

太陽エネルギー技術開発／
太陽光発電システム次世代高性能技術の開発
(中間評価)分科会
資料 5-1

「太陽エネルギー技術開発／
太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」

事業原簿
【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	------------------------------------

—目次—

概要 プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性…………… I-1 [1]
 - 1.1 NEDOが関与することの意義
 - 1.2 実施の効果(費用対効果)
2. 事業の背景・目的・位置づけ…………… I-2 [1]

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 研究の運営管理
3. 情勢変化への対応…………… II-3 [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
 - (イ) 結晶シリコン太陽電池…………… III-1-(イ) [1]
 - (ロ) 薄膜シリコン太陽電池…………… III-1-(ロ) [1]
 - (ハ) CIS・化合物系太陽電池…………… III-1-(ハ) [1]
 - (ニ) 色素増感太陽電池…………… III-1-(ニ) [1]
 - (ホ) 有機薄膜太陽電池…………… III-1-(ホ) [1]
 - (ヘ) 共通基盤技術…………… III-1-(ヘ) [1]
2. 研究開発項目毎の成果と実用化・事業化見通し
 - (イ) 結晶シリコン太陽電池
 - A 極限シリコン結晶太陽電池の研究開発
 1. 成果詳細…………… III-2-(イ)-A-1 [1]
 2. 実用化・事業化見通し…………… III-2-(イ)-A-2 [1]
 3. 波及効果…………… III-2-(イ)-A-3 [1]
 4. 今後の展開…………… III-2-(イ)-A-4 [1]
 5. 特許論文リスト…………… III-2-(イ)-A-5 [1]
 - B マルチワイヤーソーによるシリコンウェハ切断技術の研究開発
 1. 成果詳細…………… III-2-(イ)-B-1 [1]
 2. 実用化・事業化見通し…………… III-2-(イ)-B-2 [1]
 3. 波及効果…………… III-2-(イ)-B-3 [1]
 4. 今後の展開…………… III-2-(イ)-B-4 [1]
 5. 特許論文リスト…………… III-2-(イ)-B-5 [1]

C 太陽電池用ポリシリコンのシリコン原料転換の研究開発	
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(イ)-C-1 [1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(イ)-C-2 [1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(イ)-C-3 [1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(イ)-C-4 [1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(イ)-C-5 [1]
D 太陽電池用シリコンの革新的プロセスの研究開発	
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(イ)-D-1 [1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(イ)-D-2 [1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(イ)-D-3 [1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(イ)-D-4 [1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(イ)-D-5 [1]
(ロ) 薄膜シリコン太陽電池	
A 次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による開発(高効率化)	
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ロ)-A-1 [1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ロ)-A-2 [1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ロ)-A-3 [1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ロ)-A-4 [1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ロ)-A-5 [1]
B 次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による開発(大面積化)	
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ロ)-B-1 [1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ロ)-B-2 [1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ロ)-B-3 [1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ロ)-B-4 [1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ロ)-B-5 [1]
C 高度構造制御薄膜シリコン太陽電池の研究開発	
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ロ)-C-2 [1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ロ)-C-3 [1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ロ)-C-4 [1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ロ)-C-5 [1]
D 薄膜シリコンフィルム太陽電池の高速製膜技術の研究開発	
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ロ)-D-1 [1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ロ)-D-2 [1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ロ)-D-3 [1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ロ)-D-3 [1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ロ)-D-4 [1]
(ハ) CIS・化合物系太陽電池	
A CIS系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発	
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ハ)-A-1 [1]

2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ハ)-A-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ハ)-A-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ハ)-A-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ハ)-A-5	[1]
B フレキシブル CIGS 太陽電池モジュール高効率化研究		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ハ)-B-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ハ)-B-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ハ)-B-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ハ)-B-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ハ)-B-5	[1]
C 反射式集光型太陽光発電システムの研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ハ)-C-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ハ)-C-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ハ)-C-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ハ)-C-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ハ)-C-5	[1]
(二) 色素増感太陽電池		
A ガラス基板型色素増感太陽電池(電圧型)の研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ニ)-A-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ニ)-A-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ニ)-A-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ニ)-A-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ニ)-A-5	[1]
B ガラス基板型色素増感太陽電池(電流型)の研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ニ)-B-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ニ)-B-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ニ)-B-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ニ)-B-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ニ)-B-5	[1]
C プラスチック基板型色素増感太陽電池の研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ニ)-C-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ニ)-C-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ニ)-C-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ニ)-C-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ニ)-C-5	[1]
(ホ) 有機薄膜太陽電池		
A 汎用型有機薄膜太陽電池の研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ホ)-A-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ホ)-A-2	[1]

3. 波及効果	Ⅲ-2-(ホ)-A-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ホ)-A-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ホ)-A-5	[1]
B 蓄電機能付有機薄膜太陽電池の研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ホ)-B-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ホ)-B-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ホ)-B-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ホ)-B-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ホ)-B-5	[1]
(へ) 共通基盤技術		
A 超ハイガスバリア太陽電池部材の研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(へ)-A-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(へ)-A-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(へ)-A-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(へ)-A-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(へ)-A-5	[1]
B ロールツーロールプロセスを可能とする封止材一体型保護シートの研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(へ)-B-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(へ)-B-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(へ)-B-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(へ)-B-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(へ)-B-5	[1]
C 太陽光発電システムの据付工程簡便化に関する研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(へ)-C-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(へ)-C-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(へ)-C-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(へ)-C-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(へ)-C-5	[1]
D 発電量評価技術等の開発及び信頼性及び寿命評価技術の開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(へ)-D-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(へ)-D-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(へ)-D-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(へ)-D-4	[1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(へ)-D-5	[1]
E PV システム汎用リサイクル処理手法に関する研究開発		
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ハ)-E-1	[1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ハ)-E-2	[1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ハ)-E-3	[1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ハ)-E-4	[1]

5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ハ)-E-5 [1]
F 太陽光発電技術開発動向等の調査	
1. 成果詳細	Ⅲ-2-(ハ)F-1 [1]
2. 実用化・事業化見通し	Ⅲ-2-(ハ)F-2 [1]
3. 波及効果	Ⅲ-2-(ハ)F-3 [1]
4. 今後の展開	Ⅲ-2-(ハ)F-4 [1]
5. 特許論文リスト	Ⅲ-2-(ハ)F-5 [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、パブリックコメント募集の結果)

概要

作成日 平成 24 年 7 月 31 日

プログラム名	エネルギーイノベーションプログラム						
プロジェクト名	太陽エネルギー技術開発 太陽光発電システム次世代高性能技術の 開発	プロジェクト番号	P07015				
担当推進部	新エネルギー部						
0. 事業の概要	<p>本事業では、低炭素社会の実現のため我が国政府が打ち出した目標(2009年4月9日内閣総理大臣講演)(太陽光発電の導入規模を2020年に現状の20倍(26GW)、2030年に40倍(53GW)にする)の達成に資する研究開発として、モジュール高効率化及びコスト低減の観点から、各種太陽電池の変換効率の向上、原材料・各種部材の高機能化、モジュール長寿命化、評価技術等の共通基盤技術等の開発を行う。具体的には以下のテーマを実施する。</p> <p>(イ)結晶シリコン太陽電池のコスト低減技術、高効率化技術 (ロ)薄膜シリコン太陽電池の高効率化技術、製造コスト低減技術 (ハ)CIS・化合物系太陽電池の高効率化技術、製造プロセスの開発、集光型太陽電池の低コスト化開発 (ニ)色素増感太陽電池の高効率化技術、モジュール化技術・耐久性向上技術開発 (ホ)有機薄膜太陽電池の高効率化技術、モジュール化技術・耐久性向上技術開発 (ヘ)共通基盤技術の発電量評価技術、信頼性及び寿命評価技術、リサイクル・リユース技術、共通材料・部材・機器及びシステム関連技術、標準化支援事業及びIEA国際協力事業等</p>						
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>環境と調和した健全な経済産業活動と安全・安心な国民生活の実現を図るため、クリーンエネルギーである太陽光発電の更なる普及が待望されている。太陽光発電の更なる普及を実現するためには、これまでに蓄積した技術の更なる高効率化、共通基盤技術の発展及び低コスト化を可能とする革新的技術の開発が不可欠である。本プロジェクトは、経済性・出力安定性といった課題を克服し、新エネルギー等の自律的普及を目標とするエネルギーイノベーションプログラムの一環として実施する。</p> <p>太陽光発電の急速な普及を背景に、海外においては、太陽光発電技術の開発が精力的に取り組まれている。一方、我が国では太陽光発電ロードマップ(PV2030+)で示された技術課題の解決を通じた太陽光発電の普及拡大に邁進しており、まさに、グローバルな開発競争となっている。我が国は太陽光発電の技術開発及びその導入量・生産量において長らく世界を誇っていたが、欧州を中心に行われている導入普及政策により、市場の中心は欧州へと移っており、当該分野における我が国の競争力再建のためには、これまで以上の技術開発が必要となっている。このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、産学の科学的知見を結集して太陽光発電の技術開発を行い、これを産業技術へ繋げていく。また、社会の共通基盤として太陽光発電に係る情報の整備・提供を通じて、行政・産業界・地域社会等の関係各界で科学的知見に基づく認識の醸成を図ることを目的に、本プロジェクトを実施する。</p>						
II. 研究開発マネジメントについて							
事業の目標	太陽光発電ロードマップ(PV2030+)に記載の発電コスト目標:14円/kWh(2020年)、モジュール製造コスト目標:75円/W、モジュール変換効率目標:20%(2015~2020年時点)の実現に資する各種太陽電池の高効率化、低コスト化に係る技術を確立することを目標とする(太陽電池種類毎の具体的な達成目標は後述)。						
事業の計画内容	主な実施事項	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	
	結晶シリコン太陽電池	←					→
	薄膜シリコン太陽電池	←					→
	CIS・化合物系太陽電池	←					→
	色素増感太陽電池	←					→
	有機薄膜太陽電池	←					→
	共通基盤技術	←					→
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	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	総額
	一般会計	—	—	—			
	特別会計(需給勘定)	2,932	3,979	4,421			
	増額予算	1,389	2,287	—			
契約種類: 委託(100%)、共同							

研究(2/3)	総予算額	4,321	6,266	4,421		
	(委託)	3,595	5,030	3,520		
	(共同研究) :負担率2/3	726	1,236	901		
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	山口真史(豊田工業大学大学院工学研究科特任教授)(担当:下記以外)および黒川浩助(東京工業大学統合研究院特任教授)(担当:共通基盤技術の発電量評価技術、信頼性及び寿命評価技術、リサイクル・リユース技術、標準化支援事業及びIEA国際協力事業)				
	委託先	豊田工業大学、新日本ソーラーシリコン(株)、京都大学、東北大学、(株)SUMCO、九州大学、(独)物質・材料研究機構、コマツ NTC(株)、兵庫県立大学、(独)産業技術総合研究所、奈良先端科学技術大学院大学、東京工業大学、岐阜大学、シャープ(株)、三菱電機(株)、京セラ(株)、明治大学、(株)コベルコ科研、太平洋セメント(株)、弘前大学、東京大学、太陽光発電技術研究組合、(株)カネカ、富士電機(株)、昭和シェル石油(株)、富士フイルム(株)、(株)アルバック、鹿児島大学、筑波大学、豊橋技術科学大学、三井造船(株)、九州工業大学、信州大学、新日鐵化学(株)、住友大阪セメント(株)、メルク(株)、山形大学、桐蔭横浜大学、グンゼ(株)、(株)フジクラ、東京理科大学、住友化学(株)、出光興産(株)、(株)東芝、パナソニック電工(株)、早稲田大学、三菱樹脂(株)、積水化学工業(株)、デュポン(株)、(財)日本気象協会、(財)北九州産業学術推進機構、(株)資源総合システム、みずほ情報総研(株)				
情勢変化への対応	<p>日本は太陽光発電システムの導入量・生産量において長らく世界一を誇っていたが、欧州を中心に行われている導入普及政策により、市場の中心は欧州へ移り、生産量においても中国・台湾等の新興メーカーの台頭が顕著で日本の地位は相対的に低下している。</p> <p>このような近年の競争力低下と、政策面における太陽光発電の普及拡大の要請とが相まって、太陽光発電の性能の飛躍的な向上と大幅な低コスト化を狙った研究開発が求められている。それにより、住宅や商用施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を抜本的に拡大し、さらに海外の広大な非耕作地など全地球的な視点での太陽光発電の利用も可能とするなど、グローバルな展開も期待される。</p> <p>しかしながら、太陽光発電技術を飛躍的に向上させるためには、従来技術の延長線上にない研究開発における新たな取り組みが必要不可欠である。世界的に熾烈な開発競争を展開している中で、より広い知見を結集し、それぞれが得意とする専門技術を総合することで研究開発の高度化とスピードアップを狙ったコンソーシアム形式も採用した。</p>					
評価に関する事項	事前評価	事前評価 平成 21 年度 担当部 新エネルギー技術開発部				
	中間評価	中間評価 平成 24 年度 担当部 新エネルギー部				
	事後評価	事後評価 平成 27 年度予定 担当部 新エネルギー部				
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>豊田工業大学 大学院工学研究科特任教授 山口 真史氏を基本計画の研究項目ごとに設定した下記のテーマ(イ)～(ホ)のプロジェクトリーダー、東京工業大学 ソリューション研究機構 特任教授 黒川 浩助氏をテーマ(へ)のプロジェクトリーダーとし、その下で各研究開発の効率化を図りながら、太陽電池の種類ごとに研究分科会(後に進捗報告会に名称変更)を設け、プロジェクトリーダー及び実施者間での情報交換等により進捗状況の把握、研究方針のチェックと指導を行った。分野別に、成果概要を以下に示す。</p> <p>(イ) 結晶シリコン太陽電池</p> <p>結晶シリコン太陽電池の高効率化技術及び低コスト化に資する技術の開発を目的として22件のテーマについて継続して研究開発を行った。「極限シリコン結晶太陽電池の研究開発(次世代超薄型結晶シリコン太陽電池の低コスト・高効率化プロセス開発)(委託先シャープ株式会社)」においては、バックコンタクト太陽電池セルを試作し、90mm 角、220μ m厚で 22.1%(自社測定)の変換効率を達成した。また、「極限シリコン結晶太陽電池の研究開発(太陽電池向け 100μ mウエーハの高効率加工技術の構築)(委託先コマツNTC株式会社)」では、細線ワイヤーによる切断条件を改良し、ウエーハ厚さ 130μ m、カーフロス 115μ mを達成した。「太陽電池用シリコンの革新的プロセス研究開発(高純度原料の開発)(委託先:太平洋セメント株式会社)」では、シリカの洗浄に遠心分離</p>					

機を適用することで、洗浄コストの 50%削減の目途を得た。

(ロ) 薄膜シリコン太陽電池

薄膜シリコン太陽電池について、高効率化と製造コスト低減の開発を目的として、3件のテーマについて継続して研究開発を行った。「次世多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による研究開発」(委託先:太陽光発電技術研究組合)においては、小面積のタンデムセルにおいて、 SiO_x 中間層の採用、n 層の SiO_x 合金化、トップセル膜厚調整($t_{\text{top}} \sim 0.35 \mu\text{m}$)により、安定化効率 11.7%(ガラス面反射防止層あり)を得た。また製造コスト低減の開発として、三菱重工業が開発した大面積(G5 サイズ:1.4m×1.1m)プラズマCVD装置をベースにした高生産製造装置の開発を実施中であり、 $\mu\text{c-Si}$ 製膜において±15%以下の膜厚均一性を得た。「高度構造制御薄膜シリコン太陽電池の研究開発」(共同研究先:株式会社カネカ)においては、実機サイズモジュール(980mm×950mm)から切り出した 10mm 角のセルで、初期変換効率 13.1%が得られた。「薄膜シリコンフィルム太陽電池の高速製膜技術の研究開発」(共同研究先:富士電機株式会社)においては、 $\mu\text{c-Si}$ 単接合セルで製膜速度 2.2nm/s において、変換効率 9.5%を達成した。

(ハ) CIS等化合物系太陽電池

CIS 系薄膜太陽電池の高効率化技術及び軽量基板上への太陽電池の形成技術の開発を目的として2件のテーマについて継続して研究開発を行った。「フレキシブル CIGS 太陽電池モジュールの高効率化研究」(委託先:富士フィルム株式会社、株式会社アルバック、国立大学法人鹿児島大学、国立大学法人筑波大学、国立大学法人豊橋技術科学大学)において、フレキシブル基板上の集積型サブモジュールのプロセス技術を開発し、10cm 角サブモジュールで変換効率 15.9%を達成した。またフレキシブル基板上に連続で CIGS 太陽電池を製造するためのロール・トゥ・ロール製造装置の開発も実施中である。「CIS 系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発」(委託先:昭和シェル石油株式会社)においては 30cm 角サブモジュールで中間目標(変換効率 17%)を大幅に超える変換効率 17.8%を達成した。

(ニ) 色素増感太陽電池

色素増感太陽電池の高効率化・高耐久化およびモジュール開発を目的として、12件のテーマについて継続して研究開発を行った。「三層協調界面構築による高効率・低コスト・量産型色素増感太陽電池の研究開発」(委託先:シャープ株式会社、住友大阪セメント株式会社、富士フィルム株式会社、メルク株式会社、新日鐵化学株式会社、国立大学法人九州工業大学、国立大学法人信州大学)においては、半導体層、色素、電解質の三層構造を最適化した 20cm 角のモノリシック型サブモジュールを開発し、集積型モジュールでは世界最高となる変換効率 9.1%(自社測定)を達成した。「高効率・高耐久性色素増感太陽電池モジュールの研究開発」(委託先:株式会社フジクラ、学校法人東京理科大学)においては、単一ガラス基板サブモジュールとしては世界最大となる 50cm 角サブモジュールを開発し、変換効率 6.5%(自社測定)を達成した。

(ホ) 有機薄膜太陽電池

有機薄膜太陽電池の高効率化・高耐久化およびモジュール開発を目的として、6件のテーマについて継続して研究開発を行った。「有機薄膜太陽電池モジュール創製に関する研究開発」(委託先:株式会社東芝、住友化学株式会社、出光興産株式会社、国立大学法人京都大学)においては、高精度塗布・パターンニング技術および発電層材料の改良により、20cm 角のサブモジュールで世界最高となる変換効率 6.6%(自社測定)を、1cm 角セルにおいて変換効率 9.1%(自社測定)を達成した。

(ヘ) 共通基盤技術

発電量評価技術、信頼性および寿命評価技術、PV システム汎用リサイクル処理手法、共通材料・部材の開発、技術動向の調査を目的として、6 件のテーマについて継続して研究開発を行った。「発電量評価技術等の開発・信頼性および寿命評価技術の開発」(委託先:独立行政法人産業技術総合研究所他)においては、気象データから結晶 Si 太陽電池の発電量を 5%未満の精度で推定する測定法及び算出法や、当日の気象データから特定地域の翌日の発電量を予測する技術を開発した。また、新規加速試験技術としてサイクリック試験、逆バイアス定電流試験を検討すると共にモジュール内水蒸気進入経路調査方法等を開発した。「広域対象の PV システム汎用リサイクル処理手法に関する研究開発」(委託先:公益財団法人北九州産業学術推進機構)においては、EVA 加熱・燃焼処理装置など汎用リサイクル手法における共通処理部の技術開発見通しを得た。また、年間処理量 200MW のパイロットプラントの基本設計・コスト評価を実施し、目標コスト 5 円/W@年間 200MW の達成見通しを得た。「超ハイガスバリア太陽電池部材の研究開発」(委託先:三菱樹脂株式会社)においては、水蒸気透過度 $10^{-6}\text{g}/\text{m}^2\text{day}$ 以下、 $85^\circ\text{C} \times 85\% \text{RH}$ 3000hr での水蒸気透過度 $10^{-5}\text{g}/\text{m}^2\text{day}$ 以下、耐候性試験機 3000hr での水蒸気透過度 $10^{-5}\text{g}/\text{m}^2\text{day}$ 以下である、Cat-CVD とシリカ蒸着の複合膜による超ハイガスバリアフィルムの基本構成確立の目処を得た。「ロールツールロールプロセスを可能とする封止材一体型保護シートの研究開発」(委託先:積水化学工業

	<p>株式会社)においては、厚み精度±4%以下、接着速度 3m/分で一体成形、接着強度 20N/10mm以上、全光線透過率 93%の透明性、バリア性 1.8g/m²day の薄膜シリコン太陽電池向け一体型保護シートを実現した。「太陽光発電システムの据付工程簡便化に関する研究開発」(委託先:デュポン株式会社)においては、ボトルナット不要で部品点数を 62%削減した据付部品プロトタイプを開発。開発システムによる 20%の時間低減率の低減目標の妥当性を確認。また、アイオノマー樹脂と薄板ガラスの組み合わせで、従来型構造と比較し 50%以上の軽量化と、IEC61215 準拠の各種試験に合格する耐久性を持つ新規モジュール構造を実現した。</p>	
(特許・論文等について件数を記載)	H22-H24 年度(7 月末まで)において 特許出願230件、論文(査読付)245件、学会発表913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。また要素技術として確立しても、実用化までにもう一段の研究が必要とされるものは、2017 年以降に実用化を行い、2020 年における発電コスト 14 円/kWh、2030 年における発電コスト 7 円/kWh の目標達成を目指す。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成 22 年 3 月制定
	変更履歴	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
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
ASTL法	ASTL method	CIGSに対するNa供給技術の一種。Mo薄膜を成膜する前にSLGの薄膜を成膜する。NaはMoを通してCIGSへ供給される。
BDTAR	Beam Down TAR	上記集光装置の2次集光部で下方へ再度反射集光させて集光倍率をあげた集光装置。
BIPV(建材一体型太陽光発電)	Building-integrated photovoltaics	太陽電池モジュールが建物の一部分を構成して、従来の建築材料の機能を担っていること。
CCA	Concentrator cell assembly	太陽電池を基板に実装したもの。構成部品は、太陽電池、基板、ショットキーダイオード、コネクタなど
CIGS	CIGS	CuIn _{1-x} Ga _x Se ₂ という化合物半導体
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
D-π-A色素	D-π-A dye	電子密度が高く電子供与性の性質を有するドナー部位(D)と電子密度が低く電子吸引力の性質を有するアクセプター部位(A)がπ共役部位を介して結合した構造をもつ色素
EBIC	EBIC	電子線照射によって試料に誘起される電流
EMC	EMC	Electro Magnetic Casting(電磁铸造)の略称
EVA樹脂	Ethylene-vinyl acetate Copolymer	太陽電池モジュールの封止に使用される樹脂材料の一つ
G5 G8.5	G5 G8.5	ガラス基板サイズの呼称。Gは世代(Generation)を表す。通常G5は1.1×1.3m ² 、G8.5は2.2×2.5m ² を指すが、本開発では1.1×1.4m ² もG5と呼んでいる。
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。
Hα	Hα	水素原子の線スペクトルの中で、波長：656.28nmのもの。
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。
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。 本研究開発では下記3項目の試験を適用し、変換効率の低下を評価する。 温湿度サイクル(A2)：温度範囲：-40℃～85℃85%RH、サイクル数10cycle 光照射(A5)：照度255W/m ² 波長：300-700nm 500時間 耐湿性(B2)：85℃85%RH 1000時間
LPI社	Light Prescriptions Innovators, LLC	LPI社は1999年に設立され、自動車のランプ、LEDライト、集光型太陽光等の製品に、非結像及び結像光学の技術を使って、革新的なソリューションを提供している先進的な技術者集団の会社である。特に、LPIヨーロッパは、マドリッド工科大学と良好な関係を構築して、共同して先進的な技術開発を進めている。
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital	基底状態において電子を満たしていない(否占有軌道)の内、エネルギーの最も低い未占有の軌道。
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型分子	n-type molecule	電子受容性の高い分子
OES	OES	被測定物を高温のプラズマにより蒸発・気化させ、発生する発光スペクトルを分光して、その波長から元素を特定し、発光強度から定量する分析方法のこと。英語を略して「OES」とも呼ぶ。

用語 (日本語)	用語 (英語)	説明
Off-axisXR	Off-axisXR	軸外し反射屈折集光器 (長岡技術大学設計)
Off-axisXR-Köhler	Off-axisXR-Köhler	軸外しケーラー光学反射屈折集光器 (LPI社+マドリード工科大学設計)
PCBM	PCBM	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:PPS	PEDOT:PPS	導電性ポリマーの1種類であり、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。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。また、PPSはポリスチレンスルホン酸塩の略称である。
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。
POE	Primary Optical Element	一次集光装置
PTB7	PTB7	導電性高分子の1種であり、P型材料の代表的材料。PTBシリーズは、thieno[3,4-b]thiopheneがキノリド構造を安定化することで低バンドギャップを実現した一連のポリマー群を指す。PTB7は、エステル部位とベンゾジチオフェン部位両方に枝分かれの側鎖を導入することで溶剤に対する溶解性を高めている。
RP	Recycle Point	回収したPVシステムをリサイクルする場所
RPD法	RPD method	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。
Ru色素 (Ru錯体色素)	Ruthenium complex dye	ルテニウム元素を構成元素として含む色素
Rワイヤ	R-wire	鋼線に樹脂をコーティングしたソーワイヤの総称
Rワイヤウエハ	R-wired wafer	Rワイヤでスライスした低ダメージウエハ
SiON	SiON	シリコン酸窒化物
SLG	SLG	青板ガラス、ソーダ石灰ガラス
SOE	Secondary Optical Element	二次集光装置
SY	Stock Yard	回収したPVシステムを一時的に保管する場所
TAR	Trans Axial Reflector CPV	1軸で上方に直線状に集光し、2次集光装置で直交方向にさらに集光して集光倍率を高めた直交型の反射式集光装置
TCO	Transparent Conductive Oxide	透明導電膜と呼ばれる。フッ素添加された酸化錫や酸化インジウム錫、酸化亜鉛などが良く用いられる。太陽電池の光入射側に用いて光を透過させながら電流を外部に取り出すのに必要な材料である。
VHF	optical emission spectroscopy	Very High Frequency (超短波) の略。一般的に30MHz~300MHzの周波数の電磁波を指す。
ΔG (自由エネルギー差)	free energy difference	異なる材料における電子のエネルギーの差。 異なる材料を移動する時にこのエネルギー差を熱として失うために ΔG が小さい方が望ましい。一方経験的則として ΔG が0.6eVよりも小さい場合、短絡電流値が下がる。
π 共役部位	π conjugated moiety	π 共役系を持つ部位。 π 共役系 (きょうやくけい) は、化合物中に交互に位置する単結合および多重結合に非局在化電子を持つ結合p軌道系である。共役系は一般的に、分子全体のエネルギーを低下させ、安定性を高める。
π 電子	π -electron	分子内の隣り合った原子同士の電子軌道の重なりによってできる結合を π 結合といい、構成している電子の名称。
アイオノマー樹脂	Ionomer Resin	イオンによる擬似架橋構造を有する樹脂。高い水分バリア性を有し、架橋樹脂の強靭さを保持しつつ、熔融成型が可能な点で太陽電池封止材へ展開されている。
アパーチャーエリア	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。
アモルファスシリコン	Amorphous silicon	シリコンを主成分とし、原子配列に結晶性を持たない固体半導体。真空蒸着法などにより非常に薄い半導体膜を形成可能。半導体膜形成時の条件を変えることでpn接合を作製することができる。

