最大出力係数は、屋内での標準試験条件下での測定に対して、温度や日陰、入射角などの屋外条件下で生じる発電特性に影響する様々な要因を定量的に分離した後に得られる値で

あり、システムの実環境下での発電性能を示す。アレイ実効最大出力係数が 1.0 であれば銘板値どおりの性能を示していることを意味する。結果より、システム設置から 3 年が経過した 2011 年以降の分析において、結晶 Si 系のモジュールを用いたシステムにおいては明確な劣化傾向は見られず、現在まで安定した発電性能を維持していることを確認した。8 年目時点での結晶 Si 系 47 システムにおける平均的な年劣化率の算出結果として、 $-0.4\%/年$ (8 年間で約 3.2%の劣化)を得た。



図Ⅲ-2-(ホ)-B-8 アレイ実効最大出力係数の算出結果。

②モジュール屋内測定と屋外データによる劣化率の評価解析

北杜メガソーラで運用している各種モジュールの中から多結晶 Si、単結晶 Si、SHJ、バックコンタクト型 Si、化合物薄膜を選び、モジュール評価スペースにて電流-電圧測定を行っていたモジュール、および一部の種類においては 10 kW のシステム内で運用されていたモジュールと、新品または 1 年未満の屋外曝露後に約 7 年間暗所保管されていたモジュールの標準試験条件下における発電性能を屋内にて測定した。結果より、結晶シリコン系 5 種の平均値として初期測定からの出力低下が約 7 年間で 2.2%であり、2.2 年目～7 年目の期間の劣化は測定誤差の範囲内と非常に小さかった。劣化量は、同一種の銘板値を基準としたシステム劣化率の算出結果(19 システム抽出、7 年間の劣化量に換算して平均 2.2%)と極めてよく一致しており、モジュール屋内測定結果に対する屋外測定データを用いた劣化率の算出精度として定めた $\pm 10\%$ 以内(平均)との中間目標を大幅に上回る結果を得た。

③STEP-PV の改修

最終目標の確実な達成に向け、「大規模太陽光発電システム導入と運用のための検討支援ツール」(通称 STEP-PV ver. 2)を開発した。本ツールは NEDO ホームページより一般公開予定である。主な改修点は以下のとおりである。

- i) METPV-11 に基づく推定発電電力量算出機能。(METPV-3 から METPV-11 に変更)
- ii) 気象庁の日射量データと気温データに基づく推定発電電力量算出機能。
- iii) 気象庁の日照時間データと気温データに基づく推定発電電力量算出機能。
- iv) NEDO-FT フォーマットで出力された傾斜面日射量データ、気温データに基づく推定発電電力量算出機能、および推定発電電力量と実績発電電力量のグラフ表示機能。
- v) NEDO-FT フォーマットで出力された水平面全天日射量データ、気温データに基づく推定発電電力量算出機能、および推定発電電力量と実績発電電力量のグラフ表示機能。
- vi) 年劣化率、アレイ定格補正係数、パワーコンディショナ (PCS) 待機電力の直接入力機能。
- vii) PCS の変換効率の直接入力機能。
- viii) PCS 定格容量よりアレイ定格容量が大きい(いわゆる過積載)システムの推定発電電力量算出に対応。

2. 実用化・事業化見通し

・酢酸蒸気曝露試験については国際標準化が決定しており、従来の高温高湿試験に比べて 1/70 程度に試験時間を短縮可能な試験法として実用化することが確実である。酢酸蒸気曝露試験そのものは簡便であるが、メーカーに採用される場合は、量産工程用試験装置として装置メーカーでの開発が進むことも予想される。

- ・本研究開発で明確化したモジュール劣化機構に基づき、モジュール信頼性向上を実現するモジュール部材や構造に対する指針を提示することが可能であり、当該指針に基づき製造される信頼性の高いモジュールが普及し、生涯発電量向上、発電コスト低減に資することが期待される。
- ・本研究開発により得られた部材設計指針、加速試験条件等についても、国際標準化会議へ提言を行うことにより、国際標準へと順次反映できる。
- ・PID 回復技術は、実用化・事業化の見地から知財確保に積極的に取り組み、2 件を出願し、現在 1 件の出願手続きを進めている。本回復技術について、イノベーション・ジャパン 2017 大学見本市(2017 年 8 月 31 日～9 月 1 日、於：東京ビッグサイト)にて科学技術振興機構に出展を採択されている。
- ・北杜メガソーラにおいて分析した実際のシステムの発電特性から得られた知見を活用し、実測日射量を用いた推定発電電力量算出機能を実装したほか、ユーザビリティの向上も同時に行った「大規模太陽光発電システム導入と運用のための検討支援ツール」(通称 STEP-PV ver. 2)を開発した。本ツールは発電事業者の発電設備維持管理において簡易的な発電性能確認機能を提供できることから、多くの利用が見込まれる。

3. 波及効果

- ・セルの酢酸蒸気曝露試験は、セルの電極ペーストの良否判定に極めて有効に活用できる。従来は、新たに開発された電極ペーストを用いたセルをモジュール化し、長時間の高温高湿試験を経て、初めて良否が判定できた。本研究において、モジュールに対する高温高湿試験と同等の劣化を、モジュール化せずともセルの電極に生じさせる酢酸蒸気曝露試験を開発したが、当該試験では高温高湿試験の約 1/70 に試験時間を短縮できるばかりでなく、モジュール化工程を必要としない。さらに、モジュール化していないため、試験後のペースト材料の分析が極めて容易であり、電極開発へ簡便にフィードバック可能である。本研究は、モジュールの劣化現象解明と試験法構築を目指した共通基盤技術の開発を目的としているが、高品質セルの開発に大いに資する試験法を開発し標準化できたことの意義は極めて大きい。既に国内電極ペーストメーカーとの連携も進めている。
- ・本研究で新規に開発した紫外光照射との複合加速試験等では、試験装置開発が進み、装置産業活性化への波及効果も期待できる。
- ・本研究では、閉所空間でかつ非破壊で検出でき、湿熱環境下で計測できる酢酸センサを開発したが、このようなセンサはこれまでにまったく開発されていない。このセンサの特徴を發揮できる応用分野としては、過酷環境下での酸性度の計測センサとしての利用がある。たとえば、アルコールや食品の醸造技術における酸性度モニタリングや、酸性雨に伴う建造物の腐食・健全度のモニタリングなどへの応用展開が考えられる。

4. 今後の展開

- ・これまでの研究開発において、モジュールの劣化現象には多くの場合、(紫外) 光照射が大きく影響していることが明らかとなった。その効果は単純ではなく、湿熱環境での劣化については光照射が劣化を促進し、PID については光照射が劣化を抑制する。屋外曝露時には光はモジュールに必ず照射されるものであり、光照射なしに加速試験を行っても、屋外で生じる実際の劣化を惹起できないばかりでなく、信頼性を評価するのに不十分な試験にすぎないこともあれば、不必要に過剰な試験となることもある。このような状況をふまえ、今後は、以下の方針で研究開発を進めていく。
 - 1) 光照射との組合せ試験によりモジュールに生じる劣化メカニズムを解明するとともに、当該劣化と屋外曝露で生じる劣化を比較し、加速試験時の光照射の必要性を明確化する。
 - 2) 光照射との組合せ試験がコスト面等で汎用試験になりにくいことから、光照射と同等の効果をもたらす代替負荷を探索する。代替負荷としては、セルへのバイアス電圧印加等が考えられる。
 - 3) 光照射もしくは代替負荷との組合せ試験の国際標準化を推進する。
- ・屋外環境では様々な負荷の組合せによりモジュールの劣化が進行するため、光照射に限らず負荷の組合せ試験(複合試験)は重要である。上記方針により光照射との組合せ試験に重点を置くものの、他の負荷の組合せ試験についても、引き続き検討する。
- ・PID については未着手のバックコンタクトモジュールでの試験に取り組むとともに、n 型モジュールでの光照射効果についても検討する。さらには、PID 抑止対策にも本格的に着手し、モジュールの信頼性向上にも資する成果を目指す。
- ・本研究開発では、部材メーカーだけでなく、大学や公設試と連携して研究に取り組んだが、モジュールの劣化メカニズム解明に向けて、大学等の知見や独自の評価技術を活用できた意義は極めて大きい。モジュール信頼性のテーマはこれまでは経験則に基づいて語られることが多かったが、今回

の研究成果の学会や論文での発表により、学界でのコミュニティも形成されるとともに、ようやく科学の域に近づけたと感じる。モジュールは、半導体、高分子、セラミックス、金属等の多様な材料で構成された複合デバイスであり、高温高湿試験時の EVA/セル界面での選択的な酢酸発生等、各種材料間の界面での反応が劣化メカニズムと大きく関係していることも明らかになった。これらの複雑なメカニズムを明確化していくためには、特定の部材の専門家だけで対応できるものではなく、各部材の専門家の知見を統合して臨む必要がある。今後も大学等との連携を一層強化するとともに、得られた知見は学門的に体系化を図ることにより、産業界へ貢献するのみならず、学術的にも大きく貢献することができる。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	1	1	1	3 件
論文	3	8	3	14 件
研究発表・講演（うち国際会議）	22(4)	84(25)	63(24)	169 件
新聞・雑誌等への掲載	1	2	2	5 件
受賞・標準化	2	1	3	6 件
展示	1	2	3	6 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	岐阜大学	特願 2016- 56313	国内	2016/3/18	出願済	太陽電池の性能劣化回復方法	吉田弘樹 他
2	岐阜大学	特願 2017- 36400	国内	2017/2/28	出願済	太陽電池の性能劣化回復装置および方法	吉田弘樹 他
3	岐阜大学	特願 2017-164885	国内	2017/8/29	出願済	太陽電池の性能劣化を回復する装置およびその方法	吉田弘樹 他

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	萩原 英昭	産業技術総合研究所	高分子材料の劣化研究における陽電子消滅寿命測定法の活用	陽電子科学, 6, 29-34	有	2016/3/1
2	Thierry Fouquet 中村 清香 佐藤 浩昭	産業技術総合研究所	MALDI Spiral TOF high-resolution mass spectrometry and Kendrick mass defect analysis applied to the characterization of poly(ethylene-co-vinyl acetate) copolymers	Communications in Mass Spectrometry, 30, 973-981.	有	2016/3/8
3	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Behavior of the potential-induced degradation of photovoltaic modules fabricated using flat mono-crystalline silicon cells with different surface orientations	Japanese Journal of Applied Physics, 55(4S), 04ES14-1-5.	有	2016/3/24

4	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端 科学技術 大学院大 学 産業技術 総合研究 所	Changes in the current density-voltage and external quantum efficiency characteristics of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules with a rear-side emitter undergoing potential-induced degradation	Solar Energy Materials and Solar Cells, 151, 113-119.	有	2016/07
5	Hideaki Hagihara Masao Kunioka Hiroyuki Suda Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所	Degradation of encapsulants for photovoltaic modules made of ethylene vinyl acetate studied by positron annihilation lifetime spectroscopy	Japanese Journal of Applied Physics, 55(10), 102302-1-5.	有	2016/9/14
6	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端 科学技術 大学院大 学 産業技術 総合研究 所	Progression of rapid potential-induced degradation of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules	Applied Physics Express, 9(11), 112301-1-4.	有	2016/10/21
7	Atsushi Masuda Chizuko Yamamoto Tadanori Tanahashi Hitoshi Sai Takuya Matsui	産業技術 総合研究 所	Direct evidence for pn junction without degradation in crystalline Si photovoltaic modules under hygrothermal stresses	Proceedings of 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 904-906.	無	2016
8	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端 科学技術 大学院大 学 産業技術 総合研究 所	Potential-induced degradation behavior of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules with a rear-side emitter	Proceedings of 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 938-942.	無	2016

9	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所	Electrical detection of gap formation underneath finger electrodes on c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor under hygrothermal conditions	Proceedings of 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 1075-1079.	無	2016
10	Atsushi Masuda Yukiko Hara	産業技術 総合研究 所	Potential-induced degradation of thin-film Si photovoltaic modules	Japanese Journal of Applied Physics, 56(4S), 04CS04-1-5.	有	2017/2/15
11	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端 科学技術 大学院大 学 産業技術 総合研究 所	Reduction in the short- circuit current density of silicon heterojunction photovoltaic modules subjected to potential- induced degradation tests	Solar Energy Materials and Solar Cells, 161, 439-443.	有	2017/3
12	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所	Cause of current- collection failure observed in Isc-reduction phase of PV cells and modules exposed to acetic acid	Proceedings of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, in press.	無	2017
13	Naoyuki Nishikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端 科学技術 大学院大 学	Potential-induced degradation of a Si nitride/crystalline Si interface observed through minority carrier lifetime measurement	Proceedings of 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, in press.	無	2017
14	Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端 科学技術 大学院大 学	Degradation behavior of crystalline silicon solar cells in a cell-level potential-induced degradation test	Solar Energy, 155, 739-744	有	2017. 10

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	萩原 英昭 国岡 正雄 須田 洋幸 原 由希子 増田 淳	産業技術総合研究所	陽電子消滅寿命法による太陽電池封止用エチレンビニルアセテート樹脂の劣化解析	マテリアルライフ学会第 26 回研究発表会	2015/7/3
2	萩原 英昭 国岡 正雄 須田 洋幸 原 由希子 増田 淳	産業技術総合研究所	陽電子消滅寿命法による太陽電池封止材の劣化解析	第 52 回アイソトープ・放射線研究発表会	2015/7/7
3	辺田 祐志 Thi Hong Trang Ngo 土井 卓也 増田 淳	デュポン 産業技術総合研究所	紫外光照射と信頼性 (招待講演)	独立行政法人日本学術振興会産学協力研究委員会次世代の太陽光発電システム第 175 委員会モジュール・システム分科会第 2 回研究会・次世代シリコン太陽電池分科会第 3 回研究会合同研究会	2015/7/22
4	Taisei Kitamoto Yuzuru Ueda	東京理科大学	Output estimation of the crystalline silicon PV module by linear interpolation method	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/14
5	山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	異なる面方位を有する平面基板を用いて作製された単結晶シリコン太陽電池の電圧誘起劣化挙動	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15
6	棚橋 紀悟 増田 淳	産業技術総合研究所	c-Si PV モジュールにおける湿熱ストレス誘引劣化の解析方法	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15
7	浅香 孝 板山 知広 若生 峻太郎 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	ナノ構造 pH センサーによる太陽電池モジュール内の発生酢酸分布の評価	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15

8	板山 知広 浅香 孝 若生 峻太郎 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	Sn 薄膜の相対反射率変化による太陽電池モジュール内の酢酸検出	第 76 回応用物理学会 秋季学術講演会	2015/9/15
9	萩原 英昭 国岡 正雄 須田 洋幸 増田 淳 原 由希子 伊藤 賢志 大島 永康	産業技術総合研究所	陽電子消滅法による高分子の表面／界面近傍の自由体積空隙の評価	第 64 回高分子討論会	2015/9/15
10	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Behavior of the potential-induced degradation for photovoltaic modules fabricated using flat mono-crystalline silicon cells with different surface orientations	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials	2015/9/29
11	Yuzuru Ueda	東京理科大学	System performance and degradation analysis of different PV technologies (招待講演)	4th PV Performance Modelling and Monitoring Workshop	2015/10/23
12	植田 讓	東京理科大学	北杜メガソーラの長期発電特性分析と劣化率評価	平成 27 年度日本太陽エネルギー学会日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2015/11/27
13	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Electrical detection of gap formation underneath finger electrodes on c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor under hygrothermal conditions	2016 PV Module Reliability Workshop	2016/2/24
14	北本大晟 植田 讓	東京理科大学	有効日射を用いた線形補間法による太陽電池の出力推定	平成 28 年電気学会全国大会	2016/3/16

15	棚橋 紀悟 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	酢酸蒸気曝露環境における c-Si PV セル劣化機構の解析	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
16	城内 紗千子 増田 淳	産業技術総合研究所	p 型結晶シリコン太陽電池モジュールにおける PID 現象と Na 拡散の関係	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
17	大橋 史隆 宮腰 悠平 水野 佳貴 イン マング マング 吉田 弘樹 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化加速試験により拡散した太陽電池モジュール用部材内の Na の評価	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
18	山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	裏面側にエミッターを有する n 型 c-Si 太陽電池モジュールの PID 挙動	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
19	吉田 弘樹 志知 拓弥 イン マング マング 大橋 史隆 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化した太陽電池モジュールのレーザー加熱による回復	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/19
20	板山 知広 浅香 孝 若生 峻太郎 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	金属薄膜の相対反射率変化による太陽電池モジュール内の酢酸検出	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/21
21	若生 峻太郎 浅香 孝 板山 知広 長崎 秀昭 岩見 健太郎 梅田 倫弘 山本 千津子 原 由希子 増田 淳	東京農工大学 産業技術総合研究所	太陽電池モジュール内酢酸検出のための金ナノコンポジット LSPR センサの開発	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/21

22	長崎 秀昭 浅香 孝 板山 知広 若生 峻太郎 岩見 健太郎 梅田 倫弘 山本 千津子 原 由希子 増田 淳	東京農工大学 産業技術総合研究所	pH感受性蛍光色素を用いた太陽電池モジュール内酢酸検出センサの信頼性向上	第63回応用物理学会 春季学術講演会	2016/3/21
23	橋 泰至 豊田 丈紫 中野 幸一 加藤 直孝 原 由希子 増田 淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	高温高湿環境での太陽電池の劣化がPIDに及ぼす影響	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
24	山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n型リアエミッター型結晶シリコン太陽電池の電圧誘起劣化挙動	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
25	大橋 史隆 水野 佳貴 吉田 弘樹 イン マング マング 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化加速試験における太陽電池モジュール部材内のNa移動過程の評価	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
26	吉田 弘樹 志知 拓弥 イン マング マング 大橋 史隆 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化した太陽電池モジュールの光照射による回復の加速	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
27	棚橋 紀悟 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	c-Si PVモジュールにおける寿命評価指標の探索	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
28	長崎 秀昭 浅香 孝 板山 知広 若生 峻太郎 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	pH感受性蛍光色素を用いた太陽電池モジュール内酢酸検出センサの開発	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19

29	板山 知広 浅香 孝 若生 峻太郎 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜の相対反射率変化による太陽電池モジュール内酢酸検出	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/19
30	城内 紗千子 萩原 英昭 佐藤 浩昭 増田 淳	産業技術総合研究所	p型結晶Si太陽電池におけるPIDのメカニズムについて	第13回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2016/5/20
31	Atsushi Masuda Chizuko Yamamoto Tadanori Tanahashi Hitoshi Sai Takuya Matsui	産業技術総合研究所	Direct evidence for pn junction without degradation in crystalline Si photovoltaic modules under hygrothermal stresses	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/7
32	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation behavior of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules with a rear-side emitter	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/7
33	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Electrical detection of gap formation underneath finger electrodes on c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor under hygrothermal conditions	43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2016/6/7
34	増田 淳 原 浩二郎	産業技術総合研究所	各種太陽電池モジュールのPID現象と抑止法	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/15
35	棚橋 紀悟 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	結晶シリコン太陽電池モジュールにおける寿命評価指標の探索	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/15 2016/6/16
36	原 由希子 増田 淳	産業技術総合研究所	薄膜シリコン太陽電池のPID劣化現象と逆電圧印加効果	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16

37	大橋 史隆 吉田 弘樹 イン マング マング 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総 合研究所	電圧誘起劣化加速試験に よる太陽電池モジュール 部材中を移動する Na の化 学状態評価	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
38	城内 紗千子 萩原 英昭 佐藤 浩昭 増田 淳	産業技術総 合研究所	p 型結晶 Si 太陽電池にお ける PID のメカニズムの 解明	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
39	橘 泰至 豊田 丈紫 中野 幸一 南川 俊治 原 由希子 増田 淳	石川県工業 試験場 産業技術総 合研究所	高温高湿環境での太陽電 池の劣化が PID に及ぼす 影響	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
40	吉田 弘樹 大橋 史隆 イン マング マング 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総 合研究所	光照射による電圧誘起劣 化回復の加速技術の開発	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
41	山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科 学技術大学 院大学 産業技術総 合研究所	裏面側に p ⁺ エミッターを 有する n 型単結晶シリコ ン太陽電池の電圧誘起劣 化	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
42	山本 千津子 山口 世力 大平 圭介 増田 淳	産業技術総 合研究所 北陸先端科 学技術大学 院大学	ヘテロ接合結晶シリコン 太陽電池の PID 試験	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
43	佐藤 浩昭 Thierry Fouquet 城内 紗千子 増田 淳	産業技術総 合研究所	高分解能質量分析法を用 いた EVA の劣化解析	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
44	萩原 英昭 国岡 正雄 須田 洋幸 原 由希子 増田 淳	産業技術総 合研究所	陽電子消滅寿命法による 結晶 Si 太陽電池封止材の 劣化解析	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16

45	長崎 秀昭 浅香 孝 板山 知広 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	pH感受性蛍光色素を用いた太陽電池モジュール内酢酸検出センサの開発	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
46	板山 知広 浅香 孝 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜の相対反射率変化による太陽電池モジュール内酢酸検出	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
47	辺田 祐志 松尾 春美 増田 淳	デュポン 産業技術総合研究所	紫外線照射を含む複合加速試験による封止材劣化の解析	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2016	2016/6/16
48	山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	結晶シリコン太陽電池モジュールの電圧誘起劣化現象における基板面方位の影響	第13回 Cat-CVD 研究会	2016/7/8
49	大橋 史隆	岐阜大学	太陽電池モジュールの電圧誘起劣化現象(PID) (招待講演)	独立行政法人日本学術振興会産学協力研究委員会次世代の太陽光発電システム第175委員会モジュール・システム分科会第4回研究会	2016/7/29
50	橋 泰至 豊田 丈紫 南川 俊治 原 由希子 増田 淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	高温高湿環境が結晶 Si 太陽電池の PID に及ぼす影響	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
51	原 由希子 増田 淳	産業技術総合研究所	結晶シリコン太陽電池の光照射 PID 試験	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
52	城内 紗千子 増田 淳	産業技術総合研究所	p型 c-Si 太陽電池モジュールにおける PID と Na の拡散の関係	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
53	大橋 史隆 水野 佳貴 イン マング マング 吉田 弘樹 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化加速試験により移動した太陽電池表面における Na の分布評価	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14

54	西川 斉志 山口 世力 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学	SiN _x 膜のパッシベーション性能の電圧誘起劣化	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
55	棚橋 紀悟 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	c-Si 太陽電池における電極腐食過程の解析	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
56	板山 知広 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜の相対反射率変化による太陽電池モジュール内酢酸検出	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
57	森田 秀幸 岡 善之 増田 淳	東レ 産業技術総合研究所	太陽電池モジュールへの光照射と湿熱処理の組み合わせ試験	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
58	増田 淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュール信頼性の現状と今後の展開：はじめに	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
59	植田 譲	東京理科大学	北杜メガソーラにおける各種太陽電池モジュールの長期発電性能評価 (招待講演)	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
60	辺田 祐志 Trang Ngo 青木 倫子 土井 卓也 増田 淳 William J. Gambogi Thomas Felder Alexander Bradley Katherine Stika Mason Terry T. John Trout	デュポン 産業技術総合研究所 E. I. DuPont	太陽電池モジュールの劣化に及ぼす光照射の影響 (招待講演)	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
61	山口 世力 原 浩二郎 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n型 c-Si 太陽電池モジュールの電圧誘起劣化における飽和挙動	第77回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14

62	長崎 秀昭 板山 知広 Nguyen Van Quyen 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大 学 産業技術総 合研究所	ベントナイト担持 pH 感受 性蛍光色素を用いた太陽 電池モジュール内酢酸検 出センサの開発	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/15
63	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Potential-induced degradation for thin- film Si photovoltaic modules	2016 International Conference on Solid State Devices and Materials	2016/9/29
64	Keisuke Ohdaira Seira Yamaguchi Kohjiro Hara Atsushi Masuda	北陸先端科 学技術大学 院大学 産業技術総 合研究所	Potential-induced degradation of photovoltaic modules with n-type crystalline silicon bifacial cells (招待講演)	3rd bifi PV workshop	2016/9/30
65	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Potential-induced degradation and recovery process for thin-film Si photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4
66	Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科 学技術大学 院大学 産業技術総 合研究所	Progression behavior of the potential-induced degradation of n-type c-Si-wafer-based photovoltaic modules with a front-side p+ emitter	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4
67	Hideyuki Morita Miki Terada Yoshiyuki Oka Kentaro Mori Atsushi Masuda	東レ 産業技術総 合研究所	Combined test of UV irradiation and highly accelerated hygrothermal treatment for photovoltaic modules using light source with high intensity	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4

68	Hideaki Nagasaki Tomohiro Itayama Kentaro Iwami Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大学 産業技術総合研究所	Developing an acetic acid detection sensor for photovoltaic modules using a pH-sensitive fluorescent dye	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4
69	Keisuke Ohdaira Seira Yamaguchi Chizuko Yamamoto Kohjiro Hara Atsushi Masuda	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation of n-type crystalline silicon photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/4
70	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Degradation mechanisms of c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
71	Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda Toshiharu Minamikawa Yukiko Hara Atsushi Masuda	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	Effects of hygrothermal environment on PID acceleration for crystalline Si photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
72	Fumitaka Ohashi Hiroki Yoshida Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Na migration process in crystalline Si photovoltaic modules by potential induced degradation test	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5

73	Naoyuki Nishikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学	Activation of surface recombination at a SiN _x /n-type c-Si interface after potential-induced degradation	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
74	Chizuko Yamamoto Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira Atsushi Masuda	産業技術総合研究所 北陸先端科学技術大学院大学	Potential-induced degradation for silicon heterojunction photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
75	Sachiko Jonai Hideaki Hagihara Hiroaki Sato Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Mechanism of potential-induced degradation for p-type crystalline silicon photovoltaic modules	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
76	Tomohiro Itayama Hideaki Nagasaki Kentaro Iwami Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大学 産業技術総合研究所	Detecting acetic acid in photovoltaic modules through changes in the relative reflectance of tin films	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
77	萩原 英昭 国岡 正雄 須田 洋幸 原 由希子 城内 紗千子 増田 淳	産業技術総合研究所	陽電子消滅寿命測定による太陽電池封止材の劣化構造解析	第 21 回高分子分析討論会	2016/10/20

78	Atsushi Masuda Chizuko Yamamoto Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	産業技術総合研究所 北陸先端科学技術大学院大学	Progression of rapid potential-induced degradation of n-type single-crystalline silicon photovoltaic modules	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
79	Tadanori Tanahashi Yukiko Hara Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Acceleration factor of high-speed degradation of photovoltaic cells exposed to acetic acid vapor against that observed in photovoltaic modules tested under damp heat stress conditions	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
80	Sachiko Jonai Hideaki Hagihara Hiroaki Sato Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Root cause of potential induced degradation for p-type crystalline silicon photovoltaic modules	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
81	Seira Yamaguchi Kohjiro Hara Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Time dependence and saturation behavior of the potential-induced degradation of n-type front-emitter photovoltaic modules	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
82	Fumitaka Ohashi Yoshiki Mizuno Hiroki Yoshida Yin Maung Maung Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総合研究所	Migration and distribution analysis of Na in photovoltaic modules by potential induced degradation test	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
83	Taisei Kitamoto Yuzuru Ueda	東京理科大学	The development of PV module degradation analysis method	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27

84	Atsushi Masuda Kohjiro Hara	産業技術総合研究所	Potential-induced degradation for various kinds of photovoltaic modules (招待講演)	2nd Singapore-Japan Joint Workshop on Photovoltaics, Singapore	2016/10/28
85	森田 秀幸 寺田 幹 森 健太郎 増田 淳	東レ産業技術総合研究所	メタルハライドランプを用いた光照射試験と湿熱試験の組み合わせ試験	平成 28 年度日本太陽エネルギー学会日本風力エネルギー学会合同研究発表会	2016/11/24
86	濱岡 遼 長崎 秀昭 板山 知広 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	太陽電池モジュール内酢酸検出のための錫薄膜センサの長寿命化	第 1 回フォトニクス研究会「光の境界を開拓する!!」	2016/12/2
87	Nguyen Van Quyen 板山 知広 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	局在表面プラズモン共鳴による太陽電池モジュール内樹脂封止材劣化の評価	第 1 回フォトニクス研究会「光の境界を開拓する!!」	2016/12/2
88	増田 淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュールの劣化メカニズムと加速試験法 (招待講演)	共同シンポジウム (金沢大学・北陸先端科学技術大学院大学) 「エネルギー創製デバイスの将来展望」	2016/12/14
89	棚橋 紀悟 原 由希子 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	c-Si 太陽電池における酢酸による電極腐食過程の解析 (招待講演)	独立行政法人日本学術振興会産学協力研究委員会次世代の太陽光発電システム第 175 委員会モジュール・システム分科会第 5 回研究会	2016/12/16
90	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Cause of current-collection failure observed in Isc-reduction phase of PV cells and modules exposed to acetic acid	2017 NREL/SNL/BNL PV Reliability Workshops	2017/2/28
91	増田 淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュール信頼性向上のための劣化要因解析と加速試験法開発 (招待講演)	第 10 回国際太陽電池展 PV EXPO 2017 専門技術セミナー	2017/3/2

92	山口 世力 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学	太陽電池セルレベルのPID試験法における試験条件の確立	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/15
93	青木 倫子 辺田 祐志 原 由希子 増田 淳 J. Gambogi William Felder Thomas, T. Trout	デュポン 産業技術総合研究所 E. I. DuPont	太陽電池モジュールの劣化に及ぼす紫外線を含む環境因子の影響	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
94	小林 祥之 森田 秀幸 森 健太郎 増田 淳	東レ 産業技術総合研究所	光照射がPVモジュールの湿熱劣化に与える影響	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
95	棚橋 紀悟 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	c-Si 太陽電池における表面電極腐食過程の解析	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
96	梅田 倫弘 長崎 秀昭 板山 知広 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳	東京農工大学 産業技術総合研究所	pH感受性蛍光色素センサーによる太陽電池モジュール内酢酸の非破壊検出	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
97	板山 知広 濱岡 遼 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜の相対反射率変化による太陽電池モジュール内酢酸検出(2)	第64回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16

98	水野 佳貴 大橋 史隆 吉田 弘樹 小菅 寛也 古谷 大志 フレイタス ルーベン 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総 合研究所	電圧誘起劣化回復試験に より移動した太陽電池表 面における Na および Na 化合物の分布評価	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
99	城内 紗千子 増田 淳	産業技術総 合研究所	p 型結晶シリコン太陽電 池における PID 回復現象 と Na の関係	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
100	秋富 稔 原 浩二郎 増田 淳	産業技術総 合研究所	屋外曝露による n 型結晶 Si 太陽電池モジュールの 高電圧誘起劣化 (PID)	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
101	小松 豊 山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科 学技術大学 院大学 産業技術総 合研究所	c-Si 太陽電池モジュール の長時間電圧誘起劣化試 験	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
102	西川 斉志 山口 世力 大平 圭介 増田 淳	北陸先端科 学技術大学 院大学 産業技術総 合研究所	n 型リアエミッター型結 晶 Si 太陽電池モジュール の PID 試験による表面再 結合活性化とその回復	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
103	山本 千津子 山口 世力 大平 圭介 増田 淳	産業技術総 合研究所 北陸先端科 学技術大学 院大学	ヘテロ接合結晶シリコン 太陽電池の電圧誘起劣化 要因	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
104	橋 泰至 豊田 丈紫 南川 俊治 原 由希子 増田 淳	石川県工業 試験場 産業技術総 合研究所	PID が結晶 Si 太陽電池の 高温高湿劣化に及ぼす影 響	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
105	原 由希子 増田 淳	産業技術総 合研究所	結晶シリコン太陽電池モ ジュールの高湿度下にお ける光照射 PID 試験	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16

106	吉田 弘樹 志知 拓弥 ルーベン ジェロニ モ・フレイ タス 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総 合研究所	電圧誘起劣化した太陽電池における劣化箇所の光学的特定	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
107	Hideaki Hagihara Masao Kunioka Hiroyuki Suda Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Degradation assessment of ethylene vinyl acetate encapsulant in crystalline silicon photovoltaic module using positron annihilation lifetime spectroscopy	30th International Symposium on Polymer Analysis and Characterization	2017/6/12
108	増田 淳	産業技術総 合研究所	太陽電池モジュールの科学 明確化された現象と解決すべき課題	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/13
109	山本 千津子 山口 世力 大平 圭介 増田 淳	産業技術総 合研究所 北陸先端科 学技術大学 院大学	ヘテロ接合結晶シリコン 太陽電池の電圧誘起劣化 要因	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/14
110	Thierry Fouquet Hiroaki Sato Hideaki Hagihara Sachiko Jonai Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Characterization of ethylene vinyl acetate copolymers and their degradation products at a molecular level: current situation, pitfalls and future orientation	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/14
111	岩見 健太郎 長崎 秀昭 板山 知広 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大 学 産業技術総 合研究所	pH 感受性蛍光色素センサ による太陽電池モジュール 内酢酸の拡散解析	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/14

112	濱岡 遼 板山 知広 長崎 秀昭 岩見 健太郎 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	太陽電池モジュール内酢酸検出のための錫薄膜センサの改善	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
113	棚橋 紀悟 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	c-Si PV セル表面電極における酢酸による 2 段階劣化の機構解析	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
114	小林 祥之 森田 秀幸 森 健太郎 増田 淳	東レ 産業技術総合研究所	光照射が PV モジュールの湿熱劣化に与える影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
115	青木 倫子 辺田 祐志 原 由希子 増田 淳、 William J. Gambogi Thomas Felder T. John Trout	デュポン 産業技術総合研究所 E. I. DuPont	太陽電池モジュールの劣化に及ぼす光照射の影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
116	萩原 英昭 佐藤 浩昭 原 由希子 城内 紗千子 増田 淳	産業技術総合研究所	陽電子消滅寿命法による結晶 Si 太陽電池封止材の劣化構造解析	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
117	原 由希子 増田 淳	産業技術総合研究所	結晶シリコン太陽電池モジュールの光照射 PID 試験	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
118	橋 泰至 豊田 丈紫 南川 俊治 原 由希子 増田 淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	p 型結晶 Si 太陽電池における PID と高温高湿劣化の相互影響	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14

119	城内 紗千子 増田 淳	産業技術総合研究所	p型結晶シリコン太陽電池におけるPID試験時のpn接合部へのバイアス印加効果	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
120	大橋 史隆 水野 佳貴 吉田 弘樹 小菅 寛也 古谷 大志 ルーベン ジェロニモ フレイタス 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	太陽電池モジュールの電圧誘起劣化試験および回復試験後におけるセル表面のNa分布評価	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
121	吉田 弘樹 志知 拓弥 ルーベン ジェロニモ フレイタス 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化した太陽電池における劣化・回復の光学的評価	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
122	小松 豊 山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n型結晶シリコン太陽電池モジュールの長時間電圧誘起劣化試験における劣化挙動	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
123	山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	表面側にp+エミッタ層を有するn型結晶シリコン太陽電池の電圧誘起劣化とその飽和挙動	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
124	西川 斉志 山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n型リアエミッター型結晶シリコン太陽電池モジュールの電圧誘起劣化とその回復	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14
125	秋富 稔 原 浩二郎 増田 淳	産業技術総合研究所	屋外曝露によるn型結晶Si太陽電池モジュールの高電圧誘起劣化(PID)	AIST 太陽光発電研究成果報告会 2017	2017/6/14

126	Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学	Analysis for leakage currents within unlaminated photovoltaic-module-like layer stacks in a cell-level potential-induced degradation test	6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies	2017/6/20
127	Yutaka Komatsu Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Long-term potential-induced degradation tests for n-type c-Si-wafer-based photovoltaic cell modules	6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies	2017/6/21
128	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Cause of current-collection failure observed in Isc-reduction phase of PV cells and modules exposed to acetic acid	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/27
129	Naoyuki Nishikawa Seira Yamaguchi Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学	Potential-induced degradation of a Si nitride/crystalline Si interface observed through minority carrier lifetime measurement	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/27
130	橋 泰至 豊田 丈紫 南川 俊治 原 由希子 増田 淳	石川県工業試験場 産業技術総合研究所	p型結晶Si太陽電池におけるPIDと高温高湿劣化の相互影響 太陽電池の信頼性向上に向けて	平成29年度石川イノベーション促進セミナー～産総研石川サイト開所1周年記念セミナー～	2017/7/20- 21
131	大橋 史隆 水野 佳貴 吉田 弘樹 小菅 寛也 古谷 大志 ルーベン・ジェロニモ・フレイタス 原 由希子 増田 淳 野々村修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	電圧誘起劣化回復試験後の太陽電池窒化膜表面におけるNaの分布評価	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20

132	小松 豊 山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	長時間の電圧誘起劣化試験における n 型結晶シリコン太陽電池モジュールの劣化挙動	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
133	小林 祥之 森田 秀幸 森 健太郎 増田 淳	東レ産業技術総合研究所	光照射が太陽電池モジュールの湿熱劣化に与える影響	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
134	山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	n 型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化の進行／飽和挙動	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
135	山口 世力 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学	太陽電池セルレベルの PID 試験法における c-Si 太陽電池セルの劣化挙動	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
136	濱岡 遼 板山 知広 長崎 秀昭 岩見 健太郎 武元 哲 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学 産業技術総合研究所	錫薄膜センサの膜厚増加による太陽電池モジュール内酢酸検出法の改善	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
137	吉田 弘樹 志知 拓弥 大橋 史隆 ルーベン・ジェロニモ・フレイタス 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総合研究所	逆バイアス電流パルスによる高速な PID 回復現象	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/20
138	城内 紗千子 田中 亜樹 村松 和郎 中村 京太郎 小椋 厚志 大下 祥雄 増田 淳	産業技術総合研究所 ナミックス 明治大学 豊田工業大学	p 型結晶シリコン太陽電池の電極用ペースト中の Na が PID に及ぼす影響	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/21
139	棚橋 紀悟 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	長期屋外曝露 c-Si PV モジュールにおける湿熱劣化機構の解析	第 14 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	2017/7/21

140	植田 讓	東京理科大学	STEP-PV ver.2 の開発と使用方法について	日本太陽エネルギー学会太陽光発電部会第20回セミナー	2017/8/1
141	小林 祥之 森田 秀幸 森 健太郎 増田 淳	東レ産業技術総合研究所	光照射と湿熱処理による複合試験時における太陽電池モジュールの劣化挙動	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/5
142	岩見 健太郎 長崎 秀昭 板山 知広 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学産業技術総合研究所	pH感受性蛍光色素センサによる太陽電池モジュール内酢酸分布の可視化	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/5
143	濱岡 遼 岩見 健太郎 武元 哲 山本 千津子 原 由希子 増田 淳 梅田 倫弘	東京農工大学産業技術総合研究所	太陽電池内酢酸検出用錫薄膜センサの膜厚増加によるセンサ寿命の改善	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/5
144	山口 世力 中村 京太郎 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学 明治大学産業技術総合研究所	n型c-Si太陽電池の電圧誘起劣化における飽和とその起源に関する考察	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/5
145	小松 豊 山口 世力 増田 淳 大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学産業技術総合研究所	高温・高湿試験により事前劣化させたn型リアエミッター型c-Si太陽電池モジュールの電圧誘起劣化挙動	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/5
146	棚橋 紀悟 原 由希子 坂本 憲彦 柴田 肇 増田 淳	産業技術総合研究所	c-Si太陽電池セル・モジュールにおける湿熱ストレス耐性評価指標	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/7
147	橘 泰至 豊田 文紫 南川 俊治 原 由希子 増田 淳	石川県工業試験場産業技術総合研究所	PID試験中における結晶Si太陽電池モジュール内部の電界及び電流解析	第78回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/7

148	水野 佳貴 大橋 史隆 吉田 弘樹 小菅 寛也 フレイタス ルーベン 原 由希子 増田 淳 野々村 修一	岐阜大学 産業技術総 合研究所	電圧誘起劣化加速試験に より移動した太陽電池窒 化膜表面における Na 分布 の詳細評価	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/7
149	城内 紗千子 棚橋 紀悟 柴田 肇 増田 淳	産業技術総 合研究所	p 型結晶シリコン太陽電 池の PID 試験時の pn 接合 部へのバイアス印加効果	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/7
150	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Guiding principle for crystalline Si photovoltaic modules with high tolerance against acetic acid	2017 International Conference on Solid State Devices and Materials	2017/9/20
151	Yoshiyuki Kobayashi Hideyuki Morita Kentarō Mori Atsushi Masuda	東レ 産業技術総 合研究所	Effect of light irradiation treatment on hygrothermal degradation of crystalline silicon photovoltaic modules	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/26
152	Tadanori Tanahashi Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Degradation behavior with acetic acid in crystalline silicon photovoltaic cells	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/27
153	Kentarō Iwami Hideaki Nagasaki Tomohiro Itayama Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大 学 産業技術総 合研究所	Visualizaton of temporal pH distribution in PV modules during damp heat test using a pH- sensitive fluorescent dye sensors	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17

154	Minoru Akitomi Kohjiro Hara Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Potential-induced degradation in n-type c-Si photovoltaic modules by outdoor exposure	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17
155	Sachiko Jonai Tadanori Tanahashi Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Influence of bias application on potential induced degradation for crystalline silicon photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17
156	Keisuke Ohdairal Seira Yamaguchi Chizuko Yamamoto Atsushi Masuda	北陸先端科 学技術大学 院大学 産業技術総 合研究所	J_{sc} and V_{oc} reductions in silicon heterojunction photovoltaic modules by potential-induced degradation tests	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17
157	Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Effects of light irradiation during potential-induced degradation tests for p-type crystalline silicon photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17
158	Fumitaka Ohashi Yoshiki Mizuno Hiroki Yoshida Hiroya Kosuga Taishi Furuya Ruben Jerónimo Freitas Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総 合研究所	Sodium distributions at the surface of silicon nitride film after potential induced degradation test and recovery test of PV modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17

159	Yasushi Tachibana Takeshi Toyoda Toshiharu Minamikawa Yukiko Hara Atsushi Masuda	石川県工業 試験場 産業技術総 合研究所	Effects of hygrothermal environment on PID acceleration for crystalline silicon photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17
160	Yoshiyuki Kobayashi Hideyuki Morita Kentaro Mori Atsushi Masuda	東レ 産業技術総 合研究所	Investigation and estimation of UV irradiation dosage to back side of rack mounted photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17
161	Tadanori Tanahashi Norihiko Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Electrical identification of "aging signature" in crystalline silicon photovoltaic modules exposed in field for long-term	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17
162	Hiroki Yoshida Takuya Shichi Fumitaka Ohashi Ruben Jerónimo Freitas Yukiko Hara Atsushi Masuda Shuichi Nonomura	岐阜大学 産業技術総 合研究所	Observation of reverse biased electroluminescence from local shunt of p- type c-Si solar cell	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17
163	Seira Yamaguchi Kyotaro Nakamura Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科 学技術大学 院大学 明治大学 産業技術総 合研究所	Rapid saturation of potential-induced degradation in n-type c-Si photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12- 17

164	Ryo Hamaoka Tomohiro Itayama Hideaki Nagasaki Kentaro Iwami Satoru Takemoto Chizuko Yamamoto Yukiko Hara Atsushi Masuda Norihiro Umeda	東京農工大学 産業技術総合研究所	Lifetime improvement of tin film sensor for detecting acetic acid produced in photovoltaic modules	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
165	Tomoko Aoki Yukiko Hara Atsushi Masuda	産業技術総合研究所	Influence of environmental stress factors including light irradiation on photovoltaic module degradation	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
166	Yutaka Komatsu Seira Yamaguchi Atsushi Masuda Keisuke Ohdaira	北陸先端科学技術大学院大学 産業技術総合研究所	Potential-induced degradation behavior of n-type rear-emitter c-Si photovoltaic modules prestressed in damp-heat tests	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
167	Kenji Kamiya Yuzuru Ueda	東京理科大学	Development of automatic defect detection method in photovoltaic modules by infrared image analysis	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
168	Takatoshi Kawase Yuzuru Ueda	東京理科大学	Statistical analysis of aging characteristics of PV module output using linear interpolation method	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
169	増田 淳	産業技術総合研究所	太陽電池モジュール劣化現象の体系化（招待講演）	第2回フロンティア太陽電池セミナー	2017/11/30

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	北陸先端 科学技術 大学院大 学 石川県工 業試験場	太陽光発電長寿命化 NEDO 事業に採択	北國新聞	2015/6/12
2	石川県工 業試験場	太陽光発電劣化を判別	北國新聞, 4 面	2016/8/18
3	石川県工 業試験場	テクノコラム「太陽電池の長期使用に向けて」	商工石川 2016 年 10 月号, p. 24	2016/10/1
4	産業技術 総合研究 所	産総研・太陽光発電研究センター 高効率 コスト 1/3 目指す	日経産業新聞, 8 面	2017/5/9
5	産業技術 総合研究 所	産総研・太陽光発電研究成果報告会 2017 レ ポート 「2030 年に発電コスト 7 円」の目 標達成目指し進む技術開発	新エネルギー新 聞, 1 面と 12 面	2017/6/26

【受賞・標準化】

番号	区分	受賞者 発表者	所属	タイトル	賞の名称	受賞年月
1	受賞	萩原 英昭	産業技術総 合研究所	陽電子消滅寿命 法による太陽電 池封止用エチレ ンビニルアセ テート樹脂の劣 化解析	マテリアルラ イフ学会研究 奨励賞	2015/7/4
2	受賞	Tadanori Tanahashi Norihiro Sakamoto Hajime Shibata Atsushi Masuda	産業技術総 合研究所	Electrical detection of gap formation underneath finger electrodes on c-Si PV cells exposed to acetic acid vapor under hygrothermal conditions	2016 PV Module Reliability Workshop Grand Prize	2016/2/24

3	受賞	佐藤 浩昭	産業技術総合研究所	高分解能質量分析を用いたポリマー材料の構造解析	日本分析化学会 先端分析技術賞/CERI 評価技術賞	2016/9/15
4	受賞	萩原 英昭	産業技術総合研究所	Degradation assessment of ethylene vinyl acetate encapsulant in crystalline silicon photovoltaic module using positron annihilation lifetime spectroscopy	30th International Symposium on Polymer Analysis and Characterization, Poster Prize	2017/6/14
5	受賞	城内 紗千子	産業技術総合研究所	p型結晶シリコン太陽電池の電極用ペースト中のNaがPIDに及ぼす影響	第14回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム イノベイティブPV 奨励賞	2017/7/21
6	標準化	棚橋 紀悟	産業技術総合研究所	Test method for exposure durability of photovoltaic (PV) cells to acetic acid vapor	SEMI PV79-081	2017/8/2

【展示】

番号	区分	発表者	所属	タイトル	形式、詳細	日時、場所月
1	展示	大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学	研究成果に関するブース展示	PVJapan 2015	2015/7/29-31
2	展示	大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学	研究成果に関するブース展示	PVJapan 2016	2016/6/29-7/1
3	展示	橘 泰至 豊田 丈紫 南川 俊治	石川県工業試験場	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発ー屋外での電圧誘起劣化の実証研究ー	いしかわ環境フェア 2016	2016/8/27-28
4	展示	大平 圭介	北陸先端科学技術大学院大学	研究成果に関するブース展示	PVJapan 2017	2017/7/5-7/7
5	展示	橘 泰至 豊田 丈紫 南川 俊治	石川県工業試験場	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発ー屋外での電圧誘起劣化の実証研究ー	いしかわ環境フェア 2017	2017/8/19-20
6	展示	吉田 弘樹	岐阜大学	劣化太陽電池の高速回復技術	イノベーション・ジャパン 2017～大学見本市&ビジネスマッチング～	2017/8/31-9/1

C 太陽光発電システムの高精度発電量評価技術の開発 (産業技術総合研究所、電力中央研究所、日本気象協会、佐賀大学)

1. 成果詳細

【国立研究開発法人産業技術総合研究所】

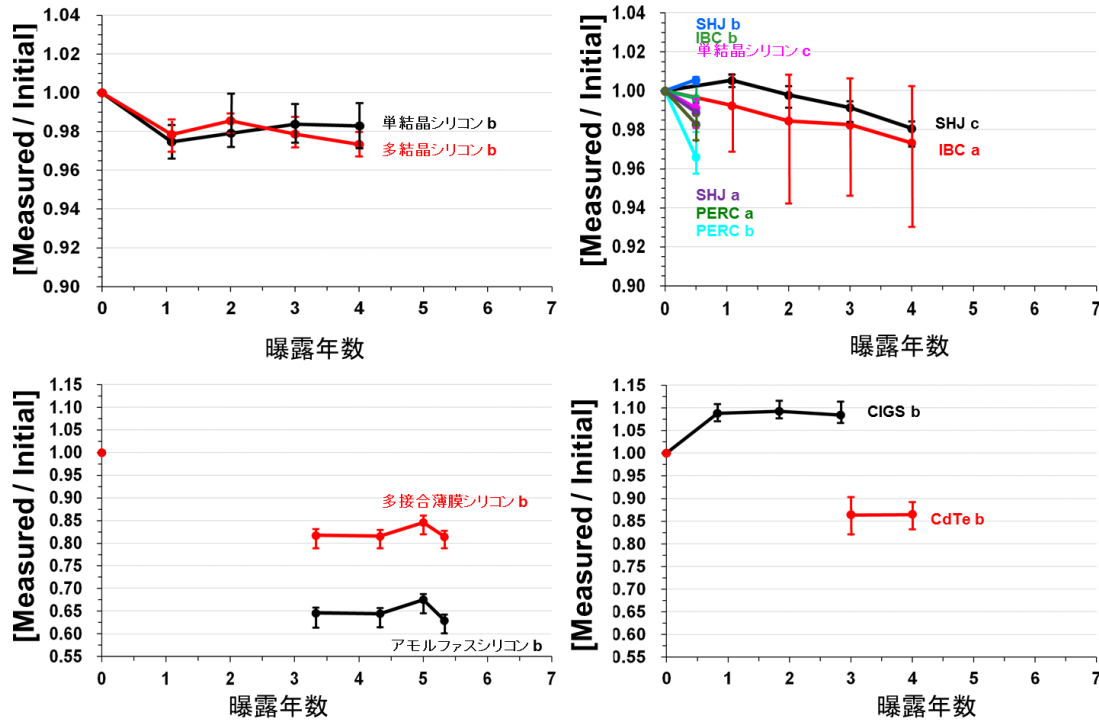
①各種太陽電池の経年劣化調査と発電量推定技術の開発（電力中央研究所と共同実施）

産業技術総合研究所九州センター（佐賀県鳥栖市）の屋外サイトで長期曝露試験を実施している太陽電池モジュールを用いて経年劣化を調査するとともに、発電量推定技術を開発した。屋外曝露モジュールはいったん架台より取り外し、屋内のソーラーシミュレータで電流－電圧特性を測定するとともに、エレクトロルミネセンス像を観測することにより、特性等の経時変化を観測した。曝露時に付着した汚れを除去するため、測定前にはモジュールを洗浄した。今回測定したのは2016年6月に設置した6型式の高効率単結晶シリコン太陽電池モジュールを含む全20型式のモジュールである。表Ⅲ-2-(ホ)-C-1には、このうち初期測定値の存在する14型式のモジュールについて、初期測定値に対する2016年末時点での劣化率を示す。曝露期間は取り外し期間を除外して算出した。図Ⅲ-2-(ホ)-C-1には、表Ⅲ-2-(ホ)-C-1に示すモジュールにおける初期測定値を1として規格化した出力の屋外曝露年数依存性を示す。図Ⅲ-2-(ホ)-C-1の横軸は実際の曝露期間ではなく、屋外曝露を開始してからの年数で表示しているため、表Ⅲ-2-(ホ)-C-1とは表現が異なる。2016年6月に曝露を開始したモジュールでは曝露期間が短いために現時点で傾向について明瞭に言及するのは控えるが、一部のPERC（passivated emitter rear cell）モジュールやシリコンヘテロ接合（SHJ）モジュールでは、比較的大きな出力低下を示している。この出力低下は恒常的に続くものではなく、初期の光照射効果に基づく出力変動に起因すると考える。2012年12月に設置した単結晶シリコン太陽電池モジュールや、多結晶シリコン太陽電池モジュールでは、曝露初期に2%程度の劣化を示すものの、劣化は飽和し、曝露期間3.6年後における年劣化率は0.5～0.8%/年と比較的小さい。これらの太陽電池モジュールではp型ウエハを用いたセルを使用しており、初期の劣化はボロン－酸素複合体に起因する光劣化による可能性がある。これに対して、SHJモジュールやIBC（interdigitated back contact）モジュールでは、曝露期間3.6年後の劣化率は前述の単結晶シリコン太陽電池モジュールならびに多結晶シリコン太陽電池モジュールと同程度であるものの、依然として劣化が飽和傾向にないことが特徴的である。SHJモジュールの劣化は開放電圧の低下に起因するものであり、アモルファスシリコン層と結晶シリコン層の界面での劣化の可能性もある。一方、IBCモジュールの劣化は屋外曝露時に高電位側に設置されたモジュールのみで発生しており、このことが大きなばらつきの原因となっている。劣化は短絡電流と開放電圧の低下をとめない曲線因子は概ね維持されていることから、典型的な電圧誘起劣化と考えられる。薄膜シリコン系太陽電池モジュールでは初期に大きな劣化をとまなうものの、曝露年数3年以上では概ね安定している。また、曝露年数5年での測定は夏季に実施し、他の測定は冬季に実施していることから、夏季の測定では光劣化により生じたシリコンダングリングボンド欠陥が夏季の温度上昇による熱アニールにより減少したことに起因し、出力が向上したものと考えられる。CIGSモジュールでは、曝露初期に1割程度の出力向上が観測されるが、いわゆる光照射効果によるものと考えられる。一方、CdTeモジュールでは、比較的大きな出力低下が観測されるものの、曝露期間3年を経ることで、薄膜シリコン系太陽電池モジュールと同様に劣化は飽和するものと考えられる。

表Ⅲ-2-(ホ)-C-1

14 型式のモジュールにおける曝露期間、銘板値から算出した総出力、出力変化、劣化率等。

種類	記号	曝露開始 (月/年)	曝露期間 (年)	枚数 (枚)	総出力 (kW)	2016年末での 出力変化(%)	劣化率 (%/年)
単結晶シリコン	b	12/2012	3.58	20	4.90	-1.71	-0.48
多結晶シリコン	b	12/2012	3.58	20	5.00	-2.67	-0.75
アモルファス シリコン	b	07/2011	4.96	18	1.35	-37.00	-7.46
多接合薄膜 シリコン	b	07/2011	4.96	16	1.76	-18.54	-3.74
2016年設置 単結晶シリコン	c (n型)	06/2016	0.42	7	1.89	-0.87	-2.07
	SHJ a	06/2016	0.42	5	1.25	-1.10	-2.62
	SHJ b	06/2016	0.42	5	1.55	+0.56	+1.33
	SHJ c	12/2012	3.58	20	4.80	-1.92	-0.54
	IBC a	12/2012	3.58	24	4.68	-2.67	-0.75
	IBC b	06/2016	0.42	5	1.05	-0.38	-0.90
	PERC a	06/2016	0.42	5	1.45	-1.71	-4.07
	PERC b	06/2016	0.42	5	1.48	-3.39	-8.07
化合物薄膜	CIGS b	03/2014	2.56	30	4.95	+8.39	+3.28
	CdTe b	12/2012	3.67	20	1.30	-13.52	-3.68



図Ⅲ-2-(ホ)-C-1

表Ⅲ-2-(ホ)-C-1 に示すモジュールにおける初期測定値で規格化した出力の屋外曝露年数依存性。

これらの結果から、初期の光照射にともなう出力変動が、劣化率の算出に大きな影響を与えていることがわかった。そこで、2016年6月に設置したSHJモジュール、PERCモジュールならびに化合物薄膜系太陽電池モジュールについて、屋外曝露にともなう初期変動を詳細に評価した。その結果、SHJモジュール2型式では、いずれも光照射による出力上昇が観測され、短絡条件に比べ開放条件の出力上昇が大きかった。一方、PERCモジュール2型式のうち1型式では、光照射初期に-4.4%と著しく出力が低下し、その後は開放条件で緩やかに出力が回復するものの、短絡条件では出力が低下するといった特徴的な振舞いを示した。CdTeモジュール2型式ならびにCIGSモジュールでは、モジュール端子が開放の場合、積算日照量の増加とともに最大出力は徐々に増加した。

有機薄膜太陽電池モジュールでは暗所保管後の短時間の屋外曝露によって短絡電流と曲線因子が上昇し、結果的に最大出力が屋外曝露前の2.3倍になった。屋外曝露後にモジュールを暗所保管したところ、曲線因子が漸減する傾向にあり、932hの暗所保管により、最大出力は暗所保管前の87%まで低

減した。今回観測された光照射にともなう出力上昇と、暗所保管による出力低減は、光ドープが必要な材料を使用していることに起因すると考えられる。

各種モジュールの劣化現象を踏まえて、定量的な発電量推定を試みた。まず、比較的経年劣化が小さく、解析が容易な単結晶シリコン太陽電池モジュールで構成されるアレイから検討を開始した。ソーラーシミュレータを用いて測定した標準試験条件（STC）での出力を $P_{MAX(STC)}$ 、屋外曝露開始後 1 年間の発電量から算出した出力の温度係数を γ 、日射計で測定した日射強度を G とすると、推定出力 P_{MAX} は式 III-1 で表される。

$$P_{MAX} = P_{MAX(STC)} \times \frac{G}{G_{STC}} \times \{1 + \gamma(T - T_{STC})\} \times f(t) \quad \dots \quad (III-1)$$

ここで、 G_{STC} 、 T_{STC} 、 T 、 $f(t)$ は、それぞれ、STC での日射強度（1000 W/m²）、STC での温度（25℃）、屋外曝露時のモジュール温度、劣化関数である。計算の結果、2012 年 10 月から 2014 年 12 月の概ね 2 年 2 ヶ月で劣化率を算出して推定した 2015 年の発電量は 5,453.2 kWh であった。一方、実際の 2015 年の発電量は 5,573.4 kWh であった。両者の誤差は 2.16% となり、±5% の精度で発電量を推定する技術を開発するとの中間目標を達成した。

【一般財団法人電力中央研究所】

①各種太陽電池の発電量評価技術の開発（産業技術総合研究所と共同実施）

6 型式の結晶シリコン太陽電池モジュールの発電性能の年劣化率を「発電量」、「出力係数」、「室内測定出力」の計 3 つのパラメータにより算出した。結果を表 III-2-(ホ)-C-2 に示す。4 年以上の実使用下にあった太陽電池モジュールの年劣化率は、光による初期劣化を除くと、p 型結晶シリコン太陽電池モジュール（E-1A、E-1B、E-2A、E-2B）では極めて小さく、SHJ 型や IBC 型太陽電池（W-2A、W-2B）などの高効率 n 型結晶シリコン太陽電池モジュールではやや大きいという、新しい知見を得た。

表 III-2-(ホ)-C-2 3 つのパラメータより算出された各型式太陽電池の年劣化率（%/年）

手法	E-1A	E-1B	E-2A	E-2B	W-2A	W-2B
	sc-Si (a)	sc-Si (b)	mc-Si (a)	mc-Si (b)	(SHJ)	(IBC)
(A) 発電量	0.0	-0.6	0.1	0.1	1.3	0.6
(B) 出力係数	0.1	-0.4	0.1	0.2	1.3	0.7
(C) 室内測定出力	0.0	-0.3	0.3	0.2	0.8	0.7

②メガソーラーの発電量診断手法の開発

設置後数年程度実稼働して、現在も運用中の合計 7 つのメガソーラーの発電データを入手した。独自技術を用いて明らかにした日射強度の時間及びエリア変動特性等に基づき、日射観測などが不備なサイトも含めて、観測項目に応じ 2% 以内の精度でメガソーラーの発電性能の年劣化率が算出可能であることを実証した。

③IEC/TC82/WG2 における発電量定格（IEC 61853）の確立

2017 年 1 月に気象データを提出し、IEC/TC82/WG2 奈良会議（2017 年 5 月）において、IEC 61853-4 CDV（案）における、世界の 6 ヶ所の気象データの 1 つに、日本の気象データが採用された。

【一般財団法人日本気象協会】

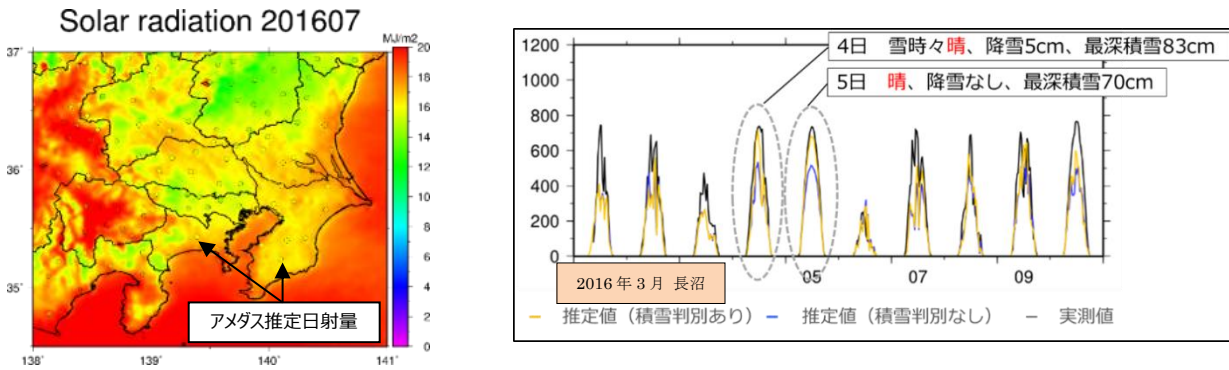
(1) ①5 地点における日射スペクトル等の観測と⑤日射スペクトルデータベースの更新と全国整備

長沼、鳥栖、つくば、岐阜、沖永良部の 5 地点で日射スペクトル等の観測を実施した。日常的なデータの監視、定期的な清掃作業を実施するとともに、毎年 1 回、日射計の校正作業等を実施し、2015 年 12 月までのデータを収録した日射スペクトルデータベース（VER-3）を整備した。日射スペクトルデータベース（VER-3）では、これまで実施したヒアリング結果等を踏まえて、データフォーマット、異常値の判別方法等を変更した。また、日射スペクトルデータベースの全国整備に向けて、観測データを用いて水平面の全天日射から日射スペクトルを推定するモデルの開発を行った。

(2) ③日射量データベースの高密度化

日射量データベースの高密度化のために、「ひまわり 8 号」の観測データ（衛星データ）から日射量を推定するモデルを開発した。開発した日射量推定モデルを用いて、2016 年度の全国の 1 km メッシュ日射量マップを作成した。作成した日射量マップとアメダス地点の日射量推定値（アメダス推定日射量）の分布を比較し、日射量マップの空間分布の妥当性を確認した（図 III-2-(ホ)-C-2 左）

衛星データから日射量を推定する場合、積雪を雲と誤判別することにより日射量を過小評価する傾向がみられた。そこで、新たに「積雪判別手法」を導入することにより、積雪の影響を大きく改善することができた（図Ⅲ-2-(ホ)-C-2 右）。また、衛星からの日射量推定値を地上の日射量観測値を用いて空間的に補正することで、推定誤差をさらに低減できることも確認した。



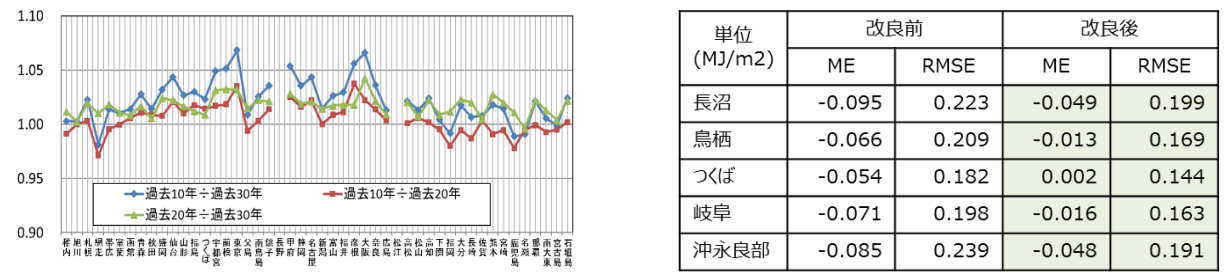
図Ⅲ-2-(ホ)-C-2

衛星データを用いた日射量マップ例（左）と積雪判別による推定精度向上例（右）

(3) ②日射量データベース整備の迅速化と④高精度化および日射量データベースの更新

日射量の経年変動を詳細に解析し、全国的な日射量の増加傾向や変動の特徴等を確認した。また、統計期間の違いによる日射量の違いについて定量的に整理した（図Ⅲ-2-(ホ)-C-3 左）。これらの解析結果をもとに、新しい日射量データベースの統計期間、更新頻度、公開方法について検討した。統計期間については、日射量の変動特性等により、10年間の妥当であるとの結果を得た。日射量データベース整備の迅速化の一環として、2015年及び2016年の日射量の傾向（前年比及び例年比）を日本気象協会ホームページで発表した。これにより、最近の日射量の傾向をいち早く知ることができるようになった。

従来の日射量データベース作成に用いた日射量推定モデル（日照-日射モデル、直散分離モデル、斜面日射量推定モデル）について検証したところ、日照時間から日射量を推定するモデル（日照-日射モデル）の精度を向上させることが重要であることがわかった。日照-日射モデルの推定式の式形の変更、学習期間の違いの検討、実況補正の効果の検討、使用するパラメータの変更、10分値データの利用等を行ったところ、推定精度を大きく改善することができた（図Ⅲ-2-(ホ)-C-3 右）。現在、さらに精度よく推定するために推定モデルの改良を進めている。



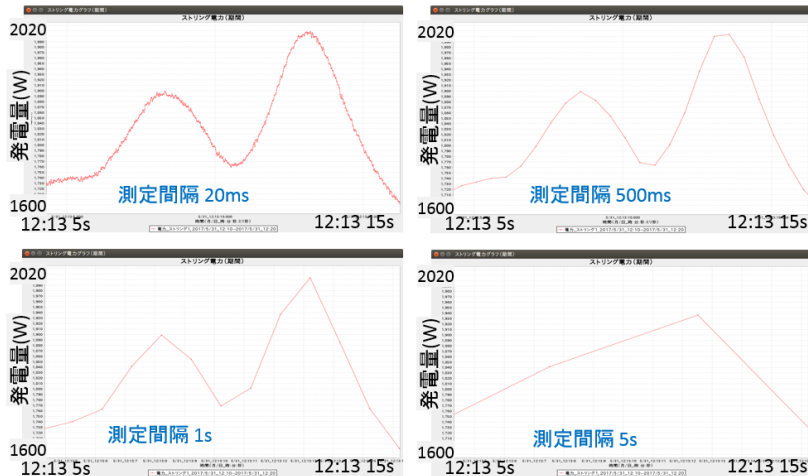
図Ⅲ-2-(ホ)-C-3 統計期間の違いによる日射量の相違（左）と改良前と改良後のRMSEとME（右）