用語 (日本語)	用語 (英語)	説明
アモルファスシリコンゲルマニウム	Amorphous silicon-germanium	シリコンとゲルマニウムの合金を主成分とし、原子配列に結晶性を持たない固体半導体。アモルファスシリコンと比較するとバンドギャップが狭い特徴がある。
アレイ	array	ストリングを並列接続したもの。
イオン液体	Ionic liquid	室温付近で液体を呈すイオンのみからなる熔融塩のことであり、極低蒸気圧、不揮発性、不燃性、低熱膨張係数の特徴があることから液体を含むデバイスである色素増感太陽電池の信頼性向上の切り札として期待されている。
エアマス	Air mass (AM)	地球大気に入射した太陽光直達光が通過した路程の長さ。標準状態の大気圧(標準気圧:1013hPa)に垂直に入射した太陽直達光が通過した路程の長さを AM1.0 として、それに対する倍率で表す。
エネルギーハーベスティング(環境発電)	Energy harvesting	光・電波・温度など周りの環境から微小なエネルギーを「収穫(ハーベスティング)」して、発電する技術
エリプソメトリ	ellipsometry	物質の表面で光が反射するときの偏光状態の変化(入射と反射)を観測し、そこから物質の膜厚や屈折率、消衰係数を計測する方法
エンジニアリングプラスチック	Engineering Plastic	耐熱性・強度に優れるプラスチックの総称。
オートクレーブ	autoclave	内部を高圧力にすることが可能な耐圧性の装置や容器、あるいはその装置を用いて行う処理のこと。医療分野では滅菌処理に、工学分野ではコンクリート製品の促進養生に使用されている。
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。
カクテル吸着セル	Cocktail cell	吸収波長の異なる複数の色素を混合(カクテル)し、複数の色素の吸収領域を合わせ持つようにチタニアに色素が吸着されたセル
カソードルミネッセンス	cathodoluminescence	電子線照射によって生じる発光
カットオフ状態	Cutoff frequency	物理学や電気工学に於けるシステム応答の限界であり、それを超えると入力されたエネルギーは減衰したり反射したりする。導波管で伝送可能な最低周波数(或いは最大波長)。
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。一般的には白板強化ガラスを用いる。
ガラス/ガラス モジュール	Glass/Glass module	ガラス/封止材/セル/封止材/ガラス という構成からなる太陽電池モジュール。
ガラス/バックシート モジュール	Glass/Backsheet module	ガラス/封止材/セル/封止材/バックシート という構成からなる太陽電池モジュール。
カルーセルタイプ	Carousel Type	メリーゴーランド状の回転系にアレイを搭載し、太陽方位に対しては回転系が追尾し、太陽高度に対しては各モジュールを傾斜させる(傾転)太陽光追尾装置。
カルバゾール系有機色素	organic dye having carbazole group	カルバゾール基を有する有機色素
キセノンウェザーメーター	XeWM	耐候性試験機の一つ。光照射を Xe ランプ発光で行う。
ギブズエネルギー	Gibbs free energy	熱力学や電気化学などで用いられ、エネルギーの次元をもつ示量性状態量である。通常 G と表記され、等温等圧条件下で仕事として取り出し可能なエネルギー量である
キャスト	cast	融液を容器に注入し凝固する方法
クーラント	coolant	冷却液。インゴットスライス中、摩擦によりインゴットおよびワイヤー温度が上昇するのを抑制するために用いられる。
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、既存の電力系統の電気料金と同等になること。
コプレーナー	Coplanar Waveguide	信号パターン及びグラウンド導体が同一平面上にある伝送線路の構造。信号を伝送する回路パターンとグラウンドプレーンとの間隔が一定となる様に広いグラウンド導体にスリットを入れた形状である。

用語（日本語）	用語（英語）	説明
コンビナトリアル手法	Combinatorial method	反応プロセスを最適化するとき、反応条件（温度、圧力、組成など）を変化させたライブラリを作製して評価することによって、系統的なデータを迅速に得ることが出来る手法。
サイクル数	wire running cycle	ソーワイヤを往復させるサイクル、単位は回/分
サブストレート型太陽電池	substrate type solar cell	太陽光を基板を通さずに入射させるタイプの太陽電池
サブモジュール	Submodule	集積構造を備えているがカバーガラス等による封止がされていない太陽電池、サーキット（Circuit）とも言う
サンシャインウェザーオメーター	SWOM	耐候性試験機の一つ。
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。
ジェットミル	Jet mill	物体を粉末状に粉砕する装置の中でも、ノズルから噴射される高圧の空気・あるいは蒸気を超高速ジェットとして粒子に衝突させ、粒子どうしの衝撃によって数ミクロンのレベルの微粒子にまで粉砕する装置のことである。噴射される空気・蒸気は音速前後に達する。
システムオンフィルム	System on film	成型、印刷、接合によってフィルム基板に機能素子を集積、個片化して電子デバイスを作製する製造方式。薄いフィルム基板を使用しているため、薄く、軽く、曲げられるといった特長を有する。また、従来のリソグラフィに比べ工程数が少ないことから、生産性が高く、製造コストを大幅に下げられる。
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。
シリカ塩化(反応)	Silica-Chlorination	直接塩化反応のこと
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。
ストリング	string	モジュールを複数直列接続したもの。
スピコート	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、スピコーターと呼ぶ。
セムス（CEMS）	Community energy management system	太陽光発電所や風力発電所を含む発電所での電力供給量と地域内の電力需要の管理を行うエネルギー管理システム
セル評価	test production of PV cell for wafer evaluation	太陽電池セルを試作してウエハの評価を行うこと
セレン化法	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
セレン化硫化法	Selenization / Sulfrization	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（Sulfrization after Selenization）と呼んでいる
ゾーン加熱	Zone heating	炉を加熱するとき、複数の熱源を用いることによって、場所によって反応温度を変える。副反応に応じて最適な反応温度を設定することができる。
ターピリジン系 Ru 色素	Ruthenium complex dye with terpyridine ligands	ターピリジン基を配位子のひとつとして有する Ru 色素
ターンキー・ソリューション	Turnkey solution	スイッチを入れれば調整など不要で、すぐに利用可能なシステムのこと。新興国が日欧米の製造装置メーカーから、ターンキー・ソリューションを調達し、最先端の製造ラインを構築している事例が増えている。

用語 (日本語)	用語 (英語)	説明
ダブルガラスモジュール	double-glass module	受光面側のみならず、裏面材にもバックシートではなくガラスを用いた太陽電池モジュール。
ダブルテクスチャー ZnO	W-textured ZnO	数ミクロンサイズの凹凸の上に、数 100nm のサイズの凹凸が形成された透明導電膜 ZnO。大きさの異なる凹凸構造を複合化することにより、非常に広い波長範囲でヘイズ率が高くなることを特徴とする。
ダブルリッジ型導波管	Double ridge waveguide	方形導波管の一部 H 型の断面を持った導波管。
タンデム型セル	Tandem cell	短波長を吸収するセルを光の入射側、その後ろに長波長側を吸収するセルを直列になるように構成されたセル
テクスチャ/テクスチャー	texture	凹凸のこと。光を凹凸によって散乱させることで光の吸収長を長くとり、光をより効果的に半導体で吸収させるのに用いられる。薄膜シリコン太陽電池では必須技術である。
デンドライト結晶	Dendrite crystal	樹枝状の形態を示す結晶で、過冷却度などの成長条件が適度に制御された状態で発現する。シリコンのデンドライト結晶は特定の優先成長面を持つため結晶組織の制御に活用できる。
トライオード型プラズマ CVD	Triode-PECVD	通常の平行平板型プラズマ CVD (ダイオード型) において、2 つの電極間にメッシュ電極を挿入し、SiH ₄ -H ₂ プラズマを基板から空間的に離す製膜法。これにより、光劣化の要因として考えられる高次シラン系ラジカルの膜への取り込みを抑制することができる。
ナノインプリント	Nano-imprint	被転写体に金型を押し付けナノメートルサイズの表面凹凸形状を転写、その後加熱または UV 照射により被転写体を硬化させる表面形状転写方法。転写の際に光を使わないので、フォトリソグラフィで問題となる光の回折限界の制限を受けず、微細構造を転写することができる。
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。
バソキュプロイン (略号 BCP)	Bathocuproine	2, 9-ジメチル-4, 7-ジフェニル-1, 10-フェナンスロリン。電子輸送材料として利用されている。
バックシート	back sheet	太陽電池モジュールの裏面側に用いる高分子系シート。ポリエチレンテレフタレート (PET) をベースフィルムとするものが多く、PET フィルムをフッ素系の樹脂ではさんだものや、アルミニウム箔を PET フィルムではさんだものなどが用いられる。
バッファ層	Buffer layer	CIGS 層と TCO 層の境界面に挿入する薄膜層。通常は CdS を用いる。光生成電子の流れをスムーズにし、表面 n 型層形成に関わる。
バリア性	barrier property	物質の透過を阻止する能力。ここでは、水蒸気の透過を阻止する能力を指しており、水蒸気透過率が低いほど、バリア性が高い。
バルクヘテロ接合	Bulk hetero junction	互いに溶け合わない p 型材料と n 型材料を混合し製膜することにより、積層による接合ではなく膜面の横方向に接合ができるようにした製膜方法。厚膜化が可能で、光吸収には有利である。また、接合は横方向の近いところにあるため、励起状態から電荷分離されやすくなる。塗布および蒸着両プロセスで製膜が可能である。但し蒸着の場合には、「バルクヘテロ接合」ではなく「i 層」という表現が使われる。
バンドギャップ	Band gap	固体中の電子が定常状態でも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。
ヒート・ライト・ソーキング	Heat light-soaking	加熱しながら光照射すること
ピピリジン系 Ru 色素	Ruthenium complex dye with bipyridine ligands	ピピリジン基を配位子のひとつとして有する Ru 色素
フィード同期	synchronous Si feed mode	ソーワイヤの線速の早い時のみにシリコンを動かす切断方法

用語 (日本語)	用語 (英語)	説明
フタロシアニン系色素	Phthalocyanine dye	フタロシアニン骨格を有する色素。フタロシアニン環の中心が水素である有機物と金属が配位した錯体型色素がある。
フラーレン	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である。フラーレン (あるいはその誘導体) が n 型材料に用いられるようになり、有機薄膜太陽電池の変換効率が向上した。専ら、炭素数 60、70 のフラーレンあるいはその誘導体が利用されている。
プラズマ CVD	plasma-enhanced chemical vapor deposition	高周波などを印加することで原料ガスをプラズマ化させることを特徴とする化学気相成長
プラズマパラメーター	Plasma parameter	電子密度や電子温度、プラズマ電位等プラズマの特性を表す指標の総称。
フラックス処理	flux treatment	酸化物やハロゲン化物の混合物を金属 (粗シリコンなどを含む) 相と接触溶解させて金属相から不純物をする。
プリカーサー	Precursor	Cu、In 等の CIS 系光吸収層を構成する元素が積層されたもの
ペDESTAL	Pedestal	1 本の支柱に 2 軸駆動系を持たせて、アレイ全体を太陽に正対するように追尾させる太陽光追尾装置。アレイを平板状に保持する場合が多く、横方向の大骨と支柱で T 字の骨組みを構成する構造を総称する。
ヘテロ接合結晶系太陽電池	heterojunction crystalline silicon solar cell	結晶シリコンとアモルファスシリコンで pn 接合を形成した結晶シリコン系太陽電池。高い電圧が得られて高性能が実現する。実用化されたものとしては、三洋電機が開発した HIT 太陽電池が代表例である。一般的な結晶系に比べれば、水蒸気浸入に弱いとされている。
ヘムス (HEMS)	Home energy management system	センサーや IT の技術を活用して家庭内のエネルギー管理を行うためのシステム
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。
ポルフィリン系色素	Porphyrin dye	ポルフィリン骨格を有する色素。ポルフィリン環の中心が水素である有機物と金属が配位した錯体型色素がある。
マルチロッド電極	multi-rods electrode	金属製の棒で構成され電力の伝搬方向を棒状電極に沿った一次元方向にすることで、電極両端からの供給する電力の位相差を制御可能とする構造とした電極
メディエータ	Mediator	対極表面で電子を受け取り、色素に電子を渡す役割を担う物質
モールド	Mold	ナノインプリントで表面形状を転写するために被転写体に押し当てる金型。
モジュール	Module	光入射側はカバーガラス等を用いて封止された太陽電池
モジュール変換効率	module efficiency, η_{module}	モジュールの受光面に入った太陽光と発電された電力の割合
モノリシックモジュール	Monolithic module	1 枚の基板上に太陽電池構成材料を層状に積層して作製したモジュール
モルフォロジー	Morphology	互いに溶け合わない材料を混合したときに、それぞれの成分の混ざり方を意味する。バルクヘテロ接合ではモルフォロジーが変換効率に大きな影響を与える。高分子材料に対して用いられる表現で、本事業原簿では、低分子材料の場合に「ナノ構造」という表現を使っている。
モル吸光係数	molar extinction coefficient	光がある媒質に入射したとき、その媒質がどれくらいの光を吸収するのかわかる定数であり、溶液の単位モル濃度で規格化した値をモル吸光係数と呼び記号 ϵ が用いられる。
ラジカルポリマー	Radical polymer	ラジカル部位を持つ高分子
レーザードーピング	Laser Doping	レーザー光を用いてシリコンを局所的に瞬時に溶解し不純物を添加する技術。基板は室温に保たれている。
ロールツーロールプロセス	Roll to Roll Process	材料フィルムをロールからロールへと連続的に供給し、印刷やラミネートを行うプロセス

用語 (日本語)	用語 (英語)	説明
亜鉛還元法	Zinc Reduction Method	四塩化珪素と亜鉛を原料として用いて、気相状態で反応させ、結晶シリコンを得るポリシリコン製造方法で、塩化(反応)、還元(反応)、電解(反応)の組合せのプロセスとなる
安定化効率	stabilizing efficiency	アモルファス Si 太陽電池は光にあたると出力が低下するが、光を照射して出力が安定になったときの変換効率
位相変調法	phase modulation method	電極両端から供給される高周波の位相差を変調することにより電極上に時間平均的に均一なプラズマを生成する方法
塩化(反応)	Chlorination (reaction)	亜鉛還元反応法において、四塩化珪素を製造・精製する工程(反応)。
塩化コバルト	cobalt chloride	コバルトと塩素の化合物。青色であるが、吸湿性を有し水蒸気との反応で薄紅色となる。
塩化生産性	Chlorination Productivity	塩化炉の内断面積あたりの四塩化珪素生産速度 単位：トン SiCl ₄ /m ² /h
塩化反応炉	Chlorination reactor	直接塩化反応を行う反応炉のこと
温度サイクル試験	Thermal Cycle Test	本稿では IEC61215 に定められた、85℃と-45℃の温度変化を一定周期で一定回数与える試験。試験後の出力低下 5%以下であれば合格。
化学熱力学	Thermochemistry	化学反応を熱力学的に扱う学問であり、溶液反応の pH と平衡定数は反応に関わる物質の化学ポテンシャルから求まる。
可視光下	Under visible light	照度 200Lx (光波長範囲 400~700nm での光エネルギー 57.7 μW/cm ²) 環境下
過渡吸収分光	Transient absorption spectroscopy	パルスレーザーで試料を瞬間的に光照射することで、種々の短寿命活性種を瞬間的に生成させ、それらによる光吸収を別のレーザーやランプで測定する分光手法である。
開放電圧	Open circuit voltage	太陽電池セル・モジュールの出力端子を開放した時の両端子間の電圧。
拡散反射率	diffuse reflectance	光の反射成分の内、直線的に反射する成分を除いた反射の割合
還元(反応)	Reduction (reaction)	亜鉛還元反応法において、ポリシリコンを製造する工程。
還元脱 P (リン)	reductive dephosphorization	目的物質(ここではシリコン)の方がリンより酸化しやすい場合に、フラックス中にリンを酸化除去することは原理的に困難であるが、還元条件にしてリン化物イオンとして除去することで、目的物質を酸化させずに脱 P すること。高合金の精錬プロセスとして開発された手法。
基準状態	Standard test condition	太陽電池セル・モジュールの特性を測定する際の基準。(セル温度：25℃、分光分布：基準太陽光、放射照度 1000W/m ²)
基準太陽光	Standard sunlight	太陽電池セル・モジュールの出力特性を共通の条件で表現するために放射照度および分光放射照度を規定した仮想的太陽光。
基準太陽電池セル	Reference solar cell	太陽電池セル・モジュールの測定にあたって、測定用光源の放射照度を基準太陽光換算で決定するために使用される、基準セル・モジュールと相対的に同じ分光感度を持った太陽電池セル。
幾何学的集光倍率	geometrical concentration, C_g	集光装置の受光面積と太陽電池面積の比
許容角度	acceptance angle, α ,	設計された太陽入射角での出力を 1 として、入射角がずれていった時に 0.9 まで出力が落ちる角度。
強色増感	Supersensitization	増感色素に別の化合物(強色増感剤)を加えることで感度が向上する現象のこと。
凝固精製	solidification refining	液相から固相を析出する際に、偏析係数の小さい元素は固相中にとりこまれにくく液相に排出され、純度の高い物質が析出する。この特徴を活かして金属やシリコンを精製する手法。シリコンの場合、Fe や Ti などはこの方法で容易に除去できるが、偏析係数の大きい P や B の除去効果は小さい。
禁制帯プロファイル	Bandgap profile	膜厚に対する禁制帯幅の変化
原子層堆積法	Atomic layer deposition	原料ガスとパージ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

用語（日本語）	用語（英語）	説明
固定砥粒方式	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
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
高圧枯渇法	High Pressure Depletion SiH4 method	(独) 産業技術総合と三菱重工で開発された微結晶 Si の製膜方法。従来よりも製膜圧力を高く (数百 Pa) して、かつ電極と基板間隔を狭くして高パワーを投入する。
高温高湿試験	damp heat (DH) test	太陽電池モジュールの信頼性試験の一つ。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。
高周波誘導加熱	high-frequency induction heating	電気伝導性のある銅やカーボンに高周波を印加すると渦電流が発生してそのジュール熱で加熱できる。対象物を短時間で効率良く加熱できる
高分子メディエータ	Polymer mediator	高分子体からなるメディエータ
最大電力	Maximum power	太陽電池セル。モジュールの電流電圧特性曲線上で電流と電圧の積が最大になる点での電力
三塩化珪素	Trichlorosilane	SiHCl ₃ 、粗金属シリコンから生産される。現状、主としてポリシリコン用の原料として用いられる。トリクロロシラン、TCS も同意。
散乱角	Scattering angle	入射光と散乱光との進行方向の差を表す角度。
酸リーチング	acid leaching	酸を用いて、不純物が濃化した目的物質の結晶粒界（結晶間にある別の相）を溶解して不純物を除去する手法。
四塩化珪素	Silicon Tetrachloride	SiCl ₄ 粗金属シリコンから生産される。現状、主として光ファイバー用の原料として用いられる。4CS も同意。
四重極型質量分析計	quadrupol mass spectrometer	4 本の円柱状電極からなり、これに正弦波をかけることによって、特定の質量数/電荷のイオンのみを通過できるようにできる。これをスキャンすることによって、採取ガス中のガス種を質量数を調べることができる。Q マス (QMS) またはマスフィルタとも呼ばれる。
集光効率	optical efficiency, η	集光装置の受光面に入った太陽光の内、太陽電池まで届いた光の割合
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)
焼成	sintering	固体粉末の集合体が、融点よりも低い温度で加熱することにより、密度の高い結合体になる現象のこと。
色素増感太陽電池	Dye sensitized solar cell	多孔質酸化チタン (TiO ₂) 膜に増感色素が吸着した光電極、ヨウ素を含む電解液、対極から構成される太陽電池であり、増感色素の光吸収励起から開始される電気化学的反応によって発電する。
触媒分解気相成膜法	Cat-CVD	加熱触媒体にて原料ガスを分解し、気相成膜を行う手法。
真空精製	vacuum refining	金属を真空下で熔融することにより、蒸気圧の高い不純物元素を表面から蒸発除去し精製する手法。
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。
据付システム	Installation System	モジュールを屋根等に取り付けるシステムを指す。
正孔輸送層	Hole transport layer	有機エレクトロルミネッセンス 参照
精製/精錬	refining	鉱石や鉱物から熱や化学的エネルギーを利用して目的の粗金属を取り出すこと。太陽電池においては、シリカから本テーマの対象不純物であるホウ素及びリンを除去すること。
赤外分光	infrared spectroscopy	分子構造を赤外域の吸収スペクトルから観測する方法。
接合界面	Interface of junction	同種あるいは異種材料の境界面
粗 SiCl ₄	Crude SiCl ₄	塩化反応で生成した、四塩化珪素

用語（日本語）	用語（英語）	説明
粗金属シリコン	Metallic silicon	珪石をアーク炉を用いて還元して生成した珪素。純度として 95-98%程度のものを用いる。
造粒	Pelletization	直接塩化反応において、反応性お呼び歩留まりを高めるために、原料となるシリカと炭材を混練して適当な粒径に成形すること。
種結晶	seed crystal	結晶の情報を成長結晶に伝えるもとなる結晶
多孔質集電極	Porous electrode	nm～サブ μ m オーダーの導電性粒子から構成した多数の空隙を持つ電極
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
太陽光発電	Photovoltaic (PV)	太陽光のエネルギーを直接電気エネルギーに変換する発電方式。光電効果を利用した太陽電池を用いるのが一般的である。
太陽電池セル	Photovoltaic cell (Solar cell)	太陽光発電に用いる太陽電池の構成要素最小単位。
太陽電池モジュール	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。
脱 B (ボロン)	boron removal	目的物質から不純物であるボロンを除去すること。ボロンの除去を必要とするシリコンの精製で用いられる用語。
脱 P (リン)	dephosphorization	目的物質から不純物であるリンを除去すること。鉄鋼精錬では重要なプロセスの一つで、フラックス中にリン酸塩として酸化除去される。
炭化珪素	silicon carbide	珪素と炭素の 1:1 の化合物で、化学式：SiC で表される無機化合物。耐熱性、耐摩耗性、硬度、強度に優れることから研磨材や構造部材、耐熱材料として広く普及してきた。また、最近では、電気特性がシリコンよりも優れることから、次世代のパワー半導体の材料として注目されている。
炭材	Carbon Material	シリカの塩化反応に使用する還元剤としての炭素成分を主成分とする材料。本試験では石油系コークスを用いた。
短絡電流	Short circuit current	太陽電池セル・モジュールの出力端子を短絡した時の両端子間に流れる電流。
窒化珪素	silicon nitride	ケイ素の窒化物で、化学式：Si ₃ N ₄ で表される無機化合物。非酸化セラミックスの代表的な物質。Si-N の結合は共有結合であるため、高温高強度、耐摩耗性、耐薬品性及び耐熱衝撃性等の機械的特性に優れることから、エンジニアリングセラミックスに幅広く利用されている。
直接塩化反応	Chlorination	シリカを原料として塩素を直接反応させ、直接四塩化珪素を生成させる反応。還元剤として炭材を使用する。
直列接続	series-connection	複数の太陽電池を電氣的に直列につなぐこと
定在波	standing wave	進行方向が互いに逆向きの 2 つの波が重なりあうことによってできるその場に止まって振動しているように見える波動のこと。
転位	dislocation	線状欠陥／結晶の塑性変形を担う
伝導帯オフセット	Conduction band offset	異種半導体を接合した時の伝導帯底のエネルギー差
電解（反応）	Electrolysis (reaction)	亜鉛還元反応法において、副生する塩化亜鉛を電気分解する工程
電解液	electrolyte	電気化学的活物質を含む液体であり、不揮発性・不燃性などを極力抑え、他の部材との相性の良い材料を開発する必要がある。本プロジェクトの主題、三層界面のうちの一つを構成するものである。
電子輸送層	Electron transport layer	有機エレクトロルミネッセンス 参照
透明導電膜	Transparent conductive layer	透光性（透過率：%T）と導電性（シート抵抗： Ω/\square ）とを兼ね備えた膜
同軸-導波管変換器	Coaxial-to-waveguide mode converter (Coaxial-to-waveguide transducer)	電磁波の伝播モードをケーブル等を伝播する同軸モードから方形導波管を伝播する導波管モードに変換する変換器。

用語（日本語）	用語（英語）	説明
導波管	Waveguide	電磁波の伝送に用いられる方形や円形の断面を持った金属製の管。電磁波は、導波管の断面形状や寸法、電磁波の波長（周波数）に応じた電磁界分布（伝播モード）を形成しながら管の中を伝播する。
熱力学計算	thermodynamic calculation	ギブスエネルギーを計算することによって、反応式において左右どちらの向きに進行するかを知ることができる。
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。結晶系に比べて水蒸気浸入に弱いとされている。
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
微結晶シリコン	microcrystalline silicon	シリコンを主成分とし、非常に狭い領域内でのみ原子配列が結晶性を示す固体半導体。アモルファスシリコンより狭いバンドギャップを持つ。
不純物	impurity	結晶中に混入している微量元素
浮遊キャスト法	Floating cast method	太陽電池用高品質シリコンインゴットの製造技術として研究開発を進めている手法。ルツボ内の融液を表面から凝固させ、ルツボと強く接触しないように（理想的には融液に浮遊させて）インゴットを成長させる。結晶組織、欠陥、不純物、歪みが制御された高品質な結晶の成長が期待される。
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もつ樹脂材料。
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。 なお、単位はA/Wまたは相対値（相対分光感度）で表す。
分光放射照度	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。
平滑電極	Flat electrode	スパッタ製膜した $R_a < 3\text{nm}$ の平滑性をもった膜からなる電極
偏析係数	segregation coefficient	物質の固相と液相が平衡している状態で、微量に含まれる元素の固相中での濃度に対する液相中での濃度の比。シリコン中での多くの不純物についてはこの値が非常に小さいため、凝固時に不純物が除去されやすい。
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。
放射照度・日射強度	Irradiance	表面の単位面積あたりに太陽光または人工光源から単位時間に入射する放射エネルギー。
放電プラズマ焼結	spark plasma sintering	ホットプレス焼結（HP）などと同じ、固体圧縮焼結法の一種であり、特殊なON-OFF直流パルス電圧・電流を焼結型+材料に直接印加して焼結させる。加圧ならびに急速昇温により、粒成長を抑制した緻密な焼結体の作製が可能である。
有機エレクトロルミネッセンス（有機EL）	Organic electroluminescence	有機化合物から成る発光ダイオードで、有機化合物中に注入された電子と正孔の再結合によって生じた励起子によって発光する。発光現象およびその現象を利用した一連の製品を指す。素子の構成は、陽極/正孔輸送層/発光層/電子輸送層/陰極となっており、有機薄膜太陽電池と類似である。違いは、有機ELが通電し光を取り出すのに対し、有機薄膜太陽電池は光を当て電気を取り出しており、逆の機能となっている。
有機系太陽電池	organic solar cell	有機半導体でpn接合を形成する太陽電池。最近では効率も10%を超え、早期の実用化が期待されているが、水蒸気浸入に弱いとの欠点もある。

用語（日本語）	用語（英語）	説明
有機色素	organic dye	色素分子を構成する元素が主に炭素からなり、かつ金属元素を含まない色素
遊離砥粒方式	SiC loose abrasive method	SiC 遊離砥粒によるスライス方式
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。
硫化度	Sulfurization degree	硫化プロセスにおける温度、時間、ガス濃度からなる指標で、値が大きくなるほど「強い」硫化となる
粒界	Grain boundary	面欠陥／多結晶における結晶粒同士の境界面

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与することの意義

世界的にこれまでにないほど、環境に対する意識が高まっている。そうした中で、2009年4月の麻生総理のスピーチ「新たな成長に向けて」においては、太陽電池の導入量を2020年までに20倍、2030年までに40倍とする目標が示されるなど、太陽電池に対する期待が高まっている。

一方で、日本は太陽光発電システムの導入量・生産量において長らく世界一を誇っていたが、欧州を中心に行われている導入普及政策により、市場の中心は欧州へ移り、生産量においても中国・台湾等の新興メーカーの台頭が顕著で日本の地位は相対的に低下している。

政策面における太陽光発電の普及拡大の要請と、同産業分野の近年の競争力低下に鑑み、太陽光発電の性能の飛躍的な向上と大幅な低コスト化を狙った研究開発が求められている。それにより、住宅や商用施設等での導入促進や、未利用地等での大規模発電等、太陽光発電の適用可能域を大幅に拡大し、さらに海外の砂漠など全地球的な視点での太陽光発電の利用も可能とするなど、グローバルな展開も期待される。

しかしながら、太陽光発電技術を飛躍的に向上させるためには、従来技術の延長線上にない研究開発における新たな取り組みが必要不可欠である。世界的に熾烈な開発競争を展開している中で、より広い知見を結集しかつ、それぞれが得意とする専門技術を総合することで研究開発の高度化とスピードアップを狙ったコンソーシアム形式も採用する。

世界レベルの厳しい競争に勝ち残れる太陽電池の開発は、従来技術の延長線上にない研究開発における新たな取り組みや世界最先端の材料技術等の統合が必須であり、企業などが自主的に実施することは困難で、高度な専門技術を有する多様な企業、大学、研究機関の参画を得てNEDO事業として行う意義は大きい。

1.2 実施の効果(費用対効果)

ロードマップPV2030+では2020年の目標として、発電コスト14円/kWh、モジュールコスト75円/Wが設定されている。これら実現するために「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」においては、太陽光発電システムの上流である製造原料から下流である施工方法まで、幅広い分野において技術開発を行っている。また太陽光発電システムの価格と発電コストの内訳を考慮した上で、研究開発テーマを設定している。すなわちセル・モジュールの高効率化・低コスト化だけでなく、施工方法も含めた技術開発を行っている。太陽光発電システムが大量に導入された際に不可欠となる発電量予測技術の開発も行っている。このため当該事業を遂行することで、モジュールコストの低減だけでなく、太陽光発電システムの、2020年の導入量、発電コストの目標達成に貢献できると考えられる。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

2006年3月に閣議決定された「第3期科学技術基本計画」において、太陽光発電が戦略重点科学技術の一つとして選定された。

また、2007年4月資源エネルギー庁公表の「エネルギー技術戦略（技術戦略マップ2007）」においては、新エネルギーの開発・導入促進に寄与する技術の中でも特に政策目標への寄与が大きいと思われる技術に位置付けられている。

2009年4月9日の麻生内閣総理大臣スピーチ（新たな成長に向けて）では、「太陽電池の導入量を2020年までに20倍、2030年までに40倍とする目標」が示され、同年12月に閣議決定された新成長戦略（基本方針）～輝きのある日本へ～では、「グリーン・イノベーションによる成長とそれを支える資源確保の推進」において、電力の固定価格買取制度の拡充等による再生可能エネルギー（太陽光、風力、小水力、バイオマス、地熱等）の普及拡大支援策や、低炭素投融资の促進、情報通信技術の活用等を通じて日本の経済社会を低炭素型に革新する事が示されている。

さらに、2010年6月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、自立した環境適合的なエネルギー需給構造を実現するため、太陽光発電をはじめとする新エネルギーの着実な導入拡大を図ることが挙げられている。「基本的視点と目標」として、第1章と第2章では下記が述べられている。

- ・エネルギーの安定供給確保（energy security）、環境への適合（environment）、市場機能（economic efficiency）の3Eの実現を図ることである。
- ・2030年に向け中長期的な視点で、エネルギー自給率を大幅向上（約18%→約4割）、エネルギー起源のCO₂の30%削減を目指す。
- ・エネルギー製品等の国際市場で、我が国企業群がトップクラスのシェアを獲得する。

加えて、第3章第2節1.再生可能エネルギーの導入拡大、に記されている「目標実現のための取組」では、太陽光発電は今後、大幅な発電コストの低下が期待され、住宅・非住宅とも潜在的な導入量が大きく、産業の裾野が広い。一方、現状では発電コストが他の発電方式に比べて高いという課題がある、とされている。

本事業は、2020年の導入量、発電コストの目標達成に貢献できる研究開発テーマに取り組んでおり、本事業で研究開発を行う高性能で低コストな太陽電池開発は、NEDOが2009年6月に「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ（PV2030）」を改訂した「太陽光発電ロードマップ（PV2030+）」においても中心的な研究開発課題として位置づけられている。また、共通部材、共通基盤技術の開発は高性能で低コストな太陽電池の開発及び太陽電池の普及拡大に寄与するもので、上記の各政策及び「太陽光発電ロードマップ（PV2030+）」の目標達成に資する。

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

NEDOは、太陽光発電の更なる普及拡大を目指し、太陽光発電ロードマップ PV2030+を作成し、そこに掲げた技術課題の解決に向け、太陽光発電の技術開発を推進している。

他方、近年の世界の太陽光発電市場の急拡大に伴い、太陽光発電に関する技術開発の取り組みについてもまさに世界規模で熾烈な開発競争が繰り広げられている。我が国は太陽電池の生産量・導入量において長らく世界一を誇っていたが、欧州を中心に進められている導入普及政策により、市場の中心は欧州に移り、生産量においても中国・台湾等の新興企業の台頭が著しく、日本の地位は相対的に低下している。

このような背景を踏まえ、本研究開発は太陽電池の導入量を2020年に現状の20倍に増加させることに寄与し、現下の世界競争に打ち勝っていくための競争力を高めるため、結晶シリコン、薄膜シリコン、CIS・化合物系、色素増感型、有機薄膜型といった太陽電池の更なる高効率化・低コスト化に加え、発電量・信頼性等を評価する技術、太陽電池に係る新たな部材の開発等に取り組むことを目的とする。

(2) 研究開発の目標

太陽光発電ロードマップ（PV2030+）に記載の発電コスト目標：14円/kWh（2020年）、モジュール製造コスト目標：75円/W、モジュール変換効率目標：20%（2015～2020年時点）の実現に資する各種太陽電池の高効率化、低コスト化に係る技術を確立することを目標とする。

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

上記目標を達成するため、下記開発分野について研究開発を実施する。

- (イ) 結晶シリコン太陽電池
- (ロ) 薄膜シリコン太陽電池
- (ハ) C I S・化合物系太陽電池
- (ニ) 色素増感太陽電池
- (ホ) 有機薄膜太陽電池
- (ヘ) 共通基盤技術

2.1.2 研究開発テーマ

平成22年度には、公募から選定された19テーマの研究開発を開始した。

研究開発テーマごとの平成24年度までの開発スケジュールを表1に示す。採択にあたっては、下記の考え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。

なお、平成25年度以降のスケジュールについては中間評価の結果を踏まえ決定する。

- (1) 提案内容が仕様書の目的、目標に合致しているか（不必要な部分はないか）
- (2) 提案された方法に新規性があり、技術的に優れているか
- (3) 共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるか
- (4) 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）
- (5) 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）。
- (6) 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、成果の実用化が見込まれるか）
- (7) 総合評価

なお研究開発は、①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、または②試験・評価方法、基準・プラットフォームの提案等、「公共財の研究開発」事業は、原則、委託事業として実施する。ただし①については、民間企業単独、民間企業のみでの連携、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。

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2に示す。

表2. 研究開発予算（実績）の推移（単位：百万円）

分野	年度	H22	H23	H24	H25	H26	総額
結晶シリコン太陽電池		10.3	15.4	11.3			
薄膜シリコン太陽電池		8.3	13.4	6.6			
C I S・化合物系太陽電池		4.1	8.9	6.6			
色素増感太陽電池		4.7	4.0	3.1			
有機薄膜太陽電池		6.6	8.6	5.0			
共通基盤技術		9.2	12.4	11.6			
計 特別会計(需給勘定)		43.2	62.7	44.2			

2.1.4 研究開発計画

(イ) 結晶シリコン太陽電池

1. 研究開発の必要性

結晶シリコン太陽電池は変換効率の高さの点で、今後も太陽電池の普及において中心的役割を果たすことが期待されており、普及拡大のためにはコスト低減と高効率化を同時に実現することが必須である。

結晶シリコン太陽電池は、従来厚さ $200\mu\text{m}$ 程度の結晶シリコン基板を用いており、シリコン材料のコストが太陽電池全体のコストに占める割合が大きく、低コスト化を阻害している。また、近年の結晶シリコン太陽電池の生産規模の急激な拡大はシリコン原料の需給逼迫を招き、今後の結晶シリコン太陽電池の普及拡大を制約することが懸念されている。また、シリコン基板の超薄型化に伴う効率低下させずに、モジュール変換効率 20% の水準を目指すことが重要である。

これら課題を解決するため、低コストシリコン原料の製造技術、 $100\mu\text{m}$ 程度の超薄型シリコン基板スライス技術、 $100\mu\text{m}$ 程度の超薄型セル高効率化技術の開発が重要である。

2. 研究開発の具体的内容

結晶シリコン太陽電池において、コスト低減と変換効率の向上を図るため、以下の研究開発を実施する。

i) コスト低減

- ・ソーラーグレードの原料シリコンを安価に製造する技術、結晶シリコンを安価に製造する結晶成長技術等を開発する。
- ・厚さ $100\mu\text{m}$ 程度のセルに対して反り、割れ等が生じない電極形成工程、スライス技術の最適化、スライス後の洗浄処理が不要、カーフの回収・再利用が可能等の新技術等を開発する。

ii) 高効率化

- i) モジュール変換効率向上に資する太陽電池形成プロセス（光及びキャリア閉じ込め、接合形成、パッシベーション等）の手法・条件の抜本的な見直しと、ヘテロ接合等新規構造・新規手法を開発する。
- ii) 高品位な結晶シリコンを製造する結晶成長技術を開発する。

3. 達成目標

i) コスト低減

- ・結晶シリコンを安価に製造する技術を開発し、シリコン製造コスト等を試算する。達成目標（中間目標を含む）は設定した製造規模でのシリコン製造コストで表し、その値は各研究テーマ毎に設定し実施計画書に記載する。
- ・カーフロス $120\mu\text{m}$ 未満、又はカーフを生じない新たな製法等を確立する。

ii) 高効率化

i) モジュール

<中間目標>

- ・厚さ $100\mu\text{m}$ 程度、 15cm 角程度のセルにおいて変換効率 20% 以上、モジュールでの変換効率 18% 以上を達成する。

<最終目標>

- ・厚さ $100\mu\text{m}$ 程度、 15cm 角のセルにおいて、変換効率 25% 以上、モジュールの変換効率 20% 以上を達成する。

ii) 高品位シリコン製造技術

15cm 角程度のセルにおいて、以下の目標値を達成する。

<中間目標>

- ・キャリア寿命：100 μ sec（拡散長 約1mm）以上
- ・シリコン純度：6N以上

<最終目標>

- ・キャリア寿命：400 μ sec（拡散長 約2mm）以上
- ・シリコン純度：7N以上

(ロ) 薄膜シリコン太陽電池

1. 研究開発の必要性

厚さ数 μ mのシリコン系薄膜により構成される薄膜シリコン太陽電池は、現在市場の主流である結晶シリコン太陽電池に比較して発電コストの大幅な低減が見込まれ、ロードマップの目標コストを達成し得る有望技術の一つとして期待されている。また、軽量基板上への太陽電池形成が可能であることから、多用途化にも適している。しかしながら、モジュール変換効率14%の水準を実現するためには、より一層の改善が必要であり、また、更なる低コスト化のためには、製造プロセス及び生産性改善等による製造コストの低減等が必要である。本研究開発は、以上の背景に基づき、薄膜シリコン太陽電池の変換効率向上及び製造コスト低減を目指して実施する。

2. 研究開発の具体的内容

モジュール高効率化及び生産性向上を図るため、以下の研究開発を実施する。

i) 高効率化

光マネジメントとして入射光の反射・屈折の制御等による光閉じ込め技術の高度化、高品質（低欠陥密度、低抵抗、高透明度）な透明導電膜の開発等を行う。

多接合化として光劣化抑制技術、界面へのバッファ層導入や粒界制御による開放電圧向上、欠陥密度の低減と価電子制御技術、バンドギャップ設計と材料高品質化、高効率化のためのパッシベーション技術、各薄膜と透明電極及び裏面金属電極との接合界面並びに各薄膜間の接合界面の高品質化の開発等を行う。

ii) 製造コスト低減

新概念を導入した製膜装置の開発による高速製膜技術の開発、大面積基板（ガラス、フィルム基板等）に高品質な薄膜を高スループットで製膜し得る製膜技術及び製膜装置・プロセスの開発等を行う。

3. 達成目標

i) 高効率化

<中間目標>

- ・30×40cm程度の基板に製膜した2接合以上の多接合薄膜シリコン太陽電池においてモジュール変換効率13%以上（安定化効率）を達成する。

<最終目標>

- ・30×40cm基板に製膜した2接合以上の多接合薄膜シリコン太陽電池においてモジュール変換効率14%以上（安定化効率）を達成する。

ii) 製造コスト低減

<中間目標>

- ・装置の設計・作製と条件出しを完了し、任意サイズの基板において製膜速度1.0nm/sec以上を達成する。

<最終目標>

- ・幅1m以上の基板において製膜速度2.5nm/sec以上、膜厚分布 \pm 5%以下を達成する。

(ハ) C I S・化合物系太陽電池

1. 研究開発の必要性

C I S系薄膜太陽電池は、結晶シリコン太陽電池、薄膜シリコン太陽電池に続いて市場投入された太陽電池であるが、現在C d T e太陽電池等との激しい価格競争の中にあり、高い経済性が求められている。

C I S系薄膜太陽電池は、結晶シリコン太陽電池に匹敵する高い変換効率を実現できる可能性があり、また、軽量基板上への太陽電池形成が可能であることから多用途化にも適している。更に、最近では、従来と異なる新規なプロセスを開発して低コスト製造を実現しようとする試みが見られるようになってきた。

しかし、現時点では、変換効率は30cm角モジュールで13から16%程度で、この太陽電池に期待されるレベル（結晶シリコン太陽電池並み）に到達しておらず、また、軽量基板上での製造技術や新規な低コスト製造プロセスも実用化までには今一步のところにある。

また、海外では集光型太陽電池で一定規模の市場がすでに形成されており、日本がこの市場に遅れることなく参入するためには、集光型太陽電池システムの低コスト化が早急に必要とされる場所である。

2. 研究開発の具体的内容

C I S系薄膜太陽電池では、実用化規模の大面積及び材料のポテンシャルを引き出すために小面積モジュールでそれぞれ高効率化を図る。また、軽量基板上での製造技術や新規な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。

集光型太陽電池では、システム全体としてのコストダウンを目指し、太陽電池セル以外に光学系や追尾架台等の低コスト化開発を実施する。

i) C I S系高効率化

光吸収層の高品質化、接合界面特性の改善、集積化技術、ワイドギャップ材料の高品質化技術（欠陥密度低減等）等の開発を行う。

ii) C I S系製造プロセスの開発

軽量基板を用いた低コスト製造プロセス、従来の製造法と異なるC I S太陽電池の低コスト製造プロセス（非真空プロセス等）等の開発を行う。

iii) 集光型太陽電池の低コスト化開発

III-V族化合物/Siモノリシックタンデム等低コスト集光型太陽電池、低コスト集光系・ミラー・レンズ、低コスト架台・システム等の開発を行う。

3. 達成目標

i) C I S系高効率化

<中間目標>

- ・サブモジュール（30cm角程度）で変換効率17%以上を達成する。
- ・小面積セル（1cm角程度）で変換効率22%以上を達成する。

<最終目標>

- ・サブモジュール（30cm角程度）で変換効率18%以上を達成する。
- ・小面積セル（1cm角程度）で変換効率25%以上を達成する。

ii) C I S系製造プロセスの開発

軽量基板上での製造技術や、新規な低コスト製造プロセス等により製造したサンプルを供試する。達成目標（中間目標を含む）は単位出力当たりの製造コスト等(円/W)で表し、その値は各研究テーマ毎に設定し実施計画書に記載する。

iii) 集光型太陽電池の低コスト化開発

開発した光学系や追尾架台等を用いたモデルシステムを実際に建設し、そのコストを基

にプラント建設コストを算出する。達成目標（中間目標を含む）は例えば単位面積当たりの建設コストで表し、その値は各研究テーマ毎に設定し実施計画書に記載する。

（二）色素増感太陽電池

1. 研究開発の必要性

色素増感太陽電池はコストの点でシリコン材料を用いないので高純度シリコン価格高騰の影響を受けない。また、高真空プロセスを用いず、スクリーン印刷・Roll to Roll等の工程で製造が可能なので低コスト化が期待されている。機能面の点では光入射角度依存性が小さく、発電出力の温度依存性が小さいため、夏季でも発電特性が落ち込まない等の利点がある。

課題は変換効率が低いことであり、現時点で環境試験・耐久性試験で相対効率低下10%以内をクリアしているセルでは変換効率は3%程度である。また、信頼性においても水分の進入等による劣化等の問題がある。

コスト面、性能面での色素増感型太陽電池のメリットを生かし実用化を実現するためには、変換効率及び信頼性の向上が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

高効率化と耐久性向上を図り、以下のモジュール製造プロセスの研究開発を実施する。

i) 高効率化

- ・新規色素（長波長応答色素）、高性能半導体電極、タンデム構造色素太陽電池の開発等を行う。

ii) モジュール化技術開発・耐久性向上

- ・封止構造形成技術、不揮発性電解質の開発、スクリーン印刷・Roll to Roll等のプロセス技術の導入による量産化検討、半導体電極の低温形成技術の開発等を行う。
- ・劣化メカニズムの解明及び耐久性向上のための技術開発を行う。

3. 達成目標

高効率かつ耐久性に優れたモジュールを開発する。モジュールは以下の効率と耐久性を同時に満たすことを目標とする。

i) 高効率化

<中間目標>

- ・セル変換効率（安定化効率） 11%（1cm角程度）以上
- ・モジュール変換効率（安定化効率） 7%（30cm角程度）以上

<最終目標>

- ・セル変換効率（安定化効率） 15%（1cm角程度）以上
- ・モジュール変換効率（安定化効率） 10%（30cm角程度）以上

ii) モジュール化・耐久性向上

<中間目標>

- ・JIS規格C8938の環境試験・耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性試験、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内

<最終目標>

- ・JIS規格C8938の環境試験・耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内

(ホ) 有機薄膜太陽電池

1. 研究開発の必要性

有機薄膜太陽電池はコストの点でシリコン材料を用いないので高純度シリコン価格高騰の影響を受けない。また、高真空プロセスを用いず、スクリーン印刷・Roll to Roll等の工程で製造が可能なので低コスト化が期待されている。機能面の点では光入射角度依存性が小さく、発電出力の温度依存性が小さいため、夏季でも発電特性が落ち込まない等の利点がある。

課題は変換効率が低いことであり、現時点ではセルで6%程度である。また、信頼性においても水分の進入等による劣化等の問題がある。

コスト面、性能面での有機薄膜太陽電池のメリットを生かし、実用化を実現するためには、変換効率と信頼性の向上が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

高効率化と耐久性向上を図り、以下のモジュール製造プロセスの技術開発を実施する。

i) 高効率化

・有機半導体（特にp型）、電子・ホール輸送層等の材料探索、短絡電流向上のための光電変換部分の増大（バルクヘテロ接合）、新デバイス構造構築、積層化に係る技術開発等を行う。

ii) モジュール化技術開発・耐久性向上

・スクリーン印刷・Roll to Roll等のプロセス技術の導入による量産化検討、劣化メカニズムの解明及び耐久性向上のための技術確立等を行う。

3. 達成目標

高効率かつ耐久性に優れたモジュールを開発する。モジュールは以下の効率と耐久性を同時に満たすことを目標とする。

i) 高効率化

<中間目標>

- ・セル変換効率（安定化効率） 8%（1cm角程度）以上
- ・モジュール変換効率（安定化効率） 6%（30cm角程度）以上

<最終目標>

- ・セル変換効率（安定化効率） 12%（1cm角程度）以上
- ・モジュール変換効率（安定化効率） 10%（30cm角程度）以上

ii) モジュール化技術開発・耐久性向上

<中間目標>

・JIS規格C8938の環境試験・耐久性試験（温湿度サイクル試験、耐熱性試験、耐湿性試験、温度サイクル試験、光照射試験）において相対効率低下 10%以内

<最終目標>

・JIS規格C8938の環境試験・耐久性試験（温湿度サイクル試験、耐熱性試験、耐湿性試験、温度サイクル試験、光照射試験）において相対効率低下10%以内

(へ) 共通基盤技術

1. 研究開発の必要性

太陽光発電システムの利用拡大や技術発展のためには、システムを構成するモジュール等の性能、耐久性、安全性、システムとしての発電量算定評価や信頼性評価等の各種評価方法の確立、国際的な規格化・標準化、システムの認証、リサイクル・リユースの技術開発等の産業基盤の整備が必要である。また、各電池に共通した部材の高機能化、長寿命化を図る必要がある。さらに、先進国に対しては諸外国の研究機関との連携、国際エネルギー機関（IEA）への参画等による戦略的な活動は、産業競争力の確保と国際貢献の双方を意識した国の活動として重要である。

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。

- i) 発電量評価技術等の開発
- ii) 信頼性及び寿命評価技術の開発
- iii) リサイクル・リユース技術の開発
- iv) 共通材料・部材・機器及びシステム関連技術開発
- v) 標準化支援事業及びIEA国際協力事業等

i) 発電量評価技術の開発

1) 発電量評価

発電量評価技術として、きめ細かい範囲でのスペクトルを含めた日射量のデータベースを構築し、測定した当日の日射量・気象データから特定地域の翌日の発電量を推定する技術を開発する。

2) 太陽電池の性能評価

太陽電池評価技術として、光照射効果を考慮した実効性性能評価技術を開発する。また、高精度屋外性能評価を開発する。さらに、新材料・新技術に対応した新型太陽電池の評価技術を開発する。

基準太陽電池校正技術の研究開発として、高精度型絶対放射計とその校正技術の開発を行う。また、絶対分光感度法による一次基準セルの校正技術を開発する。さらに、二次基準モジュールの校正精度の向上を図る。

ii) 信頼性及び寿命評価技術の開発

信頼性評価技術として、太陽電池モジュールや太陽光発電システムの屋外曝露試験データを取得・分析評価し、劣化要因を抽出する。また、これと併せてモジュール、封止材等の長寿命化技術の開発及び試作モジュール等も用いた劣化メカニズムを解明し屋内での部材も含めた寿命評価試験方法を開発し、規格化を推進する。

更に、太陽光発電システムの長寿命化等に寄与する可能性がある各電池に共通した高機能材料の寿命試験方法を確立する。

iii) リサイクル・リユース技術の開発

新たな種類の太陽電池や破損・粉砕された太陽電池モジュール等のリサイクル等の関連技術の開発を行う。また、リユース及び補修回収技術の開発並びに安全性等評価を行い、そのための基準を定める。更に、LCA評価として、これまでの評価の見直しとリサイクル等の廃棄処理まで考慮した評価を実施する。

なお、必要に応じ環境関連技術、低コスト化技術、高効率化技術等について問題抽出や課題解決のための方向性検討・調査等を行う。

iv) 共通材料・部材・機器及びシステム関連技術開発

結晶シリコン、薄膜シリコン、C I S・化合物系太陽電池等の各種太陽電池に適用でき、コスト低減（省プロセス化、信頼性向上）、高効率化が見込める共通材料、部材・機器及びシステム関連技術の開発を行う。

v) 標準化支援事業及びI E A国際協力事業等

標準化調査研究において、太陽電池の性能評価及び太陽光発電システムに関する国内外の標準策定に向けた活動を行う。

諸外国の技術開発動向や政策動向等について、I E A活動等から調査・分析し、諸外国の動向等を把握し、技術開発の方向性や分析・評価手法等について検討する。

3. 達成目標

i) 発電量評価技術の開発

1) 発電量評価

- ・スペクトルを含めた日射量のデータベースを構築する。
- ・地域の日射量・気象データから発電量を推定する技術を開発する。

2) 太陽電池の評価技術

- ・実効性性能評価技術：光照射効果（1年以上）を考慮した実効性性能評価技術を確立する。
- ・高精度屋外性能評価の開発：測定再現性2%以内の評価方法を確立する。
- ・各種新型太陽電池評価技術：N E D Oの開発成果も含めて基礎データを収集、分析、評価し、必要に応じ規格化を図りつつ基本的評価手法を確立する。
- ・基準太陽電池校正技術：W R Rファクター 0.5%以内の構成技術を確立する。
- ・絶対分光感度法による一次基準セルの校正技術：校正の不確かさ 0.5%以内の構成技術を確立する。
- ・二次基準モジュールの校正精度：校正の不確かさ 1.0%以内を達成する。

ii) 信頼性及び寿命評価技術の開発

20～30年の屋外曝露に相当する屋内での寿命評価試験方法等について、モジュール及びシステムとして基本的な評価技術を開発し、規格化に向けた技術要件を整理する。

また、工程管理で信頼性確保を判定できる方法を確立し、簡易に寿命を判定できる方法を確立する。

さらに、モジュールやシステムの屋外曝露試験を行い、電気的物理的な劣化状況に関するデータを収集、分析、評価等を行うとともに、システムも含めた劣化要因について抽出する。

iii) リサイクル・リユース技術の開発

新たな種類の太陽電池にも対応したリサイクル関連技術を確立する。

また、リユース及び補修回収技術の開発並びに安全性等の評価を行い、そのための基準を定める。

さらに、L C A評価の見直しを行い、新型太陽電池の廃棄を含めたL C A評価を完了する。

iv) 共通材料・部材・機器及びシステム関連技術開発

具体的な開発目標及び実施内容は、採択テーマごとにN E D Oと実施者との間で協議の上個別に設定することとする。

v) I E A国際協力事業及び標準化支援事業等

- ・I E C・J I Sに係る標準化活動を行う。
- ・諸外国の技術動向や政策動向等を調査・分析し、諸外国の動向を把握した上で、技術開発の方向性や、分析・評価手法の開発方針等を明確にする。

2.1.5 研究開発内容

研究開発テーマ、開発目標、研究内容は以下のとおり。

表.3 (イ) 結晶シリコン太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	中間目標	その他
① 極限シリコン結晶太陽電池の研究開発 (コンソーシアム)						
1	H22 ～ H26	産業開発プラットフォームの構築 (太陽電池試作ライン)	豊田工業大学	結晶シリコン太陽電池について原料の製造から太陽電池セルまで一貫した研究開発テーマを遂行することで、低コストで高効率な世界最高レベルの競争力を有する結晶シリコン太陽電池の実現を目指す。	<ul style="list-style-type: none"> 試作ラインの構築 ラインの維持・改善 	
2	H22 ～ H26	ソーラーグレード原料シリコンの分析評価に係る研究開発	新日本ソーラーシリコン	<p>①シリコン原料性状特定評価技術</p> <p>ポリシリコン製造プロセスおよびそこで得られる中間原料の特性評価</p> <p>②シリコン原料評価の要素技術</p> <p>ポリシリコン製造プロセスのシリコン原料とシリコン原料を塩化することにより得られるクロロシランについて必要な化学分析を行う。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 原料性状分析に必要な装置の選定と導入 原料分析技術の確立 原料性状特定に必要な試料の収集と分析 亜鉛還元 Si 試料提供適合原料特定原料性状特定 	
3	H22 ～ H26	浮遊キャスト成長法による高品質 Si 多結晶インゴットの結晶成長技術	京都大学	<ul style="list-style-type: none"> 浮遊キャスト成長法によるインゴットの高品質化のための成長技術の基礎検討 浮遊キャスト成長法によるインゴットの高品質化のための成長技術の基礎検討 太陽電池による結晶品質の評価および高効率化の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 大型インゴット成長が可能であることを実証 従来のキャスト法に比較して結晶品質に優れるメカニズムを明確にする 100 mm 角の結晶で 200 μm 程度の拡散長を実現 キャスト成長法による結晶を上回る変換効率 	
4	H22 ～ H26	浮遊キャスト成長法による高品質 Si 多結晶インゴットの結晶成長技術	東北大学	<ul style="list-style-type: none"> 浮遊キャスト成長法により作製した結晶の評価と高品質化メカニズムの解明 結晶組織や結晶欠陥、電気的特性の分布の評価を行う。 太陽電池による結晶品質の評価および高効率化の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 残留融液の分離技術を開発し、浮遊キャスト成長法にて大型インゴット成長が可能であることを実証する。 融液上部での核形成による組織形成メカニズムを解明し、その制御技術を開発する。 浮遊キャスト成長法が従来のキャスト法に比較して結晶品質 (結晶組織、結晶欠陥、不純物など) の点で優れるメカニズムを明確にする。 10cm 角の結晶で 200・m 程度の拡散長を実現する。 	

5	H22 ～ H24	高効率、低価格EMC多結晶ソーラーシリコン製造技術確立	SUMCO	<p>①既存 n タイプ多結晶の品質確認と課題抽出 既存 n タイプ多結晶の品質(金属不純物濃度、抵抗率、酸素濃度、炭素濃度)とライフタイム、変換効率との関係を調べる。品質評価、ライフタイム評価は社内評価で行い、変換効率は外注で実施する。</p> <p>②鑄造テスト・評価(抵抗率の最適化) p タイプ多結晶の変換効率を上回るレベルの結晶品質を作りこむ。(抵抗率の適正化)</p> <p>③ ボロン拡散の最適化 変換効率向上策としてボロン拡散の最適条件を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 平成 24 年度中間目標 ライフタイムの値(リン拡散後)を $200 \mu \text{ sec}$ 平成 26 年度最終目標 ライフタイムの値(リン拡散後)を $400 \mu \text{ sec}$
6	H22 ～ H26	革新的太陽電池用単結晶成長法の研究開発	九州大学	<p>① 高効率単結晶育成炉の温度分布解析シミュレータ構築 結晶育成炉の設計が可能な温度分布解析シミュレータ構築の構築を行う。</p> <p>② 高効率単結晶育成炉の不純物除去解析シミュレータ構築 ガス整流装置の最適化を、不純物除去解析シミュレータにより最適化し、実験により実証する。</p> <p>③ 高効率単結晶育成炉の転位除去解析シミュレータ構築 結晶の冷却過程の最適化アルゴリズムを構築し転位密度が $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 以下の結晶育成を実証する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 高効率単結晶育成炉の温度分布解析シミュレータ構築 高効率単結晶成長炉の不純物除去解析シミュレータ構築 高効率単結晶育成炉の低転位化および低残留応力化が可能な解析シミュレータ構築
7	H22 ～ H26	太陽電池用低価格単結晶シリコン成長法の研究開発	物質・材料研究機構	<p>太陽電池用低価格単結晶シリコン成長法の研究開発 単種結晶を用いた鑄造単結晶シリコン製造法(seed cast法)と次世代太陽電池用矩形単結晶 Si 製造法を開発し、安価かつ高品質な単結晶育成技術を確立させる。</p>	<ul style="list-style-type: none"> MonoSi 結晶中の軽元素析出物の評価 多結晶 Si 結晶中の粒界の評価
8	H22 ～ H26	太陽電池向け $100 \mu \text{ m}$ ウェーハの効率的加工技術の構築	コマツNTC	<p>太陽電池向け $100 \mu \text{ m}$ ウェーハの効率的加工技術の構築</p> <p>①薄板ウェーハの高歩留まり生産技術の確立</p> <p>②カーフロス量の最少化に向けた細線ワイヤが使用できる生産設備の確立</p>	<ul style="list-style-type: none"> $120 \mu \text{ m}$ ウェーハを歩留り 95% 以上で加工可能なこと カーフロス $120 \mu \text{ m}$ で加工可能なこと(固定砥粒ワイヤを使用)