【国立大学法人佐賀大学】

①屋外曝露メガソーラーで利用可能な高速測定システムの開発

屋外曝露メガソーラーとして稼働中の10kW発電システムで高速測定システムを構築した。二次準器である精密全天日射計と、応答速度が1ms以下の高速測定が可能なシリコン型日射計を用いて日射計測できるようにした。一方、複合気象装置を設置し、気象計測を行えるようにした。測定間隔は、ストリング電流・電圧および日射強度については10ms、その他については100msで測定できるようにし、中間目標である1sを達成した。

次に、晴天日におけるストリング電力の変動が激しい時間帯において、測定間隔10msから5sの測定データを比較検討した。図Ⅲ-2-(ホ)-C-4に測定間隔20ms, 500ms, 1s, 5sの測定波形を示す。その結果、晴天日では測定間隔20msが最適であることを見出した。



図Ⅲ-2-(ホ)-C-4 測定間隔 20 ms, 500 ms, 1 s, 5 s での電力測定波形の比較。

②発電量、日射量データの補完アルゴリズムソフトウェアの開発

離散フーリエ変換 (DFT) を用いた補間方法を考案した。そのアルゴリズムは以下のとおりである。まず、初期値として欠損区間をランダムな値で補間しておく。ランダムな信号はすべての周波数成分を一様に含む信号である。前後の測定区間を含めた区間の DFT を計算する。この DFT が表す周波数分布の分散が小さくなるように欠損区間の値を修正する。このような修正を繰り返し、最終的に周波数分布の分散が最小になるように、欠損区間の補間値を得る。このアルゴリズムをもとに、「大規模計測データ可視化システム」を開発した。次に補間誤差をさらに小さくするために、DFT を用いた補間アルゴリズムの改良を行った。定数成分も調節するように改良した結果、補間精度は向上した。さらに日射量測定値を用いて補間を行う改良法を考案した。具体的には DFT の振幅を日射量の DFT 振幅で与えるようにした。また、ウェブレットを用いた補間法のアルゴリズムを開発した。結果として、晴天日において補間誤差は 9.06% となり、中間目標 10% を達成した。

③発電量、日射量データの解析ソフトウェアの開発

メガソーラー発電所のストリング電力などの計測データと日射量等の気象データを解析して、ストリングの内部状態を推定するアルゴリズムを提案した。また、日射量、気温、風速、風向の気象データと、ストリング電流・電圧をもとにセル温度を推定するアルゴリズム考案した。

メガソーラー発電所で計測された大規模な測定データに対する解析ソフトウェアを開発した。開発した解析ソフトウェアは、ストリング電流・電圧・電力を偏差値推移表示する機能や、ストリング発電量をグレースケールで表して地図表示することができる。

日射量とモジュール裏面温度の実測値からストリング電流・電圧・電力を推定するアルゴリズムを開発した。その結果、実際の値と推定値の誤差は 0.194% となり、中間目標の 20% 以下を達成した。

2. 実用化・事業化見通し

- 現時点では、単結晶シリコン太陽電池モジュールで構成されるアレイに対する発電量推定技術を開発し、実発電量との誤差 2.16% を達成しているが、当該発電量推定技術は発電事業者にとって極めて有益な情報を与えるものと考えられる。劣化の算出期間の最適化を図り誤差を小さくするとともに、初期変動の大きい薄膜系等の解析が複雑なモジュールで構成されるアレイにも適用範囲を広げ、普遍的な発電量推定技術として確立し、実用化・事業化に結び付ける。
- IEC/TC82/WG2 に関しては、IEC 規格に日本が直接寄与する成果を得ている。太陽電池の発電量評価技術では、5 日射気候区における、経年劣化を考慮した 25 年発電量を算出する技術を開発することにより、バンカビリティの評価の簡易化や高度化への利用が可能である。さらに、メガソーラーの発電量診断手法については、現在実運用中のサイトのデータで開発を進めており、観測項目の実態も踏まえて、そのまま現場適用可能な技術となっている。これらは、最終的にはガイドラインとしてまとめることをはじめ、IEC の活動を通して、世界標準への寄与が期待できる。
- 日射量データベース整備の迅速化、高密度化、高精度化を応用した新たな日射量データ提供事業を行う。太陽光発電システムの運用監視向けのデータベースを準リアルタイムで作成する技術を開発して商品化する。現状でもアメダス地点における推定日射量を商品化しているが、本研究の成果を反映

した、より高密度・高精度な日射量データベースを構築して販売する。また、本研究で開発した日射量推定技術を応用した国外の日射量データベースを構築し、国外で太陽光発電事業を計画している企業を対象に販売する予定である。

3. 波及効果

- ・本研究により発電量推定技術が確立した場合には、STC で得られた定格出力 (W) で表示された現在の銘板値に加え、推定発電量 (Wh) を銘板値に加えることが可能となる。国内では代表的な気象条件である佐賀県鳥栖市のサイトでのデータを使用しているため、国内限定ではあるものの、直接的な価値になる発電量が銘板値に明記されることで、モジュールの付加価値が大いに向上する。さらには、世界各地でのデータに対して本研究で得られた発電量推定技術を適用することにより、気象条件毎の発電量を銘板値に明記することも可能となり、発電事業者が太陽光発電所の建設地毎に最適な種類の太陽電池モジュールを選択可能となる。
- ・メガソーラーの発電量診断技術を開発することにより、適切な保守で発電量の維持が可能になるばかりでなく、上空からのドローンによる赤外画像撮影での故障検出など、新技術の活用も含め、設備保守点検産業の育成につながる。
- ・IEC 61853 シリーズが確立することにより、世界で 6 ヶ所のモジュールパフォーマンスレシオが算出可能になり、様々な気象条件における太陽光発電システム発電量の比較が容易に可能となる。
- ・わが国の太陽光発電システムの建設・評価にあたっては、NEDO の日射量データベース (MONSOLA-11、METPV-11) が広く利用されている。MONSOLA-11、METPV-11 は過去の平均的な日射量データベースであり、長期的な視点での分析・評価に非常に有効なデータベースである。一方、最近では、太陽光発電システムの導入が進み、過去の平均的な日射量データだけでなく、直近の日射量データの提供を望む顧客も現れている。また、メガソーラーの事業者からは、アメダス地点との相違について問い合わせが寄せられることも多くなった。本研究で整備する直近の日射量を整備した高精度・高密度な新たな日射量データベースは太陽光発電事業の事業評価を行う上での標準的なデータベースとして貴重である。
- ・本研究の成果である日射スペクトルデータベースは、全国を対象とした様々な天候におけるわが国初のデータベースである。太陽電池からの発電効率は個々の太陽電池の分光感度特性に依存する。日射スペクトルデータベースは、開発が進んでいる各種太陽電池からの出力推定に有用であり、地域に適合した太陽電池を選別する場合の指標になると考える。
- ・本研究で開発した「大規模発電量可視化システム」ソフトウェアは、あらゆるメガソーラー発電所に対応でき、全国に展開可能である。
- ・本研究で開発した欠損データの補完法は、現在社会で注目されているビッグデータの数値解析法として一般化でき、応用できる可能性がある。

4. 今後の展開

- ・産業技術総合研究所九州センターに構築した屋外曝露サイトは、市販品はもとより研究開発品も含めてありとあらゆる種類の太陽電池モジュールを同一条件で曝露し、アレイ単位の発電データと気象データを定常的に取得している世界的に見ても稀有な設備である。曝露開始から最長で約 7 年を経過しており、屋外曝露による発電特性の初期変動とともに、長期劣化の傾向もようやく見えつつある。さらに、劣化を加味した発電量推定技術の開発にも目途を得た。国内太陽電池メーカーからは、このような設備で得られたデータの有効活用とともに、長期的に設備を維持していくことで劣化傾向を明確化していくことの重要性が指摘されている。これまで、屋外曝露サイトを用いた発電量の研究は、表面的な発電量の推移のみを論じた内容に留まるものが多かったと言わざるを得ないが、本研究では、NEDO から委託された「太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発」で得られたモジュール劣化に関する知見も活用し、屋外でのモジュール劣化現象を科学的に解析するとともに、劣化現象を加味した普遍的な発電量推定技術を確立することにより、発電事業者に資する研究成果を継続的に提供する。
- ・6 型式の結晶シリコン太陽電池における 2020 年末までの 8 年間以上の発電データを解析し、より長期間のデータを用いて発電性能の経年変化と故障率を評価する。また、2016 年 6 月に導入した高効率結晶シリコン太陽電池の 2020 年末まで (3 年半) の発電データを解析し、短期間での発電性能の経年変化を調査する。これらのデータに基づいた太陽電池モジュールの経年劣化モデルを構築し、日本気象協会が気象データを計測している 5 日射気候区における、経年劣化を考慮した太陽光発電の 25 年発電量を算出する。
- ・ヌーシャテル (スイス) 会議 (2017 年 10 月) において、日本の気象データが CDV から外されないよ

うに、会議に参加し議論する。その後は、CDV→FDIS→規格成立まで、日本の気象データが採用されるように、IEC/TC82/WG2に参加し議論する。

- 太陽光発電システムの発電量を建設前に評価する場合、日射量は年変動が大きく、短期間の日射量データから発電量を推定するのは好ましくない。したがって、今後も MONSOLA-11、METPV-11 のような過去の平均的な日射量データベースの整備は重要である。一方、既に建設された太陽光発電システムの運用状況を監視するには、上記のような過去データに基づいた平均的な日射量データではなく、実況値データが重要になる。このような状況を考慮し、本研究の成果を踏まえ、より高精度な準リアルタイムの日射量データ提供の事業化を検討している。
- 開発した高速測定システムは、屋外曝露のメガソーラーで測定間隔 20 ms というほとんど例のない短い時間間隔でデータを収集している。これまでは晴天日での発電量の解析を行ったが、雲が高頻度で横切る風の強い晴天日、曇り、嵐など様々な気象条件における発電量のデータの蓄積を行う必要性が示唆されている。そこで、今後は、そのような様々な気象条件をカテゴリーに分類し、個々のケースで解析を行い、最適測定間隔を決定する。
- 天気により最適な補完アルゴリズムが異なることが示唆されたため、天気のカテゴリー毎に最適な補完アルゴリズムを選択するソフトウェアを開発して、補完誤差をさらに低減する。同様に日射量測定データを用いた方法やウェーブレット法による補完アルゴリズムの改良を行い、補完誤差を低減する。また日射変動の激しい日に対応可能な解析ソフトウェアを構築し、時系列として多数の測定データがあることを解析に活かすために、多次元ニュートン法を用いた改良を行い、発電量、日射量データの解析ソフトウェアを完成させる。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	0	1	1 件
論文	1	4	3	8 件
研究発表・講演（うち国際会議）	14(4)	38(10)	24(11)	76 件
新聞・雑誌等への掲載	1	3	3	7 件
展示	1	1	1	3 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学 法人佐賀 大学 国立研究 開発法人 産業技術 総合研究 所	特願 2017-139367	国内	2017/7/18	出願	太陽光発電 装置、およ び太陽光発 電装置の制 御方法	原 重臣 嘉数 誠 千葉 恭男 増田 淳

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda Yoshihiro Hishikawa	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	Annual degradation rates of bulk crystalline silicon PV modules estimated from indoor and outdoor measurements	Proceedings of 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 2571 - 2574	無	2015/
2	Shigeomi Hara Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	Estimation method of solar cell temperature using meteorological data in mega solar power plant	IEEE Journal of Photovoltaics, 6(5), 1255-1260	有	2016/7/27
3	宇都宮 健 志	日本気象 協会	日射量の経年変動と近年の 日射量の特徴について	太陽エネルギー, 43(1), 17-24	有	2017/1/31
4	板垣 昭彦	日本気象 協会	太陽光発電システムの運用 監視に必要な日射量データ	太陽エネルギー, 43(1), 25-30	有	2017/1/31
5	板垣 昭彦 佐々木 潤 宇都宮 健 志	日本気象 協会	地上観測データを用いた日 射スペクトル推定モデルの 開発	太陽エネルギー, 43(2), 49-58	有	2017/3/31
6	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	Annual degradation rates of recent crystalline- silicon photovoltaic modules	Progress in Photovoltaics: Research and Applications, DOI: 10.1002/pip.2903	有	2017/
7	Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	Development of a practical method to estimate electric power with high precision from various photovoltaic technologies	Japanese Journal of Applied Physics, 56(8S2), 08MD05- 1-5.	有	2017/7/19
8	Sungwoo Choi, Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	Time-dependent changes in CIGS and CdTe photovoltaic modules by outdoor exposure	Japanese Journal of Applied Physics, 56(8S2), 08MD06- 1-5.	有	2017/7/25

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	松岡 寛 原 重臣 嘉数 誠 松井 則明	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける大規模計測データの可視化—メガソーラー全体の状態把握のために	電気学会平成 27 年電力・エネルギー部門大会	2015/8/25
2	原 重臣 ホンワナ ディニス 嘉数 誠 松井 則明	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおける計測データの欠損区間の補間方法	電気学会平成 27 年電力・エネルギー部門大会	2015/8/27
3	田中 裕之 ホンワナ ディニス 井上 拓磨 原 重臣 嘉数 誠 松井 則明	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおけるガラス割れモジュールの調査	電気学会平成 27 年電力・エネルギー部門大会	2015/8/27
4	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda Yoshihiro Hishikawa	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	Annual degradation rates of bulk crystalline silicon PV modules estimated from indoor and outdoor measurements	31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2015/9/16
5	宇都宮 健 志	日本気象 協会	全国 5 地点の日射スペクトルデータベースの整備	日本気象学会 2015 年度秋季大会	2015/10/30
6	Shigeomi Hara Hiroyuki Tanaka Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	Estimation method of solar cell temperature using meteorological data in mega solar power plant	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/17
7	Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	Various degradation mechanism in crystalline PV modules under moderate climate conditions	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/18

8	Shigeomi Hara Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	Estimation method of characteristic parameters of strings in mega solar power plant	25th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2015/11/19
9	石井 徹之 増田 淳	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	実運用下のバックコンタクト 太陽電池にみられる PID 現象	平成 27 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2015/11/26
10	板垣 昭彦 宇都宮 健 志 佐々木 潤	日本気象 協会	推定モデルを用いた日射スペ クトルデータの全国整備	平成 27 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2015/11/26
11	宇都宮 健 志 板垣 昭彦 佐々木 潤	日本気象 協会	MONSOLA-11 と近年の日射量 データの比較	平成 27 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2015/11/26
12	松岡 寛 原 重臣 嘉数 誠 松井 則明	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおけ る大規模計測データを可視化 するシステムの開発	平成 27 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2015/11/27
13	板垣 昭彦	日本気象 協会	日射関連検討会ー太陽光発電 システム普及後の日射量デー タベースの構築ー	平成 27 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2015/11/27
14	原 重臣 嘉数 誠 松井 則明	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおけ る大規模計測データ可視化シ ステムの開発	平成 28 年電気学会全 国大会	2016/3/17
15	石井 徹之 崔 誠佑 佐藤 梨都 子 増田 淳	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	各種結晶シリコン太陽電池の 実使用下における発電特性の 経年変化	第 13 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016/5/19
16	佐藤 梨都 子 崔 誠佑 石井 徹之 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	実運用下における薄膜シリコ ン系太陽電池モジュールの経 年変化について	第 13 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016/5/19

17	崔 誠佑 佐藤 梨都子 石井 徹之 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	化合物系薄膜太陽電池モ ジュールの屋外曝露による経 年劣化	第13回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016/5/19
18	原 重臣 嘉数 誠 松井 則明	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラー発電所 計測データを用いたストリン グ内部状態推定法の検討	第13回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2016/5/19
19	崔 誠佑 佐藤 梨都子 増田 淳	産業技術 総合研究 所	化合物薄膜系太陽電池モ ジュールの屋外曝露による経 時変化の考察	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
20	佐藤 梨都子 崔 誠佑 増田 淳	産業技術 総合研究 所	薄膜シリコン系太陽電池モ ジュールの屋外曝露による経 時変化	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
21	千葉 恭男 崔 誠佑 佐藤 梨都子 増田 淳	産業技術 総合研究 所	薄膜系太陽電池モジュールの 屋外曝露評価ー発電量と屋 内測定的相关ー	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
22	石井 徹之 崔 誠佑 佐藤 梨都子 増田 淳	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	結晶シリコン太陽電池の実使 用下における発電特性の経年 変化	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
23	原 重臣 嘉数 誠 松井 則明 佐藤 梨都子 増田 淳	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー 産業技術 総合研究 所	吉野ヶ里メガソーラー発電所 における大規模測定データ可 視化システムの開発	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
24	原 重臣 嘉数 誠 松井 則明 佐藤 梨都子 増田 淳	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー 産業技術 総合研究 所	吉野ヶ里メガソーラー発電所 における高速測定システムの 構築	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2016	2016/6/16
25	原 重臣 嘉数 誠 松井 則明	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	放射伝熱を考慮した太陽電池 セル温度推定法の検討ー理論 の構築と吉野ヶ里メガソー ラーでの測定ー	電気学会平成28年電 力・エネルギー部門大 会	2016/9/9

26	崔 誠佑 佐藤 梨都子 石井 徹之 千葉 恭男 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	薄膜系太陽電池モジュールの 屋外曝露による経時変化の検 討	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/14
27	石井 徹之 佐藤 梨都子 崔 誠佑 千葉 恭男 増田 淳	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	各種太陽電池モジュールの屋 外における発電性能評価技術 の開発	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/15
28	千葉 恭男 崔 誠佑 佐藤 梨都子 石井 徹之 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	屋外曝露した薄膜系太陽電池 モジュールのシステム出力係 数と屋内測定値の相関	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/15
29	佐藤 梨都子 千葉 恭男 近松 真之 吉田 郵司 増田 淳	産業技術 総合研究 所	有機薄膜太陽電池モジュール の光照射ならびに暗所保管に よる出力変化	第 77 回応用物理学会 秋季学術講演会	2016/9/16
30	Tetsuyuki Ishii	電力中央 研究所	PV systems database at the global perspective (招待 講演)	APEC Workshop on Small and Medium PV System Database in the APEC Region	2016/9/26
31	Tetsuyuki Ishii	電力中央 研究所	Deliberation of consolidated document and wrapping-up of workshop (招待講演)	APEC Workshop on Small and Medium PV System Database in the APEC Region	2016/9/26
32	Shigeomi Hara Makoto Kasu	佐賀大学	Fast measurement system for operating strings in Yoshinogari mega solar power plant	International Workshop on the Sustainable Actions for “Year by Year Aging” under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016/10/5
33	Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	Time-dependent changes in CIGS and CdTe photovoltaic modules due to outdoor exposure	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26

34	Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	Development of a methodology to estimate electric power from various photovoltaic technologies	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/26
35	Sergio Honwana Shigeomi Hara Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	Discrete-Fourier- transform-based interpolation method for missing data of measurement in mega solar power plant	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
36	Shigeomi Hara Sergio Honwana Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	Construction of fast measurement system in Yoshinogari mega solar power plant	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
37	Shigeomi Hara Makoto Kasu Noriaki Matsui	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	Development of computer program for large-scale measurement data of Yoshinogari mega solar power plant	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
38	Yasuo Chiba Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	Relationship between performance ratio and indoor power output measurements for various photovoltaic modules at AIST Kyushu Center	26th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2016/10/27
39	首藤 謙太 郎 原 重臣 嘉数 誠 増富 康記	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおけ る大規模計測データ解析シス テムの開発	平成 28 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2016/11/24

40	諸石 祐介 原 重臣 嘉数 誠 増富 康記	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラー発電所 における高速測定データを解 析するソフトウェアの開発	平成 28 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2016/11/24
41	原 重臣 嘉数 誠 増富 康記	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおけ る測定データに含まれる欠損 区間を補間するソフトウェア の開発	平成 28 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2016/11/24
42	板垣 昭彦 宇都宮 健 志 佐々木 潤	日本気象 協会	地上観測データを用いた日射 スペクトル推定モデルの作成	平成 28 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2016/11/24
43	宇都宮 健 志 板垣 昭彦 佐々木 潤	日本気象 協会	日照一日射モデルの改良に向 けた取組み	平成 28 年度日本太陽 エネルギー学会・日本 風力エネルギー学会合 同研究発表会	2016/11/25
44	千葉 恭男 崔 誠佑 佐藤 梨都 子 石井 徹之 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	産総研九州センター（鳥栖 市）における太陽電池の研究 開発ーモジュールの発電量評 価技術開発	平成 28 年度九州・沖 縄産業技術オープンイ ノベーションデー	2016/12/7
45	崔 誠佑 佐藤 梨都 子 石井 徹之 千葉 恭男 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	薄膜系太陽電池モジュールの 屋外発電量評価と屋内測定評 価	平成 28 年度九州・沖 縄産業技術オープンイ ノベーションデー	2016/12/7
46	石井 徹之	電力中央 研究所	近年に製造された結晶シリコ ン太陽電池の年劣化率の算出 （招待講演）	東京理科大学総合研究 院太陽光発電技術研究 部門第 7 回シンポジウ ム「太陽電池・発電技 術の最新動向」	2017/1/30
47	千葉 恭男 崔 誠佑 佐藤 梨都 子 石井 徹之 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	化合物系薄膜太陽電池モ ジュールに対する光照射の検 討	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/15
48	佐藤 梨都 子 崔 誠佑 千葉 恭男 石井 徹之 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	光照射による高効率結晶シリ コン太陽電池モジュールの出 力変化	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16

49	石井 徹之 佐藤 梨都子 崔 誠佑 千葉 恭男 増田 淳	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	近年に製造された結晶シリ コン太陽電池モジュールの年劣 化率の評価	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
50	嘉数 誠 原 重臣 植松 卓巳	佐賀大学	吉野ヶ里メガソーラーにおけ る高速測定システムの構築	第 64 回応用物理学会 春季学術講演会	2017/3/16
51	原 重臣 嘉数 誠 増富 康記	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	吉野ヶ里メガソーラーにおけ る発電量データ処理および可 視化システムの開発	平成 29 年電気学会全 国大会	2017/3/16
52	Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	Degradation characteristics of thin film photovoltaic modules by outdoor exposure (招待 講演)	Global Photovoltaic Conference 2017	2017/3/16
53	Sungwoo Choi	産業技術 総合研究 所	Indoor and outdoor measurements for various photovoltaic at AIST Kyushu Center (招待講演)	International Green Energy Conference 2017	2017/4/6
54	宇都宮 健 志 佐々木 潤 板垣 昭彦	日本気象 協会	主成分分析による日射スペク トル変動特性の評価	日本気象学会 2017 年 度春季大会	2017/5/27
55	崔 誠佑 佐藤 梨都子 石井 徹之 千葉 恭男 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	多数年の屋外曝露による各種 太陽電池モジュールの経時変 化特性	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/14
56	石井 徹之 崔 誠佑 佐藤 梨都子 千葉 恭男 増田 淳	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	近年に製造された結晶シリ コン太陽電池モジュールの年劣 化率の算出	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/14

57	原 重臣 嘉数 誠 佐藤 梨都子 千葉 恭男 増田 淳	佐賀大学 産業技術 総合研究 所	吉野ヶ里メガソーラー発電所 における高速測定システムの データ解析	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/14
58	千葉 恭男 崔 誠佑 佐藤 梨都子 増田 淳 石井 徹之 川端 秋馬 平山 斉 吉村 幸雄	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所 鹿児島大 学 鹿児島県 工業技術 センター	産総研九州センター屋外曝露 サイトにおける太陽電池モ ジュールの発電量評価	AIST 太陽光発電研究 成果報告会 2017	2017/6/14
59	嘉数 誠 原 重臣 植松 卓巳	佐賀大学	High-speed measurements of generated power and its relationship to weather observations at Yoshinogari mega solar power plant	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/28
60	原 重臣 嘉数 誠 増富 康記	佐賀大学 佐嘉吉 野ヶ里 ソーラー	Dependence of string power on its height in the array in Yoshinogari mega solar power plant	44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	2017/6/30
61	崔 誠佑 佐藤 梨都子 石井 徹之 千葉 恭男 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	屋外曝露された結晶シリコン 系太陽電池の室内測定による 劣化率の検討	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2017/7/20
62	原 重臣 嘉数 誠	佐賀大学	メガソーラーにおける発電量 測定欠損区間のウェーブレッ トを用いた補完	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2017/7/20
63	石井 徹之 佐藤 梨都子 崔 誠佑 千葉 恭男 増田 淳	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	実使用下にあるバックコンタ クト太陽電 池にみられる PID 現象	第 14 回「次世代の太 陽光発電システム」シ ンポジウム	2017/7/21
64	崔 誠佑 千葉 恭男 佐藤 梨都子 石井 徹之 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	屋外曝露した各種太陽電池モ ジュールの劣化率の検討	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/5

65	千葉 恭男 崔 誠佑 佐藤 梨都子 石井 徹之 増田 淳	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	屋内測定から算出した劣化率を用いた佐賀県鳥栖市における太陽光発電量推定の検討	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/7
66	石井 徹之 崔 誠佑 佐藤 梨都子 千葉 恭男 増田 淳	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	実使用下のバックコンタクト太陽電池にみられる PID 現象	第 78 回応用物理学会 秋季学術講演会	2017/9/7
67	Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	Change in output power by light soaking for high efficiency crystalline silicon photovoltaic modules	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/26
68	Tetsuyuki Ishii Ritsuko Sato Sungwoo Choi Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	Potential-induced degradation of photovoltaic modules composed of interdigitated back contact solar cells observed in an actual photovoltaic system	33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	2017/9/27
69	崔 誠佑 千葉 恭男 佐藤 梨都子 増田 淳 石井 徹之	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	各種太陽電池モジュールの屋外曝露による経年劣化	平成 29 年度第 7 回九州・沖縄産業技オープンイノベーションデー	2017/10/11- 13
70	千葉 恭男 崔 誠佑 佐藤 梨都子 増田 淳 石井 徹之	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	産総研九州センター(鳥栖市)における太陽電池の研究開発ーモジュールの発電量評価技術開発	平成 29 年度第 7 回九州・沖縄産業技オープンイノベーションデー	2017/10/11- 13

71	Sungwoo Choi Ritsuko Sato Tetsuyuki Ishii Yasuo Chiba Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	Degradation and seasonal effects of amorphous silicon modules due to outdoor expose by indoor and outdoor measurements	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
72	Tetsuyuki Ishii Sungwoo Choi Ritsuko Sato Yasuo Chiba Atsushi Masuda	電力中央 研究所 産業技術 総合研究 所	Reliability investigation of five technologies under actual operating conditions for six years	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
73	Yasuo Chiba Ritsuko Sato Sungwoo Choi Tetsuyuki Ishii Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	Analyses of change in power generation by outdoor exposure of photovoltaic modules installed at AIST Kyushu Center from 2010 to 2016	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
74	Ritsuko Sato Yasuo Chiba Masayuki Chikamatsu Yuji Yoshida Atsushi Masuda	産業技術 総合研究 所 電力中央 研究所	Change in output power of organic photovoltaic module connected the electric power grid for 2 years	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
75	Shigeomi Hara Makoto Kasu	佐賀大学	Subsecond interval measurements of outdoor-operated mega solar power plant	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17
76	Shigeomi Hara Makoto Kasu	佐賀大学	Interpolation method for missing data of measurement in mega solar power plant using wavelet transforms	27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference	2017/11/12-17

【新聞・雑誌等への掲載】

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	日本気象協会 環境・エネルギー事業部	2015年 年間日射量 例年に比べ『東多西少』 ～例年に比べると、東北地方で多く、九州南部で少ない傾向～	日本気象協会のホームページ	2016/2/29
2	日本気象協会 環境・エネルギー事業部	国内初！「日射スペクトルデータベース」の公開～日本気象協会が「NEDO 日射量データベース」を拡充～	日本気象協会のホームページ	2016/5/17
3	日本気象協会 環境・エネルギー事業部	2016年の年間日射量 前年の年間日射量に比べ、東日本でやや少なく西日本でやや多い「東少西多」の傾向	日本気象協会のホームページ	2017/1/19
4	日本気象協会 環境・エネルギー事業部	ひまわり 8号のデータにより、雲と積雪を判別して推定日射量の精度を10%向上 ～衛星推定日射量サービス『SOLASAT 8-Now』に活用～	日本気象協会のホームページ	2017/2/1
5	日本気象協会 環境・エネルギー事業部	「第12回再生可能エネルギー世界展示会」に出展～太陽光・風力・海洋を主軸とした、エネルギー事業の今を紹介展示～	日本気象協会のホームページ	2017/6/27
6	産業技術総合研究所	レビュー AIST 太陽光成果報告会 2017 (下)	電子デバイス産業新聞, 8面	2017/8/3
7	産業技術総合研究所	割れた太陽光パネル、そのまま放置するとどうなるのか? 産業技術総合研究所 九州センター・その1	特集—メガソーラービジネス: 日経BP社(電子版)	2017/9/13

【展示】

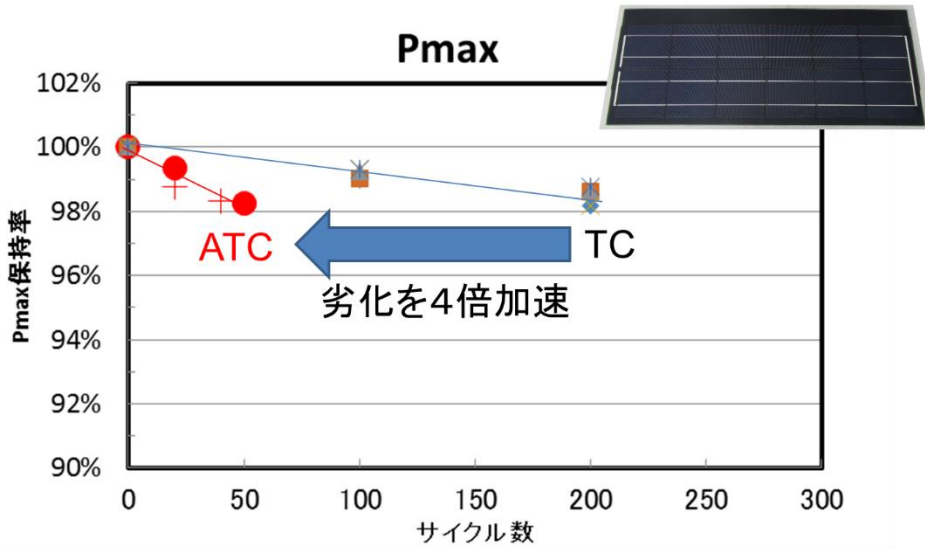
番号	区分	発表者	所属	タイトル	形式、詳細	日時、場所月
1	展示	板垣 昭彦 宇都宮 健志 佐々木 潤	日本気象協会	研究成果に関するブース展示	第10回再生可能エネルギー世界展示会	2015/7/29-31
2	展示	板垣 昭彦 宇都宮 健志 佐々木 潤	日本気象協会	研究成果に関するブース展示	第11回再生可能エネルギー世界展示会	2016/6/29-7/1
3	展示	板垣 昭彦 宇都宮 健志 佐々木 潤	日本気象協会	研究成果に関するブース展示	第12回再生可能エネルギー世界展示会	2017/7/5-7

D ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術開発 (株式会社カネカ)

1. 成果詳細

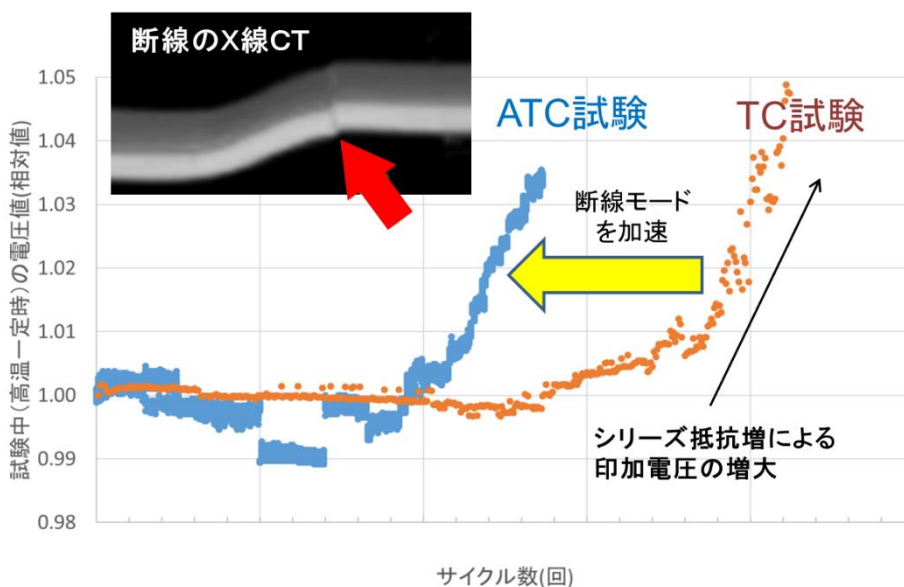
【① ZEB適用を想定した長期信頼性試験の開発】

ZEB適用型で想定される環境負荷のうち、「温度」、「電流」を複合的に負荷できる「電流負荷サイクル試験装置」を用いて、新規の加速評価試験方法を開発した。本試験方法では、はんだ接続部の機械強度の低下によって発生した亀裂が伝播し、はんだ接続部がはがれることで太陽電池モジュールの直列抵抗が増加する劣化モードを加速評価していると考えられる。加速方法として、ATC (Accelerated Thermal Cycle) 試験を開発し劣化加速を実現した。加速係数としては、通常用いられる温度サイクル試験に比べて、4倍加速で見出した (図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-1)。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-1 ATC試験による温度サイクルの加速評価