9	H22 ～ H26	スライス時のカーフの回収・再利用	兵庫県立大学	スライス時のカーフの回収・再利用 ①カーフ／不純物の分離技術の開発 ②原料再生技術の開発	・カーフ／不純物の分離技術の開発：回分式でシリコン回収率 60%以上、純度 80%以上 ・原料再生技術の開発 原料中の酸素含有量 70ppma 以下	
10	H22 ～ H26	銅ペーストの研究開発	産業技術総合研究所	①実験設備の設置 結晶 Si 太陽電池に形成する銅配線の抵抗率の精密評価、および Si 基板と銅配線の接触抵抗の評価を行う。そのための、微小抵抗計測システムを構築する。 ②ペースト調整 結晶 Si 太陽電池に印刷で微細銅配線を形成するための印刷用銅ペーストの開発を行う。 ③印刷試験 結晶 Si 太陽電池に印刷により微細銅配線を形成する技術の開発を行う。印刷法としては、特にスクリーン印刷での配線・電極パターンの形成を検討する。 ④印刷細線電気特性解析 結晶 Si 太陽電池に印刷により形成した微細銅配線の電気特性を解析する。	・コンタクト抵抗 R_c : $< 1 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2$ 、ライン抵抗 R_s : $< 2 \times 10^{-4} \Omega \text{ c}$	
11	H22 ～ H26	室温レーザードーピングプロセスの研究開発	奈良先端科学技術大学院大学	室温レーザードーピング技術の開発 ①ドーピング濃度ならびに深さ制御技術の開発 ③局所領域へのドーピング技術の開発	・ドーピング濃度ならびに深さ制御技術の開発 適切な波長のレーザービームを選択し、照射強度をレーザーパワーならびに形状や基板走査速度を変えて制御し高濃度ドーピングを目指す。最終的に高品位電子物性を有するドーピング層ならびに接合界面を実現する。 ・局所領域へのドーピング技術の開発 極細レーザービームの走査により、局所領域へのドーピングを実施する。ビーム走査の高精度制御技術を確認し任意形状のドーピングパターンにおける不純物導入を目指す。	
12	H22 ～ H26	ナノ表面・界面制御による超薄型シリコン・ヘテロ接合太陽電池	東京工業大学	ヘテロ技術の研究開発 ①ナノ界面制御によるアモルファス酸化アルミニウムパッシベーション膜の技術開発 ②超薄型シリコンヘテロ接合太陽電池の開発	・ナノ表面・界面制御による超薄型シリコン・ヘテロ接合太陽電池の高効率化に関する研究開発) ・厚さ 150-200・nm のセルで 1 cm^2 において変換効率 20%以上を達成する。	

13	H22 ～ H26	次世代ヘテロ接合シリコン結晶太陽電池の接合評価	岐阜大学	次世代ヘテロ接合シリコン結晶太陽電池の接合評価 ①結晶 Si 太陽電池用の光起電力顕微鏡の開発 a. 光起電力顕微鏡用基礎技術の開発 b. 結晶 Si 太陽電池用の光起電力顕微鏡装置の開発 開発項目②ヘテロ接合単結晶 Si 太陽電池の作製と光起電力顕微鏡によるヘテロ接合特性の評価	・結晶 Si 太陽電池用の光起電力顕微鏡の開発 ・HIT 型単結晶 Si 太陽電池ヘテロ接合特性の評価 ・HIT 型ヘテロ接合多結晶 Si 太陽電池ヘテロ接合特性の評価	
14	H22 ～ H26	次世代超薄型結晶シリコン太陽電池の低コスト・高効率化プロセス開発	シャープ	次世代超薄型高効率単結晶シリコン太陽電池の開発 微細レーザー加工技術による高効率化研究開発 ①バックコンタクト（裏面電極型）セル構造開発 ②光閉じ込め技術開発 ③表面パッシベーション技術開発 ④高品位 p n 接合形成技術開発 超薄型多結晶シリコン太陽電池の低コスト・高効率化プロセス開発 超薄型多結晶シリコン太陽電池の低コスト・高効率化プロセス開発 ⑤低コスト裏面パッシベーション構造形成技術開発 ⑥基板の評価	セル変換効率 20%（単結晶シリコン基板：厚さ 100 μ m 以下、サイズ 150mm 角） モジュールでの変換効率 18%	
15	H22 ～ H26	微細レーザー加工技術による高効率化研究開発	三菱電機	微細レーザー加工技術による高効率化研究開発 ① 効率セル製造プロセス技術 ② 微細レーザー加工技術 ③ 評価	厚さ 100 μ m 程度 15 c m 角程度のセルにおいて変換効率 20%	
16	H22 ～ H26	次世代超薄型高効率結晶シリコン太陽電池	京セラ	次世代超薄型高効率結晶シリコン太陽電池 高効率・低コストセルの研究開発 ①高効率化技術開発 ②原料・結晶の研究開発で得られた基板のセル化評価	・セル変換効率 20% ・モジュール変換効率 18% 従来結晶シリコン基板との比較評価	
17	H22 ～ H26	産業開発プラットフォームの構築（物性評価）	明治大学	産業開発プラットフォームの構築 ① セルプロセス評価 ② 原料・結晶の評価 ③ 低コスト単結晶の評価	変換効率の面内分布評価を可能とすることで、プロセスによる変換効率劣化要因の抽出技術を開発 変換効率 20%達成のための要素技術開発の支援 低コスト単結晶に特化した結晶評価技術の確立 目標転位密度 $1 \times 10^3 \text{ m}^{-2}$ 以下	

①太陽電池用シリコンの革新的プロセス研究開発（コンソーシアム）						
18	H22 ～ H26	高純度原料 の開発	太平洋 セメン ト	高純度原料の開発 ① シリカ原料の調合技術の 開発 ② シリカの高純度化技術の 開発 ③ カーボン原料の高純度化 検討 ④ コスト低減の検討（薬剤 費、処理条件の最適化） ⑤ カーボンの低コスト化検 討 ⑥ 粉砕・混合方法および装 置の調査・検討 ⑦ カーボンの粉砕方法の検 討	・ 700円/kg-SOG-Si の 原料費の目処付け	
19	H22 ～ H26	シリカの直 接還元プロ セスの開発	弘前大 学	シリカの直接還元プロセスの 開発 ・ 微粒炭素（カーボン）とシ リカ(SiO ₂)の粉体混合素材の 高温下での直接還元プロセス を研究開発し、新しい太陽電 池用 Si 素材の高純度化、低 コストかつ量産化プロセスの 基礎技術を開発する。 ・ 高純度 Si 製造プロセスを 開発する。	・ 700円/kg-SOG-Si の 原料費の技術の目処付け	
20	H22 ～ H26	Si 精製プ ロセスの開 発	東京大 学	Si 精製プロセスの開発 テーマで得られたシリコンを 太陽電池級に精製するプロセ スを確立する。	・ 600円/kg-SOG-Si の 精製技術の目処付け	
②単独案件						
21	H22 ～ H26	マルチワイ ヤーソーに よるシリコ ンウエハ切 断技術の研 究開発	コベル コ科研	マルチワイヤーソーによるシ リコンウエハ切断技術の研究 開発 ①0.13 および 0.12mm素線 径 R ワイヤによる切断の切断性 の改善および評価 ②0.1mm径素線の検討 ③マルチワイヤーソーの導入 ④0.1mm素線径 R ワイヤに よる切断実験 ⑤切断メカニズムの解析と砥 粒挙動の数値シミュレーション ⑥ライフタイムによるダメ ージ層の評価 ⑦周辺技術の検討	・カーブロス 120μm未満 ・ダメージ層 5μm以下 ・表面粗さ 0.5μm以下 ・ウエハ厚さ 130μm ・切断速度 0.3 mm/min 以 上 ・洗浄の簡便化 ・エッチング時間の短縮 あるいは省略に目処 ・125角 x0.2mm 単結晶ウ エハを試作してセル評価 を実施	
22	H22 ～ H26	太陽電池用 ポリシリコ ンのシリコ ン原料転換 の研究開発	新日本 ソーラ ーシリ コン	太陽電池用ポリシリコンのシ リコン原料転換の研究開発 シリコン原料転換の技術開発 ①原料の調査・評価 ②高効率反応技術の開発 ③粗 SiCl ₄ の蒸溜・品質評 価 シリカ塩化反応技術の開発 ① 塩化反応基礎試験（ラボ試 験） ②原料前処理技術の開発 ③塩化反応技術の開発	・シリカ塩化の生産性 0.7トン-SiCl ₄ /m ² /h以上 ・四塩化珪素の品質 純度 6N以上 ・シリコン単結晶の品質 10Ω・cm以上	

表.4 (ロ) 薄膜シリコン太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	中間目標	その他
1	H22 ～ H26	次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による研究開発（コンソーシアム）	太陽光発電技術研究組合	<p>①多接合薄膜シリコン太陽電池高効率化要素技術開発 a-Si と μc-Si の組み合わせを基本とする 2 接合以上の薄膜シリコン系太陽電池モジュール要素技術を開発する。</p> <p>②薄膜シリコン大面積高生産性製膜技術開発 基本計画書の仕様(1m 以上)を上回る 2m 長以上の電極長さに対して 10%以下の膜厚分布を有する均一な製膜技術を確立するとともに、G5 サイズ以上の面積での高速かつ高品質製膜を達成する。</p> <p>③薄膜シリコン系太陽電池モジュールシステム化技術開発 大面積薄膜シリコン太陽電池モジュールに特有の高電圧、低電流という特質を生かすべく、モジュールをシステム化するときの電圧配分、モジュール電圧の選択、インバータとの整合性などを検討し、システム効率とシステムコストが最も安くなるモジュールの集積化の手法を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・アモルファスシリコントップセルで安定化効率 11%以上 ・微結晶シリコン或いは微結晶シリコンゲルマニウム単接合で短絡電流 32mA/cm²以上 ・新規なカソード電極を用い、VHF プラズマ周波数(60MHz 以上)に対応する波長 λ に対して長さ $1/4\lambda$ 以上、幅 $1/10\lambda$ 以上の電極を用いて μc-Si 薄膜の製膜速度 1.5nm/s 以上、$\pm 10\%$以下の膜厚均一性を達成しうる、$\pm 10\%$以内のプラズマパラメーターの均一性 ・マルチロッド電極を用いた第 5 世代(以下、G5)相当サイズ(1.1m\times1.4m)ガラス基板処理可能な装置において、μc-Si 製膜において$\pm 10\%$以下の膜厚均一性 	
2	H22 ～ H26	高度構造制御薄膜シリコン太陽電池の研究開発	カネカ	<p>薄膜シリコン太陽電池の高効率化を目指し、光閉じ込め構造のさらなる強化を目的に透明電極の凹凸形状において光散乱に指向性を有する事を特徴とする新規低空間指向性光閉じ込め構造の開発を行う。合わせてモジュールへの適用を目指した検討を実施するものとする。また、多接合型薄膜シリコン太陽電池の高性能化においてキーとなるミドル層の高性能化を目的に、サブサーフェス制御製膜法による新規バンドギャップ制御シリコン系材料の開発を行い、高効率化を実現する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・サブモジュール (サイズ 20cm\times20cm) にて安定化効率 15% ・実機サイズモジュール (サイズ 980\times950mm) にて安定化後 120W 	
3	H22 ～ H26	薄膜シリコンフィルム太陽電池の高速製膜技術の研究開発	富士電機	<p>薄膜シリコン太陽電池であるフレキシブル太陽電池について、その高効率化を図ると共に、その薄膜シリコンを高速で製膜する技術を開発する。</p> <p>1) 薄膜シリコン太陽電池の高速製膜技術</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・μc-Si:H セルで変換効率 9.5% (製膜速度 2.2nm/s) ・3 接合太陽電池で初期効率 12.6%、製膜速度は μc-Si : 2.2nm/s、a-Si : 0.83nm/s ・a) 直列接続による出力低下 : 20% 	

				2) 太陽電池モジュール作製技術	b) 高温高湿通電試験での出力低下：4%	
--	--	--	--	------------------	----------------------	--

表.5 (ハ) C I S・化合物系太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	中間目標	その他
①フレキシブルC I G S太陽電池モジュールの高効率化研究（コンソーシアム）						
1	H22～H26	フレキシブルC I G S太陽電池モジュールの高効率化研究	富士フイルム	フレキシブルC I G S太陽電池の高速製膜・高性能化プロセスを開発する。 フレキシブルC I G S太陽電池のロール・トゥ・ロール製膜装置(C I G S層、Na供給層、裏面電極)の基本仕様設計と、基本仕様によるアルバック社作製装置の評価により、高効率化可能な装置技術を開発する。	・フレキシブルC I G S太陽電池の高効率化 (10×10cmサイズにて効率17%) (30×30cmサイズにて効率16%)	
2	H22～H26	装置開発	アルバック	フレキシブルC I G S太陽電池のロール・トゥ・ロール製膜装置を開発(C I G S層、Na供給層、裏面電極層)する。	・フレキシブルC I G S太陽電池製造技術の構築 (C I G S工程までをロール・トゥ・ロールプロセス化、C I G S光吸収層の高速成膜技術の構築)	
3	H22～H26	電子構造評価によるデバイス特性向上技術の開発	鹿児島大学	ワイドギャップC I G Sに適合する新規バッファ層の電子構造およびバッファ層/C I G S界面の伝導帯・価電子帯の適正な接続条件を明らかにし、デバイス作成技術にフィードバックする。	・フレキシブルC I G S太陽電池の高効率化 (10×10cmサイズにて効率17%) (30×30cmサイズにて効率16%)	
4	H22～H26	結晶欠陥の検出・同定、欠陥低減化技術開発支援	筑波大学	C I G S光吸収層の中および界面での結晶欠陥を検出、同定して欠陥の性質を明らかにし、さらに欠陥低減化技術開発を支援してデバイス特性の向上を図る。	・フレキシブルC I G S太陽電池の高効率化 (10×10cmサイズにて効率17%) (30×30cmサイズにて効率16%)	
5	H22～H26	新規バッファ層の開発	豊橋科技大学	ワイドギャップC I G Sに適合する新規バッファ層の材料とその成形技術、およびバンドギャップチューニング技術の開発を行い、ワイドギャップC I G S太陽電池の高効率化を図る。	・フレキシブルC I G S太陽電池の高効率化 (10×10cmサイズにて効率17%) (30×30cmサイズにて効率16%)	
③独案件						
6	H22～H26	C I S系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発	昭和シェル石油	2020年における発電コスト目標(14円/kWh)達成に向けたC I S系薄膜太陽電池の高効率化技術研究開発である。このために30cm角程度のサブモジュールにおいて変換効率18%、1cm角程度の小面積セルにおいて変換効率25%を目標とする。	・30cm角程度のサブモジュールで変換効率17% ・1cm角程度の小面積セルで変換効率22%	
7	H22～	反射式集光型太陽光発電	三井造船	反射を使用した集光型発電(CPV)システムの開発を実	・集光技術 集光倍率>500倍、	

	H26	電システムの研究開発		施 (New TAR(Trans Axial Reflector)方式)。レンズ方式より低コストかつ同等以上の性能を狙う。また、直達光の多いサンベルト地域等を主市場として見込む。	光学効率>70%、 モジュール効率>25%、 許容角>±1° 放熱技術 機構技術 ・実証データ取得 ・コスト試算	
--	-----	------------	--	---	--	--

表.6 (二) 色素増感太陽電池

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	中間目標	その他
①三層協調界面構築による高効率・低コスト・量産型色素増感太陽電池の研究開発 (コンソーシアム)						
1	H22 ～ H26	高効率・高耐久性モジュールに関する研究開発	シャープ	①集積モジュール化技術の研究開発 大面積化構造に対して、実用化に最も好適な集積モジュール構造の選定を行い、高効率化技術を開発する。 ②信頼性向上技術の研究開発 ユニットセルを集積するモジュール構造やプロセスに起因した劣化機構を解析・究明することで、集積モジュールレベルでの高信頼性技術を開発する。	①高効率化技術 変換効率 11% (1cm 角程度、シングルセル) モジュール変換効率 7% (30cm 角程度) ②モジュール化・耐久性向上 JIS C8938 試験 (A-2, A-5, B-2) 後の相対効率低下 10%以下	
2	H22 ～ H26	高効率タンデム化技術に関する研究開発	九州工業大学	効率タンデム化技術に関する研究開発 15%の効率を達成するための新タンデム型色素増感太陽電池構造の提案	一セル内二電極型色素増感太陽電池の機能確認 酸化錫ボトム電極を使い、吸収端 1100 nm、Jsc が 10 mA/cm ² の色素およびボトム電極を開発	
3	H22 ～ H26	高効率化技術及びメカニズム解析に関する研究開発	信州大学	高効率化技術及びメカニズム解析に関する研究開発 反応エネルギー制御色素、高効率小型セル、光学・電子移動速度同時測定装置の開発	吸収端 850nm、全吸収波長領域での平均 IPCE80%	
4	H22 ～ H26	高効率タンデム用色素材料の研究開発	新日鐵化学	高効率タンデム用色素材料の研究開発 (長波長色素の開発)	セル変換効率 11%に資する長波長色素として、吸収端 1100nm、最大吸収波長での IPCE50%を目標とした長波長色素の開発	
5	H22 ～ H26	高効率・高耐久性モジュール材料の研究開発	住友大阪セメント	高効率・高耐久性モジュール材料の研究開発 絶縁層、触媒材料、導電層及び高効率酸化半導体電極の開発	変換効率 11% (1cm 角程度、シングルセル)、モジュール変換効率 7% (30cm 角程度) 実現に資するモジュール材料の開発	
6	H22 ～ H26	高効率・高耐久性色素材料の研究開発	富士フイルム	高効率・高耐久性色素材料の研究開発 自由エネルギー差 (ΔG) の低減が可能な色素の開発	変換効率 11% (1cm 角程度、シングルセル)、モジュール変換効率 7% (30cm 角程度) 実現に資する色素材料の開発	
7	H22 ～ H26	高効率・高耐久性電解質材料の研究開発	メルク	高効率・高耐久性電解質材料の研究開発 高い解放電圧 (Voc) を与える高純度新規電解質材料の開	変換効率 11% (1cm 角程度、シングルセル)、モジュール変換効率 7% (30cm 角程度) 実現に資	

				発	する電解質材料の開発	
②フィルム型軽量低価格色素増感太陽電池の研究開発（コンソーシアム）						
8	H22 ～ H26	フィルム型 モジュール の研究開発	グンゼ	フィルム型モジュールの研究 開発 ①フィルム型モジュールの試 作と高効率化・耐久性向上、 ②RolltoRoll プロセスによ る高スループット太陽電池製 造技術開発	フィルム型色素増感太陽 電池においてモジュール 効率 7%、JIS 規格の環境 試験、耐久性試験におい て相対効率低下 10%以内	
9	H22 ～ H26	高性能色素 及び電極の 研究開発と セル性能総 合評価	岐阜大 学	高性能部材の研究開発 有機増感色素の開発と多孔質 酸化チタン電極の低温製膜法 の開発	フィルム型色素増感太陽 電池においてモジュール 効率 7%、JIS 規格の環境 試験、耐久性試験におい て相対効率低下 10%以内 達成に資する光電極の低 温製膜法の実現	
10	H22 ～ H26	低温製膜印 刷材料を用 いるフィル ム型色素増 感太陽電池 の開発	桐蔭横 浜大学	低温製膜印刷材料を用いる フィルム型色素増感太陽電池 の開発	室温印刷および 150℃以下 乾燥での酸化チタン半導 体フィルム光電極、印刷 法による対極によるフィル ムモジュールの実現	
③高効率・高耐久性色素増感太陽電池モジュールの研究開発（コンソーシアム）						
11	H22 ～ H26	色素増感太 陽電池モ ジュール化 技術と高耐 久性化研究 開発	フジク ラ	屋外利用可能かつ高効率な色 素増感太陽電池モジュールの 技術開発 ①大面積（30cm 角以上）・高 耐久性色素増感太陽電池モ ジュールの研究開発 ②色素増感太陽電池モジュ ールの屋外耐久性実証とシス テム化技術開発 ③高耐久性色素増感太陽電池 モジュールの高効率化要素技 術の研究開発	・セル変換効率(安定化効 率)11%(1cm 角程度)以上 ・モジュール変換効率 (安定化効率) 7%(30cm 角 程度)以上 ・JIS 規格 C8938 の環境試 験、耐久性試験(温湿度サ イクル、耐熱性、耐湿 性、温度サイクル、光照 射の各試験)において相対 効率低下 10%以内	
12	H22 ～ H26	高効率・高 耐久性色素 増感太陽電 池の基盤的 研究	東京理 科大	チタニア光電極の光閉じ込め 効果や新規調製法による最適 化、高性能色素の開発、電解 質溶液の最適化、対極の最適 化検討および太陽電池の性能 支配因子の明確化	1cm 角セルで 11%、10cm 角 サブモジュール耐久性試 験での相対効率低下 10%以 内の達成 Pt 代替対極 1cm 角セルで 10%、非 FTO セルで 8%の変 換効率実現	

表.7 (ホ) 有機薄膜太陽電池

No.	開発 期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	中間目標	その他
①有機薄膜太陽電池モジュール創製に関する研究開発（コンソーシアム）						
1	H22 ～ H26	新構造モ ジュールの 研究開発	東芝	①高効率化技術：新構造モ ジュールの提案 ②モジュール化技術：新構造 モジュールの作製技術を確立 ③耐久性向上：JIS 規格 C8938 に基づく評価を実施	①②セル変換効率 8%以上 (1cm 角程度)、モジュ ール変換効率 6%以上 (30cm 角程度) ③JIS 規格 C8938 の環境試 験・耐久性試験 (温湿度サイクル、耐熱 性、耐湿性、温度サイク ル、光照射の各試験)に おいて相対効率低下 10%以 内	

2	H22 ～ H26	高分子系有機薄膜太陽電池モジュールの研究開発	住友化学	①高効率化技術：高分子系の高効率発電組成を開発し、周辺材料を最適化 ②モジュール化技術：フレキシブル基板上でのモジュール化技術を開発 ③耐久性向上：JIS規格C8938に基づく評価を実施	①②セル変換効率8%以上（1cm角程度）、モジュール変換効率6%以上（30cm角程度） ③JIS規格C8938の環境試験・耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内
3	H22 ～ H26	低分子系有機薄膜太陽電池モジュールの研究開発	出光興産	①高効率化技術：低分子系新材料を開発し、セル構造を最適化・制御 ②モジュール化技術：蒸着法でのモジュール試作検討 ③耐久性向上：JIS規格C8938に基づく評価の実施	①②セル変換効率8%以上（1cm角程度）、モジュール変換効率6%以上（30cm角程度） ③JIS規格C8938の環境試験・耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内
4	H22 ～ H26	材料・構造最適化技術の研究開発	京都大学	①新材料・新構造技術：設計指針を提案し、新材料・新構造を創製 ②機構解明：物性・素子特性などを測定し光電変換機構を解明 ③最適化技術：評価環境を整備し、セルの最適化を実現	①②セル変換効率8%以上（1cm角程度）、モジュール変換効率6%以上（30cm角程度）の実現に資する新材料・新構造を創製
②光電荷分離ゲルによる屋内用有機太陽電池の研究開発（コンソーシアム）					
5	H22 ～ H26	光電荷分離ゲル材料の有機太陽電池デバイス化技術開発	パナソニック	①変換効率向上：デバイス構造・電解液組成設計技術開発 ②耐久性向上：色素脱離抑制技術開発 ③低コスト化：塗布製膜透明導電膜基板での高変換効率および高耐久性技術開発 ④蓄電機能付与：発電デバイスへの蓄電付与技術開発	①可視光下（400-700nm、57.7μW）で変換効率20% ②JIS C8938試験での相対効率低下10%以内 ③塗布工法での透明導電膜基板（80%T、10Ω/□）、空隙率80%以上の多孔質集電電極の作製技術開発 ④1.26mWhの蓄電機能実現のための材料技術開発
6	H22 ～ H26	光電荷分離ゲル材料技術開発及びゲル劣化因子の把握・改善	早稲田大学	①変換効率向上：ゲル材料技術開発 ②耐久性向上：ゲル劣化因子の把握および改善 ④蓄電機能付与：蓄電機能実現のためのゲル材料技術開発	①可視光下（400-700nm、57.7μW）で変換効率20% ②JIS C8938試験での相対効率低下10%以内 ④1.26mWhの蓄電機能実現のための材料技術開発

表.8 (へ) 共通基盤技術

No.	開発期間	テーマ名	委託先	テーマ概要	中間目標	その他
①発電量評価技術等の研究開発及び信頼性及び寿命評価技術の開発（コンソーシアム）						
1	H22 ～ H26	発電量評価技術等の研究開発及び信頼性及び寿命評価技術の開発	産業技術総合研究所	発電量評価技術の開発 ①太陽電池性能評価・校正技術 ②発電量推定と予測技術 信頼性評価技術と長寿命化技術の開発	発電量評価技術の開発 ①・結晶Si・薄膜Si・化合物半導体・色素増感・有機薄膜等を材料とした様々な新型太陽電池やこれらを要素セルとして用	

				<p>①モジュール・機器耐久性評価技術 ②システム点検技術</p>	<p>いた多接合太陽電池、および大型サブモジュールを高精度に評価する技術を検討して実証し、測定を実施する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・評価技術の国際整合性を確保・確認するための比較測定・標準化等を実施する ・超高温定温黒体炉を用いた相対分光放射照度の高精度な値付けと、精密構造型 WRR 絶対放射計を用いた絶対放射照度の値付けの結果の併用による一次基準太陽電池セル校正技術の不確かさ改善を実証する <p>②・新型太陽電池モジュールを含む各種太陽電池モジュールのモード発電量を1ヶ月間の測定機関で5%未満の精度で算出する測定法を開発する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・現状の気象パラメータを利用した、分散発電量予測モデル、広域発電量予測技術の試作モデルを開発する <p>信頼性評価技術と長寿命化技術の開発</p> <p>①・4セル～6セル（40cm角～40×60cm程度）のミニモジュールで、サイクリック試験の結果をとりまとめ、フルサイズモジュールへの適用可能性を判断する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水蒸気との酸化反応により光学定数に変化する金属を見出すことにより、透過率に換算して10-2g/m2dayまでの水蒸気の浸入を検出可能なモジュール内水蒸気進入経路調査方法を確立する <p>②・オンサイト点検において気象センサを利用して発電性能10%低下を検出可能な手法の開発を行う</p>
2	H22～H26	発電量評価技術等の開発	気象協会	<p>発電量定格技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・日射スペクトルデータの全国整備に関する研究開発 ・発電量予測技術の開発 ・広域日射量予測技術の研究開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・日射スペクトルのデータベースを構築する ・実測データを基に、水平面全天日射から日射スペクトルを推定するモデルを開発する ・日射スペクトルデータの全国整備を行う ・広域の日射量予測の予測誤差検証用に気象庁地

					<p>上気象官署の補間的な位置づけとして、気象衛星観測データから算出した日射量メッシュ（1kmメッシュ）を整備する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・5kmメッシュで全国を対象とする全天日射量予測誤差の検証を行うとともに、予測モデルによる広域の太陽光発電量把握への適用性を評価する ・日射量予測の精度向上を図る 	
3	H22～H26	発電量評価技術等の開発	岐阜大学	<p>発電量予測技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分散日射量予測技術の研究開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・分散日射予測において、分解能10kmの気象パラメータからさらに詳細な空間分解能2kmの気象パラメータを推定可能とする ・24時間以上先での日射強度を直達・散乱日射スペクトル強度で予測を可能とする技術を開発する 	
4	H22～H26	発電量評価技術等の開発	東京大学	<p>発電量予測技術の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分散・広域発電量応用評価技術の研究開発 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電量予測技術仕様を検討するための電力システム解析・評価モデルの開発 ・発電量予測技術仕様の設定 ・発電量予測のためのPVシステム発電量のモニタリング手法の策定 	
5	H22～H26	信頼性及び寿命評価技術の開発	太陽光発電技術研究組合	<p>信頼性評価技術と長寿命化技術の開発と次世代太陽光発電システムに向けた基盤技術開発の調査</p> <ol style="list-style-type: none"> ①高信頼性モジュールの認証試験技術 ②新規信頼性試験方法の開発 ③発電データ分析技術 ④リユースモジュール健全性試験技術 ⑤次世代太陽光発電システムに向けた基盤技術開発の調査 	<ol style="list-style-type: none"> ①・モジュールの認証試験に定められている紫外線強度試験、温度サイクル試験の条件を5倍程度まで印加した試験を実施し、劣化症状と照らし合わせ、劣化因子の推定を行う ②・4セル～6セル（40cm角～40×60cm程度）のミニモジュールで、サイクル試験の結果をとりまとめ、フルサイズモジュールへの適用可能性を判断する ・水蒸気との酸化反応により光学定数が増加する金属を見出すことにより、透過率に換算して10-2g/m2dayまでの水蒸気の浸入を検出可能なモジュール内水蒸気浸入経路調査方法を確立する ③・損失分析手法（SV法等）を利用して測定可能な計測項目と評価可能な損失項目との関係について定量的に明確にする 	