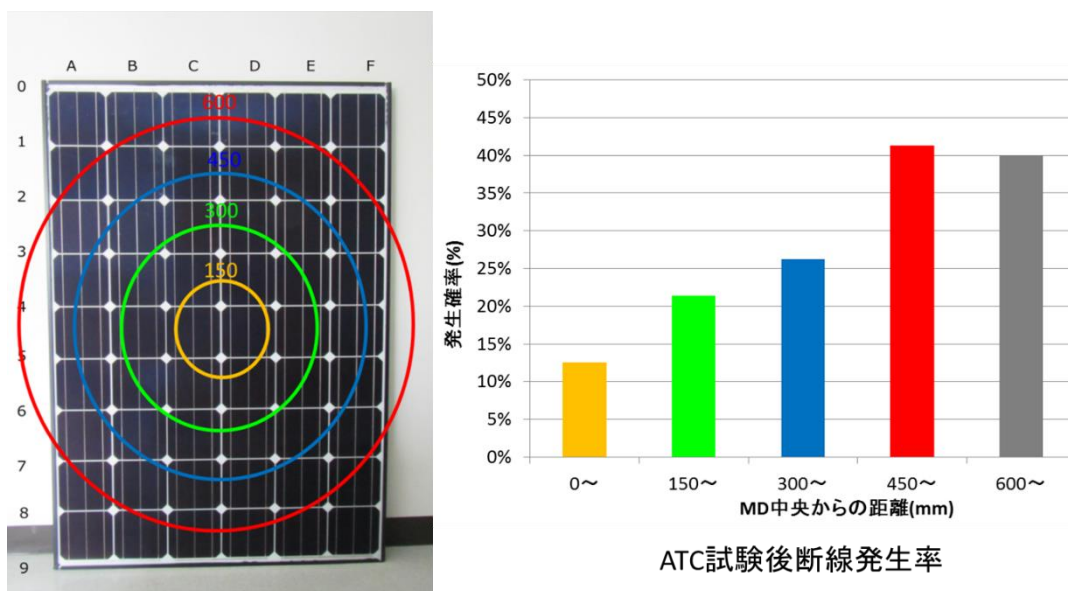
また、ATC試験によってタブ配線断線といった長期信頼性上リスクのある劣化モードも加速され、サイクル数は2分の1程度に短縮可能な評価結果が得られた (図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-2)。



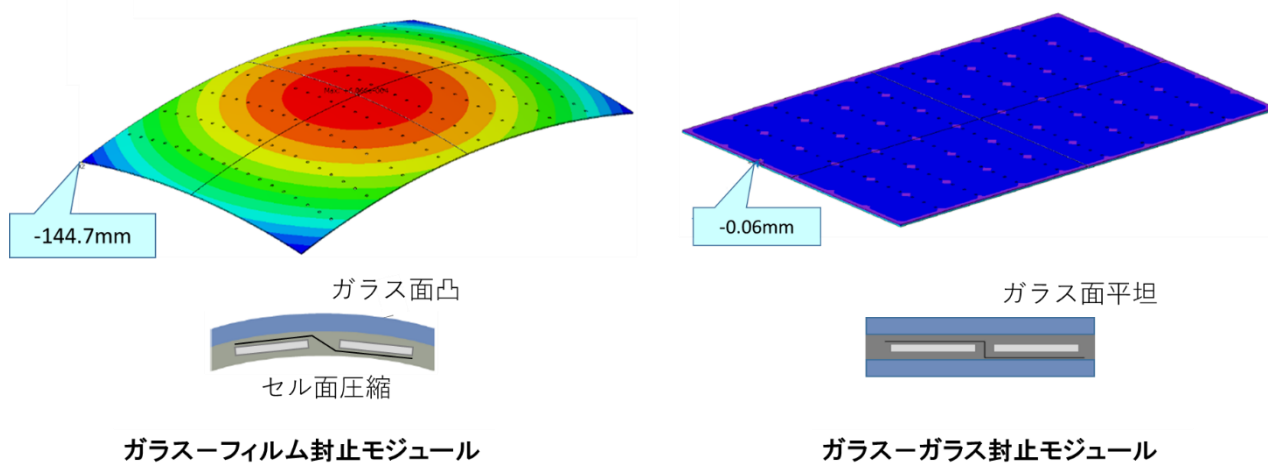
図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-2 ATC試験による断線不良モードの加速

タブ線断線は太陽電池モジュールに対するX線CT画像によっても確認され、太陽電池モジュールの

端部に近いほど断線の発生率が高い傾向にある事が見出された（図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-3）。ATC試験における熱応力解析から、温度変化による変位量は太陽電池モジュールの端部に近いほど大きく、断線の発生率と相関がある。熱応力による変位量は、モジュールの封止構造が線膨張係数の異なる部材で構成されていることに起因すると想定される。線膨張係数の同じ部材で構成されるガラス封止構造や建材で用いられている合わせガラス構造を有するZEB適用型太陽電池モジュールに対して熱応力解析を実施した結果、温度変化による変位量は小さく、セル間接続線の断線不良モードに対して優位であることが推定された（図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-4）。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-3 ATC試験後のセル間接続線の断線発生分布

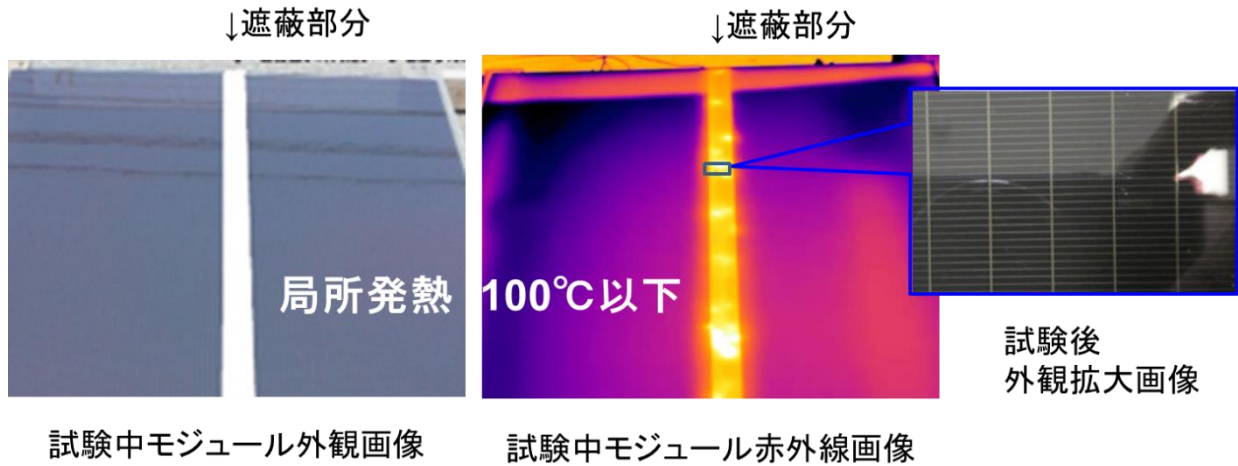


図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-4 太陽電池モジュールの熱応力による変位量解析

長期信頼性リスクの高い半田接続部のはがれやタブ線断線をより加速して評価するため、「温度」、「電流」に加えて「機械荷重」を複合的に負荷するために「電流負荷サイクル試験装置」の改造を実施し、複合負荷による劣化の加速化検討を行い、設置形態における環境負荷を考慮した長期信頼性試験を完成させる。

部分影については、ZEB適用型太陽電池モジュールである薄膜シリコンシースルー太陽電池に対してホットスポット試験を実施し、部分影発生時の温度上昇が抑えられることを定量的に評価した。開口率を向上させることによって、通常モジュールに比べて太陽電池セルならびに構成部材であるガ

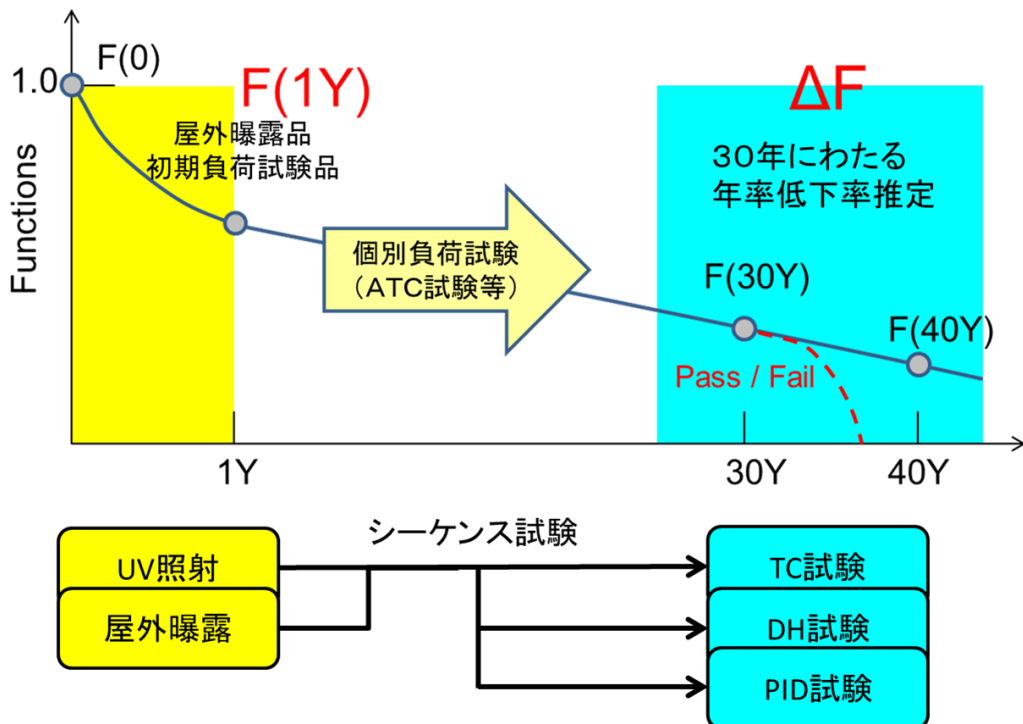
ラス等の破損リスクが小さくなることを見出した（図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-5）。一方で、建築物の開口部へ適用される採光型の結晶系モジュールでは、部分影により顕著な温度上昇が確認されており、開口率や電気的な設計が破損リスクに与える影響を検討した。結果、採光型の結晶系モジュールにおいても、モジュール設計により破損リスクを低減することが出来ることを見出した。開口部に適用される太陽電池は、建築物一体型太陽電池モジュールとして建築物の外装に用いられる事が多く、建築材料としての構造的な耐久性が必要となるため、適切な部分影の試験方法を提案する。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-①-1-5 薄膜シリコンシーソー太陽電池の部分影による発熱評価

【② 建材寿命を考慮した長期発電性能推定技術の開発】

ZEB 適用型太陽電池モジュールの実環境下での寿命に与える影響を評価するため、シーケンス試験に関する調査を行った。屋外曝露後に負荷試験を実施すると、屋外曝露無しで負荷試験を実施するよりも大きく劣化する事が確認されており、屋外曝露が与える影響について、一年間の屋外曝露試験後に続いての個別負荷試験と、初期負荷試験に続いての個別負荷試験との、シーケンス試験の比較にて劣化率の相違の評価を進めている（図Ⅲ-2-(ホ)-D-②-1-1）。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-②-1-1 建材寿命を考慮した長期発電性能評価技術の開発

長期信頼性リスクの高いと考えるデラミネーションを加速評価する試験方法としては、高温高湿試験とPID試験を組み合わせた試験方法がIEC規格に提案されている。近年量産した各種結晶Si太陽電池に対するPID試験後の外観観察を行った結果、いずれの太陽電池においてもデラミネーションは確認されなかった（表Ⅲ-2-(ホ)-D-②-1-1）。

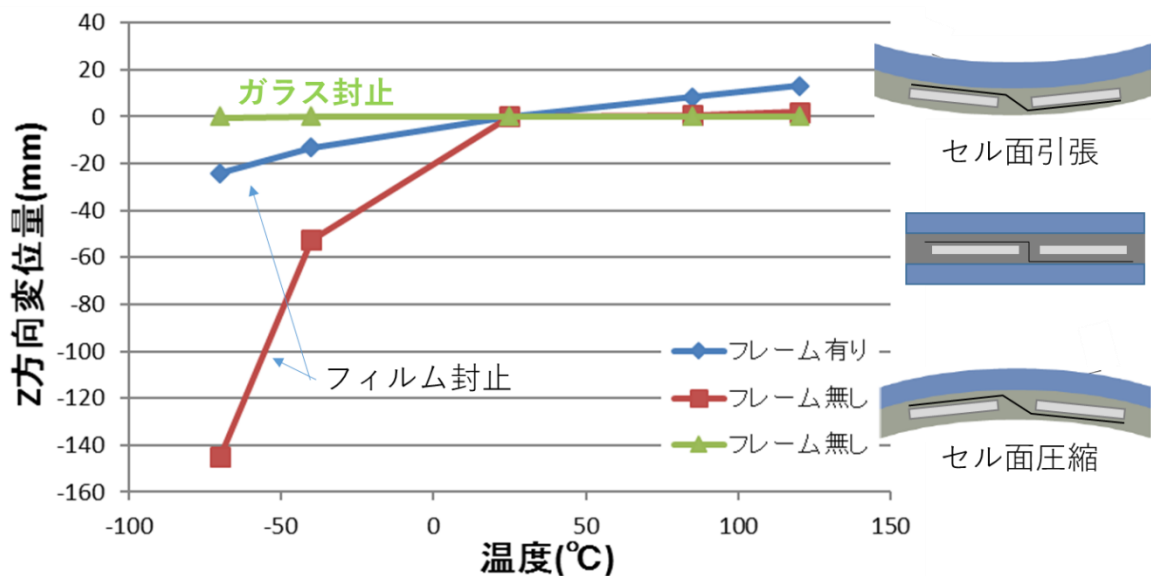
表Ⅲ-2-(ホ)-D-②-1-1 各種結晶Si太陽電池のPID試験とデラミ評価

MDタイプ	セル	封止材(EVA)	製造ライン	外観変化
1	PERC	水準A	A	無
2	多結晶耐PID対策品	水準B	B	無
	多結晶			無
	単結晶Si-1			無
	単結晶Si-2	水準C	A	無
		水準D		無
水準E		無		
単結晶Si-3	水準F	C	無	

本事業では、紫外線照射試験と高温高湿試験あるいは紫外線照射試験とPID試験のシーケンス試験による新規デラミネーション試験の開発を実施している。デラミネーションの発生原因として、封止材(EVA)の化学変化、物性変化による影響が大きいという仮説を検証するためにも、試験前後の分析を行い、解析を行っている。今年度、30年、40年後の劣化に相当するUV光照射負荷を明らかにする。

【③低コスト高信頼性太陽電池モジュールの耐久性評価、発電コストの見積もり】

建築分野で30年以上の長期耐久性において、モジュールの構造の違いによる熱応力に対する変位量を解析した結果、フレームの有無ならびに用いる封止部材により環境温度による変位量に大きな差が発生した（図Ⅲ-2-(ホ)-D-③-1-1）。



図Ⅲ-2-(ホ)-D-③-1-1 モジュール最大変位量の温度依存性

上記データに加えて、封止構造や封止部材について調査を実施した結果、プロジェクト目標に見合

う候補として、ガラスーガラス封止構造や建材で用いられている封止構造をZEB適用型太陽電池モジュールへ適用する可能性が見出された。実際に低コスト高信頼性太陽電池モジュールを作製し、長期信頼性評価を行うことで、ZEB適用型太陽電池モジュールとして、発電コスト7円/kWhを達成するためのコスト目標と課題を明確化する。

【④標準化活動への反映】

BIPV国際標準化委員会にて、ZEB適用型太陽電池モジュールの耐久性に関する評価手法について、現IEC規格をベースに建築サイズの大面積モジュールを対象にリテストガイドラインに関する提案を行った。ホットスポット試験及び温度サイクル試験、高温高湿試験、荷重試験を対象に、「代表サンプル試験」によって実試験体を代用できる試験体仕様と試験方法について提案を行った。

2. 実用化・事業化見通し

当社では、ZEBを実現するために必要となる屋上設置用太陽電池モジュールとしてヘテロ接合型太陽電池モジュールを、壁面ならびに開口部設置用太陽電池モジュールとして薄膜シリコンシーソーならびに結晶シリコンライトソー太陽電池モジュールを、30年以上の保証を実現できる製品として開発中である。

本事業「ZEB適用型太陽電池モジュールの長期信頼性評価技術」の開発によって得られた長期信頼性評価技術（新規加速評価試験法、寿命評価法）を製品設計、ならびに製品規格に反映させることで、建材と同等の寿命をもつZEB適用型高信頼性太陽電池製品を出来る限り速やかに上市していくことが可能と考えている。

事業化の見通しとして、2017年度には本事業で得られた低コスト高信頼性太陽電池モジュールの設計要件を上記開発品に適用する。2018年度には本事業で得られた長期信頼性評価技術を製品規格、品質管理基準に反映させ、まずは従来製品と同等の保証年数にて販売を開始する。2019年度には、長期信頼性評価技術ならびに低コスト高信頼性太陽電池モジュールの設計要件の妥当性検証を完了し、製品の量産化ならびに保証年数の拡張を判断し、他に先駆けてZEB市場をターゲットとした競争力のある製品の提供を実施していく計画である。

また、本事業の長期信頼性技術開発で得られた長期信頼性、寿命の試験法ならびに判定基準は、BIPV国際標準化委員会を通じて、国際規格（IEC、ISO）への反映にむけた活動を行う。2018年度には国際会議またはIEC会議にて成果を認知させる報告を行う。

3. 波及効果

本事業である長期信頼性技術開発で得られた長期信頼性、寿命の試験法の国際標準化を行うことにより、ZEBという新規市場に流通することが危惧される低品質品の流入を抑制することが出来る。これにより新規市場が混乱することを未然に防ぐことができると考えられる。

4. 今後の展開

製品の設計要件、製品規格、品質管理基準に適用可能な長期信頼性評価技術を確立することで、ZEBにもとめられる多種多様な製品の開発に安心して取り組むことが可能となる。本事業で製品開発する上での基盤技術の確立した後は、顧客の多種多様な製品要求事項に応える開発を実施する。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
論文	0	1	0	1 件
研究発表・講演（うち国際会議）	0	3	0	3 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	中島昭彦	株式会社 カネカ	社会実装としての BIPV システムの展望	日本太陽エネルギー学会誌 236 号	無	2016 年 11 月

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	中島昭彦	株式会社 カネカ	B I P V 普及に向けてのカネカの挑戦	第 48 回秋季化学工学学会	2016 年 9 月 8 日
2	中島昭彦	株式会社 カネカ	Challenges to Overcome before Spreading BIPV System	SAYURI-PV2016WS	2016 年 10 月 5 日
3	中島昭彦	株式会社 カネカ	建築物一体型太陽光発電モジュールの国際標準化	第 35 回 PVTEC 技術交流会	2016 年 12 月 1 日

E レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発 (日清紡メカトロニクス株式会社、奈良先端科学技術大学院大学)

1. 成果詳細

(1) 発電劣化メカニズムの解明

結晶系太陽電池モジュールの発電劣化年率は、およそ0.4～0.8%で、直線的に変化することが実測により示されている。事業性は、この年間平均発電劣化率(Rd)を用いて、20年間の生涯発電量を見積り、検討されている。一方、その発電劣化率は、設置環境に影響を受けるので、現場の太陽電池プラントでの寿命予測技術の確立が強く望まれている。

太陽電池モジュールは、「発電素子」を繋ぎ合わせた発電部分とそれらを環境劣化因子から保護する「ケーシング：EVA封止材」部分からなる。太陽電池モジュールの寿命予測を行うため、「発電素子：セルとセル上銀フィンガー電極・インターコネクタ」部と「ケーシング」部を別々に解析可能な分析技術の検討を行った。

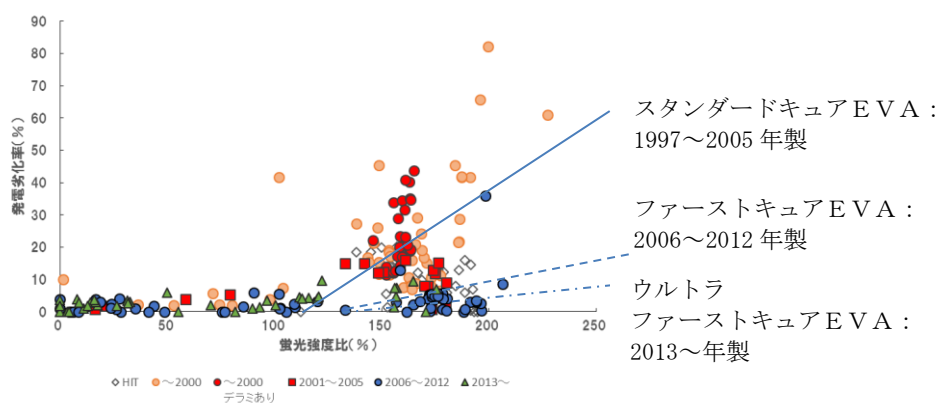
経年劣化モジュール(PID含む)の発電劣化原因を破壊分析およびEL画像観察などにより検討した結果、EL画像の明暗に大きく影響を与える変化として、①セル上の銀フィンガー部の細線薄肉化と②インターコネクタのはんだ接合部の剥離が観察された。破壊分析(SIMS)の結果、P型セルの銀フィンガー電極とインターコネクタを起点とし、セル表面への「ナトリウムの堆積」を観測した。また、EVA封止材の劣化による「酢酸」発生が認められた。

モジュール内部のEVA封止材の劣化(脱酢酸)は、ラマン分光によるEVAラマンスペクトルの蛍光の強さ：蛍光強度比($I_{1800\text{cm}^{-1}}/I_{2850\text{cm}^{-1}}$)で解析した。

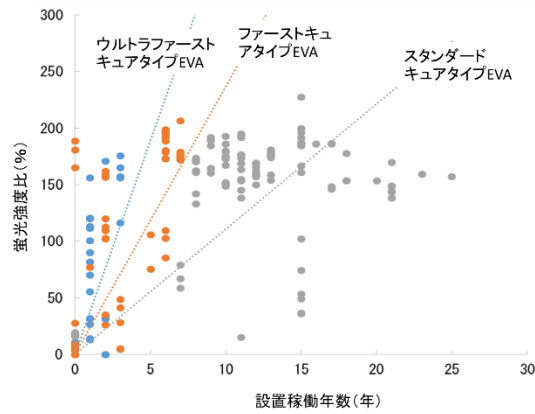
国内外の経年劣化モジュール(約300枚)の発電劣化率に及ぼす蛍光強度比の関係を図III-2-(ホ)-E-1に示す。ファーストキュアEVAでは、130%を超えるとモジュールの発電劣化率と相関することが分かった。スタンダードキュアEVAでは、110%を超えると太陽電池モジュールに発電劣化現象が開始する。これは、Naイオンがガラスから活性化し、セルの電極に引き寄せられ、銀フィンガー電極の腐食による細線薄肉化が発電劣化現象に繋がることに相関していると考えられる。

メガソーラーなどでは、蛍光強度比：130%を基準として、稼働何年でその値に達するかで発電プラントの寿命予測の基準値とすることができる。

最近の封止材は、更に加工タクトが速いウルトラファーストキュアEVAが使用されている。



図III-2-(ホ)-E-1

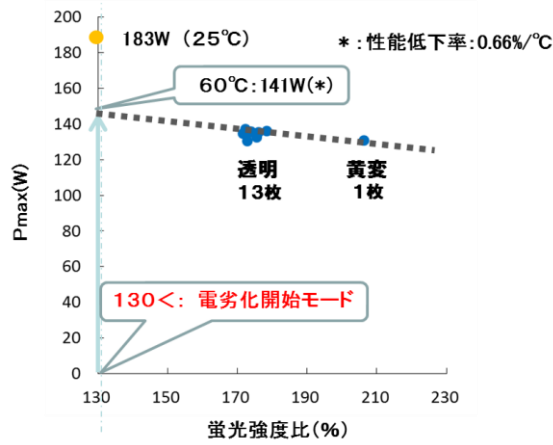


図Ⅲ-2-(ホ)-E-2

太陽電池モジュール適用のEVAタイプ別の蛍光強度比を図Ⅲ-2-(ホ)-E-2に示す。産総研所蔵の約100パネルと外部企業からの試料提供130パネル、および日清紡所蔵の約30パネルの発電劣化率とラマン分光解析を行った。産総研所蔵パネルと外部企業提供パネルの発電劣化率は、パネルの銘板値から求めたものである。製造年と製造場所からモジュール適用のEVAの種類を特定して、タイプ別の劣化度合いを比較した。その結果、ラミネート加工タクトを高速化する目的で開発されたEVA銘柄は、劣化し易いことが分かった。よって、図Ⅲ-2-(ホ)-E-1は、EVA封止材の劣化状態が及ぼす太陽電池モジュールの発電劣化率との関係において、EVAタイプ別の関係が得られた。

発電劣化率の算出は、太陽電池パネルの取り外しが必要であるため計測費用が高い。英弘精機社製のIVチェッカーで、250kWプラントの中で、封止材が黄変しているパネルを含む1アレイ(14枚直列)の最大発電量 P_{max} を計測した。計測した14枚の各パネルの中央部の蛍光強度比との関係を図Ⅲ-2-(ホ)-E-3に示す。黄変したパネルの蛍光強度比は、210%であり、他の透明な封止材を有するパネルよりも大きな値であった。切片は、発電劣化が開始する130%での値を採用した。本パネルの初期発電の平均値は、183W(25℃)であった。計測時のパネル温度は60℃であったので、多結晶シリコン温度係数(0.66%/℃)を考慮して算出すると、141Wとなり、その切片の発電量の値と一致した。この評価法を用いれば、太陽電池モジュールの初期性能が不明の場合に関わらず、発電劣化率を算出できることを示している。

発電劣化メカニズムより、実フィールドの発電劣化は、ガラス中のNaがセルの銀フィンガー電極を腐食し始めてからであるので、稼働年数と発電劣化率は、原点を通る直線ではない。25年後、30年後の発電量を予測するには、1年経過後に、同じ太陽電池モジュールにて計測し、発電劣化率を算出する。本プラントは、稼働7年経過での発電劣化率(上述の計算より)は、6%であったので、稼働8年後の発電劣化率と直線のグラフを作成し、25年後、30年後の発電劣化率を算出することによって、予測できる。

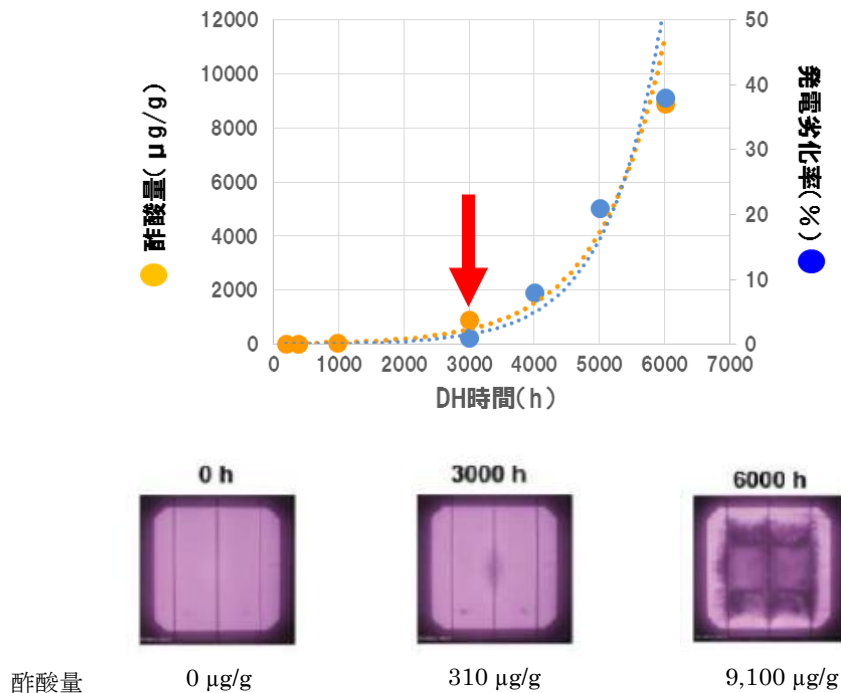


図III-2-(ホ)-E-3

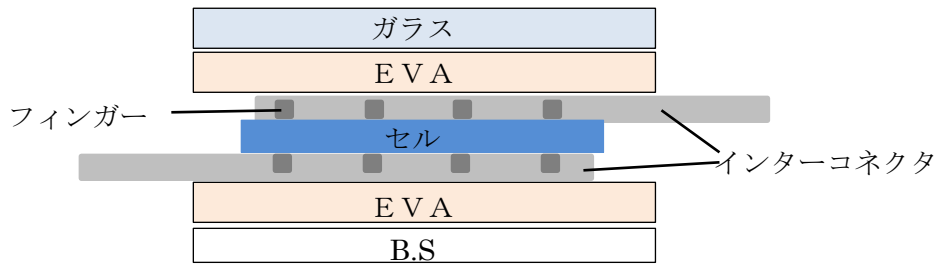
産総研九州センターより提供された、1000時間毎で6000時間迄のダンプヒート試験（85℃、85RH%）後の1セルモジュールの発電劣化率と酢酸量及びEL画像を図III-2-(ホ)-E-4に示す。発電劣化率は、発生した酢酸量の増加率とほぼ一致した。本結果は、ラボダンプヒート試験における発電劣化メカニズムは、酢酸量と強く相関していることを示している。

インターコネクタ（図III-2-(ホ)-E-5）のはんだは、酢酸等の酸によって容易に溶けるものである。ラボにて、シリコンセルのインターコネクタの一部を塩酸で溶かしてEL画像を撮ると、ダンプヒート試験後の結果を再現した。また、外れたインターコネクタを再配線するとEL画像が全面明部となった。また、6000時間ダンプヒート品の銀フィンガー電極の断面写真は、3000時間後の電極形状と同形状であった。つまり、実フィールドでの発電劣化メカニズムと異なることが分かった。

以上の結果、ダンプヒート試験における発電劣化メカニズムは、「インターコネクタの剥がれ」によるものであることが分かった。実フィールドにおいても、酢酸が大量に発生しているモジュールにおいては、インターコネクタ外れによる発電劣化が観察されている。なお、25年稼働の太陽電池モジュールから採取した平均の酢酸量は1900 μg/gであったので、通常の設置環境で3000 μg/g（赤↓）を超えるのは、40年以上と推定される。



図III-2-(ホ)-E-4



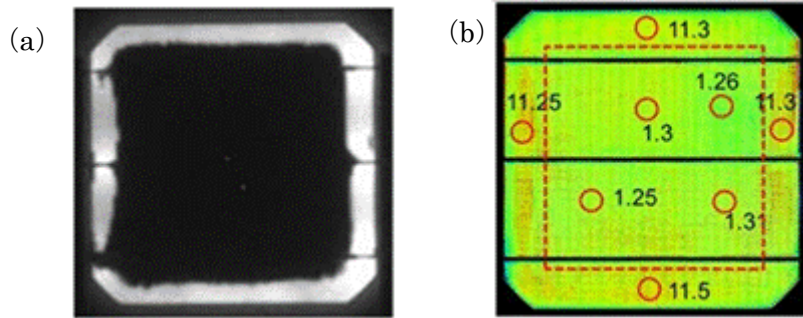
図Ⅲ-2-(ホ)-E-5

経年劣化モジュール、PID試験モジュール、実フィールド/PID劣化、PID試験モジュールの破壊分析結果を基にそれぞれの発電劣化モードを表Ⅲ-2-(ホ)-E-1に示す。実フィールドでの発電劣化は、発電により、電圧が加わっているため、銀フィンガー電極の細線薄肉化が進行し、酢酸が $1000 \mu\text{g/g}$ を超える場合は、インターコネクタ外れによる大幅な発電劣化が起っている。経年劣化とPID劣化は、ダンプヒート試験条件に電圧を加えるPID試験法により再現される。一方、インターコネクタ外れによる発電劣化不具合は、長時間ダンプヒート試験で評価することができる。しかし、6000時間の試験時間は、現実的ではない。実フィールド環境下の寿命予測試験は、ガラスを含むケーシングに高電圧を加える、所謂PID試験条件こそが実フィールドでの寿命を予測する試験法であると言える。

表Ⅲ-2-(ホ)-E-1

	ラボ試験 ダンプヒート試験	実フィールド	ラボ試験 PID試験
<条件>	<ul style="list-style-type: none"> 電圧 温度・湿度 時間 	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光(紫外線) 電圧 温度・湿度 ~30年 	<ul style="list-style-type: none"> 電圧(-1000V) 温度・湿度 時間
<分析結果>	<ul style="list-style-type: none"> Na堆積なし フィンガー変化なし デラミなし 酢酸$\sim 900 \mu\text{g/g}$ 	<ul style="list-style-type: none"> フィンガー電極周辺にNa堆積 フィンガーの細線薄肉化 デラミ、黄変 酢酸大$\sim 3000 \mu\text{g/g}$ 	<ul style="list-style-type: none"> フィンガー電極周辺にNa堆積 フィンガーの細線薄肉化 デラミ、黄変 酢酸小$\sim 10 \mu\text{g/g}$
<劣化原因>	インターコネクタのハンダ外れによる発電劣化	<ul style="list-style-type: none"> 酢酸によるインターコネクタ外れ Naイオンによるフィンガー細線薄肉化 	Naイオンのセル上堆積による電気特性変化