					<p>④リユースモジュールに要求される性能の最も基本的な要求である絶縁性能を決定したガイドライン案の策定に必要なデータを提供する</p> <p>⑤・PV モジュールの信頼性及び高耐久性に関するデータの系統的な調査・解析を行い、PV モジュールの主要な劣化要因の特定を行う</p> <p>・2050年のPVシステムのあるべき姿を策定するための、基本情報を収集する</p>	
②単独案件						
6	H22 ～ H26	広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理手法に関する研究開発	北九州産業学術推進機構	PVシステムのリサイクル処理手法の確立 ①低コスト汎用リサイクル処理技術の基本技術を開発 ②LCA評価 ③広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理に必要な社会システムの提案	<p>・汎用リサイクル手法の共通処理部までの開発を概ね完了し、技術開発の見通しを得ていること</p> <p>・処理コスト目標「5円/W@年間200MW処理」の実現妥当性に関する専門委員会での検討が完了していること</p> <p>・広域対象のPVシステム汎用リサイクル処理に必要な社会システム整備に関する必要事項を専門委員会で議論できていること</p>	
7	H22 ～ H26	超ハイガスバリア太陽電池部材の研究開発	三菱樹脂	超ハイガスバリア太陽電池部材の研究開発 ①Cat-CVDとシリカ蒸着の複合膜による超ハイガスバリアフィルムの基本構成確立 ②耐候性バックシート、フロントシートの基本構成確立 ③耐熱性耐候性基材の基本構成確立	<p>①・水蒸気透過度 10-6g/(m²・d)以下</p> <p>・85℃×85%RH 3000hrでの水蒸気透過度 10-5g/(m²・d)以下</p> <p>・耐候性試験機 3000hrでの水蒸気透過度 10-5g/(m²・d)以下</p> <p>②・85℃×85%RH 3000hrでの機械物性変化30%以下</p> <p>・耐候性試験機 3000hrでの水蒸気透過度 10-5g/(m²・d)以下</p> <p>③・プラスチック基材の線膨張係数が20ppm以下、200℃の熱収縮率が0.1%以下</p>	
8	H22 ～ H26	ロールツーロールプロセスを可能とする封止材一体型保護シートの研究開発	積水化学	ロールツーロールプロセスに対応可能な封止材一体型保護シートの開発 ①封止材の開発 ②保護シートの開発 ③封止材/保護層の一体化 ④ラミネート封止技術の検討 ⑤リジッド太陽電池用の封止材の開発	<p>薄膜シリコン太陽電池用一体型シート品質</p> <p>・厚み制度：±5%以下</p> <p>・接着速度：3m/分で一体成形できること</p> <p>・接着強度：5N/10mm以上</p> <p>・透明性：全光線透過率>90%以上</p> <p>・バリア性：3g/m²day以下</p> <p>リジッド太陽電池用封止</p>	

					材品質 ・ラミネート適性：架橋行程が不要 ・長期信頼性：高温高湿試験 1000hr 合格（発電性能） ・耐熱性：EVA 封止材と類似の熱変形挙動	
9	H22 ～ H26	太陽光発電システムの据付工程簡便化に関する研究開発	デュポン	据付工程簡便化に関する研究開発 ①機能複合化した据付部品のデザイン、材料選択および耐久性の検証 ②太陽電池モジュールの機械的強度／環境耐久性および保持方法の検証	①・部品点数削減率（50%以上）および据付作業に必要な人員・時間の低減率（20%以上）の目標値の妥当性を検証し、最終目標値を確定する ・新規開発した機能複合化部品について 10～20 年相当以上の耐久性を実証する ②・新規モジュール構造について、従来ガラス/ガラス構造のモジュールと比較し 50%以上の軽量化、かつ 10～20 年相当以上の耐久性（高温高湿試験（85℃ x 85%RH x 1000 時間後に出力低下 5%以下を達成）を実証する	

2.2 研究開発の実施体制

本研究開発を実施するための基本計画・実施方針については、平成 22 年 2 月に外部有識者による太陽光発電技術委員会においてその方向性を審議し、平成 22 年 4 月に策定された。

本研究開発は、NEDO が選定する企業、大学、民間研究機関、あるいは独立行政法人等（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。

(1) 平成 22 年度：「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」に関する公募

プロジェクトの企画立案に際し、太陽光発電システムのシリコン原料からシステムインテグレート等に至るまで、100社超の事業者からヒアリングを実施。PV2030+において、2020年14円/kWhを実現するための変換効率20%、製造コスト75円/Wを、中国台湾との競争に鑑みて、その実現時期を更に3年前倒し、2014年に達成する基本計画を策定した。

その結果、太陽光発電システムの川上から川下までバリューチェーン全体で競争力を発掘・強化すること、産学連携により基盤的知見増進をシステム開発につなげることの重要性を把握。

公募の結果、41件の提案の中から、セル・モジュール自体の高効率化・低コスト化のみならず、原料シリコンの高品位・低コスト製造、モジュールの生産性向上、設置・施工コスト低減等に資する取り組み21件を採択した。

・ 公募期間：平成 22 年 4 月 2 日～平成 22 年 5 月 17 日

・ 審査項目・基準

- 1) 開発の最終目標は、本事業の目標値に対応して妥当かつ明確であるか。
- 2) 開発計画は、中間目標・最終目標まで実現可能なスケジュールであるか。また提案の要件を満たす計画となっているか。
- 3) 開発内容は、技術的に優れたものであるか。また新規性があるか。
- 4) 開発内容は、実現したときのインパクトが大きいのか。
- 5) 実施体制は、効果的な開発が期待できるか。

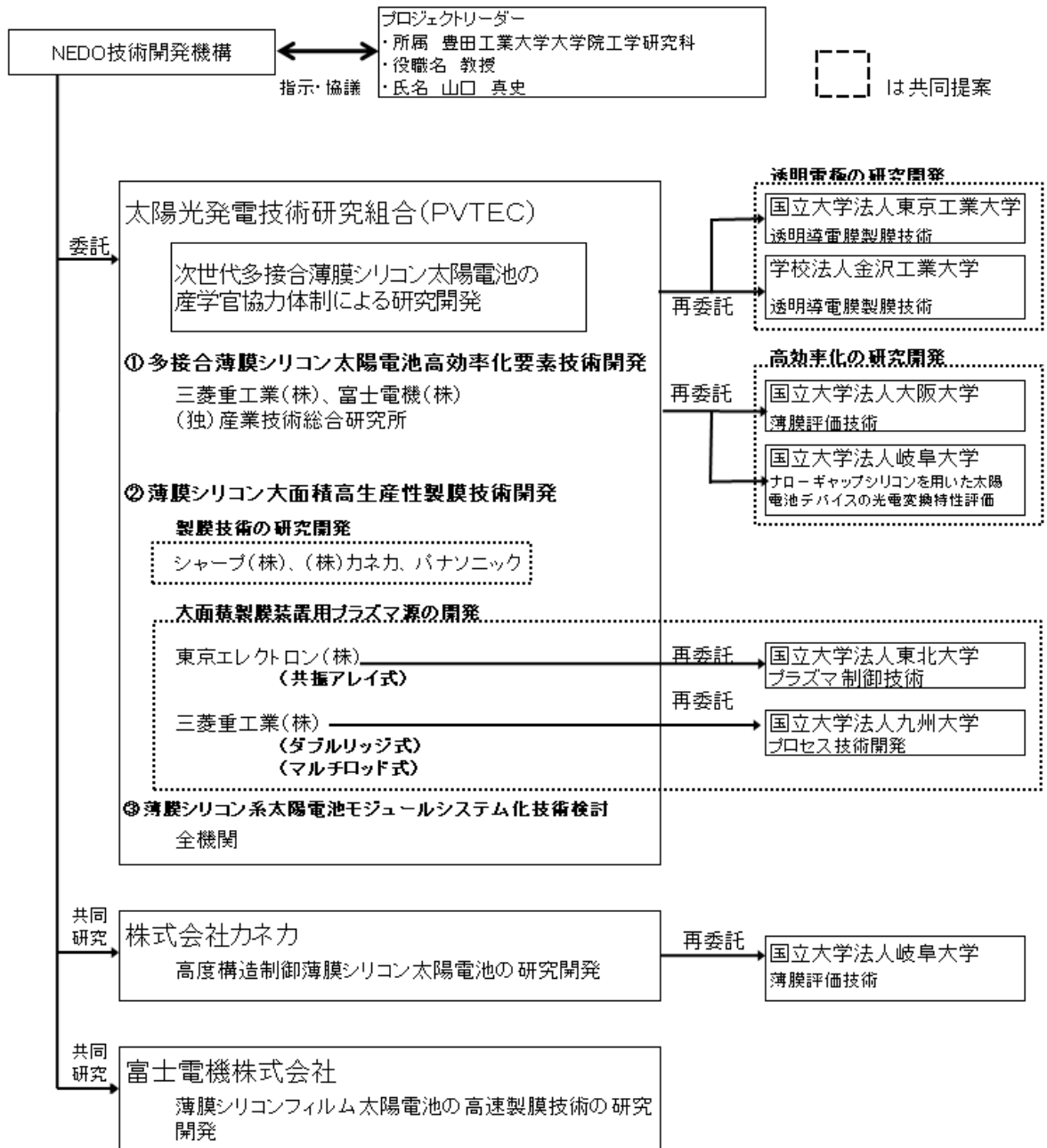
- 審査委員会委員（敬称略）：
山本 嵩勇（福井大学教授）、石原 好之（同志社大学教授）、勝本信吾（東京大学教授）、工藤 一浩（千葉大学教授）、瀬川 浩司（東京大学教授）
- 応募件数：41 件
- 採択件数：21 件

研究開発の実施体制を以下に示す。

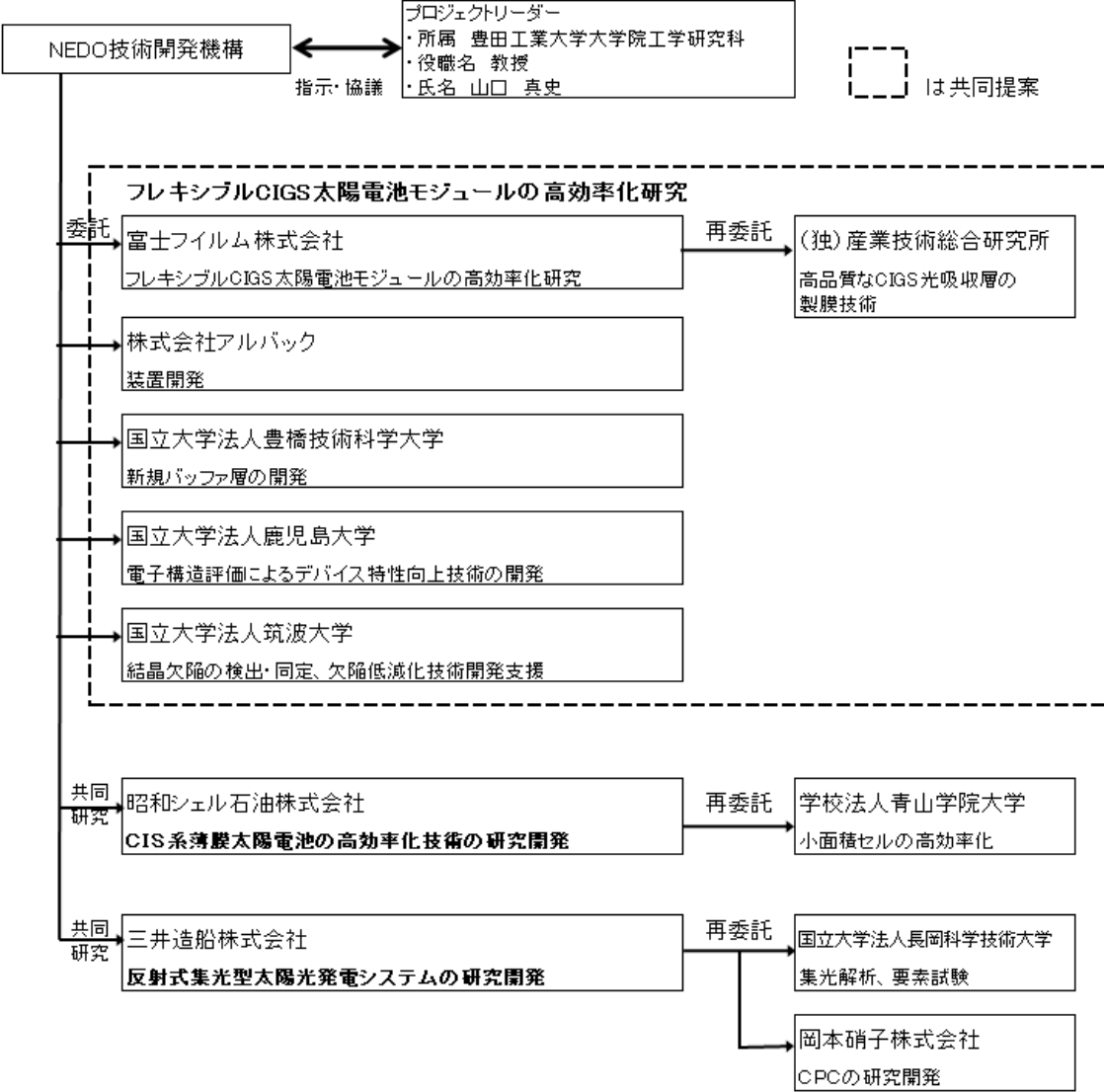
研究開発項目 (イ) 結晶シリコン太陽電池



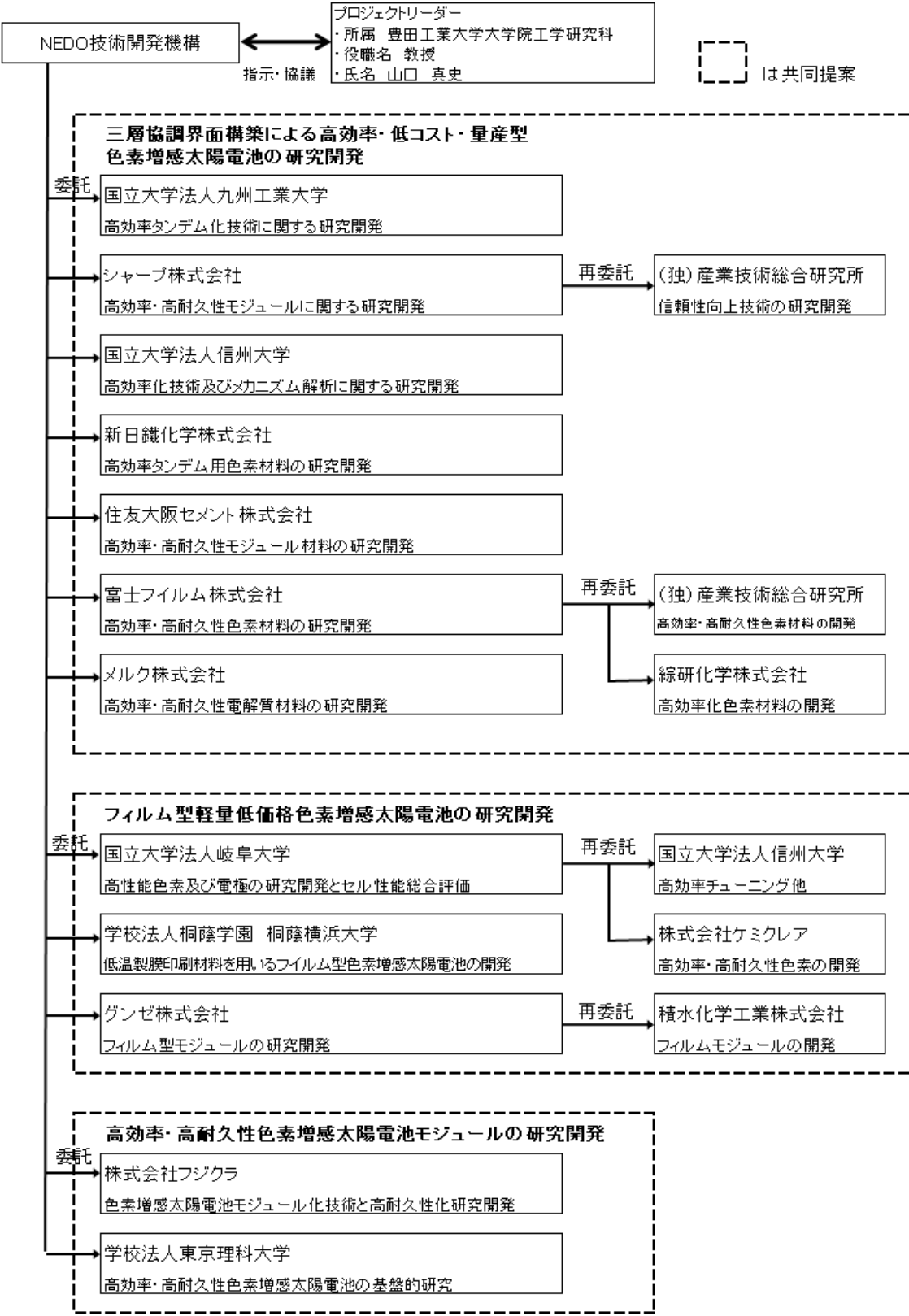
研究開発項目 (ロ) 薄膜シリコン太陽電池



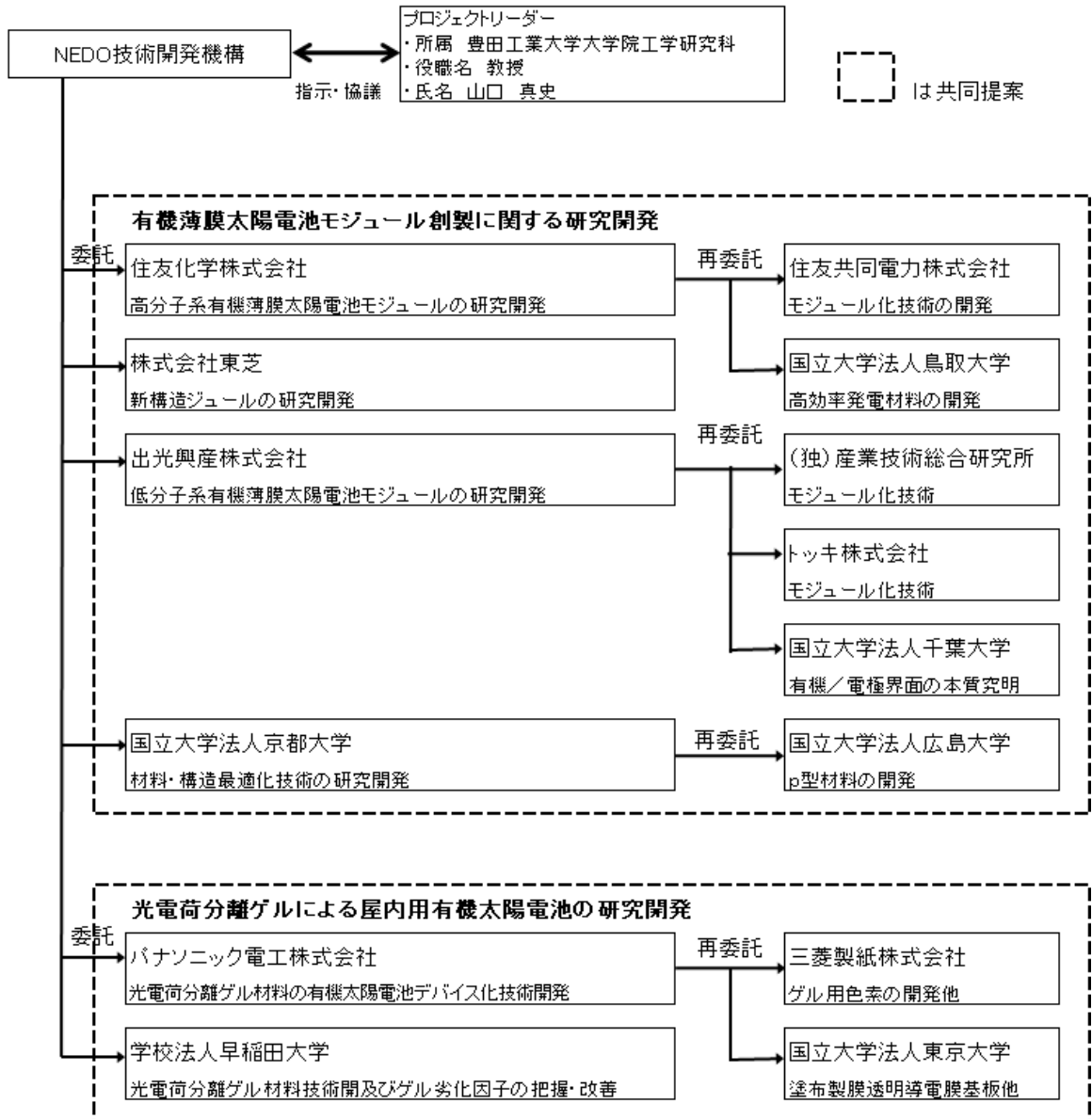
研究開発項目 (ハ) CIS・化合物系太陽電池



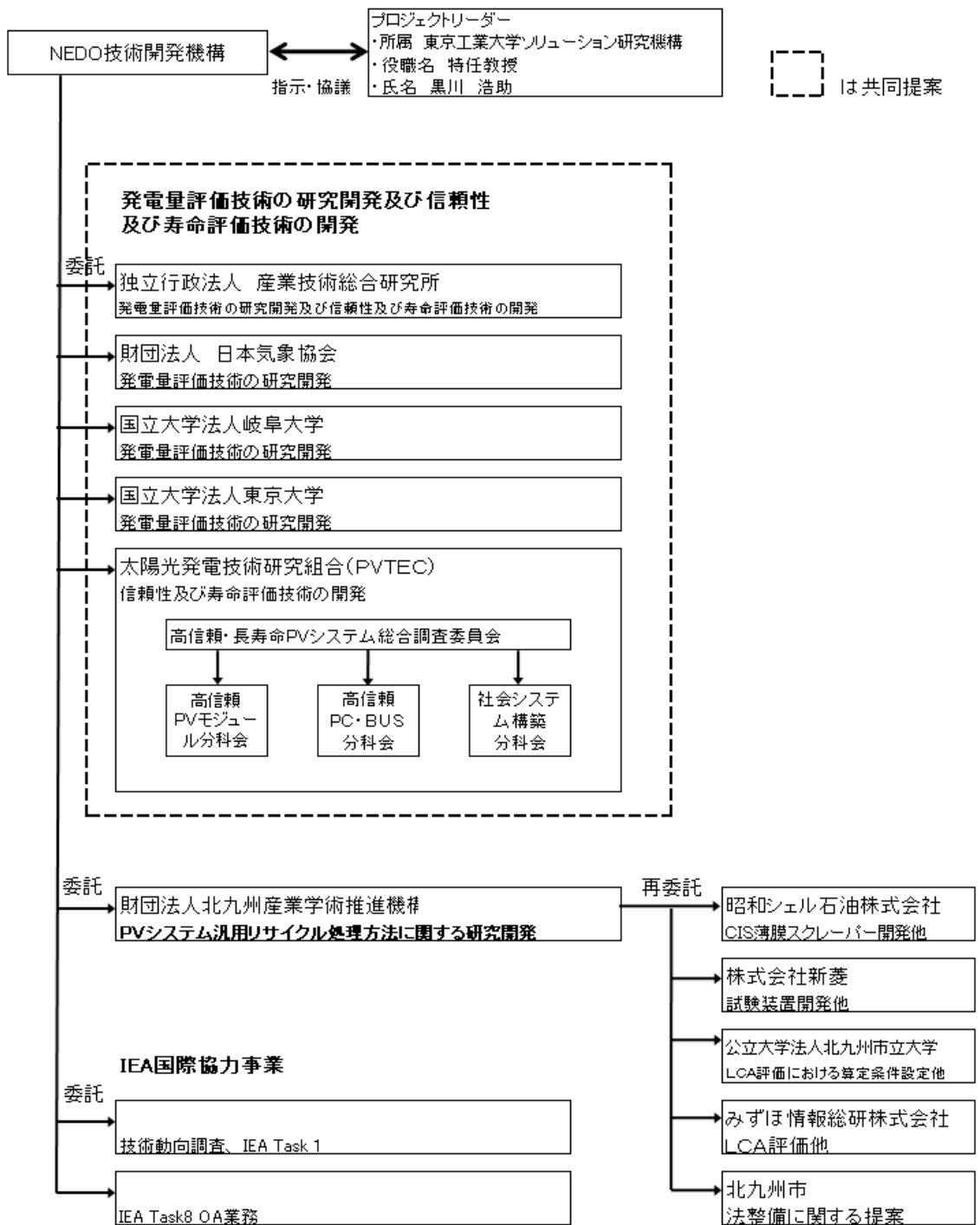
研究開発項目（二）色素増感太陽電池



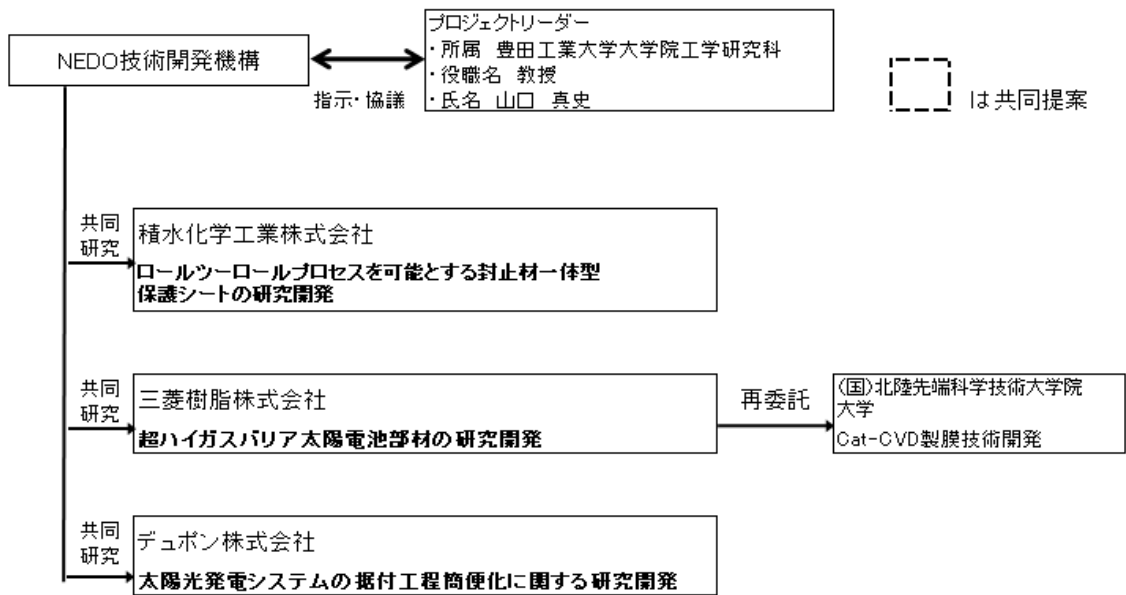
研究開発項目（ホ）有機薄膜太陽電池



研究開発項目（へ） 共通基盤技術 1



研究開発項目（へ） 共通基盤技術 2



(2) 平成 24 年度：「太陽光発電システム次世代高性能技術の開発」に関する追加公募

追加公募対象は、基本計画に掲げる目標の実現に資する研究開発であって、上記の研究開発テーマ以外の新たな着想、方式、材料等を用いた太陽光発電システムの低コスト化、変換効率向上、長寿命化等の研究開発であり、2020年までに実用化・事業化を見込む即効的な研究開発とした。追加公募では、特に下記の研究開発に重点をおいた。

○ 太陽光発電システムの市場競争力を高めるため、新たな着想、方式、材料等を用いた太陽電池モジュールの低コスト化、高効率化、長寿命化に資する研究開発

1

○ 太陽光発電システムの周辺機器、施工・工法、共通部材等の低コスト化・長寿命化に資する研究開発（モジュール価格の低下により、太陽光発電システムの周辺機器、施工・工法、共通部材等のコストの割合が大きくなっており、この分野での低コスト化の取り組みが十分進んでいないため）

・公募期間：平成 24 年 4 月 20 日から 5 月 29 日

・審査項目・基準

（実施中のテーマ領域の重複、開発の経済性、経営基盤なども考慮した上で）

- 1) 提案内容が基本計画の目的、目標に合致しているか。
- 2) 提案された方法に新規性・独創性があり、技術の経済的優位性や競争力があるか。
- 3) 共同提案の場合、各者の提案が相互補完的であるか。
- 4) 提案内容・研究計画は実現可能か（技術的可能性、計画の妥当性等）
- 5) 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。
- 6) 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
- 7) プロジェクト終了後の事業性が具体的な提案となっているか。

・審査委員会委員（敬称略）：

山本 嵩勇（福井大学名誉教授）、工藤 一浩（千葉大学教授）、小野塚 恭彦（国際協力銀行 審議役）、渡辺 憲治（株式会社東芝 部長）

・応募件数：23 件

2.3 研究開発の運営管理

2.3.1 進捗報告会の開催

研究開発全体の管理・執行に責任と決定権をもつ NEDO は、プロジェクトリーダーと密接な関係を維持しつつ、研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施した。具体的には、全ての事業者の研究開発の進捗状況を把握し、進捗状況に照らし必要な指示するために、プロジェクト開始の平成 22 年度から現在に至るため継続して、年 3 回の進捗報告会を開催した（開催日：平成 23 年 3 月、7 月、11 月、平成 24 年 2 月）。

この進捗報告会は原則分野毎（結晶シリコン、薄膜シリコン、CIS 化合物、有機色素、基盤技術）に開催し、事業者・コンソーシアムの垣根を越えて情報交換、討議を実施した。そして、プロジェクトリーダーに方向性や実施内容について意見を求め、研究開発の運営に反映した。

分野	主な指導内容
結晶シリコン 太陽電池	（平成 23 年 7 月）研究開発に参画している大学、独法は企業が使いたくなる技術開発に注力し、常に産業界にフィードバックすることを念頭に開発に取り組むように指示した。 （平成 24 年 2 月）Rワイヤーの開発についてはウェハの切断速度は生産性に直結するので、目標の切断速度の達成に向け解決法を最優先で検討するように指示した。
薄膜シリコン 太陽電池	（平成 23 年 7 月）コンソーシアムにおける大学の役割が不明確なので、企業が担当するプロジェクトへの貢献を可視化するように指示した。 （平成 24 年 2 月）薄膜シリコン材料だけでなく、変換効率に影響を与える透明導電膜の開発にも注力するよう、指示した。
CIS 等化合物系 太陽電池	（平成 23 年 11 月）フレキシブル太陽電池の市場規模や製品ニーズについて調査を行い、フレキシブル太陽電池の必要性を明確にするように指示した。 （平成 24 年 2 月）CIS 薄膜の構造評価等が不十分なので、大学や産総研からバックアップを受けるよう、実施者（企業）へ指示した。
色素増感 太陽電池	（平成 22 年 7 月）コンソーシアムの枠を超えて、相互の意見交換を活性化させ、全体として研究開発をスピードアップさせることを指示した。 （平成 23 年 11 月）製品のターゲットと事業化時期を明確にした上で、ユーザー開拓を進めるとともに、性能を上げるための原理を早急に明確化することを指示した。
有機薄膜 太陽電池	（平成 23 年 11 月）光電変換材料の基本特性からセル特性を推定する評価手法を検討すること。 （平成 24 年 2 月）アモルファスに対する優位性を明確にすると共に、コスト試算と市場性の評価を進めること。
共通基盤技術	（平成 23 年 3 月）ロールツーロールプロセスを可能とする封止材一体型保護シートの展開として、結晶シリコンについても検討するよう指示した。 （平成 24 年 3 月）発電量予測技術に関して、予測技術のユーザーとして、電力事業者に加え、地域のエネルギーマネジメント業者や事業プランナー等への展開も視野に入れるよう、指示した。

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

2010年に13.9億円、2011年に22.9億円の予算増額を伴う事業の加速・拡充を実施した。2012年度も、必要に応じて事業の加速・拡充を実施している。

【予算増額】

太陽電池種類	主な予算増額
結晶シリコン太陽電池	<p>増額金額： 91百万円（平成22年11月）</p> <p>課題：結晶シリコン太陽電池の試作ラインを構築した。しかし自らの研究開発に加えて、コンソーシアム参画のセルメーカー等が、各機関の研究成果を試作・実証する上で、試作評価、検証、品質維持の面が不十分であった。</p> <p>内容：コンフォーカル顕微鏡、電極形成用スパッタ装置、及び高速加熱処理装置、シート抵抗測定装置、印刷ライン、洗浄ユニットを導入した。</p> <p>効果：より実的な太陽電池試作ラインが構築され、変換効率と低コストの実現を目指したセルの試作が可能となった。</p>
薄膜シリコン太陽電池	<p>増額金額： 250百万円（平成24年4月）</p> <p>課題：平成23年度は、ラボレベルの実験で、原料ガスのナノクラスターが製膜中に薄膜シリコンに取り込まれると光安定化効率が低下する事が明らかにされ、排気効率向上が有効であることが分かった。また製膜速度向上のためにはプラズマでの高周波化が有効であり、改善の余地があることが明らかになった。更に薄膜の高品位化のためにはpin層を連続で製膜する事が重要であることが分かった。</p> <p>内容：競合他社（シャープ、パナソニック、カネカ）が共同で活用している製膜装置（G5サイズ）の改造として、①排気効率向上等の装置改造、②製膜速度アップのための高周波化（60MHz→100MHz）、③高品位化のためのロードロックチャンバー（pin層の連続製膜）の増設</p> <p>効果：製膜装置の改造が今年度中に実現することで、研究開発の加速が期待できる。</p>
CIS 等化合物系太陽電池	<p>増額金額： 31百万円（平成23年9月）</p> <p>課題：ラボ試験装置を用いて富士フイルムが得た知見（蒸着方法の最適化）を、量産試作装置に活かす必要が生じた。</p> <p>内容：アルバックが開発中の量産試作装置の蒸着ゾーンの配置を変更した。</p> <p>効果：基板高温加熱時間を短縮でき、基板搬送が安定化した。</p> <p>増額金額： 28百万円（平成24年3月）</p> <p>課題：平成23年度末までの成果として、昭和シェル石油（ソーラーフロンティア）が、サブモジュール（30cm×30cm）サイズでは世界最高の17.8%の高効率化を達成した。更なる高効率化には、CIS光吸収層のライフタイムやバンドギャップなどの正確な評価が必要であることが判明した。</p> <p>内容：ライフタイムやバンドギャップなどの正確な評価が可能な「PLライフタイム測定装置」を導入した。</p> <p>効果：サブモジュールの変換効率の更なる向上が期待できる。</p>
色素増感太陽電池	<p>増額金額： 52百万円（平成23年9月）</p> <p>課題：従来のプロセスでは、大面積モジュールを均一に作製することが困難であった。</p> <p>内容：ラミネータ、ガラス切断機、大型遠心分離器を導入し、均一性のある大面積モジュールの作製方法を開発した。</p> <p>効果：世界で初めて50cm角モジュールを実現するとともに、変換効率6.7%を達成した。</p>

<p>有機薄膜 太陽電池</p>	<p>増額金額： 65百万円（平成23年9月）</p> <p>課題：従来のプロセスでは、大面積モジュールを均一に作製することが困難であった。</p> <p>内容：塗布装置、電極形成用大型蒸着装置、インライン膜厚測定装置を導入し、均一性のある大面積モジュールの作製方法を開発した。</p> <p>効果：20cm角モジュールで世界最高となる変換効率6.6%を達成。</p>
<p>共通基盤技術</p>	<p>増額金額： 343百万円（平成23年3月）</p> <p>課題：同一条件で長期に亘るモジュールの発電量の比較を行う必要が生じた。</p> <p>内容：各社のモジュールが設置してある大規模PVシステムでのデータ取得を実施した。</p> <p>効果：同一条件で長期に亘りメーカー別や方式別の太陽電池の発電量の比較ができ、市場展開や技術開発に役立てた。</p>

2.3.3 追加応募の実施

世界の太陽光発電市場の急拡大に伴い、世界規模で熾烈な開発競争が繰り広げられている。世界競争に打ち勝っていくための競争力を高めるため太陽電池の更なる高効率化・低コスト化に加え、太陽電池に係る新たな部材の開発等に取り組む必要が生じた。そこで、2012年6月に13.8億円（契約予定額[平成24年度分]）の追加公募を実施し、重要課題の7件を採択した。

【追加公募】

太陽電池種類	内容
結晶シリコン太陽電池	事業名：超低コスト高効率Agフリーヘテロ接合太陽電池モジュールの研究開発 実施者：(委託先) 株式会社カネカ (再委託先) 独立行政法人産業技術総合研究所
	事業名：銅ペースト量産化技術と試験・評価方法に関する研究開発 実施者：(委託先) ナミックス株式会社 (委託先) 独立行政法人産業技術総合研究所
	事業名：赤外線FZ法によるN型四角形状シリコン単結晶育成方法の研究開発 実施者：(委託先) 株式会社クリスタルシステム (委託先) 国立大学法人山梨大学
CIS等化合物系太陽電池	事業名：CIGS薄膜太陽電池モジュールにおける低コスト化技術の開発 実施者：(共同研究先) ホンダソルテック
	事業名：CZTS薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発 実施者：(委託先) 昭和シェル石油、産業技術総合研究所、鹿児島大学、筑波大学、龍谷大学 (再委託先) 東京工業大学、立命館大学
共通基盤技術	事業名：次世代長寿命太陽電池モジュールの研究開発 事業者：(共同研究先) 日清紡ホールディングス株式会社、ポリプラスチック株式会社
	事業名：ドレスト光子利用太陽電池技術の研究開発 事業者：(委託先) ナノフォニクス工学推進機構、三菱化学株式会社、東京大学

2.3.4 他のプロジェクトとの連携促進

相乗効果を期待して、有機太陽電池分野について他のプロジェクトと下記の連携を行っている。

○「最先端研究開発支援プログラム-低炭素社会に資する有機系太陽電池の開発」と適切な分担と連携を行っている。また国際シンポジウムを相乗りで実施し、相互討論を促進している。

○軽量・フレキシブル性といった設置特性、弱い光や、浅い入射角でも発電するといった発電特性、透明性やカラフル性といったデザイン特性を活かして、これまで太陽光発電の導入が進んでいない分野での市場開拓を狙うことを主眼とし、平成24年度から「有機系太陽電池事業化先導技術開発」を開始。本プロジェクトからは、シャープ、フジクラが参画し、実製品ベースの太陽光発電システムを開発、実証をすることで、用途開拓を進めている。

○有機太陽電池の性能評価法・耐久性評価法の開発とその国際標準化については、本プロジェクトの評価技術開発チームと最先端研究支援プログラムの計測・標準化分科会とが相互で連携している。

3. 情勢変化への対応

○発電量予測技術開発において、平成23年度までの成果として、日射量から結晶シリコン太陽電池モジュールの発電量を5%以内の精度で予測可能とするなどの成果が得られた。また、昨今の太陽光発電への期待や全量買い取り制度の施行に伴い、発電量予測に対する需要が急激に高まっている。これらを受け、産業技術総合研究所に対して予算を31百万円増額し、膨大なデータ処理を必要とする気象パラメータの分析を高速に処理する分析装置を導入することにより、発電量予測モデル構築のための研究開発を加速させた。

○世界の太陽光発電市場の急拡大に伴い、世界規模で熾烈な開発競争が繰り広げられている。世界競争に打ち勝っていくための競争力を高めるため太陽電池の更なる高効率化・低コスト化に加え、太陽電池に係る新たな部材の開発等に取り組む必要が生じた。そこで、2012年6月に13.8億円（契約予定額[平成24年度分]）の追加公募を実施し、重要課題の7件を採択した。

Ⅲ. 委託テーマの成果詳細と実用化・事業化の見通し

1. 事業全体の成果

(イ) 結晶シリコン太陽電池

表 Ⅲ-1-(イ)(1) 基本計画の達成目標と委託テーマの関係

		委託テーマ				
		A. 極限シリコン結晶太陽電池の研究開発	B. マルチワイヤーソーによるシリコンウェハ切断技術の研究開発	C. 太陽電池用ポリシロンのシリコン原料転換の研究開発	D. 太陽電池用シリコンの革新的プロセスの研究開発	
基本計画の達成目標	コスト低減	i) 結晶シリコンを安価に製造する技術の開発 結晶シリコンを安価に製造する技術を開発し、シリコンの製造コスト等を試算する。	○		○	○
		ii) カーフロス120 μ m未満、または、カーフロスを生じない新たな製法開発	○	○		
	高効率化	i) 厚さ100 μ m未満、15cm角程度のセル変換効率20%以上、モジュール変換効率18%以上	○			
		ii) 高品位シリコン製造技術 キャリア寿命100 μ sec(拡散長約1mm)以上 シリコン純度6N以上	○		○	

A. 結晶シリコン太陽電池

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
コスト低減			
i) 結晶シリコンを安価に製造する技術の開発 結晶シリコンを安価に製造する技術を開発し、シリコンの製造コスト等を試算する。	製造コストの試算、並び、不純物の分析の結果、低コストで原料シリコン製造の可能性を明らかにした。 具体的には、純度 99%以下の国産原料を 99.5%以上に精製できること、及び、本原料が低コスト Si 原料として使用できることを明らかにした。	◎	
ii) カーフロス 120 μm 未満、または、カーフロスを生じない新たな製法開発	ダイヤモンド固定砥粒マルチワイヤ法により、ウェハ厚 120 μm、カーフロス 100 μm を実現した。	◎	
高効率化			
i) 厚さ 100 μm 未満、15cm 角程度のセル変換効率 20% 以上、モジュール変換効率 18% 以上	プラットフォームにおいて、100μm 厚の太陽電池の製造プロセスを確立した。 <シャープ> バックコンタクト太陽電池セルを試作し、90mm 角 (81cm ² , 220・m 厚) で変換効率 22.1% (J _{sc} : 40.8mA/cm ² , V _{oc} : 671mV, F.F. : 0.809) を達成。 <三菱> レーザー加工技術を用いた逆ピラミッド型 TEX の形成について要素技術の開発を完了した。基板ライフタイムの改善など要素技術の完成度の向上を実施中。 めっき技術を用いた細線電極形成技術に関して、初期基本性能を確認した。コンタクト抵抗の改善などセル化技術の適用性向上を実施中。	<シャープ> セル変換効率: ◎ 基板厚さ: △ サイズ: △ モジュール効率: △ <三菱> △ 平成 24 年 12 月達成予定	

ii) 高品位シリコン製造技術 キャリア寿命 100 μ sec (拡散長約 1mm) 以上 シリコン純度 6N 以上	炭素濃度低減により ($<2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$) 結晶欠陥密度が低減し、キャリア寿命が 200 μ sec を達成した。 <九州大学> 九大が新提案した不純物低減方法と seed cast 法を用いて NIMS、明治大学、豊田工大が共同で結晶育成を行なった結果、拡散長 1 mm 以上の結晶育成に成功した。	◎ ○	今後 50cm 角の大型結晶で実証
---	--	--	-------------------

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

B. マルチワイヤーソーによるシリコンウェハ切断技術の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
コスト低減			
ii) カーフロス 120 μ m 未満、または、カーフロスを生じない新たな製法開発	カーフロス < 120 μ m	○	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

C. 太陽電池用ポリシリコンのシリコン原料転換の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
コスト低減			
i) 結晶シリコンを安価に製造する技術の開発 結晶シリコンを安価に製造する技術を開発し、シリコンの製造コスト等を試算する。	・シリカ塩化の生産性 0.7 トン-SiCl ₄ /m ² /h 以上 シリカ塩化反応において、生産性は 0.79 に達し、さらに、高効率化試験においては、0.88 の値を得た。	◎	
高効率化			
ii) 高品位シリコン製造技術 ・四塩化珪素の品質 純度 6N 以上 ・シリコン単結晶の品質 10 $\Omega \cdot \text{cm}$ 以上	・四塩化珪素を精留し分析した結果から、純度は 99.9999% 以上 (6N 以上) になった。 ・シリコン製造装置により、精留四塩化珪素からシリコンを製造し、単結晶評価を行った結果、N 型で 30 $\Omega \cdot \text{cm}$ の抵抗値を得た	○ ○	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

D. 太陽電池用シリコンの革新的プロセスの研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
コスト低減			
i) 結晶シリコンを安価に製造する技術の開発 B・Pが1ppm以下のSOG・Siが2000円/kg以下で製造する技術を開発する	<ul style="list-style-type: none"> 高純度原料の開発 目標純度 (B, P<1ppm) を満たす原料を開発し、その量産技術 (3.6t/年) を確立した。モデルプラントを設計し、製造コストを試算し、課題を明確にした。 シリカの直接還元プロセスの開発 ①シリカ、炭素の混合比の最適化を行い、②ハイブリッド加熱法の開発に成功した (1900℃以上) ③従来方法より高い収率でSiを製造できることを確認 Si精製プロセスの開発 フラックス中にPを還元する新手法を開発し、酸浸出処理を組み合わせることで、目標脱P率に近い96%を達成した。また、強還元雰囲気でもフラックス処理により50%の脱B率を確認 	<p>○</p> <p>△</p> <p>平成 24 年 12 月 達成予定</p> <p>△</p> <p>平成 24 年 12 月 達成予定</p>	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

(ロ) 薄膜シリコン太陽電池

表 III-1- (ロ) (1) 基本計画の達成目標と委託テーマの関係

		委託テーマ			
		A. 次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による開発 (高効率化)	B. 次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による開発 (大面積化)	C. 高度構造制御薄膜シリコン太陽電池の研究開発	D. 薄膜シリコンフィルム太陽電池の高速製膜技術の開発
基本計画の達成目標	i) 高効率化 30cm×40cm 程度の基板に製膜した2接合以上の多接合シリコン太陽電池においてモジュール変換効率13%以上 (安定化効率)	○		○	
	ii) 製造コスト低減 装置の設計・作製と条件出しを完了し、任意サイズの基板において製膜速度1.0nm/sec以上を達成		○		○

A. 次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による開発（高効率化）

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
アモルファスシリコントップセルで安定化効率11%以上	<p>トライオード成膜法により作製した光安定化膜により、i層250nmにおいて、初期効率10.7%、安定化効率9.6%を得た。（劣化率～10%）</p> <p>また、エッチングガラス基板によるダブルテクスチャTCOにより、i層300nmにおいて、初期効率11.7%、短絡光電流17mA/cm²、安定化効率9.6%を得た。</p>	△	<p>・主にトライオード成膜光安定化膜技術とダブルテクスチャTCO技術の融合による高電流・高安定効率化</p> <p>・p/i界面バッファ層への光安定化</p> <p>を実施し、中間目標を達成する予定である。</p>
<p>微結晶シリコン或いは微結晶シリコンゲルマニウム単接合で短絡電流32mA/cm²以上（従来構造に比して同一セル構成で10%以上の短絡電流の向上技術を含む）</p>	<p>Ge濃度10-30%とした微結晶SiGeのセルで、酸素添加により短絡電流密度を5mA/cm²改善し、厚さ3.4μm、Ge濃度10%で27.5mA/cm²を得た。</p> <p>また、新規開発ハニカムテクスチャ型反射基板を用いたサブストレート型μc-Si単接合セル（膜厚2μm）において、短絡電流密度27.7mA/cm²、逆バイアス電圧下の量子効率スペクトルでは28.9mA/cm²を得、従来構造に較べて4mA/cm²程度の向上を実現した。</p>	△	<p>微結晶シリコンゲルマニウム膜のハニカムテクスチャ基板、ダブルテクスチャTCO基板への適用</p> <p>・表面TCO、裏面電極、ドーピング層の寄生吸収ロスを低減</p> <p>・ハニカムテクスチャ技術の透明樹脂やバックシート転写等によるスーパーストレート構造への展開</p> <p>を実施し、中間目標を達成する予定である。</p>

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

B. 次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による開発（大面積化）

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
従来に無い新規なカソード電極を用い、VHF プラズマ周波数(60MHz 以上)に対応する波長 λ に対して長さ $1/4 \lambda$ 以上、幅 $1/10 \lambda$ 以上の電極を用いて μ c-Si 薄膜の製膜速度 1.5nm/s 以上、 $\pm 10\%$ 以下の膜厚均一性を達成しうる、 $\pm 10\%$ 以内のプラズマパラメーターの均一性	共振電極対アレイ方式を用いた可視化装置 (2.2m \times 0.56m 電極)にて、長辺方向に定在波が立たない事を目視確認し、H ₂ プラズマの OES 計測にて、H α 強度： $\pm 9.85\%$ 以下、電界強度： $\pm 8.8\%$ 以下達成。また、短辺均一性に関しては、短辺均一性に関しては、十分な均一性目視確認済	○	
マルチロッド電極を用いた第 5 世代(以下、G5)相当サイズ(1.1m \times 1.4m)のガラス基板を処理可能な規模の装置において、 μ c-Si 製膜において $\pm 10\%$ 以下の膜厚均一性	従来よりも高度な制御法を適用した位相変調法により平均製膜速度 2nm/sec 以上で膜厚分布 $\pm 9.9\%$ を達成。 (検討開始時の膜厚分布 $\pm 15\%$)	○	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

C. 高度構造制御薄膜シリコン太陽電池の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
サブモジュール (モジュールサイズ 20cm×20cm) にて安 定化効率 15%	<ul style="list-style-type: none"> ・変換効率が 7%向上する新規 低空間指向性光閉じ込め基板 を開発した。(従来基板 7%up) ・新規欠陥低減処理により、3 接合セルの光安定化後の保持 率が 97%に向上。(処理無し 93%) 	△	<ul style="list-style-type: none"> ・透明電極凹凸形状制御技術 の 3 接合への適用。 ・ミドル層の高品質化 ・今後は大面積化に注力
実機サイズモジュー ル (モジュールサイ ズ 980×950mm) にて 120W	<ul style="list-style-type: none"> ・世界で初めて中間層を有す る大面積 3 接合モジュール (a-Si/中間層/a-SiGe/中間層 /μc-Si) を作成した。 ・980×950mm : 115W相当 ・1420×1100mm : 作製 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・透明電極凹凸形状制御技術 ならびに新規欠陥低減処理技 術の大面積化

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

D. 薄膜シリコンフィルム太陽電池の高速製膜技術の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
①フィルム基板上にシリコン系薄膜を積層した多接合太陽電池において、変換効率が 14%以上（初期）または 13%以上（安定化）とする。このときの製膜速度を結晶質シリコン系薄膜で 2.0nm/s 以上、非晶質シリコン系薄膜で 0.67nm/s 以上とする。	①フィルム基板上にアモルファスシリコン (a-Si:H) と微結晶シリコン (μ c-Si:H) のセルを積層した多接合太陽電池において、3 接合太陽電池で初期効率 12.6%、安定化効率 11.6%を得た。このときの a-Si:H の製膜速度は 0.83nm/s、 μ c-Si:H は 2.0nm/s である。	△	
②このために、結晶質シリコン系単接合太陽電池において、その発電層の製膜速度が 2.0nm/s 以上で変換効率を 9.5%以上とする。	②フィルム基板上的 μ c-Si:H 単接合太陽電池において、製膜速度を 2.2nm/s として変換効率 9.5%を得た。	○	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

(ハ) CIS・化合物系太陽電池

表 III-1- (ハ) (1) 基本計画の達成目標と委託テーマの関係

		委託テーマ		
		A. CIS系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発	B. フレキシブルCIGS太陽電池モジュールの高効率化研究	C. 反射式集光型太陽光発電システムの研究開発
基本計画の達成目標	i) CIS系高効率化サブモジュール(30cm角程度)で変換効率17%以上を達成する。	○		
	ii) CIS系製造プロセスの開発 軽量基板上での製造技術や、新規な低コスト製造プロセス等により製造したサンプルを供試する。達成目標は単位出力当たりの製造コスト等で表す。		○	
	iii) 集光型太陽電池の低コスト化開発 開発した光学系や追加架台等を用いたモデルシステムを実際に建設し、そのコストを基にプラント建設コストを算出する。達成目標は例えば単位面積当たりの建設コストで表す。			○

A. C I S系薄膜太陽電池の効率化技術の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
①「C I S系薄膜太陽電池の効率化技術の研究開発（大面積モジュールの研究開発）」 （H24年度末中間目標） 30cm角程度のサブモジュールで変換効率 17%	社内測定にて中間目標を大幅に超え、最終目標まであと少しとなる 17.8% を達成した。また外部評価機関（TUV）において 17.5%（30cm角サブモジュール）を公認している。	◎	
②「C I S系薄膜太陽電池の効率化技術の研究開発（小面積セルの研究開発）」 （H24年度末中間目標） 1cm角程度の小面積セルで変換効率 22%	ZnO:Al/CdS/CIGS/Mo/glass 構造セルで 18.8%（真性変換効率 19.7%）、ZnO:B/ZnS(0,0H)/CIGS/Mo/glass 構造セルで 18.4%（真性変換効率 19.3%）を達成した。	△	禁制帯幅プロファイルの最適化、界面および粒界再結合の低減、アルカリ金属添加技術の開発により目標を達成。

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

B. フレキシブル CIGS 太陽電池モジュールの高効率化研究

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
<p>「CIS 等化合物系高効率化」 フレキシブルサブモジュールにて下記、変換効率を達成する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・10×10cm 基板サイズにて変換効率 17% ・30×30cm 基板サイズにて変換効率 16% 	<ul style="list-style-type: none"> ・H24 年 3 月時点で 10×10cm 基板サイズにて変換効率 15.9%を達成し、フレキシブル基板向けの成膜プロセス、集積化プロセスの技術構築を完了した。 ・30×30cm 試作ラインは各工程の立ちあげが完了した。 ・要素的に高効率化技術に取り組み、ガラス基板上の小面積ながらセル特性で 19.8%、サブモジュールにて 17.1%という高い変換効率の実現に成功した。 	△	高効率化の要素検討結果を大面積サブモジュールに展開することにより、本年度中に達成見込みである。
<p>「CIS 等化合物系製造プロセスの開発」 フレキシブルCIGS太陽電池の製造技術を構築する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CIGS 工程までをロール to ロールプロセス化 ・CIGS 光吸収層の高速成膜技術の構築 	<p>CIGS 光吸収層の成膜工程までのロール to ロールプロセス化を完了させた。また後半工程の大面積バッチプロセスも立ちあげを完了した。高生産性課題として CIGS 層の高速成膜に取り組み、課題であった電流リークの原因を突き止め、これを解決するプロセスを開発した。</p>	○	30×30cm 基板へのプロセス均一性を向上させ高効率化を実現するとともに、高歩留まり、高スループットを実現する技術構築に取り組んでいく。

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

C. 反射式集光型太陽光発電システムの研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
「集光技術」 集光倍率>500倍、 光学効率>70%、 モジュール効率>25%、 許容角>±1° 放熱技術 機構技術	集光倍率：640倍 光学効率：82% モジュール効率：27% 許容角 >±1.33° 放熱技術、機構技術の見通し	○	
<ul style="list-style-type: none"> ・実証データ取得 ・コスト試算 	<ul style="list-style-type: none"> ・実証データ未取得 ・設備コスト試算：4億円/MW (コスト競争力が課題) 	△ △	今後の課題 <ul style="list-style-type: none"> ・実証試験継続 ・低コスト化

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

(二) 色素増感太陽電池

表. III-1-(二)(1) 基本計画の達成目標と委託テーマの関係

		委託テーマ		
		A. ガラス基板型色素増感太陽電池（電圧型）の研究開発	B. ガラス基板型色素増感太陽電池（電流型）の研究開発	C. プラスチック基板型色素増感太陽電池の研究開発
基本計画の達成目標	i) 高効率化	○	○	○ (プラスチック基板のため、自主目標を設定)
	ii) モジュール化・耐久性向上	○	○	○ (プラスチック基板のため、自主目標を設定)

A. ガラス基板型色素増感太陽電池（電圧型）の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
(1)-1 高効率化（セル） 中間目標 変換効率 11%（1cm 角程度）	<ul style="list-style-type: none"> 変換効率 11.0% (1cm 角 AIST 測定)達成 変換効率 11.6%(新規色素) (1cm 角 自社測定) 達成 ΔG 低減可能材料の設計指針の確立 	○	なし
(1)-2 高効率化（モジュール） 中間目標 モジュール変換効率 7%（30cm 角程度）	<ul style="list-style-type: none"> 変換効率 9.1% (20cm 角 自社測定)達成 変換効率 9.0% (15cm 角 AIST 測定)達成 	◎	なし
(2)モジュール化・耐久性向上 中間目標 JIS C8938 試験（A-2,A-5,B-2）後の相対効率低下 10%以下	<ul style="list-style-type: none"> （A-2）変換効率 7%サブモジュールで低下率 10%以内を達成 （A-5）7%サブモジュールで低下率 10%以内を達成（見込み） （B-2）B-1 試験で、7%サブモジュールで低下率 10%以内を達成（見込み）。 	△	30cm 角程度のモジュールでの実証。