単結晶セルモジュールをPID試験(条件:アルミ板/85℃・85%RH・-1000V・1500時間)処理し、 μ -PCD法にて、実効的キャリアライフタイムを計測した結果を図Ⅲ-2-(ホ)-E-6に示す。予め、セル単体、そのモジュールのキャリアライフタイム: τ は、およそ $11 \mu\text{s}$ であることを確認した。PID劣化モジュールは、セル内で、 τ の大小の分布が生じており、PID現象は、セル表面にキャリアが拘束される部分の形成と相関することが分かった。この τ の分布は、EL画像や電子密度の可視化画像と一致した。一方、ラマン分光解析では、封止材の劣化は認められなかった。 μ -PCD法は、モジュール内のセル品質を評価できる有用な指標であることが分かった。



図Ⅲ-2-(ホ)-E-6

(a)PID試験を1500時間行ったP型単結晶Si太陽電池のEL画像(b)PID試験を1500時間行ったP型単結晶Si太陽電池の光起電流マッピング及び μ -PCD法により測定した実効的キャリア寿命値(Time range:80 μ s)

2. 実用化・事業化見通し

平成29年4月1日、太陽光発電所の保守点検や維持管理が発電事業者に義務づけられたことにより、O&M市場の拡大機運が急激に高まっている。O&Mの標準メニューは、①24時間の監視、②現地駆けつけ、③定期点検、④報告書作成、⑤現場管理であり、売電収入の5%程度の価格設定となっている。その市場は、自社グループやEPCに紐づいた形での案件となっている。

現状のO&Mビジネスは、差別化が難しく、価格勝負という様相になりつつある。この原因は、現O&M技術では、発電プラントの寿命予測ができていないからである。顧客は、安価で、かつ、事業計画通りの発電が20年間継続し、さらにFIT終了後も発電所として活用できることを期待している。

本NEDO委託事業で開発した「レーザーを用いた太陽電池モジュールの寿命予測技術」は、太陽電池モジュールのケース側(EVA封止材)の劣化状態をラマン分光測定器で解析することにより、その設置環境下での太陽電池モジュールの発電劣化率を見積もることができる。さらに、 μ -PCD測定により、セルの品質の詳細評価ができる。これらの評価結果により、パネルの交換を促したり、あるいは、設置した場所の架台周辺の湿気対策を指導するなど、発電劣化メカニズムに基づいたコンサルティングビジネスが可能となる。又、中古パネル販売においては、現在の発電性能の表示に加え、今後の発電劣化率を見積もることで中古市場マーケット用検査装置としての活用が期待できる。

3. 波及効果

太陽電池モジュールの寿命予測が可能となることで、O&Mビジネスでの信頼性向上及び本格的な中古パネル市場の形成が期待できる。

4. 今後の展開

太陽電池モジュールの発電劣化率とラマン分光測定器の蛍光強度比との相関を検討するに当たり、計測場所提供企業から、多くの引き合いを頂いた。又、発電劣化メカニズムに基づき、本現場での今後の発電性能予測が可能になった。これらのことから、中古パネルビジネス及び寿命予測検査装置及び評価解析システムに関する事業化の取組み(①~④)を2017年10月より行う。

- ① O&Mビジネス用として、O&M業者への販売を計画
- ② 中古パネル市場向け寿命予測検査装置として、中古パネル取扱業者への販売を計画
- ③ 過積載対応中古パネルの仕分け用検査装置として、中古パネル取扱業者への販売を計画
- ④ 廃棄物件パネルの仕分け用検査装置として、リサイクル業者への販売を計画

一方、 μ -PCD測定によるセル表面解析は、PERCセルに関して更なる検証を年度内で行い、様々なセルの品質劣化を検知できる技術に発展させる。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0	1	0	1 件
研究発表・講演（うち国際会議）	5	14(5)	2(1)	21 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	奈良先端 科学技術 大学院大 学	特願 2017-066163	国内	2017 年 3 月 29 日	出願 済	太陽光発電 モジュール 評価方法、 評価装置お よび評価プ ログラム	石河泰明、 Mohammad Aminul Islam

【研究発表・講演】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	仲濱秀斉	日清紡メ カトロン クス(株)	化学強化ガラス適用太陽電池 モジュールの PID 試験結果と 発電劣化メカニズム	平成 27 年度第 1 回太 陽電池モジュール劣化 メカニズム研究会	2015 年 10 月 20 日
2	仲濱秀斉	日清紡メ カトロン クス(株)	太陽電池パネルの寿命予測技 術開発の進捗状況報告	日本学術振興会次世代 の太陽電池システム第 175 委員会 第 4 回次世代シリコン 太陽電池分科会研究会 プログラム	2016 年 2 月 22 日
3	仲濱秀斉 飯田浩貴	日清紡メ カトロン クス(株)	HIT モジュールの劣化分析結 果報告	平成 27 年度第 2 回太 陽電池モジュール劣化 メカニズム研究会	2016 年 3 月 14 日
4	石河泰明	奈良先端 科学技術 大学院大 学	結晶 Si 太陽電池モジュール の非破壊評価技術開発	平成 27 年度第 2 回太 陽電池モジュール劣化 メカニズム研究会	2016 年 3 月 14 日
5	野口 一 輝, M. A. Islam, 石 河 泰明, 仲濱 秀 斉, 浦岡 行治	奈良先端 大、日清 紡メカト ロニクス	多結晶 Si 太陽電池モジュー ルの K イオンによる PID 劣化 メカニズム解明に向けた光過 渡吸収法の検討	第 63 回応用物理学会 春季学術講演会	2016 年 3 月 19 日

6	Mohammad Animul Islam, Kazuki Noguchi, Narihide Nakahama, and Yasuaki Ishikawa	奈良先端大、日清紡メカトロニクス	Localized Defect Study of Laboratory PID Tested Module	IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference	2016年6月5日
7	Mohammad Animul Islam, Kazuki Noguchi, Narihide Nakahama, and Yasuaki Ishikawa	奈良先端大、日清紡メカトロニクス	Investigation of the E V A Degradation Mechanism and Prediction of Reliability by the Raman Spectroscopy	European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2016年6月20日
8	Mohammad Aminul Islam, Kazuki Noguchi, Hidenari Nakahama, and Yasuaki Ishikawa	奈良先端大、日清紡メカトロニクス	Detail Study on Failure Mechanism of Si-Photovoltaic: Encapsulant to Solar Cells	第77回応用物理学会秋季学術講演会	2016年9月14日
9	石河泰明	奈良先端科学技術大学院大学	結晶 Si 太陽電池モジュールの非破壊評価技術開発 II	平成 28 年度第 1 回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2016年7月21日
10	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	太陽電池モジュールの寿命予測技術確立検討/モバイルラマン分光計測結果	平成 28 年度第 1 回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2016年7月21日
11	飯田浩貴	日清紡メカトロニクス(株)	HIT モジュールの破壊分析結果 II	平成 28 年度第 1 回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2016年7月21日

12	Yasuaki Ishikawa, Mohammad Aminul Islam, Kazuki Noguchi, Hirotaka, Iida, Yasushi Takagi, and Hidenari Nakahama	奈良先端大、日清紡メカトロニクス	A characterization by using laser-based technique for failure Si PV modules	International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016年10月5日
13	Kazuki Noguchi, Mohammad Aminul Islam, Takuya Oshima, Yasuaki Ishikawa, Hidenari Nakahama, and Yukiharu Uraoka	奈良先端大、日清紡メカトロニクス	Study of carrier lifetime measurement methods for PID tested module	International Workshop on the Sustainable Actions for "Year by Year Aging" under Reliability Investigations in Photovoltaic Modules	2016年10月5日
14	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発	平成28年度成果報告会	2016年11月1日
15	石河泰明、Mohammad Aminul Islam、野口一輝、飯田浩貴、高木靖史、仲濱秀斉	奈良先端大、日清紡メカトロニクス	レーザーを利用したSi太陽電池モジュールの劣化特性評価	学振第175委員会 モジュール・システム分科会 第5回研究会	2016年12月12日
16	Mohammad Aminul Islam, Yasuaki Ishikawa, Sadao Sakamoto, Hidenari Nakahama, and Atsushi Masuda	奈良先端大、日清紡メカトロニクス、産業技術総合研究所	Unexplained Causes of the Most Frequent Degradation Mode of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules	NREL Annual Photovoltaic Reliability Workshop	2017年2月28日

17	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	EVA封止材の分子構造から観た太陽電池発電劣化メカニズム	平成28年度第2回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2017年3月21日
18	飯田浩貴	日清紡メカトロニクス(株)	発電劣化メカニズムを踏まえた、PID試験法の検討	平成28年度第2回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2017年3月21日
19	石河泰明	奈良先端科学技術大学院大学	結晶Si太陽電池モジュールの非破壊評価技術開発 III	平成28年度第2回太陽電池モジュール劣化メカニズム研究会	2017年3月21日
20	仲濱秀斉	日清紡メカトロニクス(株)	レーザー技術を用いた太陽電池モジュールの寿命予測検査技術の開発	平成29年度成果報告会	2017年9月22日
21	Mohammad Aminul Islam, Hidenari Nakahama, Yasuaki Ishikawa	奈良先端大、日清紡メカトロニクス	Study on Potential-induced degradation and recovery of n-type single crystalline Si photovoltaic modules	European PV Solar Energy Conference and Exhibition	2017年9月25日

(へ) 動向調査等

【A 太陽光発電開発戦略に関する動向調査】(みずほ情報総研株式会社)

テーマ名	中間目標	研究開発成果	達成度*1	備考
太陽光発電開発戦略に関する動向調査	「太陽光発電開発戦略」の推進に係る各種情報収集・分析	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電システムの導入動向、太陽電池セル・モジュールの生産・出荷動向と主要国における生産能力と生産量、パワーコンディショナの出荷動向を調査するとともに、発電コストに関連する各種情報を収集した。 調達価格等算定委員会の議論から、発電コスト算定方法を最新のものに見直すとともに、最新の発電コストの分析を行った。また、2020年、2030年の将来発電コストについて様々な条件を置いて分析を実施した。 海外主要機関等のロードマップにおける太陽光発電コストの分析・評価事例を調査し、システム価格や発電コストの算定方法などについて日本との比較を行った。 太陽電池技術に関する特許分析の考え方や手法およびキーワードについて検討を行った。 	○	
	太陽光発電産業、市場動向等に関するシナリオ分析	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光発電に関連する市場動向、制度動向、技術動向、経済性評価（グリッドパリティ等）の情報を調査した。 シナリオ分析の実施方法を検討し、各ステップでの具体的な実施イメージを作成した。また、動向情報を踏まえながら、太陽光発電の将来導入量に影響を与える影響因子を整理した。 太陽光発電の将来導入量に関する定量的な分析を様々な条件を想定して試行的に実施した。 	○	
	「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出	<ul style="list-style-type: none"> ハイブリッド自動車、電気自動車、燃料電池自動車などの次世代自動車について、販売台数の推移と見通し等に関する情報を収集した。 太陽光発電システム搭載自動車の付加価値を定量的に分析し、今後の課題を検討した。また、太陽光発電システム搭載自動車の取り組みを国際的に展開するための準備を実施した。 	○	

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【B 発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査】(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	備考
(1) 太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性および産業競争力に関する動向調査	<ul style="list-style-type: none"> ・年度毎に太陽電池モジュール性能と発電コストの関係を分析する。 ・発電量、発電コストに直結する太陽電池モジュールの長期信頼性に関する動向調査を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・現状の発電コストを把握するため、太陽光発電システム設置価格とその内訳について調査・分析を行った。 ・太陽電池モジュール性能の発電コストへの影響の推定を実施した。 ・世界における太陽電池モジュール技術および産業の現状を調査した。ベンチマークとして、生産や技術面において世界の代表的な太陽電池製造企業 12 社を対象とし、事業内容の整理および比較を行った。 ・太陽電池モジュールの長期信頼性（性能劣化および故障、耐久性等）に関する評価、要因分析、研究開発動向、国際標準化の新たな動向について調査した。 	○	
(2) 太陽電池モジュール製造技術開発と製造コストに関する調査・分析	<p>主要な太陽電池モジュールの製造技術の開発状況と製造コストの内訳とその変化に関する調査し、コスト低減要因などの分析を行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・現在市場で主に流通している結晶シリコンおよび化合物系薄膜（CIGS 系、CdTe）太陽電池に焦点を当て、太陽電池モジュール製造技術の現状と、世界の研究開発の取組みについて、国際会議や学術会議、直接ヒアリング等から調査し、最新の動向をまとめた。 ・これら太陽電池モジュールの製造コストについて、その内訳やコスト低減の方向性について調査・分析した。 	○	
(3) 太陽電池モジュールの利用動向と今後の産業と市場の可能性に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽電池モジュール要件の現状と今後の変化の可能性について調査する。 ・コスト低減や性能向上により発生する新たな利用可能性について探索し、今後付加すべき性能・機能などについても検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽光発電システムの施工時や利用環境下における太陽電池モジュールの不具合発生の現状と、太陽電池モジュール要件に関する技術開発動向について調査した。 ・実利用下において要請される太陽電池モジュール仕様の要件と技術開発課題、また、今後想定される新たな利用環境および用途に対する太陽電池モジュール要件と、それらの実現に向けた最近の主な研究開発および事業化・商品化動向についてまとめた。 ・太陽電池製造に係る今後の市場と産業について検討・分析するため、今後の太陽光発電市場（地域および用途別）見通し、最近の太陽電池生産拠点の動向について調査を行った。 	○	
(4) 各国の太陽電池研究開発政策動向及び新たな太陽電池技術に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> ・各国での太陽電池研究開発動向について、国家間の開発方針や各技術分野への取り組みの状況などについて比較・分析を行う。 ・実用化が期待される新たな太 	<ul style="list-style-type: none"> ・海外主要国における太陽電池の研究開発動向を調査し、研究開発戦略や開発動向、予算配分等をまとめた。これら各国の太陽電池技術開発戦略を体系的かつ明確に比較・分析できるよう、その枠組み、予算配分、目標等の比較を行った。 ・新たな太陽電池技術として、ペロブスカイト太陽電池、有機薄膜太陽電池の最近の研究開発動向や、コスト試算例、実用化に向けた企業による取り組みについて調査した。また、太陽電池モジュールの性能向上やコスト 	○	

	陽電池技術について調査し、実用化の可能性を検討する。	低減、信頼性向上に資する新たなモジュール化技術の概要と開発の現状をまとめた。		
--	----------------------------	--	--	--

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

【C IEA PVPS 国際協力事業】(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	備考
IEA PVPS タスク 1 の国際協力活動への参加(専門家会議等への参加、国際協力活動への対応)	IEA PVPS タスク 1 の国際協力活動に日本の代表として参加し、国際協力に貢献すると共に情報交換を実施する	タスク 1 専門家会議、タスク 1 活動に係わるワークショップ及びその活動への参画を通じて、各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。また、タスク 1 が主催する各種ワークショップにおいて日本の動向について講演を行い、加盟国間の情報交換に貢献した。	○	当初予定の計画を遂行
タスク 1 に係る日本の報告書(調査・作成)	IEA PVPS に提出することを義務付けられている報告書を提出する	日本のタスク 1 に関わる報告書である National Survey Report of PV Power Applications Japan、Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report、及び Country Page of Japan の提出に必要な調査を実施し、報告書を IEA PVPS に提出した。	○	当初予定の計画を遂行
タスク 1 に係る定期刊行物の日本語版作成	IEA PVPS の成果の普及のために定期刊行物の日本語版を作成する	IEA PVPS Trends Report 及び主要国の国内調査報告書(National Survey Report of PV Power Applications)の日本語版、「速報報告書」Snapshot Report 日本語版を作製した	○	当初予定の計画を遂行
2018 年度以降の IEA PVPS 活動に関する情報収集と活動提案	タスク 1 での議論を中心に、今後 IEA PVPS 活動について情報収集を実施する	タスク 1 専門家会議における今後の IEA PVPS の活動の方向性に関する議論に参加し、タスク 1 としての提案を NEDO に対して報告した。	○	当初予定の計画を遂行
加盟国の統計・データ等の取りまとめ	IEA PVPS 統計データの取りまとめ及び更新を実施する	IEA PVPS で収集している導入量、価格情報、生産量等を取り纏め、更新を行った。	○	当初予定の計画を遂行

* 1 達成度：◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

A 太陽光発電開発戦略に関する動向調査（みずほ情報総研株式会社）

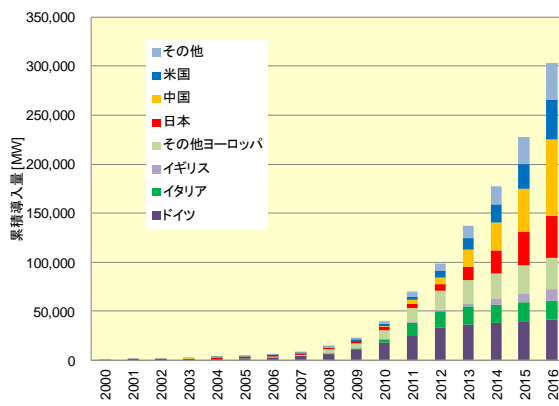
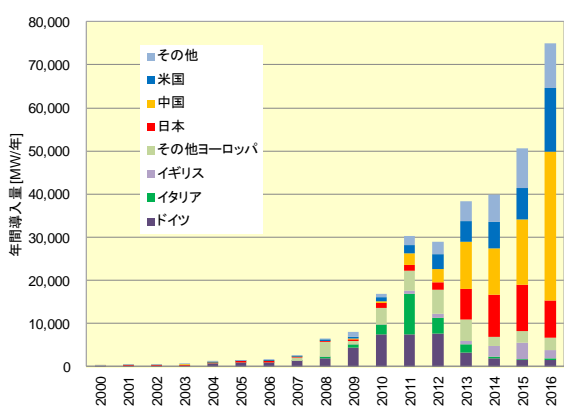
1. 成果詳細

1.1 「太陽光発電開発戦略」の推進に係る各種情報収集・分析

a) 太陽光発電の導入、生産動向の調査

○世界の太陽光発電導入量推移

図Ⅲ-2-(へ)-A-1 および図Ⅲ-2-(へ)-A-2 に、世界の太陽光発電導入量を示す。2016年の太陽光発電の年間導入量は世界全体で約75GWで、中国の導入量が最も大きく約34.5GW/年、次いで米国（約14.7GW/年）、日本（約8.6GW/年）、インド（約4.0GW/年）、イギリス（約2.0GW/年）の順となった。また、2015年に引き続き、イギリスの年間導入量が欧州最大となったことに加え、インドの導入量の増加が著しい。2016年末時点の世界の累積導入量は303GWに達し、国別では中国が最も多く約78.1GW、次いで日本（約42.8GW）、ドイツ（約41.2GW）、米国（約40.3GW）、イタリア（約19.3GW）となっている。2015年に引き続き2016年も中国が世界最大の太陽光発電導入国となった。また日本はドイツを抜いて二番目に多い太陽光発電導入国となった。



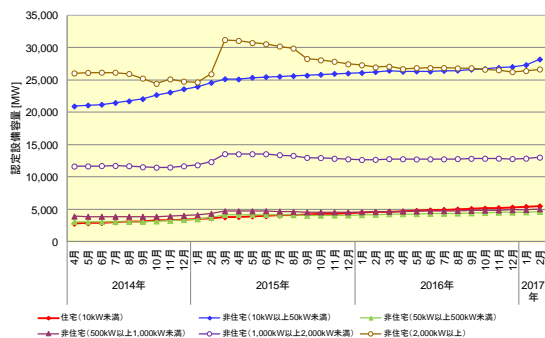
図Ⅲ-2-(へ)-A-1 世界の太陽光発電年間導入量の推移 Ⅲ-2-(へ)-A-(1)-(7)より作成

図Ⅲ-2-(へ)-A-2 世界の太陽光発電累積導入量の推移 Ⅲ-2-(へ)-A-(1)-(7)より作成

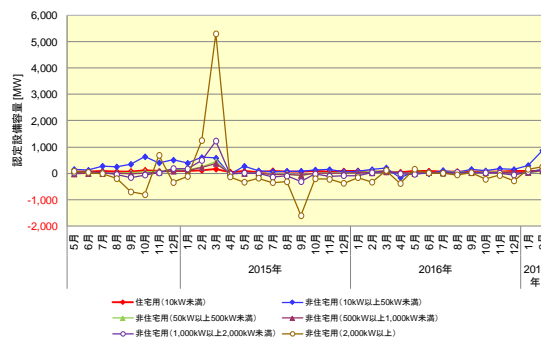
○国内における太陽光発電導入量推移

日本国内における太陽光発電導入量は固定価格買取制度のもと急速に拡大した。固定価格買取制度が開始された2012年7月以降、新規設備認定を受けた太陽光発電は2017年2月末時点で83.1GWである。内訳を見ると、認定取り消しが発生している2,000kW以上の区分では2014年の27.9GWから26.7GWに減少、10kW以上50kW未満が最も多く28.2GW、1,000kW以上2,000kW未満が13.0GWとなっており、非住宅用が住宅用（10kW未満）（約5.5GW）を大きく上回っている。

<累積認定量>



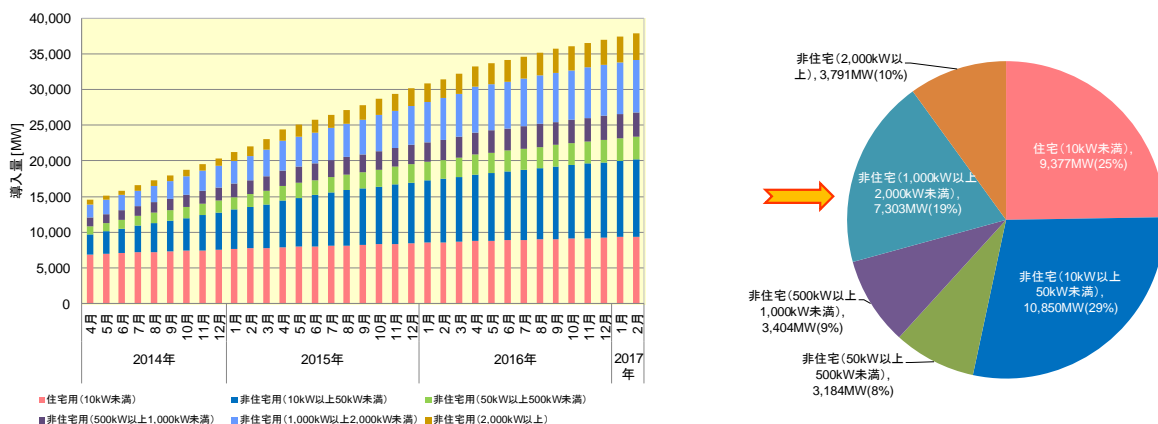
<月別認定量(各月)>



図Ⅲ-2-(へ)-A-3 固定価格買取制度による太陽光発電認定設備容量の推移

(新規認定分：(左)累積、(右)月別) Ⅲ-2-(イ)-A-(8)より作成

この新規認定設備容量のうち運転を開始した設備容量（導入量）は 2017 年 2 月末時点で 32.9GW にとどまっているが、固定価格買取制度開始以前に導入され、移行認定された設備容量を含めると、日本における太陽光発電導入量は約 37.9GW に達している。内訳は 10kW 以上 50kW 未満の非住宅用（10.8GW）が最も多く、次いで住宅用（10kW 未満）が 9.4GW、1,000kW 以上 2,000kW 未満の非住宅用（7.3GW）と続いている。



図Ⅲ-2-(へ)-A-4 固定価格買取制度による太陽光発電導入量の推移（左）と 2017 年 2 月末時点の導入量内訳（右）（移行認定分も考慮） Ⅲ-2-(へ)-A-(8)より作成

○太陽電池セルの生産量シェア

太陽電池セルの世界市場は、かつては日系太陽電池メーカーが大きなシェアを占め、2005 年には日本企業のシェアは世界全体の 47%を占め、生産量上位 5 社のうちの 4 社が日本企業であった。しかしながら、2009 年には日本企業のシェアは 14%に低下、上位 10 社に入る日本企業は 2 社となり、2015 年時点では上位 10 社に日本企業は入らず、生産量に占めるシェアも 5%にとどまっている。一方、コスト競争力を持つ中国・台湾勢が 2000 年代後半から大きくシェアを伸ばし、2005 年におけるシェアは 12%であったが、2009 年には世界の 49%、2015 年には世界の 79%を占めるに至っている。太陽電池モジュールについても、2015 年の生産量は中国メーカーが上位 10 社中 5 社を占めている。なお、出荷量・生産量どちらも上位 10 社に日本企業は入っていない。

表Ⅲ-2-(へ)-A-1 太陽電池セル生産量ランキングの推移（単位：GW/年） Ⅲ-2-(へ)-A-(9)より作成

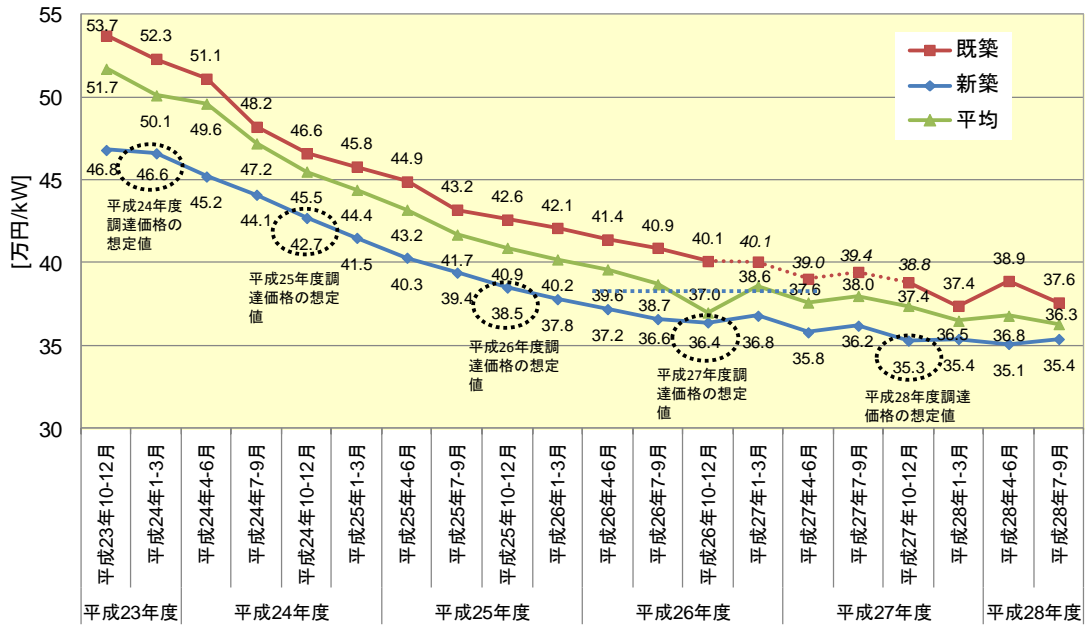
2005 年（企業別）		2009 年（企業グループ別）		2015 年（企業グループ別）	
シャープ（日本）	0.428	First Solar（米国/ドイツ/マレーシア）	1.01	Hangwha グループ（ドイツ/韓国/マレーシア/中国）	3.94
Q-Cells（ドイツ）	0.166	Suntech（中国）	0.704	Trina Solar（中国）	3.88
京セラ（日本）	0.142	シャープ（日本）	0.595	JA Solar（中国/マレーシア）	3.60
三洋電機（日本）	0.125	Q-Cells（ドイツ/マレーシア）	0.537	First Solar（米国/マレーシア）	2.62
三菱電機（日本）	0.100	Yingli Green Energy（中国）	0.525	Jinko Solar（中国/ポルトガル/マレーシア/南アフリカ）	2.50
Schott Solar（ドイツ）	0.082	JA Solar（中国）	0.509	MOTECH（台湾）	2.35
Suntech（中国）	0.081	京セラ（日本）	0.4	Yingli Green Energy（中国）	1.94
MOTECH（台湾）	0.060	Trina Solar（中国）	0.399	Canadian Solar（カナダ/中国）	1.73
Isoton（スペイン）	0.053	SunPower（フィリピン）	0.398	Suntech Power /Shunfeng（中国）	1.70
Shell Solar Industries（米国）	0.042	Gintech（台湾）	0.396	Neo Solar Power（台湾/中国）	1.65
（上位 10 社の占める比率：73%）		（上位 10 社の占める比率：51%）		（上位 10 社の占める比率：41%）	

b) 太陽光発電の価格動向と発電コストの分析

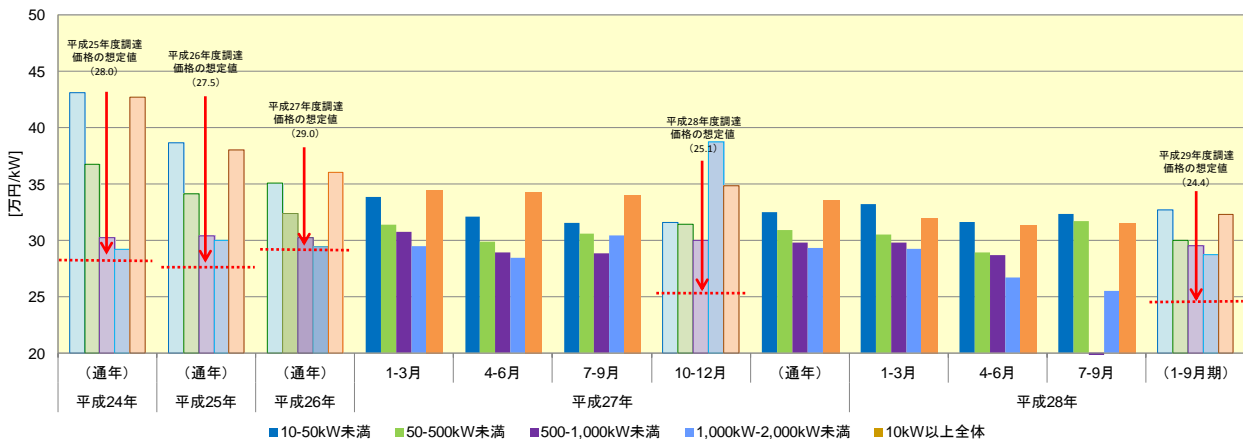
○太陽光発電システムの価格動向

図Ⅲ-2-(へ)-A-5 および図Ⅲ-2-(へ)-A-6 に、住宅用太陽光発電システムおよび非住宅用太陽光発電システムの価格動向を示す。2016 年 7-9 月期における住宅用太陽光発電システム（10kW 未満）の価格は住宅平均で 36.3 万円/kW で前年同時期（2015 年 10-12 月期）から 1.1 万円の低減

となった。新築住宅は昨年度から横ばいの 35.4 万円/kW であった。固定価格買取制度による平成 29 年度調達価格想定に際しての住宅用太陽光発電のシステム価格の想定値は、効率的に導入が進む水準として 33.6 万円/kW と設定された。非住宅用太陽光発電システムの価格は 2016 年 7-9 月期において 10kW 以上 50kW 未満のシステムが 32.3 万円/kW、50kW 以上 500kW 未満のシステムが 31.7 万円/kW、500kW 以上 1,000kW 未満のシステムが 28.7 万円/kW（2016 年 7-9 月の実績が 0 件なため 4-6 月期の値）、1,000kW 以上のシステムが 28.2 万円/kW であった。2014 年以降、価格低下の度合いは小さくなり、前期より増加する場合も見られるようになっている。固定価格買取制度による平成 29 年度調達価格想定に際しての非住宅太陽光発電のシステム価格の想定値は、効率的に導入が進む水準として、価格が安い順に上位 25%となる 24.4 万円/kW（除土地造成費）という価格が想定された。



図Ⅲ-2-(へ)-A-5 固定価格買取制度による住宅用（10kW 未満）太陽光発電システム価格の動向Ⅲ-2-(へ)-A-(10)より作成



図Ⅲ-2-(へ)-A-6 固定価格買取制度による非住宅用（10kW 以上）太陽光発電システム価格の動向Ⅲ-2-(へ)-A-(10)(11)より作成

○太陽光発電システムの発電コスト推定

図Ⅲ-2-(へ)-A-7 および図Ⅲ-2-(へ)-A-8 に、住宅用太陽光発電システムおよび非住宅用太陽光発電システムの発電コストの推定結果を示す。2016 年における住宅用太陽光発電システムの発電コストは、新築住宅では 35.4 万円/kW ならびに平成 29 年度調達価格の想定値である 33.6 万

円/kW というシステム価格を想定し、それぞれ 18.70 円/kWh、17.88 円/kWh となった。なお、既築住宅におけるシステム価格 37.6 万円/kW より求めた発電コストは 19.71 円/kWh となった。

非住宅用太陽光発電システムでは、2,000kW のシステムについて、上述の 1,000kW 以上システムの価格である 28.2 万円/kW、ならびに平成 29 年度調達価格の想定値である 24.4 万円/kW というシステム価格を想定し、発電コストはそれぞれ 17.95 円/kWh、16.15 円/kWh となった。2015 年と比較するとシステム価格の低減は少ないが、設備利用率が 14%から 15.1%に向上し、さらに年間の運転維持費も 6,000 円/kW から 5,000 円/kW に低下した。これによって 2015 年システム価格 25.1 万円/kW の場合と比較して、2016 年システム価格 24.4 万円/kW の発電コストは 2.4 円/kWh 低下している。