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

B. ガラス基板型色素増感太陽電池（電流型）の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
(1)-1. 高効率化（セル） 中間目標 変換効率 11%（1cm 角程度）	5 mm 角セル(自己測定) : 11.8% 1 cm 角セル(AIST 測定) : 10.5%	○	今後、5 mm 角の最適化条件での AIST 測定を実施予定。
(1)-2. 高効率化（モジュール） 中間目標 モジュール変換効率 7% (30cm 角程度)	25 cm 角のモジュールにてアパーチャー変換効率 7.4%を達成。	○	より大面積のモジュールとして 50 cm 角を検討中。50 cm 角での変換効率は、 $\eta(ap) = 6.7\%$ 。
(2) モジュール化・耐久性向上 中間目標 JIS C8938 試験後の相対効率低下 10%以下 (温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験)	アパーチャーでの変換効率 7.2%の 25 cm 角のモジュールにて、JIS C8938 試験で最も性能維持が困難な耐湿性試験 (85°C 85%RH, 1000 時間)での性能低下 3%を達成。	◎	JIS C 8938 各試験での性能低下はほぼ抑えることに成功。今後、複合条件やより長期の試験も検討していく。

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

C. プラスチック基板型色素増感太陽電池の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
フィルム型色素増感太陽電池において 中間目標(自主設定) ・モジュール効率 5% ・JIS 規格の環境試験、耐久性試験において相対効率低下 10%以内	・モジュール効率 4%達成 (100cm ²) ・耐久性は屋内日常使用レベル (60°C90%RH1000 時間) を達成し、屋外使用に向けて対策中。 ・モジュール製造技術を確立し、住宅用実証評価やユーザーヒアリングによる実市場調査を開始。	△	フィルム型としては世界最高レベルの技術を達成。

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

(ホ) 有機薄膜太陽電池

表. III-1-(ホ)(1) 基本計画の達成目標と委託テーマの関係

		委託テーマ	
		D. 汎用型有機薄膜太陽電池の研究開発	E. 蓄電機能付有機薄膜太陽電池の研究開発
基本計画の達成目標	i) 高効率化	○	○ (蓄電機能付き室内向け太陽電池のため、自主目標を設定)
	ii) モジュール化・耐久性向上	○	○ (蓄電機能付き室内向け太陽電池のため、自主目標を設定)

A. 汎用型有機薄膜太陽電池の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
①セル変換効率 8%以上 (1cm角程度)	長波長域まで光を吸収するp型材料開発による高 J_{sc} 化、低HOMO化p型材料・高LUMO化n型材料開発による高 V_{oc} 化、ナノ相分離構造の最適化による高FF化を図り、1cm角シングルセルの変換効率で9.0%を達成した。 また、コンソーシアム内の連携により、吸収波長分割によるタンデム型素子を検討し、高分子-高分子タンデムで9.1%、高分子-低分子タンデムで8.2%を達成した。	◎	
②モジュール変換効率 6%以上 (30cm角程度)	塗布においては、シミュレーション技術活用による高開口率モジュールの設計、絶縁層挿入によるリーク電流の抑制並びに印刷精度向上により、20cm角モジュールで変換効率6.6%を達成した。シミュレーションにより30cm角モジュールでも6%以上に達すると予測している（予測値6.5%）。 蒸着でも同様なアプローチで開発を進めており、20cm角モジュールで4.6%を確認した。高効率セル構成を適用して、目標を達成する見込みである。	○	モジュール変換効率6.6%は世界最高。 (公式世界記録は4.2%)
③JIS規格C8938の環境試験・耐久性試験（温湿度サイクル、耐熱性、耐湿性、温度サイクル、光照射の各試験）において相対効率低下10%以内	コンソーシアム内の連携により、測定条件の統一、共同実験を進めている。2項目で目標を達成した。目標未達の項目については、封止技術の改良、耐熱材料の開発、プロセス雰囲気制御などで目標を達成する見込みである。 温度サイクル試験：低下9%（達成） 温湿度サイクル試験：低下5%（達成） 光照射試験、耐熱性試験、耐湿性試験は低下率が10%以上となり、目標未達。	△	H25年2月達成予定

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

B. 蓄電機能付有機薄膜太陽電池の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度*1	コメント
A. 変換効率向上 可視光下*2 変換効率 20% (出力: 12 μW/cm ² の実現)	・変換効率 10.5% (6.1 μW/cm ²) 実現 ・20%達成要件を平滑電極にて実証 (Voc=950mV, Jsc=0.2 μA/cm ²)	△	H24年12月達成 予定
B. 耐久性向上 JIS C8938 試験での相対 効率低下10%以内の実現	・高 Voc 相対効率低下 10%以内実現 ・電解液保持率*3 95%の実現	△	H24年12月達成 予定
C. 低コスト化 ・塗布工法での透明導電 膜基板*4 (80%T, 10 Ω/ □) ・空隙率 80%以上の多孔 質集電極*5 の作製技術 開発)	・40%T10 Ω/□実現。シリカナノ粒子 の基板上への高密度配置と高分散性 の両立が課題 ・89%空隙率実現。孔径分布と素子特 性との相関把握。	△ ◎	H24年12月達成 予定 (変換効率実証 に活用)
D. 蓄電機能付与 ・1.26mWh の蓄電機能実 現のための材料技術開発	・ラジカルポリマーで 1.32mWh 実現 ・急速放電 (100mA) に優れた特性実 証	◎	(デモ品駆動に よる有効性実 証)

*1 達成度

大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

*2 可視光下：照度 200Lx、光波長範囲 400～700nm での光エネルギー 57.7 μW/cm²

*3 電解液保持率：(加速試験後の電解液量/加速試験前の電解液量) × 100

*4 透明導電膜：透光性 (透過率：%T) と導電性 (シート抵抗：Ω/□) とを兼ね備えた膜

*5 多孔質集電極：nm～サブ μm オーダーの導電性粒子から構成した多数の空隙を持つ電極

(へ) 共通基盤技術

表 III-1-(へ)(1) 基本計画の達成目標と委託テーマの関係

		委託テーマ					
		A. 超ハイガスバリア太陽電池部材の研究開発	B. ロールツーロールプロセスを可能とする封止材一体型保護シートの研究開発	C. 太陽光発電システムの据付工程簡便化に関する研究開発	D. 発電量評価技術等の開発及び信頼性及び寿命評価技術の開発	E. PVシステム汎用リサイクル処理手法に関する研究開発	F. 太陽光発電技術開発動向等の調査
基本計画の達成目標	i) 発電量評価技術の開発 イ) 発電量評価 ロ) 太陽電池の評価技術				○		
	ii) 信頼性及び寿命評価技術の開発				○		
	iii) リサイクル・リユース技術の開発				○ (リユース)	○ (リサイクル)	
	iv) 共通材料・部材・機器及びシステム関連技術開発	○ (超ハイガスバリアフィルム)	○ (封止材一体型保護シート)	○ (据付部材、モジュール構造)			
	v) I E A国際協力事業及び標準化支援事業等 ・技術動向や政策動向等を調査・分析						○

A. 超ハイガスバリア太陽電池部材の研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
超ハイガスバリア太陽電池部材の基本構成確立	<ul style="list-style-type: none"> ・Cat-CVD とシリカ蒸着の複合膜による超ハイガスバリアフィルムの基本構成を確立 ・耐候性バックシート、フロントシートの基本構成を確立 ・耐熱性耐候性基材の基本構成を確立 	○	2012/8 中に外部評価機関にて水蒸気透過 10^{-6} g (m ² ・day) 以下評価判明の見込。耐候性、耐熱性とも目標達成。

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

B. ロールツーロールプロセスを可能とする封止材一体型保護シートの研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
ロールツーロールプロセス対応薄膜シリコン太陽電池用一体型保護シートおよび封止技術の確立	<p>①薄膜シリコン太陽電池用一体型保護シート品質の実現</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ロールツーロールプロセス対応薄膜シリコン太陽電池用一体型保護シートの基本構成を確立 ・ロールラミネート封止技術世界初となるロール封止に成功 <p>②リジッド太陽電池用封止材品質の実現（平成24年度追加）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・封止速度の高速化封止速度従来技術の20倍達成 長期信頼性（促進1000時間）に合格 	○	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

C. 太陽光発電システムの据付簡便化に関する研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
<ul style="list-style-type: none"> ・据付部品の機能複合化による部品点数の削減および据付作業時間の低減の最終目標値の確定と、使用材料の10～20年相当以上の耐久性を実証 ・据付工法の自由度を向上する新規モジュール構造の実現とその耐久性についての基礎検討を完了 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボルトナットレスで部品点数が最大62%削減された据付部品プロトタイプの開発 ・部品点数削減率：50%以上および据付作業工程低減率：20%以上を最終目標値とすることの妥当性を確認 ・機能複合化据付部品材料の耐久性をIEC61730 準拠の火炎伝搬試験、高温高湿試験により確認 ・従来ガラス/ガラス構造のモジュールと比較して最大50%の軽量化が可能な新規モジュール構造を実現 ・IEC61215 準拠の高温高湿試験・温度サイクル試験を実施し、耐久性の基礎検討を完了 	◎	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

D. 発電量評価技術等の開発及び信頼性及び寿命評価技術の開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
I) 発電量評価技術の開発 イ) 発電量評価 ・スペクトルを含めた日射量のデータベースを構築するためのモデルを開発、データを取得する。 ・地域の日射量・気象データから発電量を推定する技術を開発するための測定法、算出法および予測法の基本技術開発を行う。	・約50地点1年分の日射スペクトルデータを2013年2月に完成見込み。 ・日射量、気象データから結晶Si太陽電池の発電量を5%未満の精度で推定する測定法及び算出法を開発・検証した。当日の日射量・気象データから特定地域の翌日の発電量を予測する技術を開発した。	○	
ロ) 太陽電池の性能評価 ・実効性能評価技術：光照射効果（1年以上）を考慮した実効性能評価技術を確立するために、光照射条件、温度等の影響を定量化する。 ・高精度屋外性能評価技術の開発：測定再現性2%以内の評価方法を確立するために、主な誤差要因を実測により解析、検証する。 ・各種新型太陽電池評価技術：高精度評価のための基礎データを収集、分析、評価し、必要に応じ規格化を図りつつ基本的評価手法を検討する。 ・基準太陽電池校正技術：WRRファクター0.5%以内の構成技術を開発するための要素技術を開発する。 ・絶対分光感度法による一次基準セル校正の要素技術を開発する。 ・二次基準モジュールの校正不確かさ1.0%以内の要素技術を開発する。	・IEC規格等に定められた光照射条件の影響を定量化した。各種太陽電池モジュールの分光感度温度依存性を測定できる技術を開発した。 ・現状の屋外性能評価技術において、Isc測定誤差（1～3%）、次いでVoc（～1%）が重要なことを明らかにした。 ・NEDO開発品等新型太陽電池の測定約190件を実施、高精度化のための要素技術を開発した。IEC規格60904-8（分光感度測定法）等を開発成果を標準化にむけ提案。モジュール国際比較測定等により、国際整合性を検証。 ・精密構造型WRR絶対放射計を実現し、性能を実証。超高温定点黒体炉併用により不確かさを低減する。 ・トラップディテクタと基準波長レーザの組み合わせで絶対分光感度測定5波長を達成見込み。 ・二次基準1セルモジュール校正の不確かさ0.90%の要素技術を開発した。	○	
II) 信頼性評価技術と長寿命化技術の開発 ・20～30年の屋外曝露に相当する屋内での寿命評価試験実現のための基本的な評価技術を開発し、規格化に向けた技術要件を整理する。 ・工程管理での信頼性確保、簡易に寿命を判定するための要素技術を開発する。 ・モジュールやシステムの屋外曝露試験および劣化状況に関するデータを収集、分析を行い、劣化要因を抽出する。	・国内外のPVシステムの点検技術開発、文献調査、事例収集および試験結果を元に、劣化事象の発生要因を推定する。 ・新規加速試験技術としてサイクリック試験、逆バイアス定電流試験を検討すると共にモジュール内水蒸気進入経路調査方法等の実験・評価を行い、信頼性評価・長寿命化への有用性を確認した。 ・高信頼性PVシステムを実現のための技術課題を明らかにする分科会による調査を実施する。	○	
III) リユースモジュール健全性試験技術 ・リユースモジュールに要求される絶縁性能ガイドライン案の策定に必要なデータを提供する。	・リユースモジュールが具備すべき最も基本的な要求である絶縁性能の要求値の決定を目標とし、必要なデータを収集した。	△ 24年度中に達成見込	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

E. PV システム汎用リサイクル処理手法に関する研究開発

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
広域対象の PV システム汎用リサイクル処理手法の基本技術、コスト目標、社会システム提案の見極め完了と LCA 評価見直し完了	<ul style="list-style-type: none"> ・低コスト汎用リサイクル処理技術の基本技術開発の見通しを取得 ・処理コスト目標「5 円/W@年間 200MW 処理」の実現妥当性について専門委員会で検討完了 ・広域 PV システム汎用リサイクル処理に必要な社会システム整備に関する必須事項を専門委員会で議論済み ・LCA 評価見直しほぼ完了 (H25 年 3 月完了予定) 	○	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

F. 太陽光発電技術開発動向等の調査

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
「太陽光発電技術開発動向等の調査」 諸外国の技術動向や政策動向等を調査・分析し、諸外国の動向を把握した上で、技術開発の方向性や、分析・評価手法の開発方針等を明確にする。	太陽光発電に関する次期技術開発計画の検討に資するよう、最新の国内外の技術開発動向、諸外国の国家プロジェクト等について国際会議や学会、直接ヒアリング等から調査・分析し、技術開発動向を体系的に把握、纏めた。	○	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

2. 研究開発項目毎の成果と実用化見通し

(イ)結晶シリコン太陽電池

A 極限シリコン結晶太陽電池の研究開発

1. 成果詳細

〈豊田工業大学〉

①試作ライン構築

新規のプロセスや材料の評価には、個々の要素としての評価に加えて太陽電池の性能面からの評価が必要不可欠である。そこで結晶系シリコン太陽電池を試作する工程に必要な装置を導入し結晶シリコン太陽電池の試作ラインを構築する。加えて、次世代の太陽電池の試作に必要な評価装置、プロセス装置を立ち上げ、高効率低コスト太陽電池の試作評価が可能な環境を整備する。

具体的には、豊田工業大学が有するクリーンルームの一部改造、ならびに洗浄装置、酸化炉、拡散炉、常圧 CVD、パッシベーション用プラズマ CVD 装置、スクリーンプリント装置、焼成炉、電極形成用スパッタ装置、高速熱処理装置、印刷ライン、洗浄ユニット等の装置の立ち上げを行う。加えて、コンフォーカル顕微鏡、シート抵抗測定装置、などを導入し、評価体制も整える。その結果、本コンソーシアムにおいて標準となる太陽電池の試作ラインを整備し、その特性を評価できるようにする。

ラインの構築に関しては、基板洗浄・基板エッチング・テクスチャー形成用のドラフト（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(1)）、接合形成のための P 拡散・B 拡散・熱処理炉（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(2)）、常圧 CVD（大気圧化学気相成長）装置（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(3)）、SiN パッシベーション膜堆積用プラズマ CVD 装置（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(4)）、ならびにスパッタ装置（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(5)）をクリーンルーム内に設置した。これにより、太陽電池製造工程をクリーンルーム内で行うことができる。クリーンルーム内の装置配置を図Ⅲ-2-(イ)-A-1(9)に示す。電極形成に関しては、スクリーンプリント用の印刷機（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(6)）、ならびに焼成炉（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(7)）はクリーンルーム外の別の部屋に設置した。（印刷機にはクリーンブースを設けた。）その結果、印刷工程ラインが構築された。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(1) 基板洗浄用ドラフト



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(2) 熱処理炉



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(3) 常圧 CVD 装置



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(4) プラズマ CVD 装置



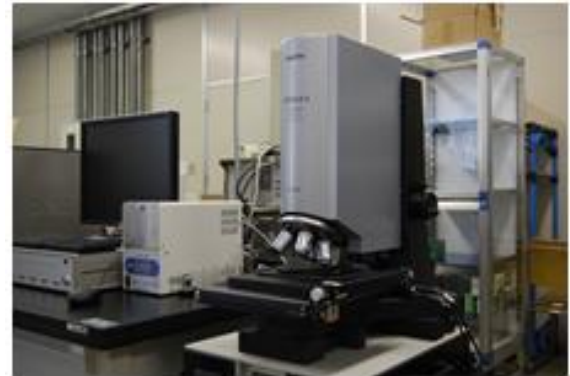
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(5) スパッタ装置



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(6) 印刷機



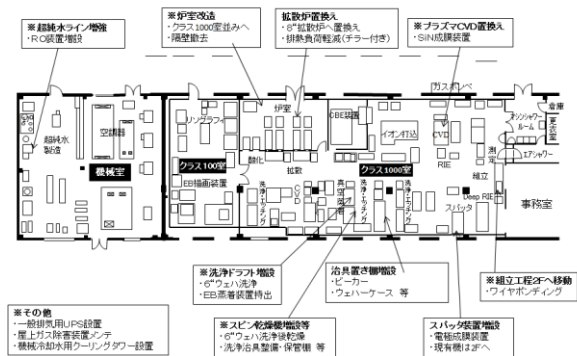
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(7) 焼成炉



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(8) コンフォーカル顕微鏡

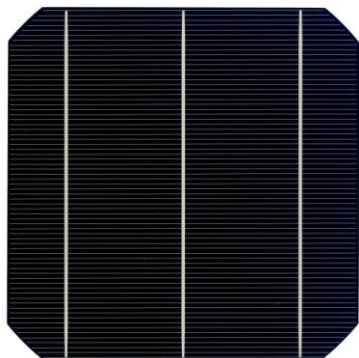
評価装置としては、ドーピング量を定量的に把握するための比抵抗測定装置の導入をした。また、明治大学が購入した線状の光を照射しCTの原理を用いることにより、変換効率に加えて開放電圧や短絡電流などの面内分布を測定できる装置の立ち上げを終了し、原料が太陽電池特性に与える影響などの評価を開始した。

以上の設備に加え、原料シリコンの品質改善を図るための、高速熱処理装置、また形成した電極形状を調べるためのコンフォーカル顕微鏡（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(8)）を導入した。



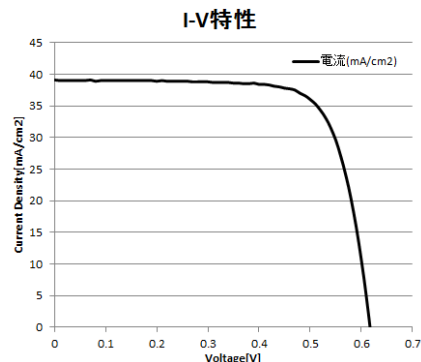
図III-2-(イ)-A-1(9) クリーンルーム内の装置配置

コンソーシアム参加組織の新規プロセスや材料を評価するための結晶シリコン太陽電池標準試作工程を整備した。標準工程は、1) 洗浄・テクスチャー形成、2) Pドーピング、3) SiNパッシベーション膜堆積、4) 表面Ag、裏面Alスクリーンプリント、5) 焼成、6) アイソレーション、のプロセスから構成されている。サイズとしては、156mm角(図III-2-(イ)-A-1(10))、125mm角を標準としている。現在、18%程度の変換効率を有する太陽電池の試作が可能である(図III-2-(イ)-A-1(11))。また、裏面コンタクトや裏面接合構造など、異なる構造の太陽電池の試作や新たな材料やプロセスへも対応が可能である。本ラインを試作プラットフォームとして使用した実績を表2にまとめる。



図III-2-(イ)-A-1(10)

豊田工大で試作した156mm角太陽電池



図III-2-(イ)-A-1(11)

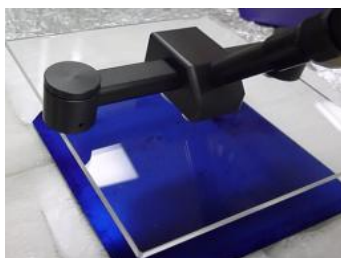
豊田工大で試作した太陽電池評価結果

表III-2-(イ)-A-1(1)2011年度装置利用実績

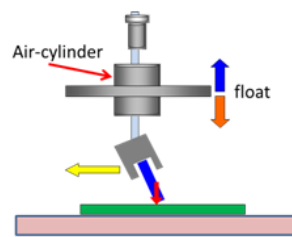
利用時間[h]	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
洗浄ドラフト	8	40	39	32	40	35	40	80	55	32	48	32
熱処理炉	8	48	20.5	32	40.5	36	40	100	64	48	48	32
常圧CVD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42
プラズマCVD	40	24	38	32	40.5	40	48	72	48	56	40	24
印刷機	0	24	20	69	81	81	48	72	40	80	52	32
焼成炉	0	8	0	6	7	9	16	52	20	24	44	30
pn分離	0	0	22	51	43	50	15	60	22	8	6	6
MP-15	64	24	0	8	32	8	20	32	16	24	24	27
ソーラーシミュレータ	-	-	-	-	-	-	10	56	32	40	48	16
コンフォーカル 顕微鏡	0	0	58	16	17	16	16	32	17	9	16	0
見学・下見	18人	40人	7人	0人	22人	0人	47人	4人	0人	9人	5人	8人

結晶シリコン太陽電池の低コスト化・高効率化において重要な技術の一つが薄型結晶を用いた太陽電池の製造である。薄型化によりシリコン使用量が低減され、かつ変換効率の向上が期待される。本プロジェクトにおいては、低コスト原料を用いて成長させた結晶を薄くスライスして得られたシリコン基板を用いた薄型結晶シリコン太陽電池製造技術の開発が目標の一つである。今年度、本プロジェクトの成果の一つとして、新規スライス技術により $100\mu\text{m}$ 程度の厚さの基板結晶が得られた。しかし、薄くした結晶基板を使用し、現状の技術で太陽電池を製造すると、洗浄、スクリーンプリントなどの工程や搬送中に基板が割れる問題が生じる。これら問題を解決するため、本プラットフォームにおいては、以下の技術開発を行った。搬送系に関してはベルヌーイチャック（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(12)）を用い、 $100\mu\text{m}$ 以下の薄い基板の搬送を可能とした。印刷技術に関しては、印刷時の割れの原因である高い印加圧力やその不均一を解消するため、エアバランスシステム（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(13)）を採用し均一で低い圧力下での印刷を可能とした。その他、広角メッシュの採用や、メッシュのカレンダー化（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(14)）などを行った。その結果、固定砥粒を用いたマルチワイヤソーで切断した薄型結晶を用いて $100\mu\text{m}$ 程度の厚さの結晶シリコン太陽電池の試作が可能となった。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(15)は、今回作製した $95\mu\text{m}$ 厚太陽電池である。

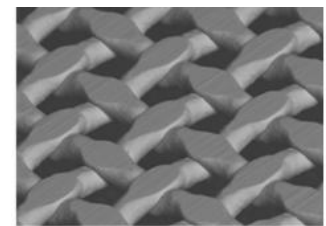
また、本コンソーシアムにおける ITRPV2020 目標に対する達成値を表Ⅲ-2-(イ)-A-1(2)に示す。



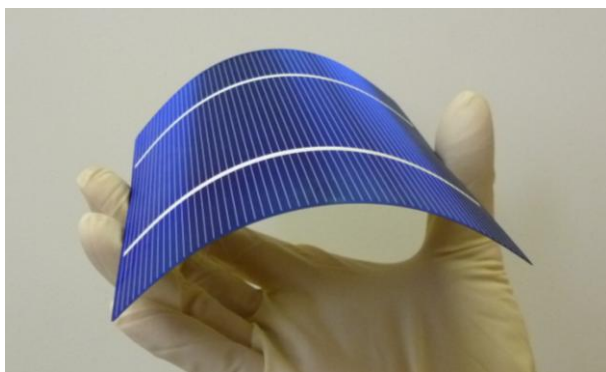
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(12)
ベルヌーイチャック



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(13)
エアバランスシステム



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(14)
メッシュのカレンダー化



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(15) $95\mu\text{m}$ 基板太陽電池

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(2) ITRPV2020 目標値に対する達成値

	ITRPV 2020 年目標	達成値
フィンガー幅	30 μ m	50 μ m \Rightarrow 30 μ m
エミッタ抵抗	120 ohm/sq	100ohm/sq \Rightarrow 120 ohm/sq
基板厚	120 μ m	120 μ m (太陽電池厚 < 100 μ m)
銀使用量	20mg/cell	\Rightarrow 銅

<新日本ソーラーシリコン>

(1) ソーラーグレード原料シリコンの分析評価に関わる研究開発

[開発の概要]

NEDO が目標とする 2020 年における太陽光発電コスト 14 円/kWh を達成するためには全ての太陽電池製造プロセスにおいてプロセスコストの低減を行わなければならない。太陽光発電システム次世代高性能技術の開発コンソーシアムでは All Japan 体制で低コスト・高性能太陽電池の開発を目指している。

本研究開発テーマでは太陽電池用ポリシリコンのコスト低減に向けて次の 3 つの取り扱い原料について原料段階での評価/選択を可能とする分析技術を確認するとともに限界仕様を検討することが目的である。

- 1) 直接塩化原料のシリカ (SiO₂) 調査と原料適性の評価、有望原料の確認
- 2) 金属シリコンおよびカーブシリコンの分析と適性評価
- 3) 中間原料のクロロシラン分析(直接塩化生成 SiCl₄ の適性評価)

これらの分析/評価を可能とするために、

- (1) 分析・評価項目と適切な分析装置の選定
- (2) 太陽電池用出発原料として適性を有する組成範囲を明らかにするためのサンプル収集と系統的な分析
- (3) 分析結果の解析による適合性あるサンプルの抽出と適合範囲の把握

などの研究開発を行った。

その結果、表Ⅲ-2-(イ)-A-1(3)に示すような分析装置を導入し、平成 23 年度末の段階で上記 1)~3)の評価が可能となる分析手法を確認することができた。

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(3) 本研究開発において用いた分析装置と H23 年度末における運用状

分析装置	区分	分析対象	導入年度	H23年度末到達状態
GC-FID	NEDOコンソ	クロロシラン中の有機クロロシラン	H22年	SiCl ₄ 分析に適用
ICP-MS	NEDOコンソ	全試料の金属不純物	H22年	シリカ、カーブSiに適用
FIA	NEDOコンソ	クロロシラン中のB	H23年	SiCl ₄ 分析に適用
IC	NEDOコンソ	クロロシラン中のP	H23年	SiCl ₄ 分析に適用
SEM/EDX	NEDO単独	固体試料の形態分析	H23年	シリカ、カーブSiに適用
示差熱	自社	固体試料の反応/相変態	--	シリカ、カーブSiに適用

また、シリカの調査により国内外のシリカ 30 サンプル、カーフ Si7 サンプル、弊社が単独案件テーマとして実施しているシリカの直接塩化試験で生成する SiCl_4 およびその比較サンプルなどを収集、分析することができた。更には収集シリカサンプルの形態分析などから鉱石段階で不純物除去のできる可能性がある国産シリカを見出しそのアップグレード方法についても検討を行った。

[成果]