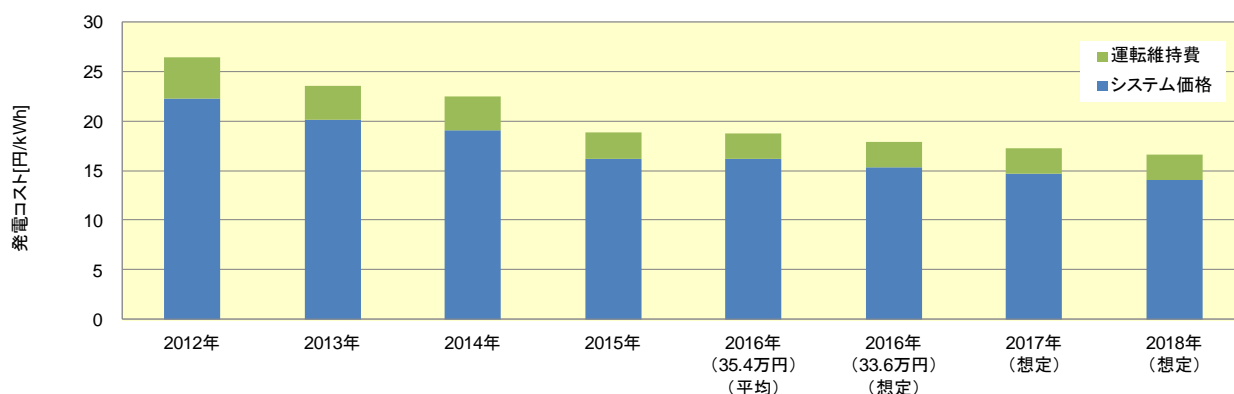


図 III-2-(へ)-A-7 住宅用太陽光発電システムの発電コスト推定結果 (新築住宅を想定)

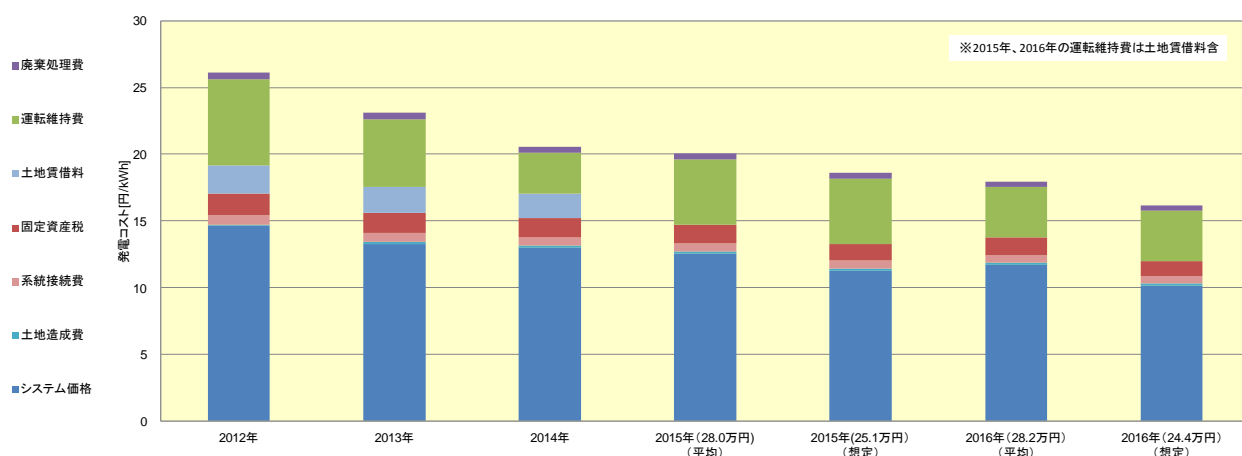
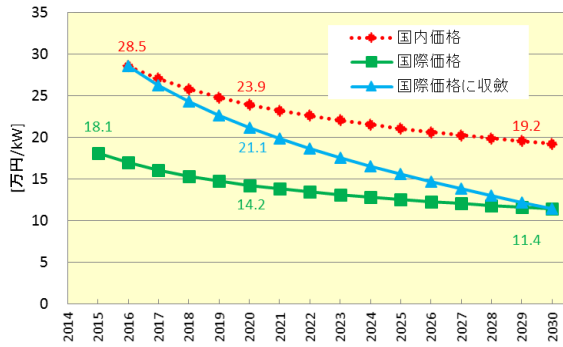


図 III-2-(へ)-A-8 非住宅用太陽光発電システムの発電コスト推定結果 (2,000kW を想定)

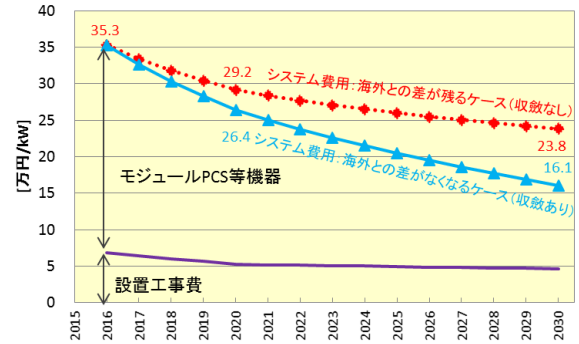
2020 年および 2030 年における太陽光発電システム価格について、発電コスト検証ワーキンググループ III-2-(へ)-A-(12) の考え方を参照して推定した結果を図 III-2-(へ)-A-10、図 III-2-(へ)-A-12 に示す。これらの価格および、関連するパラメーター (運転年数、モジュール効率等) を考慮して発電コストを推定した結果が図 III-2-(へ)-A-13 となる。住宅用太陽光発電システム価格はそれぞれ 26.4 万円/kW および 16.1 万円/kW となり、発電コストは 12.19 円/kWh、6.73 円/kWh と推定された。非住宅用太陽光発電システムでは 2020 年および 2030 年におけるシステム価格がそれぞれ 20.9 万円/kW および 12.9 万円/kW となり、発電コストはそれぞれ 11.89 円/kWh、6.95 円/kWh となった。

＜モジュール、PCS 等機器価格(住宅)＞



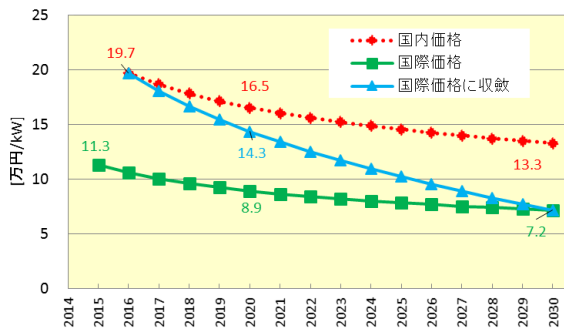
図Ⅲ-2-(へ)-A-9 2030 年に向けた住宅用太陽光発電のモジュール、PCS 等機器価格の想定

＜住宅用太陽光発電システム価格(住宅)＞



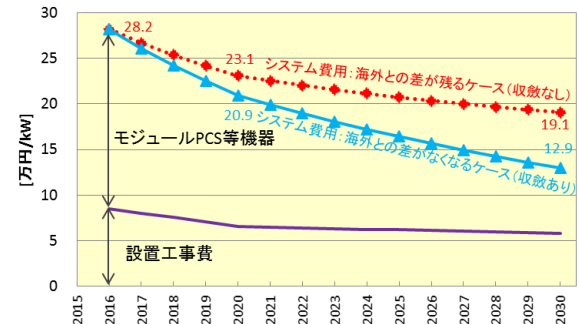
図Ⅲ-2-(へ)-A-10 2030 年に向けた住宅用太陽光発電システム価格の想定

＜モジュール、PCS 等機器価格(非住宅)＞

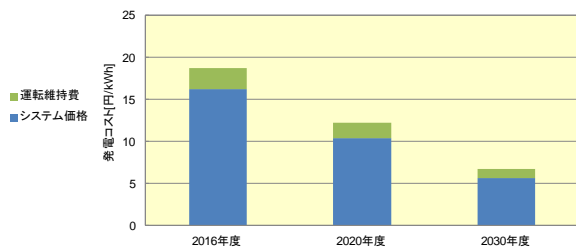


図Ⅲ-2-(へ)-A-11 2030 年に向けた非住宅用太陽光発電のモジュール、PCS 等機器価格の想定

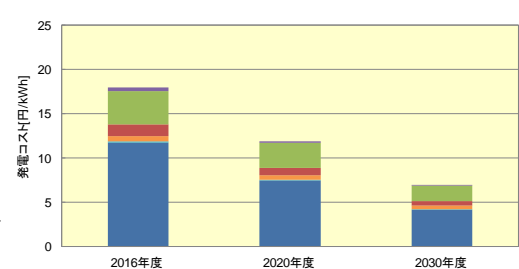
＜非住宅用太陽光発電システム価格(非住宅)＞



図Ⅲ-2-(へ)-A-12 2030 年に向けた非住宅用太陽光発電システム価格の想定



図Ⅲ-2-(へ)-A-13 2020 年および 2030 年における太陽光発電システムの発電コスト推定結果 (左：住宅用、右：非住宅用)



○海外における発電コスト分析との比較

太陽光発電システムの価格は国や地域の市場環境により異なるが、その発電コストは、システム価格のほか、推定方法や用いるパラメータ、前提条件に左右される。ここでは、海外の関連ロードマップを分析した上で、それらにおける発電コストの推定方法等について日本との比較をした。

IEA/NEA および欧州機関による発電コスト (LCOE) 推定例と、本調査研究で実施している推定方法 (NEDO PV Challenges の考え方に準拠) を比較すると、いずれも推定においてもシステム価格や年間経費、設備利用率などの条件は実績に基づいていると見られるが、運転年数、出力劣化率、廃棄処理費用の考え方はいずれも異なっている。運転年数は本調査研究が 20 年 (現状)

であるのに対し、IEA/NEA は 25 年、欧州機関は 30 年としており、出力劣化率は本調査研究では考慮していないが、海外機関の推定では考慮（最大 1%/年）している。一方、廃棄処理費用については本調査研究における非住宅用、および IEA/NEA は考慮しているが、欧州機関は考慮していない。また、初期費用の計上方法も異なっており、本調査研究および IEA/NEA では減価償却費として計上しているが、欧州機関では運転開始年に一括計上している。初期費用を運転開始年に計上する考え方は日本における発電コスト検証ワーキンググループでも採用している。

このような推定方法の相違を考慮しながら、本調査研究による日本の発電コストと欧州機関によるドイツの発電コスト（IEA/NEA^{III-2-(へ)-A-(13)}、Agora/Fraunhofer^{III-2-(へ)-A-(14)}、PVtec-Platform^{III-2-(へ)-A-(15)}）を比較した結果を図 III-2-(へ)-A-14 および図 III-2-(へ)-A-15 に示す。住宅用では、運転年数を 30 年とした場合の日本の発電コストは、WACC を 4% としたドイツの発電コストよりもやや安価となるが、劣化率の考慮や初期費用の計上方法を同一とすると、日本の発電コストの方が高くなる。非住宅用においては、欧州機関による推定は、初期費用の計上方法、設備利用率、WACC、劣化率などの条件がいずれも本調査研究より不利であるにもかかわらず、ドイツのシステム価格は日本の半分程度であり、ドイツの発電コストが安い。なお、この比較は 2015 年度時点のものであり、日本の発電コスト試算は 2015 年の価格、欧州機関による発電コストは各レポート（2015 年公開）における 2014 年の価格を設定している。

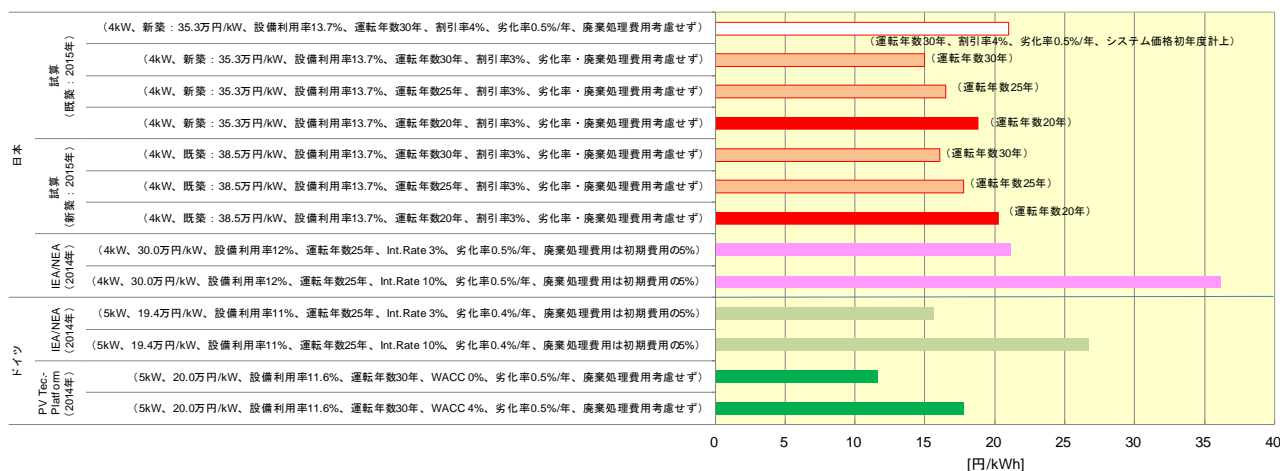


図 III-2-(へ)-A-14 発電コスト分析結果の比較（住宅用）

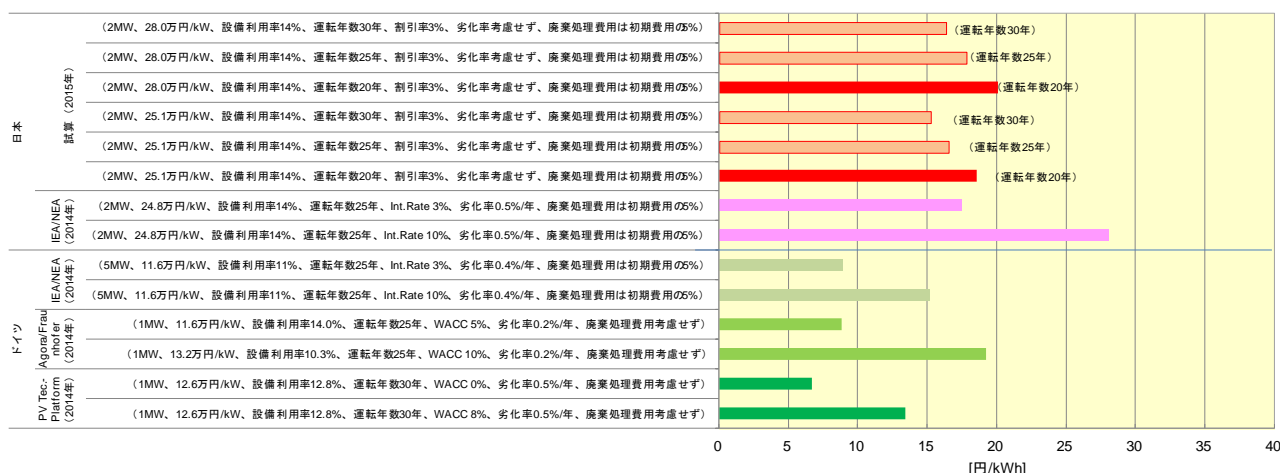
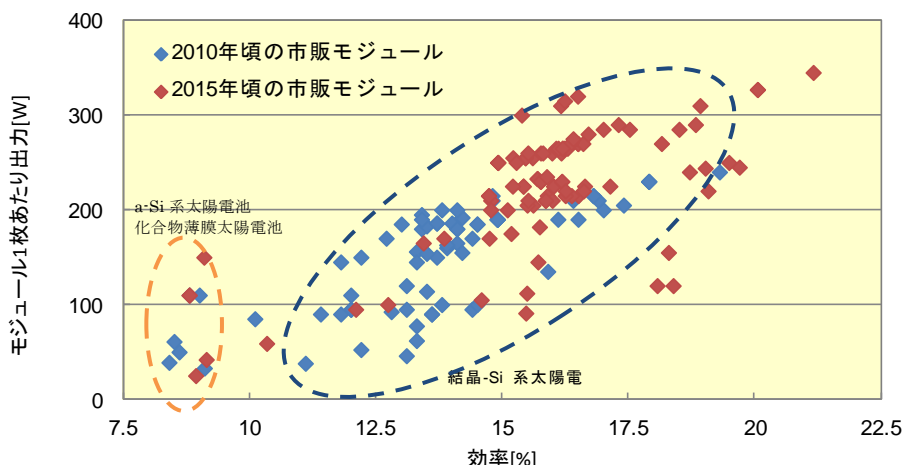


図 III-2-(へ)-A-15 発電コスト分析結果の比較（非住宅用）

c) 太陽電池セル・モジュール性能、製造技術等に関する基礎調査

図 III-2-(へ)-A-16 は、2010 年および 2015 年時点の市販されている太陽電池モジュールの効率とモジュール 1 枚あたりの定格出力をプロットしたものである。図 III-2-(へ)-A-16 の左下に

示される a-Si 系太陽電池では、効率の向上はほとんど見られないが、結晶 Si 系では単結晶 Si 製品の増加や HIT または裏面電極技術を採用したモジュールの増加によって中央値が約 14%から約 15.5%に向上し、プロット全体が高効率側（右側）にシフトしている。



※PVJapan 2015 にて収集した製品カタログ等から作成。ただしすべての製品を網羅しているとは限らない。
 ※2010 年については入手可能な製品カタログのみを利用。

図 III-2-(へ)-A-16 日本で市販されている太陽電池モジュールの効率および出力の変化

1.2 太陽光発電産業、市場動向等に関するシナリオ分析

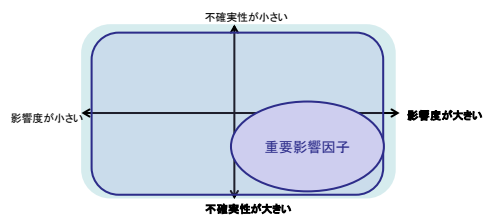
将来の太陽光発電産業、市場の拡大に向けて検討をするためには、将来想定される政策、技術、ビジネスモデル、コスト低減等の様々な要因を踏まえて、将来の多様なシナリオを描くとともに、導入拡大を推進するシナリオに向けて、政策や技術、ビジネスモデル、コスト低減などの要因がどのように寄与するかを分析する必要がある。

シナリオを検討する上での基本的な情報として、太陽光発電に関する市場・企業動向、制度動向、技術動向、経済性（グリッドパリティ）の状況等、これまでの各種情報を分析した。

次に、シナリオ分析の実施方法について検討した。実施方法では、①影響因子の洗い出し、②影響因子の評価、③重要影響因子の決定、④重要影響因子の分析、⑤シナリオパターンの検討、⑥シナリオの具体的記載の 6 ステップに分け、それぞれについて、実施イメージを検討した。図 III-2-(へ)-A-17 にシナリオ分析の実施方法と重要影響因子の決定方法を示す。

図 III-2-(へ)-A-17 シナリオ分析の実施方法（左）と重要影響因子の決定方法（右）

シナリオ分析ステップ	内容
①影響因子の洗い出し	太陽光発電の将来導入に影響する影響因子を洗い出して整理する。
②影響因子の評価	影響因子を影響度と不確実性で評価する。
③重要影響因子の決定	影響因子のうち、影響度が大きく、かつ不確実性も大きいものを重要影響因子として決定する。
④重要影響因子の分析	重要影響因子が現状どのような状況にあるか、現時点の情報からみて将来どうなる可能性があるかを分析する。
⑤シナリオパターンの検討	重要影響因子を軸として、複数のシナリオパターンを検討する。
⑥シナリオの具体的記載	重要影響因子の将来を想定し、そのような状況下で、描かれるシナリオを評価する。



評価軸	定義	例
影響が大きい	太陽光発電導入に対して、影響が非常に大きいとみられる要因	・大規模な市場が新たに創出される ・市場を支配する制度が大きく変化する ・既存ビジネスの前提条件が大きく変化する（ビジネスモデルの変化）、など
不確実性が大きい	現時点の情報からみて、2030 年以降どうなるか非常に不透明な要因	・起こるかどうかわからない ・起こる時期の推測ができない、など

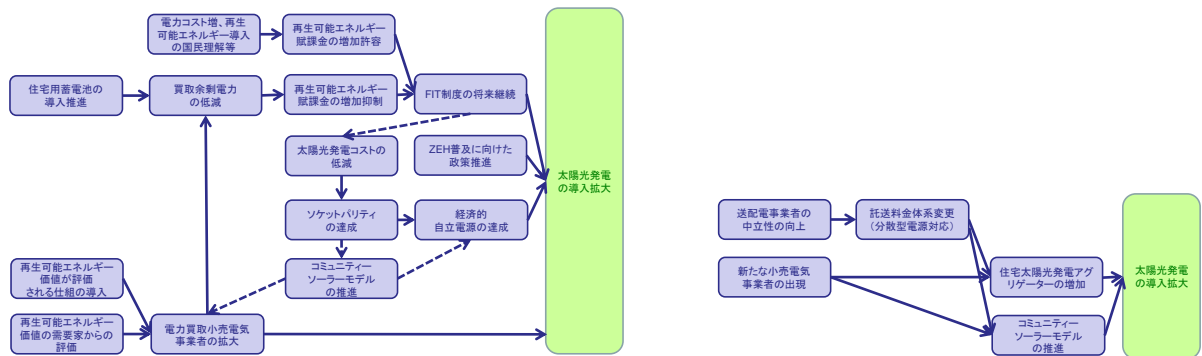
太陽光発電の将来の導入に影響すると考えられる影響因子について洗い出し、整理を行った。様々な影響因子案が洗い出されたが、大きく分類すると、表 III-2-(へ)-A-2 のようになる。

このうち、固定価格買取制度、発送電分離（電力自由化）をキーワードにして、それぞれのテーマの中で具体的にどのような影響因子がどのようにシナリオに影響するかについて因果関係

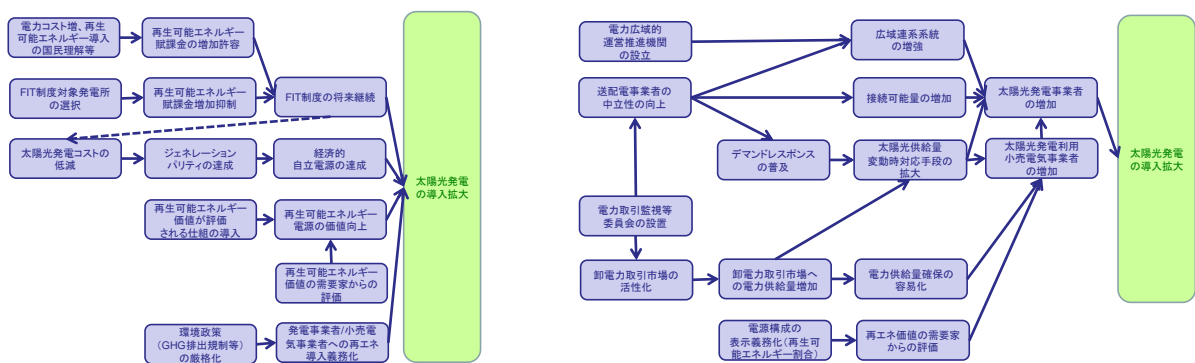
を整理し、分析を実施した。住宅（自家消費）に係る影響因子を図Ⅲ-2-(へ)-A-18 に、非住宅（メガソーラー）に係る影響因子を図Ⅲ-2-(へ)-A-19 に示す。今後は、重要影響因子を評価して、具体的な将来シナリオの検討を実施していく。

表Ⅲ-2-(へ)-A-2 影響因子の大分類

分野	キーワード
制度・政策	固定価格買取 (FIT) 制度
	発送電分離(電力自由化)
	系統接続制約
	環境政策
	再生可能エネルギー導入推進政策
技術	エネルギー貯蔵技術
	維持管理技術
	リユース、リサイクル技術
	多用途化技術
ビジネスモデル	地域地産（分散型電源）
経済性（グリッドパリティ）	太陽光発電、太陽光発電+蓄電池パリティ
外部環境	太陽光発電以外の電源状況



図Ⅲ-2-(へ)-A-18 住宅（自家消費）に係る影響因子（左：固定価格買取制度、右：発送電分離）



図Ⅲ-2-(へ)-A-19 メガソーラー（発電事業）に係る影響因子（左：固定価格買取制度、右：発送電分離）

1.3 「太陽光発電システム搭載自動車」に関する情報収集、課題の抽出

太陽光発電システム搭載自動車は、高効率太陽電池をはじめとした太陽光発電産業の付加価値向上と市場の拡大、次世代自動車産業においては系統への影響を低減するための技術として、さらなる付加価値向上につながる可能性がある。両産業の取り組みの結果、太陽光発電システム搭載自動車を実現し普及できれば、世界の運輸部門における温室効果ガス排出量の削減に向けて、

多大な貢献が可能であると考えられる。

本調査研究では、太陽光発電搭載自動車の付加価値として、1kW の太陽光発電システムを次世代自動車 (EV、PHV、HV) に搭載した場合の CO₂ 排出削減効果、経済効果、利便性 (充電回数) について分析を実施した。また、太陽光発電システム搭載自動車が普及した場合の社会全体での CO₂ 排出削減効果について試算を実施した。

太陽光発電搭載自動車の付加価値は、ユーザーの利用方法によって大きく異なるため主な 6 パターンに分けて分析した。EV の場合の結果を図 III-2-(へ)-A-20 に示す。休日 (土日) に一日あたり 150km 走る休日レジャー長距離型のユーザーで、CO₂ 排出削減効果が 240kg-CO₂/(台・年)、経済効果が 14,200 円/(台・年)と試算された。この場合充電回数は減るが、充電フリーとはならない。平日 4 日に一日あたり 50km 走るアクティブ利用型のユーザーでは、EV の場合、CO₂ 排出削減効果 240kg-CO₂/(台・年)、経済効果が 11,300 円/(台・年)となる。このパターンの場合には充電フリーとなり自動車としての利便性の大幅な向上が期待できる。

パターン	タイプ	一回あたりの走行距離 (km)	車載 PV によって発電した電力のうち利用可能な割合	経済効果 (円/台・年)	CO ₂ 排出削減効果 (kg-CO ₂ /台・年)
A 休日利用	A-1 休日レジャー長距離型	150km @2 日間 (土曜日、日曜日)	100%	14,200	240
	A-2 休日レジャー短距離型	50km @2 日間 (土曜日、日曜日)	44%	650	54
B 平日休日利用	B-1 アクティブ利用型	50km @4 日間 (月水金日)	88%	11,300	200
	B-2 近郊街乗り利用型	5km @4 日間 (月水金日)	9%	-7,820	-23
C 平日利用	C-1 長距離通勤利用型	50km @5 日間 (平日)	100%	14,200	240
	C-2 短距離通勤利用型	15km @5 日間 (平日)	33%	-2,010	18

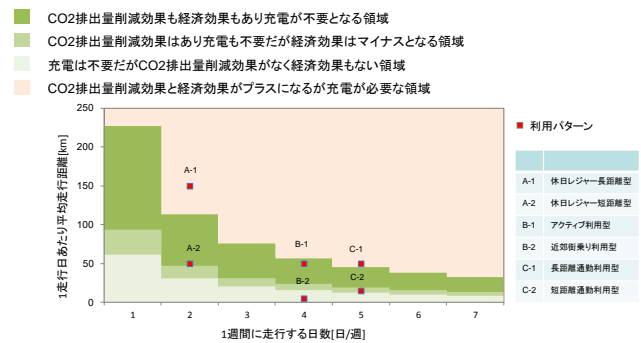


図 III-2-(へ)-A-20 EV の利用パターンごとの経済的便益と CO₂ 排出削減効果

また、将来の導入量を考慮して、国内外における 2030 年、2050 年の CO₂ 削減効果を試算した結果を図 III-2-(へ)-A-21 に示す。日本全体での 2030 年における CO₂ 排出削減効果は最大 227 万 t-CO₂/年と試算され、国内で想定されている 2030 年に向けた乗用車における CO₂ 排出削減量のうち 11%に相当する。

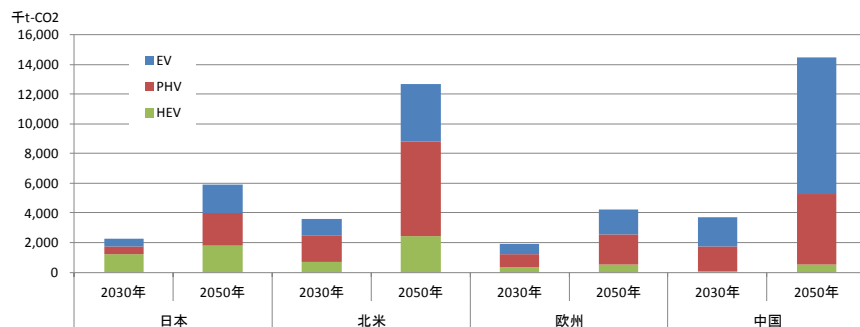


図 III-2-(へ)-A-21 国内外における年間 CO₂ 排出削減効果 (2030 年、2050 年)

太陽光発電システムで発電した電力を 100%消費し、かつ系統からの充電が不要となる容量最適な太陽電池容量を想定すると、休日レジャー長距離型では 1,270kW となった。様々なユーザーを想定した場合、太陽光発電システム搭載自動車に必要な太陽電池容量は 1kW 程度が必要と想定され、自動車にこの容量を搭載するためには面積制約との関係で変換効率 30%以上の高効率太陽電池が必要となることが示唆された。

表Ⅲ-2-(へ)-A-3 に、太陽光発電システム搭載自動車の開発普及に向けた課題と検討内容例を示す。実現、開発に向けた課題としては、太陽光発電システムから供給される電力量の向上や、太陽光発電システム搭載自動車の電費向上の他、信頼性や安全性に関する技術的な課題が想定される。一方、各国の市場に投入して実現していくにあたっては、各国の既存規制、制度面を把握して課題を認識する必要がある。また、国際的な普及推進に向けては、例えば、太陽光発電システム搭載自動車もたらすライフサイクルでの CO₂ 排出量削減効果を訴求できるような規制、制度面の提案や、各国の次世代自動車の走行モードや利用データ、駐車時の日射状況等の市場環境を把握し、各国における太陽光発電システム搭載自動車の具体的な付加価値を検討すること、また太陽光発電搭載自動車の CO₂ 排出量削減効果等の評価手法の提案などが考えられる。

さらに、太陽光発電システム搭載自動車の普及によって今後新たな電力の利用形態が現れる。普及後を見据えて、余剰電力の有効活用の方法等、社会システム全体での検討を実施することが重要である。例えば、国内の太陽光発電システム搭載自動車を大きな一つの電源として捉え、それらを統合的に制御して、国内の系統電力システムに組み込んでいく VPP (Virtual Power Plant) としての活用も想定される。なお、本検討では自家用乗用車を対象としたが、この分野以外にも運輸部門における高効率太陽電池の潜在的市場ニーズが考えられる。これらの潜在的市場を探索することも必要である。

表Ⅲ-2-(へ)-A-3 太陽光発電システム搭載自動車の開発普及に向けた課題と検討内容例

検討課題		検討内容	
実現、開発に向けた課題	技術的課題	太陽光発電システムから供給される電力量の向上	発電効率の向上 曲面对応（伸縮性等） 部分影等による発電量低減の抑制 劣化率の低減
		太陽光発電システム搭載自動車の電費向上	太陽電池モジュール、システムの軽量化 太陽光発電システム搭載自動車のシステム省エネ化
		太陽光発電システム搭載自動車の長期信頼性（品質）の向上	次世代自動車への搭載による太陽電池モジュールの長期信頼性への影響（部分影、振動等）
		太陽光発電システム搭載自動車の安全性確保	太陽電池モジュールの強度 衝突時の安全対策 直流電気による感電等防止策
	その他太陽光発電システム搭載による自動車側の課題	太陽電池モジュールの車体設置に際しての課題抽出 太陽光発電システム搭載による自動車システムの課題抽出	
	既存規制、制度面における課題	太陽光発電システム搭載自動車の市場投入にあたっての各国の規制状況把握	
	国際的な普及推進に向けた課題	規制、制度面への提案	安全性、信頼性、品質に関する制度、規制等への提案 燃費規制、CO ₂ 排出規制等への提案
市場環境等の把握		各国市場における付加価値検討のための利用状況等に関するデータ収集 各国の次世代自動車市場の見通し	
付加価値、効果評価方法の提案		環境負荷低減効果の評価方法等	
太陽光発電システム搭載自動車の普及と期待される社会システムの構築	余剰電力の有効活用方法の検討		
新たな高効率太陽電池市場の開拓	運輸部門における潜在的市場ニーズの探索		

【参考文献】

- Ⅲ-2-(へ)-A-(1) IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2016, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014, Report IEA-PVPS T1-30: 2016、2016年
- Ⅲ-2-(へ)-A-(2) IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2015, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014, Report IEA-PVPS T1-27: 2015、2015年
- Ⅲ-2-(へ)-A-(3) IEA PVPS : Trends in Photovoltaic Applications 2014, Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2013, Report IEA-PVPS T1-25: 2014、2014年
- Ⅲ-2-(へ)-A-(4) IRENA : 2016 a Record Year for Renewables, Latest IRENA Data Reveals http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=A&menu=cat&PriMenuID=16&CatID=84&News_ID=1486、2017年3月
- Ⅲ-2-(へ)-A-(5) European Photovoltaic Industry Association (EPIA) : Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018、2014
- Ⅲ-2-(へ)-A-(6) IEA PVPS : Snapshot of global photovoltaic markets, Report IEA-PVPS T1-31: 2017、2017年
- Ⅲ-2-(へ)-A-(7) Solar Power Europe: Global Market Outlook for Solar Power 2017-2021、2017年
- Ⅲ-2-(へ)-A-(8) 資源エネルギー庁 : 再生可能エネルギー発電設備の導入状況 (各報) および公表データ
(http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/statistics/index.html)
- Ⅲ-2-(へ)-A-(9) ㈱資源総合システム : 太陽光発電マーケット 2007、2010、2014、2015、2016
- Ⅲ-2-(へ)-A-(10) 資源エネルギー庁 : 再生可能エネルギーの導入状況と固定価格買取制度見直しに関する検討状況について、第25回調達価格等算定委員会 資料1 (平成28年11月1日)
- Ⅲ-2-(へ)-A-(11) 資源エネルギー庁 : 平成29年度調達価格及び調達期間についての委員長案、第28回調達価格等算定委員会 資料2 (平成28年12月13日)
- Ⅲ-2-(へ)-A-(12) 資源エネルギー庁 : 総合資源エネルギー調査会長期需給見通小委員会発電コスト検証ワーキンググループ 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告、2015年5月
- Ⅲ-2-(へ)-A-(13) IEA (International Energy Agency) /NEA (Nuclear Energy Agency) : Projected Costs of Generating Electricity 2015 edition、2015年
- Ⅲ-2-(へ)-A-(14) Agora Energiewende/Fraunhofer ISE : Calculator of Levelized Cost of Electricity for Photovoltaics、2015年2月
- Ⅲ-2-(へ)-A-(15) European PV Technology Platform Steering Committee PV LCOE Working Group : PV LCOE in Europe 2014-2030、2015年6月

2. 実用化・事業化見通し

本調査研究は、「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」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、発電コスト 7 円/kWh の実現に向けた技術開発、ならびに今後の太陽光発電技術開発の方向性に関する検討に資することが期待される。また「太陽光発電システム搭載自動車」に関する調査は、同分野を我が国主導で国際的に展開することを視野に、IEA PVPS への新タスク立ち上げのための提案につなげている。

3. 波及効果

本調査研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の指導のもと経済産業省資源エネルギー庁とも情報共有して進められ、我が国の太陽光発電産業の今後の方針決定に寄与している。例えば、2016 年 8 月から経済産業省で開催された太陽光発電競争力強化研究会の準備として、太陽光発電のコスト低減に向けた課題の検討や、様々なコスト低減シナリオの設定と試算を実施した。

また、「太陽光発電システム搭載自動車」に関する調査は今後 IEA PVPS への新タスク設立がされることで、我が国のみならず、国際的に運輸部門の環境負荷低減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

我が国では、固定価格買取制度によって、太陽光発電の導入普及が急激に進んでいる。同時に、太陽光発電の導入普及は、再エネ賦課金の増大や系統への影響をもたらし、社会へ様々な克服すべき課題をもたらしている。今後の本調査研究では、これまでの調査結果を活用しながら 2030 年、2050 年を視野にした導入目標の検討、それら太陽光発電の導入目標を実現するために必要な技術開発およびコストに関するロードマップ、シナリオの検討を実施していく。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
特許出願（うち外国出願）	0(0)	1(1)	0(0)	1 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【論文・学会発表】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	佐藤 貴文	みずほ情報総研株式会社	The Potential of On-Board PV for Electrified Vehicles to Reduce Lifecycle CO2 Emissions	Poster session on PV systems, deployment and grid integration: PVSEC-26 (シンガポール) : ポスター発表	2016/10/27

B 発電コスト低減に向けた太陽電池技術開発に関する動向調査 (株式会社資源総合システム)

1. 成果詳細

(1) 太陽電池モジュール性能と発電コストの関係性および産業競争力に関する動向調査

現状の発電コストを把握するため、太陽光発電システム設置価格とその内訳について調査・分析を行った。日本におけるシステム設置価格に占めるモジュール価格の比率は、非住宅用で全体の4割、住宅用では6割で、設置費用のうち最も多くの割合を占めている。また、太陽電池モジュール性能の発電コストへの影響については、現状の太陽光発電システムの価格構成を基準とすると、太陽電池セルの変換効率を絶対値で1%向上すると、太陽光発電システムの発電コストは0.5~1.5%低減できると推定される。

世界における太陽電池モジュール技術および産業の現状は、表Ⅲ-2-(へ)-B-1(1)に示すとおりである。また、ベンチマークとして、生産や技術面において世界の代表的な太陽電池製造企業12社を対象とし、生産拠点、生産・供給、技術研究開発、商品展開、業績の状況など事業内容の整理および比較を行った。

太陽電池モジュールの長期信頼性（性能劣化および故障、耐久性等）に関する評価、要因分析、研究開発動向、国際標準化の新たな動向について調査した。太陽電池モジュールの信頼性に関するデータの多くは公開されておらず、投資家や事業者が信頼性を判別することが難しいのが現状である。そのため、ユーザーの立場に立って民間企業が独自に太陽電池モジュールの第三者評価を行い、その結果を公表し共有する動きが進んでいる。一方、太陽電池モジュールの認証制度では、国際電気標準会議（IEC）の国際規格（IEC規格）に基づいて運営され、性能規格および安全性規格に適合することが求められる。2016年にはIEC規格が改訂され、性能規格では別規格であった結晶シリコン太陽電池と薄膜太陽電池が1つの規格に統合された。

表Ⅲ-2-(へ)-B-1(1) 各種太陽電池の性能・供給力・市場価格の現状

太陽電池材料		性能（変換効率）（%）			生産量（2015年）（GW）※2		生産能力（2015年末）（GW/年）※2		モジュールスポット平均価格（米セント/W）※3	
		市販モジュール（セル）※20	研究開発（最高値）※1		セル	モジュール	セル	モジュール		
			セル	モジュール						
全体						63.0	62.1	71.7	77.6	
結晶Si	単結晶	16.5～23 (19.8～25)	26.6(HBC)※4 24.7(HIT)※5 25.2(IBC)※6 22.61(PERC)※7	24.4(HBC)※4 22.5(HIT)※5 24.1(IBC)※6		11.8	11.6	13.0	14.3	40
	多結晶	15～17 (18.3～19.2)	21.9※8	19.9※9		47.1	46.5	51.8	57.2	37
薄膜系	薄膜Si	9	14.0※10	13.4※11		0.5		1.4		38
	CIGS系	13～14.5	22.6※12	19.2※13 17.0※14		1.0		1.7		
	CdTe	16.6	22.1※15	18.6※15		2.5		2.9		
多接合(III-V)	非集光	—	38.8(5接合)※16	31.2(3接合)※17		—		—		—
	集光型	—	46.0(4接合)※18 44.4(3接合)※17	38.9(4接合)※19	(集光型：0.1)			0.8		—

※1：2017年2月現在の性能 ※2：(株)資源総合システム調べ

※3：スポット価格(2016年12月末現在)

※4：カネカによるヘテロ接合バックコンタクト型（HBC）太陽電池

※5：パナソニックによるヘテロ接合型HIT太陽電池

※6：SunPower CorporationによるIBCバックコンタクト型太陽電池（Passivated contact）

※7：Trina SolarによるPERC p型単結晶Si太陽電池

※8：フラウンホーファー太陽エネルギー研究所（FhG-ISE）によるTOPCon裏面電極n型多結晶Si太陽電池

※9：Trina Solarによるp型PERC多結晶Si太陽電池

※10：産業技術総合研究所（AIST）

※11：カネカ

※12：ZSWによるCIGS太陽電池 ※13：ソーラーフロンティアによるCIS太陽電池サブモジュール

※14：Solibro Hi-Tech（Hanergyグループ）によるCIGS太陽電池モジュール ※15：First SolarによるCdTe太陽電池

※16：SpectrolabによるGaAs/InP 5接合太陽電池

※17：シャープによるInGaP/GaAs/InGaAs 3接合太陽電池

※18：FhG-ISE/SoitecによるGaInP/GaAs;GaInAsP/GaInAs 4接合太陽電池

※19：Soitecによる4接合太陽電池

※20：2016年末現在、結晶Si系太陽電池は60直モジュール（セル60枚）の平均効率とセル平均効率、各社資料参照

出典：NREL-National Center for Photovoltaics (NCPV) - Best Research Cell Efficiency Records (2017年1月17日更新、<http://www.nrel.gov/ncpv/>)、Progress in Photovoltaics-Solar Cell Efficiency Tables (Version 1-49) (2016年11月)、PVinsights.com、EnergyTrend、各社資料

(2) 太陽電池モジュール製造技術開発と製造コストに関する調査・分析

現在市場で主に流通している結晶シリコンおよび化合物系薄膜（CIGS 系、CdTe）太陽電池に焦点を当て、太陽電池モジュール製造技術の現状と、世界の研究開発の取組みについて、国際会議や学術会議、直接ヒアリング等から調査し、最新の動向をまとめた。結晶シリコン太陽電池の高効率化に向けた動きでは、汎用太陽電池において通常の Al-BSF セルから PERC セルへのプロセス転換は引き続き進展しており、そのシェアは 15GW 程度まで増大している。PERC セルに関しては開発段階であるが、JinkoSolar は多結晶シリコン太陽電池セルで 21.6%を達成している。一方、Trina Solar は、多結晶シリコン太陽電池セル量産プロセスで変換効率 20.16%、モジュールでも 19.86%を達成するとともに、p 型単結晶量産セルでは 21.1%を達成している。高効率化に向けては、単結晶シリコンセルへの転換も予想されていたが、増産対応性が良く、基板の高品質化が進む多結晶シリコンセルが引き続き 7 割以上のシェアを確保している。また、さらなる高性能化を狙う n 型単結晶基板の使用や、IBC セル、SHJ セルの拡大に関しては、Trina Solar など大手製造企業各社から量産化に向けた取り組み動向が発表されているが、先行するパナソニック、SunPower Corporation の 2 社以外ではまだ本格的な量産には至っていない。一方、研究段階では、カネカが実用サイズの IBC セルで変換効率 26.33%、モジュール効率でも 24.37%の世界最高効率を更新し、量産性能 25%の可能性を高めている。他方、モジュール技術では信頼性向上に加えて、マルチワイヤー技術のようなバスバー構造の転換、モジュールでの材料品質の改善や光閉じ込めの向上など光ロスの低減に向けた検討も進められており、これらの結果は順次製品に反映されるとみられる。一方、薄膜系太陽電池では、CIGS 系で、ナトリウム効果や表面硫化効果、カリウム処理や Ga 含有量の調整などの技術的なブレークスルーにより、22.6%（世界最高、CIGS、独・ZSW）、22.3%（CIS、日・ソーラーフロンティア、自社測定 22.8%）、21.7%（CIGS、独・ZSW）、21.0%（CIGS、独・Solibro）と、開発面で 21%を超える変換効率が 2014 年以降次々と達成された。CdTe 系については、米・First Solar が研究開発と製造面で世界をリードしている。界面改善などのセルプロセス改善などでセル効率は徐々に更新され、世界記録は同社の 22.1%となっている。同社では、変換効率 25%に向けた技術開発にも着手したと発表している。量産性能についても現在の 16%台から、2018 年には 20%まで向上させる目標を示しており、CdTe 太陽電池は、製品レベルの性能面で多結晶シリコン太陽電池に迫るレベルとなっている。

これら太陽電池モジュールの製造コストについて、その内訳やコスト低減の方向性について調査・分析した。結晶シリコン太陽電池では、モジュール製造工程の比率が最も大きく、全体の約 4 割を占めていると推定され、各種技術改善により約 45%のコスト削減が可能と試算した。このほか、研究機関や業界団体、太陽電池製造企業が発表する開発ロードマップなどから製造コストの内訳や今後の低減目標や方向性を調査した。最も安価なケースで、結晶シリコン太陽電池では 0.32 ドル/W、薄膜系では 0.4 ドル/W 程度のコストが報告されている。性能向上や生産規模の拡大等により、0.2~0.3 ドル/W 程度まで低減できる可能性が示されている。

(3) 太陽電池モジュールの利用動向と今後の産業と市場の可能性に関する調査

太陽光発電市場が拡大する中、基幹部品である太陽電池モジュールについては、自然現象などの様々な外的要因による機器の故障や破損のほか、電圧誘起出力低下（PID）や光誘起劣化（LID）現象などによる出力低下や部材の劣化現象も起きている。また実際の施工現場では、優れた運搬性および施工性、屋根の面積や形状、荷重強度に対応する多様なモジュール寸法や軽量化、また不具合発生の早期発見なども要件として求められている。太陽光発電システムの施工時や利用環境下における太陽電池モジュールの不具合発生の現状と、実利用環境下から要請される太陽電池モジュール要件および技術開発課題を整理するとともに、最新の技術開発動向について、最新の研究論文等について調査を実施した。

また、太陽電池製造に係る産業および市場について、各機関より発表されている今後の太陽光発電市場（地域および用途別）見通しについて調査した。太陽光発電システムの最大市場は中国で、米国や日本が主要市場となっているが、太陽電池モジュール並びに太陽光発電システムの価格低下が急速に進み、世界の太陽光発電市場はインド、東南アジア、中南米諸国でも導入拡大が誘発されている。用途別では、国際エネルギー機関（IEA）が発表した 2021 年までの世界の年間導入量見通しによると、電力事業規模が最大で安定的に推移し、商業用が徐々に増える。最大市

場となっている中国においては、現状、地上設置型大規模システムが市場の8割を占めるが、今後は建物等に設置する分散型システムが4割程度まで増えるとのロードマップが示されている。今後想定される新たな利用地域（環境）および用途に対する太陽電池モジュール要件を整理し、それらに関連する最近の主な研究開発および事業化・商品化動向をまとめた。更に太陽電池生産拠点の推移と最近の動向について調査を実施した。

(4) 各国の太陽電池研究開発政策動向及び新たな太陽電池技術に関する調査

海外主要国における太陽電池の研究開発動向を調査し、研究開発戦略や開発動向、予算配分等をまとめた。主な動向として、米国では新たな発電コスト目標達成に必要なモジュール価格目標が設定され、欧州連合（EU）では欧州戦略的エネルギー技術（SET）計画の一環で「太陽光発電の世界における競争力確保のための戦略目標」が策定、また中国では国家発展改革委員会・国家能源局が第13次5ヶ年計画（2016～2020年）において太陽電池のコスト及び変換効率の目標等が策定された。日米欧における太陽電池技術開発戦略を体系的かつ明確に比較・分析できるよう、その枠組み、予算配分、目標等について表Ⅲ-2-(へ)-B-1(2)において比較した。

また、新たな太陽電池技術として、ペロブスカイト太陽電池、有機薄膜太陽電池の最近の研究開発動向や、コスト試算例、実用化に向けた企業による取り組みについて調査した。ペロブスカイト単接合セルでは、2016年3月に韓国化学研究所（KRICT）/蔚山科学技術大学（UNIST）の研究グループが達成した変換効率22.1%が2016年末時点で世界最高効率となっている。高効率化の新たなアイデアとしては、異種太陽電池との「タンデム化」が注目されており、ヘテロ接合結晶シリコン太陽電池とのタンデム化により25%超のセル効率が達成されている。今後の実用化に向けては、特に安定性と再現性の向上に関して、現状では太陽電池に要求される長期耐久性要件までは届いておらず大きな課題となっている。研究機関のほか、これまで色素増感型や有機薄膜など薄膜系太陽電池の研究開発や製造を行ってきた企業がペロブスカイト太陽電池分野に参入する動きもある。日本や欧州の研究開発プロジェクトでは、企業も参画し、高性能化や製造プロセス、長期耐久性に関する開発が進められている。R2R方式でのモジュール試作も始まっている。このほか、太陽電池モジュールの性能向上やコスト低減、信頼性向上に資する新たなモジュール化技術の概要と開発の現状をまとめた。

表Ⅲ-2-(へ)-B-1(2) 日米欧における太陽光発電技術開発目標の比較 (2016年現在)

	日本	米国	欧州
<p>主要な研究開発分野 (相互比較)</p>	<p>結晶Si、薄膜Si、CIGS、有機薄膜、モジュール長寿命化、性能評価、耐久性評価</p>	<p>シングル接合、タンデム、集光型、色素増感型、ペロブスカイト、プラズモニクス、有機、中間バンド、ハイブリッド有機、ハイブリッド非有機、高効率多接合、システムインテグレーション</p>	<p>結晶Si、薄膜Si、CIGS、集光型、色素増感型、有機系、ペロブスカイト、新コンセプト、BIPV、リサイクル、システム、利用技術、評価技術、標準化</p>
<p>研究開発目標</p>	<p>(2025年)</p> <ul style="list-style-type: none"> モジュール変換効率： <ul style="list-style-type: none"> 結晶Si 25%、 薄膜Si 18%、 CIS系 25% 化合物系 40% シリコン消費原単位：3g/W 寿命：30年 (2020年) 	<p>(2030年)</p> <ul style="list-style-type: none"> 太陽電池モジュール価格 <ul style="list-style-type: none"> 30セント/W (電力事業用) 32セント/W (商用) 35セント/W (住宅用) (下記発電コスト目標を達成するための価格) モジュール耐用年数：30年 (現状) →50年 モジュール性能劣化率 0.75%/年→0.2%/年 BOSコスト 0.55ドル/W 	<p>(2020年)</p> <p>SET計画における目標：太陽光発電の世界における競争力確保のための戦略目標</p> <ul style="list-style-type: none"> 太陽電池モジュール変換効率を、2015年レベルと比較して2020年までに少なくとも20%向上させる 太陽電池モジュール変換効率を、最新の太陽光発電技術を導入するなどして、2030年までに2015年と比較して少なくとも35%向上させる ターンキー・システムコストを、2015年と比較して2020年までに少なくとも20%削減する 大規模に開発された最新かつ潜在的に超高効率な太陽光発電技術の導入によって、ターンキー・システムコストを、2030年までに2015年と比較して少なくとも50%削減する 太陽電池モジュールの寿命を電力出力の保証期間 (初期電力の80%) まで延ばし、2020年までに30年、2025年までに35年に延長 太陽光発電の価値連鎖全体に渡ってライフサイクル環境影響を最小限に抑え、太陽電池モジュールコンポーネントのリサイクル性を向上
<p>コスト目標</p>	<p>(2020年)</p> <p>14円/kWh、75円/W</p> <p>(2030年)</p> <p>7円/kWh、50円/W</p> <p>(2050年)</p> <p><7円/kWh、<50円/W</p>	<p>(2030年)</p> <p>3セント/kWh (電力事業用)</p> <p>4セント/kWh (商用)</p> <p>5セント/kWh (住宅用)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ターンキー・システムコストを2015年と比較して2020年までに少なくとも20%削減 大規模に開発された最新かつ潜在的に超高効率な太陽光発電技術の導入によって、ターンキー・システムコストを2030年までに2015年と比較して少なくとも50%削減

出典：「太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges)」、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2014年9月他)、米国エネルギー省 (DOE)、SunShot 2030 Waterfalls (2016年12月)、米国エネルギー省 (DOE)、SunShot 2030 Fact Sheet (2016年12月)、<https://setis.ec.europa.eu/> (2017年3月) 及びEC, “Issues Paper No.2 Initiative for Global Leadership in Photovoltaic Solar Energy”

2. 実用化・事業化見通し

本調査研究では、NEDO が「太陽光発電開発戦略」で掲げる発電コスト低減目標の達成に向け、同開発戦略に提示されている各種情報を NEDO が逐次最新のものとして資するべく、今後の技術開発の方向性の検討に際して効果的な情報を適宜追加して情報の発信・分析を実施している。これにより、太陽光発電の発電コスト低減と我が国の産業競争力の確保と更なる向上に貢献することが見込まれる。

3. 波及効果

太陽光発電は、各国政策を背景に 2016 年の世界市場は前年比 50%成長の 75GW へと急成長している。こうした中、太陽電池モジュール価格は大幅下落し、産業界では価格競争力を有する中国を中心とした太陽電池メーカーのシェアが拡大、その技術力も向上しつつある。また、国内市場は 2012 年 7 月から開始された固定価格買取制度により、太陽光発電は本格的な普及のフェーズに移行しているが、その一方で賦課金による国民負担の増大も見込まれており、発電コストの低減は引き続き重要な課題となっている。日本の重要なエネルギー源の一つとなり得る太陽光発電の普及促進を今後も確実かつ健全に推進し、持続的な市場を形成するには、積極的な市場拡大策はもちろんのこと、製品レベルでの性能やコストの実態、それを取り巻く研究・技術開発に関する周辺環境を適確に分析し、技術開発にフィードバックすることが不可欠である。

このような環境の中で、本調査研究による太陽電池モジュールの製造に関する状況や、諸外国における太陽電池技術の研究開発状況等の調査・分析、及びその結果を踏まえて、我が国の今後の技術研究開発の方向性等を明確にすることで、我が国の太陽光発電産業の更なる発展と国際競争力確保に貢献することが期待できる。

4. 今後の展開

本調査研究の実施期間中において、太陽光発電市場の中心地としてアジア・米州のシェアが更に拡大した。また太陽電池生産についても、中国・台湾が世界シェアを更に拡大させるとともに、市場拡大地域や貿易摩擦を回避できる地域での生産増強の動きが東アジアを中心に継続する一方、欧米製造企業の事業撤退が相次ぐなど、産業構造も大きく変化した。さらに、太陽電池モジュールの価格低下が継続し、システム価格や発電コストの低減も進んだことにより、インド、東南アジア、中南米諸国でも太陽光発電の導入拡大が誘発されている。

欧米中諸国・地域では引き続き意欲的な太陽光発電に関する研究開発プログラムを設定し、研究開発予算が投入されている。これらの国による研究開発施策のほか、先進諸国からの技術移転や企業買収などによる企業での太陽電池技術の向上も目覚ましい。今後も産業および市場環境は様々な要因により変化していくことが予想される。こうした状況において中長期の将来に我が国が産業競争力を維持・強化していくためには、現行の技術研究開発計画を速やか、かつ円滑に推進するとともに、将来の市場や産業動向を見据えた次期技術研究開発計画を検討および策定していく必要がある。そのためにも、今後も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予定である。

5. 特許論文リスト

なし

C IEA PVPS 国際協力事業（株式会社資源総合システム）

1. 成果詳細

1.1 IEA PVPS タスク 1 の国際協力活動への参加

（専門家会議等への参加、国際協力活動への対応）

タスク 1 専門家会議、タスク 1 活動に係わるワークショップ及びその活動への参画を通じて、国際協力活動に貢献すると共に各国の国家プログラム、研究開発、実証試験、導入促進、市場動向等の情報を調査した。平成 27 年度から平成 29 年度までに参加した会議及びワークショップは、下記の通りである。

(1) 第44回タスク 1 専門家会合（平成27年9月1～5日、タイ・バンコク）

第44回タスク1専門家会議に日本の代表としてタスク14専門家である東京大学・荻本和彦特任教授と出席した。今後のIEA PVPSの新たな活動（電力システムへのインテグレーション、電力事業者の関与、新たなビジネスモデル）についてのディスカッション及び審議に参加した。ASEAN POWER WEEKの併催イベントであるIEA PVPSワークショップにおいて我が国の太陽光発電の動向について講演を行った。また、専門家会議及びワークショップにおいて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45回タスク1専門家会議（平成27年10月26～30日、トルコ・イスタンブール）

第45回タスク1専門家会議及びタスク1&タスク9合同会議に日本の代表として出席した。タスク1の活動方針に沿って、①今後のIEA PVPSの新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画（2016年に開催される欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2016）における併催イベントであるIEA PVPSワークショップ及び第26回太陽光発電国際会議（PVSEC-26）におけるIEA PVPSワークショップ）、③タスク1成果物である動向報告書（Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014）の報告と来年以降の対応、④国内調査報告書（National Survey Report of PV Power Applications）の執筆指針、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（ショートレポートの作成）等について審議した。タスク1とタスク9の合同会議においては、両タスクにビジネスモデルをはじめとした共通の関心事項があることから、今後も機会があれば合同会議を実施することが決定した。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。また、我が国の太陽光発電の動向について報告した。トルコ側のホストであったトルコ太陽エネルギー産業協会（GÜNDER）及びタスク1が共催したワークショップにおいて、東日本大震災以降の日本におけるエネルギーの状況と太陽光発電の貢献について講演を行った。

(3) 2015年欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2015）におけるIEA PVPSワークショップ（2015年9月14日、ドイツ・ハンブルグ）

2015年欧州太陽光発電国際会議（EU PVSEC 2015）において、パラレルイベントとしてタスク1が開催したIEA PVPSワークショップ「競争力、ソフトコストと新たなビジネスの事例」に参加した。同ワークショップ及びその他の併催ワークショップ及び本会議等において、タスク1の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。IEA PVPSワークショップにおいては、日本における太陽光発電システムのコストの動向について口頭発表を行った。

(4) 第25回太陽光発電国際会議（PVSEC-25）におけるIEA PVPSワークショップ（2015年11月15日、韓国・釜山）

PVSEC-25においてIEA PVPS及びPVSEC-25運営委員会が共催したIEA PVPSワークショップに参加した。ワークショップは、IEA PVPSの活動及びタスク1の刊行物であるTrends Reportの紹

介を目的としたパート I 及び太陽光発電市場の新たなビジネスモデルに関する議論を行うパート II から構成された。パート I においては、Trends Report の報告に基づいて、産業動向について講演を行い、パート II においては、電力市場の自由化に伴い太陽光発電産業が我が国において開始した新たな事業展開について報告を行った。同ワークショップ及びその他の併催ワークショップ及び本会議において、タスク 1 の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(5) 第 46 回タスク 1 専門家会議

(平成 28 年 4 月、スペイン・マドリッド及びラス・パルマス・デ・グラン・カナリア)

第 46 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 IEA PVPS の新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画 (2016 年 6 月に開催される欧州太陽光発電国際会議 (EU PVSEC 2016) における IEA PVPS ワークショップ等)、③タスク 1 成果物である Snapshot レポート及び動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015) の進捗報告と来年以降の対応、④国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications) の執筆指針、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)、⑥今後のタスク 1 活動 (ショートレポートの作成) 等について審議した。併催された IEA SHC Task 53 (New Generation Solar Cooling & Heating Systems) 及び IEA PVPS Task 1 共同ワークショップ及びカナリー諸島政府・UNEP・IEA PVPS 共催ワークショップ及び専門家会議において我が国における太陽光発電の最新動向について講演した。また、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。

(6) 第 47 回タスク 1 専門家会議 (平成 28 年 10 月、オーストラリア・シドニー)

第 47 回タスク 1 専門家会議に日本の代表として参加した。タスク 1 の活動方針に沿って、①今後の IEA PVPS の新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画 (第 26 回太陽光発電国際会議 (PVSEC-26) における IEA PVPS ワークショップ等)、③タスク 1 成果物である動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015) 及び Snapshot レポートの進捗報告と 2017 年以降の対応、④国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications) の執筆指針、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)、⑥今後のタスク 1 活動 (ショートレポートの作成) 等について審議した。さらに、新たな活動課題として、日本が提案する PV for Transportation についてディスカッションを行った。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。また、我が国の太陽光発電の動向についてタスク 1 専門家会議及びオーストラリア太陽光発電研究所 (APVI) 及びタスク 1 が共催したワークショップにおいて講演を行った。

(7) 2016 年欧州太陽光発電国際会議 (EU PVSEC 2016) における IEA PVPS ワークショップ

(2016 年 6 月、ドイツ・ミュンヘン)

2016 年欧州太陽光発電国際会議 (EU PVSEC 2016) において、パラレルイベントとしてタスク 1 が開催した IEA PVPS ワークショップ「競争力、ソフトコストと新たなビジネスの事例」に参加した。同ワークショップにおいて日本のタスク 1 専門家として日本における住宅用太陽光発電システムと蓄電池について講演を実施した。同ワークショップ及びその他の併催ワークショップ及び本会議等において、タスク 1 の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(8) Intersolar Middle East 2016 における IEA PVPS ワークショップ報告 (2016 年 9 月)

中東地域における主要な国際会議である Intersolar Middle East 2016 において開催された IEA PVPS ワークショップ「電力会社の役割と中東の砂漠気候に代表される過酷環境における太陽光発電の長期信頼性」に関するワークショップに参加し、中東・北アフリカ (MENA) 地域における太陽光発電の動向について調査を実施した。

(9) 第 26 回太陽光発電国際会議 (PVSEC-26) における IEA PVPS ワークショップ
(2016 年 10 月シンガポール)

PVSEC-26 において IEA PVPS 及び PVSEC-26 運営委員会が共催した IEA PVPS ワークショップ「建築物における太陽光発電：将来の競争力とポテンシャル」に参加した。ワークショップでは、太陽光発電の競争力、自家消費導入モデルの成功要因、建物一体型太陽光発電 (BIPV) のポテンシャルと BIPV モジュール、各国での建物への応用事例について広範な課題について議論した。本ワークショップには、タスク 1 専門家のほかに、タスク 15、タスク 9 及びタスク 14 専門家が参加した。また、主催国であるシンガポールより、住宅開発局 (HDB) 及びシンガポール太陽エネルギー研究所 (SERIS) が参加した。ワークショップでは、日本での住宅太陽光発電システムの動向についてタスク 1 専門家として講演した。同ワークショップ及びその他の併催ワークショップ及び本会議において、タスク 1 の活動関連領域である太陽光発電の競争力や市場、非技術的課題等に関連する動向の調査を実施した。

(10) 第 48 回タスク 1 専門家会議 (平成 29 年 4 月、イタリア・ローマ)

第 47 回タスク 1 専門家会議に日本の代表として参加した。タスク 1 の活動方針に沿って、①今後の IEA PVPS の新たな活動に関する議論と計画の策定、②特別活動の計画 (IEA PVPS ワークショップ、Modeling Workshop)、③タスク 1 成果物である動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2016) の計画及び Snapshot レポートの報告、④国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications) の執筆指針、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 (ショートレポートの作成) 等について審議した。さらに、新たな活動課題として、日本が提案する PV for Transportation について NEDO の草案に基づいてディスカッションを行った。また、国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) との協力活動について審議した。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。

1.2 タスク 1 に係る日本の報告書 (調査・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 に関わる報告書を作成した。これまでに IEA PVPS に提出した英文報告書は下記の通りである。

- ・平成 27 年度
 - ・国内調査報告書 2014 年 (National Survey Report of PV Power Applications 2014 Japan)
 - ・年次報告書 2015 年 (Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2015)
 - ・国別報告 2016 年 (2015 年の統計速報値) (Country Page of Japan, 2016)
- ・平成 28 年度
 - ・国内調査報告書 2015 年 (National Survey Report of PV Power Applications 2015 Japan)
 - ・年次報告書 2016 年 (Japan, PV Technology Status and Prospects, Annual Report 2016)
 - ・国別報告 2017 年 (2016 年の統計速報値) (Country Page of Japan, 2017)
- ・平成 29 年度
 - ・国内調査報告書 2016 年 (National Survey Report of PV Power Applications 2016 Japan)

1.3 タスク 1 に係る定期刊行物の日本語版作成

IEA PVPS の成果の普及のために定期刊行物の日本語版を作成した。

- ・平成 27 年度
 - ・動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014) 日本語版
 - ・主要国の国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications 2014)
 - ・Snapshot Report 2014 日本語版

- ・平成 28 年度
- ・動向報告書 (Trends in Photovoltaic Applications - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015)」日本語版
- ・主要国の国内調査報告書 (National Survey Report of PV Power Applications 2015)
- ・Snapshot Report 2015 日本語版
- ・平成 29 年度
- ・Snapshot Report 2016 日本語版

1.4 2018 年度以降の IEA PVPS 活動に関する情報収集と活動提案

1.1 の項に示した IEA PVPS のシンクタンクとしての役割を担うタスク 1 専門家会議において、2018 年以降の IEA PVPS 活動に関する議論が行われており、専門家会議においての議論の結果を報告した。直近に実施された議論においては、下記の項目があげられている。

- ・ IEA PVPS が今後必要な活動：政策策定者へのロビイング、非加盟国の情報の網羅、障壁の特定、将来展望及びエネルギーセクターの展望の提供
- ・ 技術的トピック：稼働の知見、技術動向、LCOE、蓄電、電力事業者のための太陽光発電、地上自治体による取り組み、ストレージ、独立形、マイクログリッドなどがある
- ・ 経済性に関するトピック：再生可能エネルギー電源 (RES) の価値、ソフトコストとファイナンス、市場の持続可能性、エネルギーセクターにおける他のエネルギーへの補助金との比較、ビジネスモデルなど
- ・ 必要な成果物：Fact Sheets や政策策定者向けのわかりやすい情報の提供、政策的対話への参加、レクチャの提供

また、NEDO の主導により 2018 年に活動を開始する PV for Transportation に関するタスク活動の計画についてもタスク 1 専門家会議におけるフィードバックを報告した。

1.5 加盟国の統計・データ等の取りまとめ

本協力活動を通じて収集する情報 (各国の National Survey Report、Annual Report 及び専門家会議、ワークショップ等での配布資料等) のとりまとめを下記について実施した。統計データ等については、平成 27 年度は過去に遡り、推移の調査・とりまとめを行った。平成 28 年度以降は、更新を実施した。

- 加盟国の累積導入量と年間導入量
- 主要国の下記の項目に関する総生産量と総生産能力
ポリシリコン、インゴット、ウエハー、セル、モジュール
- 加盟国/非加盟国における太陽電池モジュール及び太陽電池モジュール生産能力
- 日本のポリシリコン、インゴット、ウエハー、セル、モジュール製造企業が生産量・生産能力
- 主要国の太陽電池モジュール、太陽光発電システムの価格
- 主要国における雇用人員
- 主要国における産業価値
- 主要国の公的予算 (研究開発、実証及び普及)
- 主要国の政策：再生可能エネルギー目標、太陽エネルギーの導入目標、管轄省庁、実施している普及施策及び導入や廃止が計画されている施策概要、太陽光発電関連予算額 (研究開発、実証、普及)

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)」をはじめとしたタスク 1 の成果物は、NEDO の太陽光発電技術開発ロードマップ PV 2030+や太陽光発電開発戦略 (NEDO PV Challenges) の策定に利用された。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)」をはじめとしたタスク 1 の成果物は、NEDO の太陽光発電技術開発ロードマップ PV 2030+の策定に利用された。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。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。

4. 今後の展開

継続して下記の国際協力活動に参加する計画である (平成 29 年度のみ記す)。PVSEC-27 と併催して実施するワークショップでは、ワークショップ主催事務局業務も実施する。

- ・平成 29 年 9 月：第 33 回欧州太陽光発電国際会議 (EUPVSEC-33) における IRENA/IEA PVPS ワークショップ (オランダ・アムステルダム)
- ・平成 29 年 10 月：第 48 回タスク 1 専門家会合 平成 29 年 10 月 チリ・アントファガスタ
- ・平成 29 年 11 月：第 27 回太陽光発電国際会議 (PVSEC-27) (滋賀県大津市) における IEA PVPS ワークショップ及びタスク 17 PV forTransportation Definition Workshop

さらに、タスク 1 に係る日本の報告書 (調査・作成)、タスク 1 に係る定期刊行物の日本語版作成、2018 年度以降の IEA PVPS 活動に関する情報収集と活動提案及び加盟国の統計・データ等の取りまとめを継続して実施する。IEA PVPS より新たな要請事項があった場合は、NEDO と協議のうえ対応する予定である。

5. 特許論文リスト

	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
研究発表・講演（うち外国出願）	4(4)	5(5)	0(0)	9 件

(2017 年 6 月 30 日現在)

【論文・学会発表】

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	貝塚 泉	(株)資源 総合シス テム	PV in Japan and Utility 's activities	PV &Utility Workshop, ASEAN POWER WEEK 2015	2015/9/3
2	貝塚 泉	(株)資源 総合シス テム	Soft cost and competitiveness in the booming Japanese market	IEA PVPS Workshop、 EUPVSEC 2015	2015/9/14
3	貝塚 泉	(株)資源 総合シス テム	Pathway to PV after the 2011 Earthquake	IEA PVPS & GÜNDER Workshop, Istanbul	2015/10/27
4	貝塚 泉	(株)資源 総合シス テム	Electricity Market Reform in Japan and Emerging Business Models	PVPS Workshop, PVSEC- 25, Busan	2015/11/15
5	貝塚 泉	(株)資源 総合シス テム	Renewable Energy in Japan Focusing on Solar PV	IEA PVPS・UNEF Workshop、Gran Canaria	2016/4/14
6	貝塚 泉	(株)資源 総合シス テム	PV plus electricity storage, a Japanese case	IEA PVPS Workshop, EUPVSEC2016, Munich	2016/6/20
7	貝塚 泉	(株)資源 総合シス テム	PV Status in Japan, Japanese experience in grid-connected applications	Utilities Workshop, Sydney	2016/10/20
8	貝塚 泉	(株)資源 総合シス テム	Evolution of residential PV market in Japan	IEA PVPS Workshop, PVSEC-26, Busan	2016/10/27
9	G. Masson	IEA PVPS Task 1	A Snapshot of Global PV Markets - The Latest Survey Results on PV Markets and policies from the IEA pVPS Programme 2016	EUPVSEC 2016, Munich	2016/6/24

「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」基本計画

新エネルギー部

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

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。太陽光発電は、「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である」と期待されている。一方で、発電コストが高い等の課題も指摘され、更なる技術革新が必要とされている。

また、固定価格買取制度の効果で国内市場は急拡大しているが、今後、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に進めば、賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれるとの指摘もある。将来の国民負担を軽減するためには、発電コストの低減は重要な課題である。

こうした状況を踏まえ、NEDOは2014年9月に「太陽光発電開発戦略（以下、「開発戦略」という。）」を策定し、発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh（グリッドパリティ）、2030年に従来型火力発電の発電コスト並みあるいはそれ以下に相当する7円/kWh（ジェネレーションパリティ）を掲げた。また、開発戦略では、その目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。

② 我が国の状況

平成26年度までNEDOが「革新的太陽光発電技術研究開発」と「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」で進めてきた発電コスト低減に資する技術の開発は、多くの成果をあげている。例えば、結晶シリコン太陽電池ではヘテロ接合バックコンタクト太陽電池で25%を超える要素技術を開発し、CIS系薄膜太陽電池でも30cm角サブモジュールで変換効率17.8%（世界最高）を達成する等の成果をあげてきた。また、Ⅲ－Ⅴ族の薄膜多接合型太陽電池で世界最高効率のセル変換効率を達成、量子ドット等の新概念の太陽電池で世界最高水準の

技術を開発、ペロブスカイト太陽電池等の革新的な技術を開発する等、新分野の開拓でも大きな成果をあげている。

③ 世界の取組状況

欧州では、戦略的研究計画（Strategic Research Agenda : SRA）を策定し、発電コスト低減に取り組んでいる。欧州フレームワーク計画 FP7 (2007～2013) では、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、FP7の後継プログラム Horizon 2020 (2014～2020) を策定し研究開発に取り組んでいる。

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12次5ヵ年計画（2011～2015年）で、変換効率 単結晶シリコン太陽電池で21%、多結晶シリコン太陽電池19%、太陽電池のモジュール製造コスト2020年7元/W等の目標を設定し、研究開発を推進している。

世界各国で国を挙げた研究開発が行われており、2013年時点で、中国メーカーが太陽電池の販売量として出力ベースで6割のシェアを占めるに至り、太陽電池技術分野における我が国の技術の優位性が低下しつつある。

④ 本事業のねらい

本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。

具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとともに、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術を開発する。

(2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

2014年度までに実施した「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果から、結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWh

達成の技術的見通しを得たことから、当該技術を着実に実用化するための技術を開発することとする。

また、2030年までに発電コスト7円/kWh実現に資する要素技術開発を進める。加えて、実用化まで時間を要するものの、これまでの開発成果から発電コスト低減に有効な太陽電池の実現に有望と考えられる技術を対象に、2030年発電コスト7円/kWh達成に資する高性能太陽電池を開発する。なお、これまでは主として高性能化に取り組んできたが、実用化を加速するべく、低コスト化や信頼性も重視する。

さらに、上記開発に必要な測定、評価、分析技術等の開発等を共通基盤技術として開発する。

【最終目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト14円/kWh相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト(円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト14円/kWhを満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25年で20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境(条件)によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2030年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 30%
- ・モジュール製造コスト : 想定する使用環境で、システム価格125円/Wを実現するコスト

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

- ・モジュール変換効率 : 20%
- ・モジュール製造コスト : 15円/Wを実現するコスト

3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

a) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。

材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

b) 高性能C I S太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率23%以上

② 欠陥密度の低減化技術の開発

③ C I S太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

a) 出力測定技術の開発

・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ （ 1σ ）以内を目指す。

・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ （ 1σ ）以内を目指す。

b) 発電量評価技術

・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し、NEDOホームページ等のWebサイトに掲載する。

c) 信頼性・寿命評価技術の開発

・低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。

・太陽電池モジュールの性能30年を予測できる加速試験方法を開発する。

5) 動向調査等

a) 動向調査

- ・発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

b) I E A国際協力事業

PVPS の動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

【中間目標】

1) 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発

a) 試作モジュールで、発電コスト 17 円/kWh 相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率 (%)、モジュール製造コスト (円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト (円/W)、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 17 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%
- ・モジュールの出力劣化 20 年で 20%相当

なお、発電コスト目標を達成する使用環境（条件）によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

b) 2020 年までの実用化計画を提示すること。

2) 革新的新構造太陽電池の研究開発

a) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率 30%以上、且つ、結晶シリコン並の製造コストを実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

b) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率 20%の達成。

- 3) 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発
 - a) 先端複合技術型シリコン太陽電池
 - ① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発
p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の2倍以上にする。
 - ② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発
新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。
 - b) 高性能C I S太陽電池の開発
 - ① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率22%以上
 - ② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化
 - ③ C I S太陽電池の電子構造の明確化
- 4) 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）
 - a) 出力測定技術の開発
 - ・ 新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ （ 1σ ）以内を目指す。
 - ・ 市販されている結晶Si系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ （ 1σ ）以内を目指す。
 - b) 発電量評価技術
 - ・ 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。
 - c) 信頼性・寿命評価技術の開発
 - ・ PID現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。
 - ・ 太陽電池モジュールの性能25年を予測できる加速試験方法を開発する。
- 5) 動向調査等
 - a) 動向調査
 - ① 年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析

するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。

② 発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

b) I E A国際協力事業

N E D Oが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。
2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。

② アウトカム目標

本プロジェクトで開発した太陽電池モジュールが実用化、販売され、当該モジュールが採用される太陽光発電システムの2020年には発電コスト14円/kWh、2030年には発電コスト7円/kWhを実現する。これにより、固定価格買取制度の早期卒業が実現すれば、年間数千億円の費用負担削減効果が見込まれる。

③ アウトカム目標達成に向けての取組

N E D Oは、2020年の発電コスト14円/kWh実現に向け、参画企業の事業戦略を確認する仕組みを構築する。

また、2030年の発電コスト7円/kWh実現に向け、開発技術の実用化を進めるための産学連携体制を構築する。

さらに、開発技術の信頼性評価技術を開発、公表し、発電コスト低減技術の普及拡大に努める。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

【共同研究事業（N E D O負担率2／3）】

① 先端複合技術型シリコン太陽電池、C I S太陽電池の技術開発

本研究開発項目は、大学等の関与が必要となる基盤的な研究要素を含むが、すでに実用化が進んでいる太陽電池を対象として主として企業が実施する開発項目であり、共同研究（N E D O負担率2／3）で実施する。

【委託事業／共同研究事業（N E D O負担率2／3）】

② 革新的新構造太陽電池の研究開発

本研究開発項目は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事

業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

③太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発

本研究開発項目は、大学等が研究開発項目①に取り組む企業と産学官で連携して取り組む基盤的技術の開発に係る事業であり、原則委託事業として実施する。

ただし、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

④ 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）

本研究開発項目は、試験・評価方法の提案等、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、原則委託事業として実施する。ただし、民間企業単独、民間企業のみでの連携、大学等の単独実施等、産学官連携とならないものは、共同研究事業（NEDO負担率：2／3）として実施する。

【委託事業】

⑤ 動向調査等

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、委託事業として実施する。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

NEDOが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、企業や大学等の研究機関等（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、国外の団体の特別の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。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOは、研究開発項目②、③及び④の各項目の下に研究テーマ毎の研究開発責任者（テーマリーダー）を選定し、各実施者はテーマリーダーの下でそれぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

(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、研究開発実施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う。また、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る。

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、研究開発項目⑤や適宜行う調査から内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について把握し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から、一部は委託事業として実施する。

3. 研究開発の実施期間

平成27年度から平成31年度までの5年間とする。

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、外部有識者による研究開発の中間評価を平成29年度、事後評価を平成32年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じ研究開発の加速・縮小・中止等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. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

① 総論

研究開発実施者は、研究成果を広範に普及するよう努めるものとする。NEDOは、研究開発実施者による研究成果の普及を促進する。

② 開発成果の実用化による発電コスト低減への寄与

開発成果については、その実用化を前倒して実現し、発電コスト低減目標の早期達成を目指す。

③ 共通基盤技術の形成に資する成果の普及

研究開発項目②、③及び④の成果については、広く太陽光発電産業、市場に展開可能な共通基盤技術として、プロジェクト内で速やかに共有した後、NEDO及び実施者が協力して普及に努めるものとする。

④ データベース等の整備

研究開発項目④の成果のうち、日射量等のデータベースを構築するものについては、NEDOのWebサイト等で積極的にデータの提供を行う。

⑤ 標準化施策等との連携

NEDO及び研究開発実施者は、研究開発項目④で得られた評価手法等の成果について、国際標準化に向けた役割を果たしていくこととする。

⑥ 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。

(2) 基本計画の見直し

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号イに基づき実施する。

(4) その他

NEDOは、NEDOが実施する他の事業とも連携し、太陽光発電システム全体で発電コスト低減に取り組むこととする。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成 27 年 3 月、制定。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①「先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能C I S太陽電池の技術開発」

1. 研究開発の必要性

現在普及している結晶シリコン太陽電池やC I S太陽電池は、技術開発の進展、市場拡大による量産効果によって、性能向上と価格低減が進んでいる。NEDOの「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」プロジェクトでも、結晶シリコン太陽電池のヘテロ接合とバックコンタクトの統合技術によって、セル効率で25.1%を達成。C I S太陽電池でも高品質光吸収層とCdフリーバッファ層を開発し、小面積セルで変換効率20.9%(2014年4月)、30cm角サブモジュールで変換効率17.8%(世界最高)を達成する等、大きな成果をあげた。しかしながら、2030年までにこれらの成果を実用化し、発電コスト7円/kWhを実現するためには、性能を維持しつつ、大面積化や低製造コストプロセスの開発等を進めるため、更なる技術革新が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

ヘテロ接合とバックコンタクトの統合等、先端技術を複合し、高効率かつ高信頼性を両立したシリコン太陽電池とその低コスト製造技術を開発する。

(2) 高性能C I S太陽電池の開発

C I S太陽電池では、実用化規模の大面積モジュールの高効率化及び低コスト製造プロセスの実用化に向けた開発を実施する。

3. 達成目標

【中間目標】

① 試作モジュールで、発電コスト17円/kWh相当の性能を確認する。

- ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト17円/kWhを満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 20%

- ・モジュールの出力劣化 20年で20%相当
(加速評価試験の方法については、試験条件(例えば JISC8917 の温湿度サイクル試験の試験時間等)を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)

なお、発電コスト目標を達成する使用環境(条件)によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

②2020年までの実用化計画を提示すること。

【最終目標】

- ① 試作モジュールで、発電コスト 14 円/kWh 相当の性能を確認する。
 - ・発電コスト算出においては、開発技術のモジュール変換効率(%)、モジュール製造コスト(円/W)、想定する使用環境におけるシステムコスト円/W、出力劣化率、設備利用率等の前提条件を客観的に説明すること。

<発電コスト 14 円/kWh を満たす性能の目安>

- ・モジュール変換効率 22%
- ・モジュールの出力劣化 25年で20%相当
(加速評価試験の方法については、試験条件(例えば JISC8917 の温湿度サイクル試験の試験時間等)を提示するとともに、目標年数を保証する製品出荷時と同等の条件を満たすこと。)

なお、発電コスト目標を達成する使用環境(条件)によっては、上記条件と異なる目標とする場合もあり得る。

② 2030年までに発電コスト7円/kWhを実現するための開発計画を提示すること。

研究開発項目②「革新的新構造太陽電池の研究開発」

1. 研究開発の必要性

従来の延長線上にはない、Ⅲ－Ⅴ族等の革新的高効率太陽電池や、コスト構造を革新する太陽電池は、2020年の実用化は困難であるが、変換効率の高さや、製造コストの低さから、2030年に7円/kWhの達成が見込める有力な太陽電池である。

しかしながら、革新的高効率太陽電池は、現在は一般に普及する価格での製造はきわめて困難であり、事業目標達成のためには太陽電池の製造装置及び製造プロセスの開発や、多接合化のための太陽電池層の剥離、接合技術の開発が必要である。

また、近年短期間で発電効率を大幅に伸ばしている、ペロブスカイト太陽電池など、コスト構造を革新する太陽電池の実現が期待される技術も見いだされているが、実用化には、原理検証や、信頼性の確認、新しいコンセプトの製造装置の実現が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

一般には普及していないⅢ－Ⅴ族太陽電池等の超高効率太陽電池において、将来の普及を目指し、現在普及している太陽電池並みのコストで製造するための低コスト化の要素技術開発並びに、太陽電池の効率向上により発電コスト低減を実現する要素技術開発を合わせて行うことで、2030年に7円/kWhを達成する手段を明らかにする。

具体的には、変換効率30%以上の薄膜化合物の超高効率太陽電池で発電コスト7円/kWhを達成するために、Ⅲ－Ⅴ族の太陽電池の製造装置、製造プロセス、多接合化の為の剥離・接合などの製造コスト低減のための要素技術開発や、モジュール化の要素技術開発を行い、その実現性を見極める。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

太陽電池に新材料、新構造を用いることで製造コストを革新的に低減させ2030年に発電コスト7円/kWhを目指す。モジュール変換効率は20%程度ながら、新材料、新構造を用いることでモジュール製造コストを15円/Wまで革新的に低減することができる技術を実現する。具体的には、新構造のペロブスカイト系太陽電池等の研究開発を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格125

円/W を実現するセル・モジュール構造と達成手段を明確化する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池セル材料・構造に関する要素技術の開発。

小面積太陽電池セルでの変換効率 20%の達成。

【最終目標】

(1) 革新的高効率太陽電池の研究開発

モジュール変換効率 30%以上、且つ、想定する使用環境で、システム価格 125 円/W を実現する要素技術を確立する。

(2) 革新的低製造コスト太陽電池の研究開発

量産時にモジュール製造コスト 15 円/W を実現しうる、太陽電池モジュール材料・構造・生産プロセスに関する要素技術の開発。

実験室レベルの小型太陽電池モジュールでの変換効率 20%の達成。

研究開発項目③ 「太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発」

1. 研究開発の必要性

発電コスト7円/kWh、14円/kWhを実現するためには、従来の太陽電池モジュールを超える性能を、低コストで実現しなければならない。そのためには、材料や構造の設計において、基礎的、科学的知見を踏まえた検討を行う必要がある。

本研究開発項目は、研究開発項目①の実施者と産学官連携で進める。

2. 研究開発の具体的内容

以下の研究開発項目を実施する。

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池の開発

太陽電池セル・モジュールの各製造プロセスにおいて、評価解析を行い、得られた知見をもとに、原料、結晶、装置、セル、モジュールメーカーの高効率化、低コスト化、高信頼性化に貢献する。

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発

転位密度が低くライフタイムの長い高品質で低コストな材料の開発を行う。また、ウエハスライス技術については、低コスト化、低ダメージ化のための知見を得るための研究開発を行う。さらに、材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響の研究を行う。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発

受光面構造、受光面成膜、裏面成膜、裏面パターン形成、裏面電極構造、高品質透明導電膜、高品質パッシベーション膜、高性能エミッタ、細線低抵抗電極、銀代替電極、ヘテロ接合等の研究開発を行い、技術開発指針を確立する。

(2) 高性能C I S太陽電池の開発

発電コスト7円/kWh達成のために、C I S太陽電池モジュールの高効率化および発電コスト低減を可能とする界面制御技術、再結合パッシベーション、バンドプロファイル評価技術等、要素技術の研究開発を行う。また、実デバイスでの評価検証を行う。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発
p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の2倍以上にする。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発
新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を評価し、セル、モジュールプロセスにおける技術開発課題を明らかにする。

(2) 高性能C I S太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率22%以上

② 欠陥検出のためのデバイス構造の明確化

③ C I S太陽電池の電子構造の明確化

【最終目標】

(1) 先端複合技術型シリコン太陽電池

① 高効率・低コスト結晶成長、ウエハスライス技術に関する研究開発
p型、n型それぞれの基板のキャリアライフタイムを現状の3倍以上にする。
材料品質、スライスプロセスがセル性能に与える影響を明らかにし、セルプロセスにおける技術開発指針を得る。

② 高効率・低コストセル、モジュールプロセス技術に関する研究開発
新たに開発する先端複合技術型シリコン太陽電池において、各要素技術（成膜、電極、パッシベーション等）がセル性能に与える影響を明らかにし、セル、モジュールプロセスにおける技術開発指針を得る。

(2) 高性能C I S太陽電池の開発

① 小面積セル（1cm角程度）で変換効率23%以上

② 欠陥密度低減化の技術開発指針の構築

③ C I S太陽電池の理想的な材料設計技術の提案

研究開発項目④ 「共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）」

1. 研究開発の必要性

太陽光発電の発電コスト低減を実現するためには、長期に亘り安定した発電量を得られることが必要であることから、太陽電池モジュールに対しても、長期信頼性の確保が求められている。

これまでNEDOでは、太陽光発電システム次世代高性能技術の開発において、太陽電池モジュールの評価技術の開発に取り組んできており、出力測定精度の向上や劣化要因について知見が得られつつあるものの、その寿命（耐久性等）を効率的に評価出来る試験技術の確立には至っていない。

発電システムとして信頼性を向上するためには、太陽電池モジュールの耐久性向上に資する技術開発と同時に、実際に設置する環境下での出力測定や寿命を予測できる試験方法といった評価技術の開発と、PID等の太陽電池モジュールの劣化原因の解明が必要である。

更に、これら評価技術の向上や技術開発と併せて、ガイドライン等の作成、認証機関への技術移転や、標準化・国際規格化を進めるための取り組みも実施することで、信頼性の高い太陽電池が適正に評価される環境を作り、日本の太陽光発電産業の国際競争力の向上に貢献する。

2. 研究開発の具体的内容

（1）出力等測定技術の開発

本プロジェクトで開発する太陽電池等、標準化や規格化が進んでいない太陽電池の出力等を正しく評価するための測定技術を開発する。

（2）発電量評価技術

NEDO日射量データベースについて、データの更新、高精度化等、拡充を進め、ユーザーの利便性向上を図る。

（3）信頼性・寿命評価技術の開発

- ① 実際の太陽光発電システムから発電データを取得、分析評価し、発電システムの劣化要因の抽出、劣化メカニズムの解明、および劣化予防対策技術を開発する。
- ② 太陽電池モジュールが設置される環境を考慮した、長期信頼性を評価するための試験方法を開発する。

3. 達成目標

【中間目標】

(1) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。
- ・市販されている結晶 Si 系太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

- ・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。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ① PID 現象など太陽電池モジュールの劣化メカニズムを解明するとともに、劣化予防のための具体的な低コスト対策技術を開発する。
- ② 太陽電池モジュールの性能 25 年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数 100 倍以上等）を開発する。

【最終目標】

(1) 出力測定技術の開発

- ・新型の太陽電池等については、海外における主要研究機関による測定技術との整合性も考慮しつつ、室内測定においては精度 $\pm 0.5\%$ (1σ) 以内を目指す。
- ・薄膜系を含む市販されている太陽電池モジュールの屋外での測定においては精度 $\pm 1.0\%$ (1σ) 以内を目指す。

(2) 発電量評価技術

- ・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し、NEDOホームページ等のWebサイトに掲載する。

(3) 信頼性・寿命評価技術の開発

- ① 低コストで劣化対策を施した太陽電池モジュールの有効性について実証する。
- ② 太陽電池モジュールの性能 30 年を予測できる加速試験方法（劣化率の予測精度 $\pm 5\%$ 、加速係数 100 倍以上等）を開発する。

研究開発項目⑤ 「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) 動向調査

開発戦略の発電コスト低減目標の達成に向け、必要な情報を収集、整理、分析する。

(2) I E A国際協力事業

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) 動向調査

- ①年度毎に太陽電池モジュールの性能と発電コストの関係を客観的に分析するとともに、モジュールの産業競争力を評価する。
- ②発電コスト目標達成後の産業、市場動向について、シナリオ分析を行う。

(2) I E A国際協力事業

N E D Oが参画するPVPSの活動に参加し、その内容を産業界に発信する。2018年度以降のPVPSへの新たな活動計画案を作成する。

【最終目標】

(1) 動向調査

発電コスト7円/kWh実現に向け、開発戦略の見直しの要否を検討するとともに、必要に応じ、見直し案を作成する。

(2) I E A国際協力事業

PVPSの動向及び展開を踏まえた、定期的な情報発信を行う。

事前評価書

	作成日	平成27年2月13日
1. プロジェクト名	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	
2. 推進部署名	新エネルギー部	
3. プロジェクト概要（予定）		
(1) 概要		
1) 背景		
<p>2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、再生可能エネルギーを「現時点では、安定供給面、コスト面で様々な課題が存在するが、温室効果ガスを排出せず、国内で生産できることから、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、重要な低炭素の国産エネルギー源である。」と位置付け、これまでのエネルギー基本計画で示した水準を更に上回る水準の導入を目指すこととしている。太陽光発電は、「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である」と期待されている。一方で、発電コストが高い等の課題も指摘され、更なる技術革新が必要とされている。</p> <p>また、固定価格買取制度の効果で国内市場は急拡大しているが、今後、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に進めば、賦課金が増加し、国民負担の増大が見込まれるとの指摘もある。将来の国民負担を軽減するためには、発電コストの低減は重要な課題である。</p> <p>こうした状況を踏まえ、NEDOは2014年9月に「太陽光発電開発戦略（以下、「開発戦略」という。）」を策定し、発電コスト低減目標として、2020年に業務用電力価格並となる14円/kWh（グリッドパリティ）、2030年に従来型火力発電の発電コスト並みあるいはそれ以下に相当する7円/kWh（ジェネレーションパリティ）を掲げた。また、開発戦略では、その目標達成のための方策として、発電コストに関する要素を分析し、モジュール変換効率の向上、システム価格の低減及び長期信頼性を同時に満たす太陽光発電が必要であり、そのためには新たな技術の開発が必要であるとしている。</p>		
2) 目的		
<p>本プロジェクトでは、開発戦略で掲げる発電コスト低減目標達成のため、2030年までに7円/kWhの実現に資する高性能と高信頼性を両立した太陽電池の開発を目指す。</p> <p>具体的には、実用化が進んでいる結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池については、14円/kWhを実現する太陽電池モジュールを2020年までに実用化するとと</p>		

もに、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

また、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池とは異なり、圧倒的な高効率や低コストで発電コスト7円/kWhを目指す革新的太陽電池については、2030年までに7円/kWhを実現する要素技術の確立を目指す。

上記開発と並行して、太陽光発電の信頼性を高め、着実に社会に定着するための評価技術等の共通基盤技術を開発する。

3) 実施内容

- ① 先端複合技術型シリコン太陽電池、高性能 CIS 太陽電池の技術開発
- ② 革新的新構造太陽電池の研究開発
- ③ 太陽電池セル、モジュールの共通基盤技術開発
- ④ 共通基盤技術の開発（太陽光発電システムの信頼性評価技術等）
- ⑤ 動向調査等

(2) 規模 総事業費（需給）262.5億円（委託100%、共同：2/3）

(3) 期間 平成27年度～31年度（5年間）

4. 評価内容

(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

国内外の周辺動向（規制・政策動向、エネルギー需給動向、社会・経済動向、産業構造、市場動向等）を踏まえているか。また、政策課題や中期目標に掲げるNEDOのミッションに合致しているか。更に、民間活動のみでは改善できない又は公共性や緊急性が高いプロジェクトであるか。

2014年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画では、太陽光発電を「個人を含めた需要家に近接したところで中小規模の発電を行うことも可能で、系統負担も抑えられる上に、非常用電源としても利用可能である。一方、発電コストが高く、出力不安定性などの安定供給上の問題があることから、更なる技術革新が必要である。中長期的には、コスト低減が達成されることで、分散型エネルギーシステムにおける昼間のピーク需要を補い、消費者参加型のエネルギーマネジメントの実現等に貢献するエネルギー源としての位置付けも踏まえた導入が進むことが期待される」と位置付けている。

また、NEDOの中期目標では、「長期的に太陽光発電の発電コストを基幹電源並みに低減させるため、低コスト化に係る技術開発を行うこと」とされており、太陽光発電の発電コスト低減は、政策課題、NEDOの中期目標と合致している。

さらに、固定価格買取制度による太陽光発電の導入拡大が、将来の国民負担増となるとの指摘があり、太陽光発電の発電コスト低減の早期実現は重要な課題であることから、公共性、緊急性の高いプロジェクトである。

② 本事業を実施しない場合、日本の政策上、産業競争力上又はエネルギー・環境上のリスクは何か。

本事業を実施しない場合、太陽光発電の発電コスト低減が遅れるだけでなく、開発戦略に掲げる目標の達成は非常に困難になると考えられる。さらに、日本の太陽電池産業の競争力が著しく低下することが予想される。

2) 研究開発の目標

① アウトプット目標

国内外の競合技術のポジショニング状況を踏まえ、戦略的かつ具体的（定量的）な成果目標の設定がなされているか。また、想定する成果（アウトプット）は、十分に意義があり、市場競争力（コスト、クォリティー、バリュー等）が見込めるものか。

2020年の発電コスト14円/kWh、2030年の発電コスト7円/kWhの実現に向け、ヘテロ接合技術やバックコンタクト技術等の先端技術を複数用いた複合技術型シリコン太陽電池や、CIS太陽電池の高効率化、大面積化、モジュール化、量産化技術の開発等によりモジュール変換効率22%、モジュールの出力劣化25年で20%相当、さらには、モジュール変換効率25%、モジュールの出力劣化30年で20%相当を目指す。これにより現在の市場で、市場競争力を有する太陽電池の早期実用化が期待される。

また、2030年の発電コスト7円/kWhの実現に向け、モジュール変換効率30%、システム価格125円/Wを実現する従来の延長線上にはない革新的高効率太陽電池、モジュール製造コスト15円/Wを実現する革新的低製造コスト太陽電池の要素技術の確立を目指す。これらの技術が実用化すれば、従来の太陽電池とは異なる新たな市場の創出が可能となる。また、高効率化、低コスト化、高信頼性化のための技術開発指針を確立し、あわせて、出力等の測定技術、発電量評価、信頼性寿命評価技術を開発することで、日本の太陽電池の優位性が示され、その国際競争力の向上が期待される。

② アウトカム目標

目的の達成による効果予測（アウトカム）は、投じる予算との比較において想定される市場規模または産業インフラ育成の観点から十分であるか。

本研究開発では、2020年の発電コスト14円/kWhの達成、および、2030年の発電コスト7円/kWhに向けた要素技術の確立を目指す。初年度に投じる予算は44億円で、5年間では総額262億円程度の予定である。これにより、2020年には発電コスト14円/kWh（グリッドパリティ）の達成が見込まれる。

仮に、固定価格買取制度の法律に基づくスキーム見直しが法定されている2020年までに、買取価格20円/kWhが実現できれば、2013年～2020年の8年間で国民負担総額を600億円以上低減することに相当する。加えて、家庭用電力料金を下回ることにより、太陽光発電分野における固定価格買取制度の早期卒業が実現できれば、その後の費用負担削減効果は、年間数千億円レベルになると考えられ、本研究開発の効果は十分であると考えられる。

3) 研究開発の内容と設定根拠

プロジェクトの全体目標からみて、研究開発項目と内容が論理的に設定されているか。

研究開発項目①では、「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」の成果を踏まえ、発電コスト7円/kWh達成の可能性が高い結晶シリコン太陽電池とCIS太陽電池に重点化しており、その目標は開発戦略で検討された発電コスト目標、シナリオに合致している。

研究開発項目②は、研究開発項目①に対して大きな優位性を確保できる開発目標を設定しており、結晶シリコン太陽電池やCIS太陽電池と差別化され、新たな市場創出をも見据えた内容となっている。

研究開発項目③は、実用化は進んでいるものの、今後の開発では特に科学的知見を要求される課題が多いことを踏まえ産学連携で要素技術の確立を目指すこととしている。

研究開発項目④では、長期信頼性の確保により発電コスト低減を目指す開発戦略のシナリオを踏まえ、14円/kWh、7円/kWh実現に必要な劣化率を確認する技術開発目標を設定している。

さらに、国際競争力を常に把握するための動向調査も行うこととしている。

これらの項目、内容は、発電コスト低減という全体目標に照らして、論理的に設定されている。

(1) 研究開発の目的・目標・内容についての総合的評価

太陽光発電は、エネルギー基本計画でも発電コストが高いと指摘されており、更なる技術革新が求められている。よって、発電コスト低減を目的とした本プロジェクトを実施する意義は大きいと考えられる。また、目標に掲げている2020年の発電コスト14円/kWh、2030年の7円/kWhについては、開発戦略で十分に検討されたものであり、これから実施していく技術開発を具体的に想定できていることから、目標として適当であると考えられる。

研究開発項目の内容については、今後目標達成の実現に寄与することができる技術にテーマを絞り、基幹電源並みの発電コストに向けた実用化のための技術開発と要素技術の確立を検討されていることから総合的に判断しても妥当である。

(2) 研究開発の実施方式

1) 研究開発の実施体制・運営方式

成果目標を効果的・効率的に達成するうえで、適切な実施体制の想定はあるか。また、外部有識者による委員会やステージゲート方式等を検討しているか。

各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、研究開発項目①は、これまでの開発で成果を分けている結晶シリコン太陽電池と CIS 太陽電池に重点化し、競争的に実施する。ただし、実用化も進んでいることから NEDO 負担率 2/3 とする。また、研究開発項目②、③及び④は産学官連携で推進することとし、各項目の下に研究テーマ毎の研究開発責任者（テーマリーダー）を選定し、各実施者はテーマリーダーの下でそれぞれの研究テーマについて研究開発を実施する。

研究開発の進捗管理については、研究開発実施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。また、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。

(2) 研究開発の実施方式についての総合的評価

本プロジェクトの実施方式は、効率的かつ効果的に発電コスト目標の早期達成を図る取り組みとして適切である。