収集したシリカサンプルの ICP-MS 分析を行い幅広い組成分布の試料が得られたことを確認した。

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(4) シリカサンプルの ICP-MS 分析結果一覧表

NO.	コン/No.	Li	Na	Mg	Al	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Sn	Pb	As
1	AB01	2.7	17	2	54	<50	200	0.3	1	26	<0.3	<7	<0.6	<0.6	0.1	<0.3	0.2	
2	AB02	2.2	20	6.2	61	<50	240	0.4	0.9	30	<0.3	<7	<0.6	3	0	<0.3	0.3	
3	AB03	2.1	21	4.7	81	<92	250	0.9	1.3	36	0.2	<3.4	0.5	0.6	0.0	<0.4	0.4	
4	AB04	3.2	18	4.6	160	<50	110	0.2	1.1	45	<0.3	<7	<0.6	3	0.1	<0.3	0.2	
5	AB05	5.1	22	6.8	240	<50	79	0.2	1.7	53	<0.3	<7	<0.6	<0.6	0	<0.3	0.4	
6	AB06	2.7	640	21	8600	<50	150	1.2	2.5	178	<0.3	<7	<0.6	1.3	0.1	<0.3	1.1	
7	AB07	3.3	12	4.4	110	<50	61	<0.2	1.6	40	<0.3	<7	<0.6	<0.6	0.1	<0.3	0.5	
8	AB08	5.3	36	40	600	<92	220	1.9	5.0	130	0.3	<3.4	1.1	1.4	0.1	<0.4	0.6	
9	AB10	4.8	15	6.3	140	<37	68	1.2	1.6	43	<0.4	3.6	<0.8	<0.7	0.0	<0.2	0.3	<0.3
10	AB11	5.7	22	6.8	240	<37	70	<0.4	1.1	36	<0.4	<2.8	<0.8	<0.7	0.0	<0.2	0.3	<0.3
11	AB12	1.4	30	1.0	22	<37	3.0	0.5	1.4	49	<0.4	4.4	<0.8	0.8	0.0	<0.2	<0.2	<0.3
12	DM01	11	173	720	3500	<50	190	19	330	2400	2.5	11	6	12	0	0.3	0.9	
13	DM03	6	370	340	2700	<50	130	3.3	380	1900	2.1	<7	1.9	11	0	<0.3	1.5	
14	DM04	17	5,200	630	28,000	260	480	6.7	93	6,400	1.8	<3.4	1.8	15	0.1	0.5	8.2	
15	DM05	13	1,900	170	8,500	<92	170	2.0	25	1,500	0.4	<3.4	0.8	5.5	0.1	<0.4	3.0	
16	DM06	17	5,800	640	28,000	260	500	13	87	6,100	1.7	3.8	2.4	16	0.1	0.6	10	
17	DM07	16	4,500	540	25,000	180	420	5.5	63	4,800	1.2	<3.4	1.4	1	0.1	0.4	8.3	
18	DM08	17	6,000	660	33,000	230	550	7.9	120	6,900	2.0	<3.4	2.1	17	0.1	0.7	10	
19	DM09	16	4,600	430	24,000	160	400	6.9	67	4,600	1.1	<3.4	1.6	1	0.1	0.5	8.5	
20	DM10	18	7,200	1,300	31,000	370	640	12	99	7,300	2.2	4.3	2.7	20	0.1	0.7	10	
21	DM11	12	2,600	67	14,000	120	130	1.0	13	1,000	0.5	<7	0.8	3.4	0.1	0.3	6	
22	DM12	13	2,400	71	13,000	130	100	1.0	18	1,300	0.6	<7	0.7	3.3	0.1	<0.3	5.9	
23	DM13	13	930	85	1,300	<92	280	1.4	46	1,900	0.3	<3.4	2.8	8.2	0.1	0.5	8.0	
24	DM14	13	481	1,000	4,800	<37	250	5.0	560	3,900	3.4	15	11	20	0.0	0.3	1.2	1.5
25	DM15	40	19,000	300	54,000	110	900	2	330	8,400	2	<2	4	40	0	2	13	4
26	DM16	33	18,000	370	63,000	100	1,400	6	270	9,800	4	<2	9	49	0	3	13	6
27	DM17	32	15,000	350	61,000	72	1,500	7	250	11,000	5	<2	11	54	0	2	8	5
28	DM18	40	19,000	330	56,000	110	920	2	280	11,000	2	<2	3	41	0	2	11	5
29	DM19	2,900	8,100	700	1,200	60	710	5	160	2,100	2	<2	3	27	0	2	3	2
30	DM20	5	34	13	220	<27	170	<0.4	2	7	<0.21	<2	<0.3	<0.5	0	<0.4	0	<1

また、これらの試料のうち AB08 を用いた直接塩化試験において得られた SiCl_4 (表Ⅲ-2-(イ)-A-1(5)) は弊社のポリシリコン生産プロセスに適用している SiCl_4 との有機クロロシラン含有量とほぼ同じレベルであることから適合性のあることが確認された。

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(5) : 還流漏液のなかった主留試料の GC-MS 分析(ppm)

GC-MS組成	IP	MDCS	TMCS	DMDS	MTCS	CCl_4
	<0.01	<0.01	0.08	<0.01	0.01	<0.01

更に、シリカ鉱石のアップグレード検討では表Ⅲ-2-(イ)-A-1(6)に示す国産シリカをリーチング(酸抽出法)などで処理することにより RC12 のレベルまでアップグレードできることを確認した。表Ⅲ-2-(イ)-A-1(6)の AB01 および AB08 は豪州産シリカで AB08 は表Ⅲ-2-(イ)-A-1(5)に示した直接塩化 SiCl_4 を生成するために用いた原料である。DM01 をアップグレードした RC12 の純度は太陽電池用原料として適性がほぼ確認された AB08 に近いレベルであることから国産シリカサンプルからも太陽電池原料として適合性が期待できる鉱

石が見出されたことになる。

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(6) 直接塩化原料として有望なシリカ試料 (ppm)

試料	Na	Mg	Al	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	As
AB01	17	2	54	200	1	26	<0.3	<7	<0.6	未測定
AB08	36	40	600	220	5	130	0.3	<3.4	1.1	未測定
DM01	173	720	3500	190	330	2400	2.5	11	6	未測定
RC12	11	170	1400	38	67	380	0.5	<2.1	2	<0.9
DM20	34	13	220	170	2	7	<0.2	<2	<0.3	<1

また、これまで産業廃棄物として処理されてきた結晶シリコン加工時に発生するカーフシリコンの分析についても行った結果、表Ⅲ-2-(イ)-A-1(7)のような分析結果を得た。この分析結果はシリカ分析結果としてNi以外の不純物が特段多いわけではなく、更に比較的 low 負荷の酸洗によって金属分の溶解除去も可能なことを確認したことから直接塩化プロセスにおける熱源を兼ねた添加原料として適用の可能性が高いことを確認した。

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(7) 水洗シリコンカーフの不純物分 (ppm)

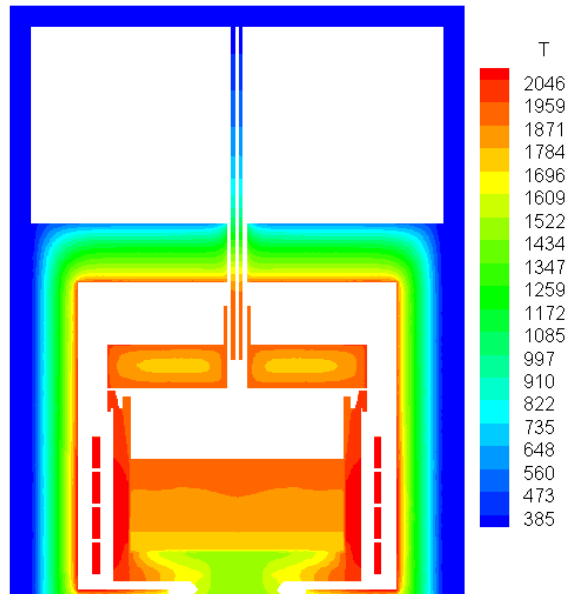
水洗カーフ	Na	Mg	Al	Ca	Fe	Ni	Cr	Cu	Zn
	9.91	3.79	4.58	<506	23.5	127	1.92	4.4	148

<九州大学>

高効率シリコン太陽電池の実現に必要な単結晶シリコンをシードキャスト法で実現するために、次の3つの開発項目に集中して研究開発を行なった。現在のシリコン多結晶系太陽電池の変換効率を向上するためには、次の5つの問題点を克服する必要がある。1) 転位密度の低減、2) 炭素や酸素の軽元素の除去、3) 坩堝壁からの多結晶成長抑止、4) 重金属汚染の防止、5) 全領域単結晶化、である。この5つの問題点を克服するために、次の3項目に関して研究開発を推進した。

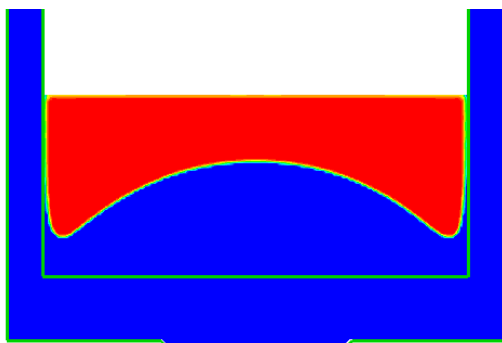
① 高効率単結晶育成炉の温度分布解析シミュレータ構築

種結晶を用いたシードキャスト単結晶育成が実現可能となるように、九州大学が独自に開発したシードキャスト用単結晶育成コードを用いて、50cm 角の単結晶育成可能な炉内構造を提案した。従来問題となっていた種結晶の融解を防止し、確実に種結晶を融解なしに、しかも結晶全領域に単結晶育成可能な温度分布を提案した。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(16)は、新規提案しているシードキャスト法による単結晶育成炉内の温度分布の一例である。本方法では、軽元素である不純物、特に炭素、酸素濃度の低減可能な炉構造となっている。

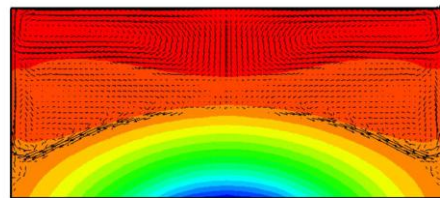


図Ⅲ-2-(イ)-A-1(16) 本提案のシードキャスト法による育成炉内の温度分布

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(17)は、新提案によるシードキャスト法の固液界面形状と温度分布の解析結果、および図Ⅲ-2-(イ)-A-1(18)に融液対流の解析結果を示す。本提案は、従来の坩堝底一面に種結晶を配置して固液界面形状を平坦なまま結晶成長させる方法ではなく、図Ⅲ-2-(イ)-A-1(17)、図Ⅲ-2-(イ)-A-1(18)に示すような凸状の固液界面形状を特徴とする成長方法であり、**世界最初の試み**である。このような固液界面形状を形成することによって、変換効率の転位密度を低減し、かつ不純物の偏析現象による界面形状の崩壊を阻止することが可能である。また、本解析方法ではエンタルピー法という方法を総合熱流解析の中に採用しており、従来用いられている方法である固液界面形状を計算格子で追跡する方法に比べて複雑な形状の固液界面形状を表現することが可能であり、このような結晶育成方法には非常に有効な手段である。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(17)
本提案の固液界面形状の解析結果



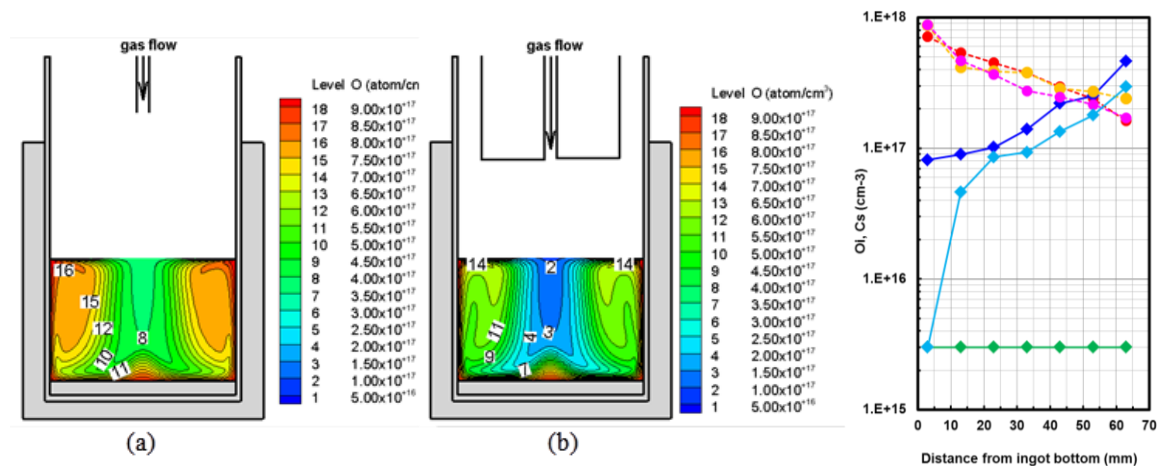
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(18)
融液対流の解析結果

② 高効率単結晶成長炉の不純物除去解析シミュレータ構築

太陽電池の効率低下の原因となる軽元素、特に炭素と酸素の効果的除去方法の提案

を行い、実験結果との比較検討を行い、実際に大型結晶においても除去可能であることを証明した。本研究成果は、**2011 SciVerse Science Direct TOP25 Hottest Research** に選定されている。

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(19)に示すようなカバー構造を新規に提案した。この方法を結晶育成中に用いて炭素除去実験を NIMS、明治大学、豊田工大が共同で結晶育成を行なったところ、図Ⅲ-2-(イ)-A-1(20)に示すように結晶中の炭素濃度を 10^{17} cm^{-3} のオーダーから約 2 桁低濃度の炭素濃度を有するシリコン結晶を得ることが可能となった。本方法を用いれば、変換効率が約 0.5% 程度向上することが確認できた。



(a) 従来方法

(b) 新規提案方法

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(20)

結晶中炭素濃度

(従来(赤)、新規(緑))

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(19)

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(21)は、NIMS、明治大学、豊田工大と共同で結晶育成を行なった結晶の写真であり、また図Ⅲ-2-(イ)-A-1(22)は約 50cm 角の結晶で本方法を採用した場合の結晶の写真である。このように、従来育成されていた一般の結晶は、表面に偏析による SiC の析出物が存在し、SiC の特有の緑色を呈し光沢が無いが、本方法を用いることにより、鏡面の結晶を育成することが可能となった。特に図Ⅲ-2-(イ)-A-1(22)に示すように、大型結晶においても炭素低減化に成功している。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(21)

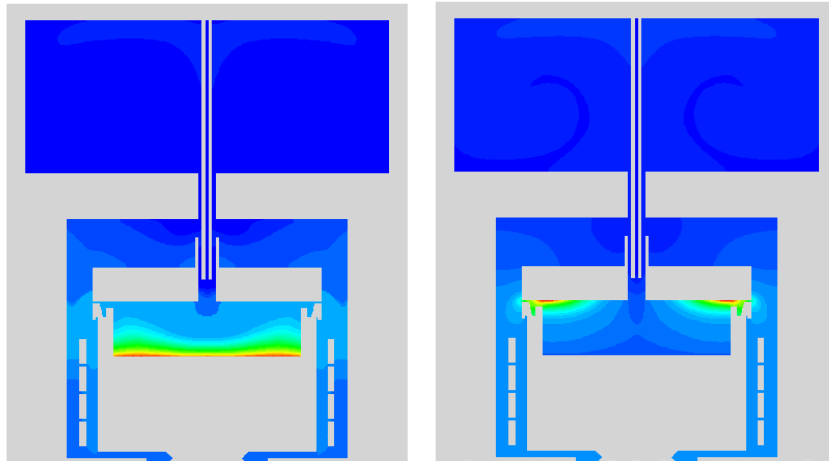
直径 100mm の結晶の写真



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(22)

50cm 角の結晶の写真

低炭素濃度である鏡面結晶を得るために、図Ⅲ-2-(イ)-A-1(23)に示したような炉内構造においてSiO とCO の濃度分布予測を行い、結晶育成を行った。この結果、図Ⅲ-2-(イ)-A-1(22)に示したような表面に光沢がある50cm角の結晶育成が可能であることを実証した。本方法を用いれば、1m角を超える超大型結晶においても低炭素である鏡面結晶を実現できることを今後証明していく。

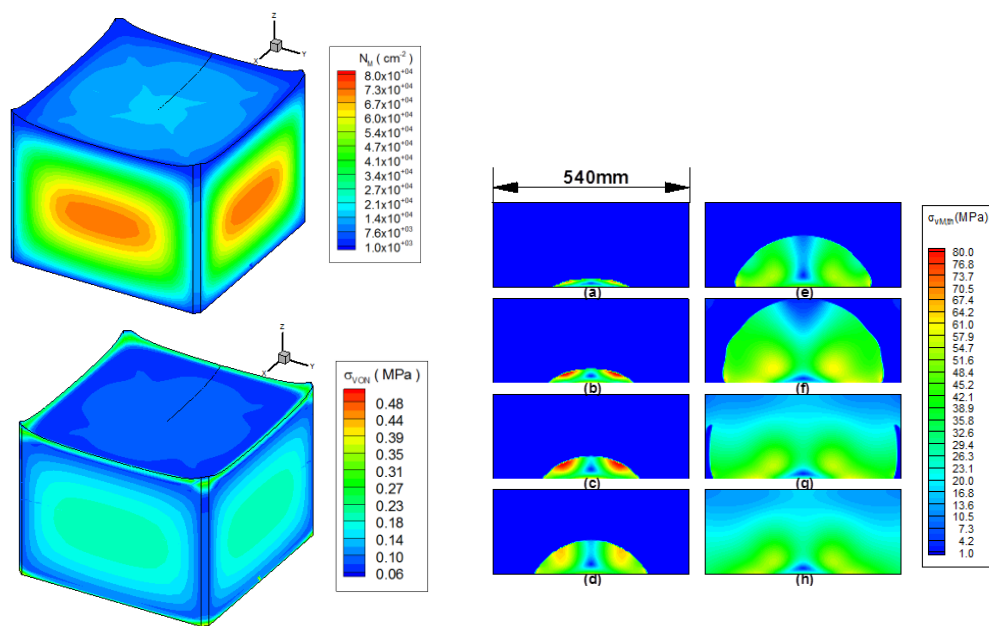


図Ⅲ-2-(イ)-A-1(23) SiO とCO の濃度分布解析結果 (単位は任意とした)

③ 高効率単結晶育成炉の低転位化および低残留応力化が可能な解析シミュレータ構築

結晶中の転位は、変換効率の低下の主な原因の一つであるために、転位密度の低減が最重要課題の一つである。本提案であるシードキャストの場合種結晶として単結晶を使用する。この時、転位密度低減に効果がある結晶方位を解析する必要がある。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(24)は、矩形結晶の転位と応力分布、およびシードキャストにおける黄緑分布の成長過程依存性を示している。また、種結晶を等方性であると仮定した場合[001]、[111]の3つの場合について、結晶育成中の温度分布をもとに解析した結果、シードキャストの種結晶として最適な結晶方位は、[001]であることが分かった。[111]方位の種結晶を用いた場合、種結晶底部の応力が非常に大きくなり、結晶を室温まで冷却した時の転位密度は[001]種結晶を用いた場合よりも約3倍大きくなることが明らかとなった。これらの結果から、シードキャスト法で用いる種結晶の方位は[001]が最適であることが明らかとなった。

本解析結果に基づく結晶の最適冷却法は、**特許出願特願(2012-042427) (結晶冷却方法および半導体結晶)**を行った。



図III-2-(イ)-A-1(24)

矩形結晶の転位と応力分布、およびシードキャスト法における黄緑分布の成長過程依存性

<NIMS>

1. 研究開発の内容及び成果等

① 実験炉を用いた Seed cast 法の予備実験

Seed の必要サイズ等の検討と、Seed が溶解しない成長条件の最適化（Seeding 技術の確立）が必要である

② 実証炉の設計・製造

九州大学グループが計算機シミュレーションで予測した育成条件を具現化するための改造設計と発注製造を行う。

各項目の詳細を以下に示す。

① 実験炉を用いた Seed cast 法の予備実験

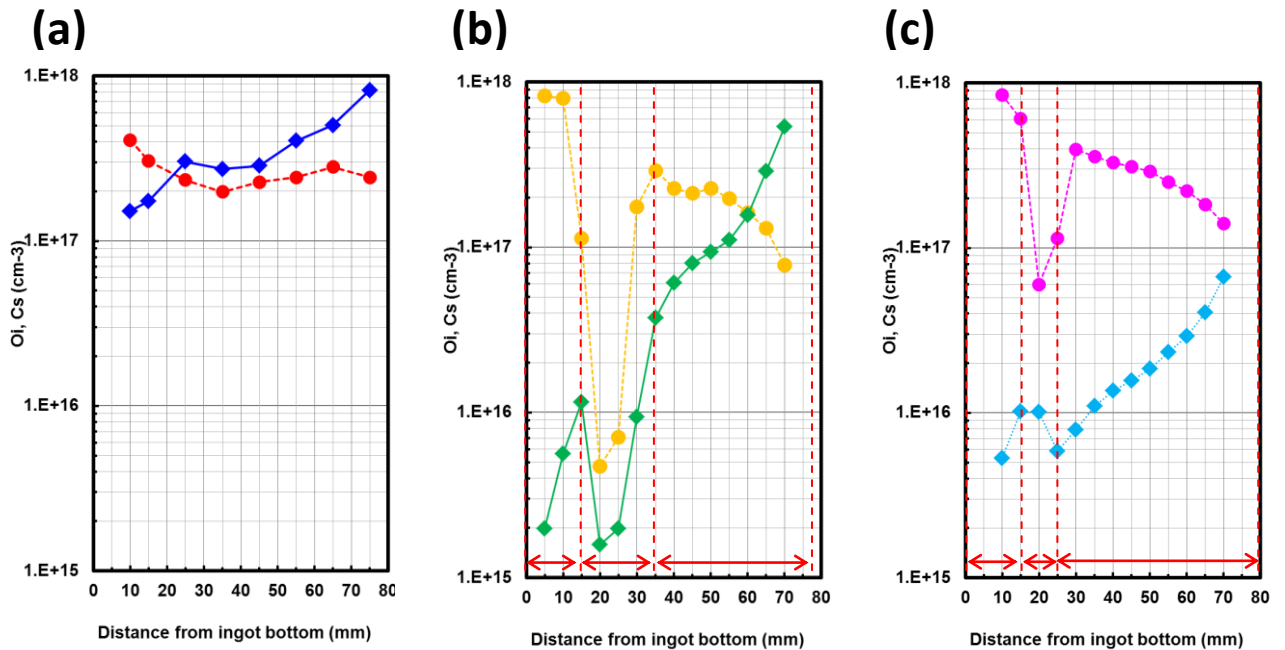
多結晶原料の融解時や単結晶成長時の種結晶の熱的安定性を予測することは重要であり、九州大学グループが開発した温度分布解析シミュレータを使って、九州大学と一緒に、種結晶サイズおよび原料融解や成長条件の事前検討を行う。

② 実証炉の設計・製造

九州大学グループが開発した温度分布解析シミュレータを使って、九州大学と一緒に、購入予定の市販の鋳造炉体の改造と炉内のヒーターおよび断熱構造の改造設計を行う。以下に、各項目の本年度の成果を示す。

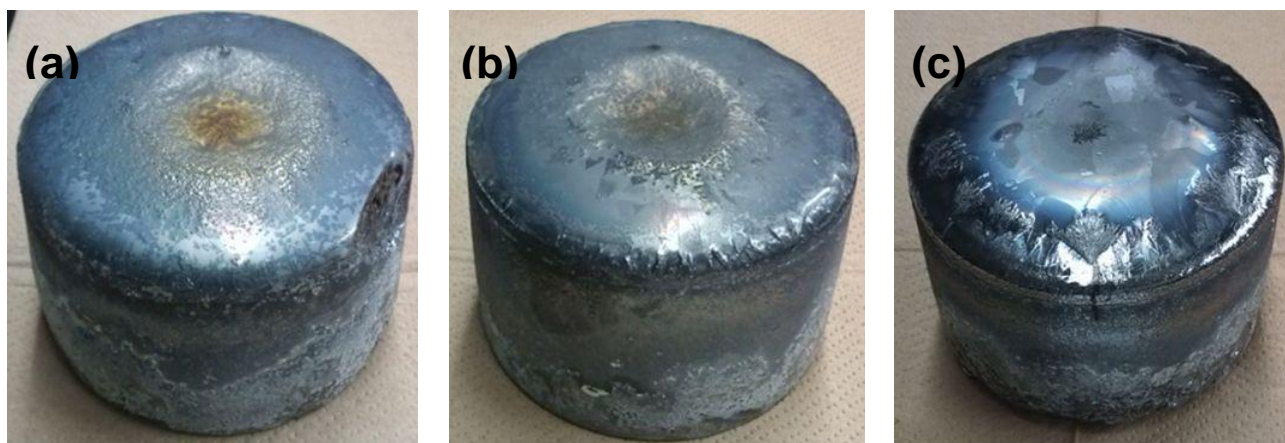
① 実験炉を用いた Seed cast 法の予備実験

九州大学グループが開発した不純物除去解析シミュレータで予測した炭素濃度低減のためのガス整流装置を実験炉で具現化し、昨年度は、炭素濃度： $1\sim 8\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ の結晶育成に成功し、予測通りの低減効果を確認したが、今年度は、更に、ガス管および整流装置の材質を改良した。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(25)に、酸素と炭素濃度の評価結果を示す。(c)の結晶では、炭素濃度を $5\times 10^{15}\sim 8\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ まで低減することができ、半導体用単結晶のレベルを達成した。



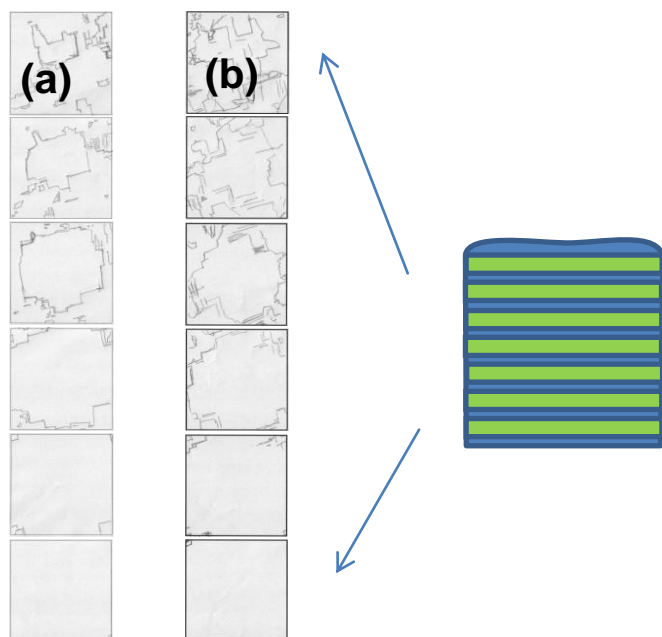
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(25) ガス管および整流装置の材質改善効果

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(26)は、太陽電池セルの変換効率を評価するために、九州大学グループが開発した温度分布解析シミュレータを使って検討した溶解条件で多結晶原料を熔融し、多結晶と単結晶および炭素濃度の作り分けをした結晶の光学写真である。(a)(b)は高炭素濃度のため黄緑色の鈍い光沢であるが、(c)は低炭素濃度のため金属光沢で凝固後の酸化膜成長の虹模様が見られる。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(26) 多結晶と単結晶および炭素濃度を作り分けした結晶の外観写真

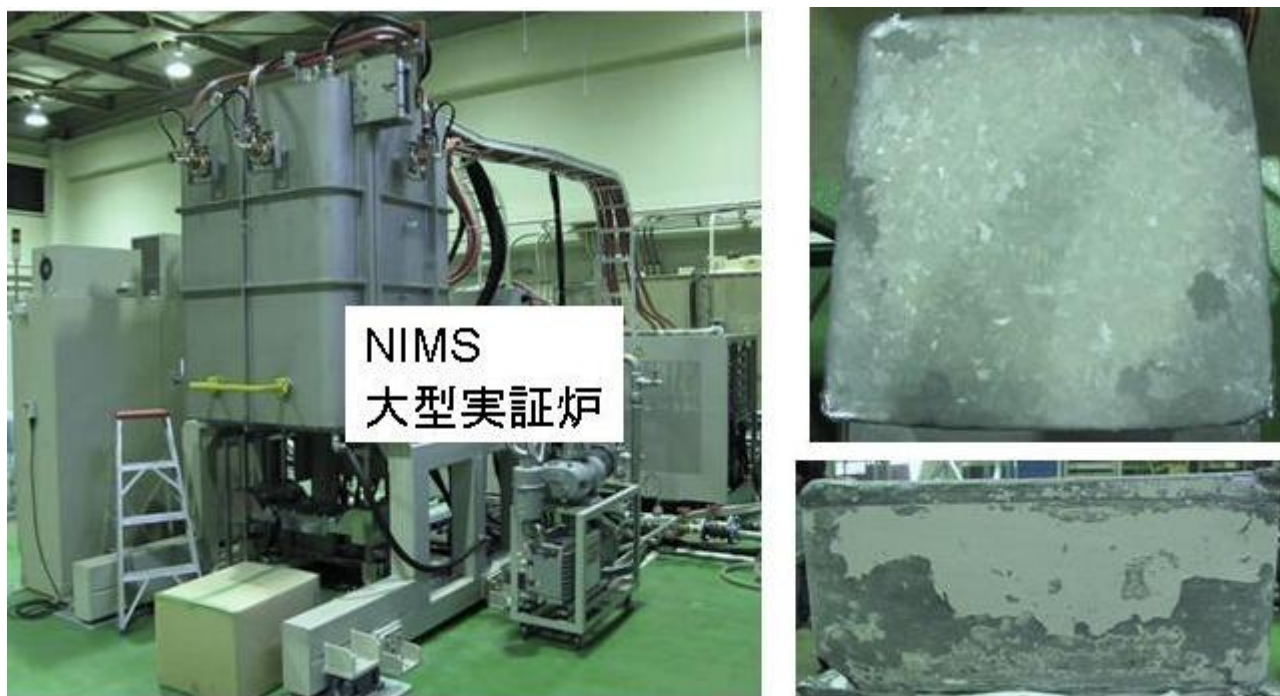
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(27)に、作り分け条件で育成した結晶の結晶粒の成長の様子を示す。(a)と(b)は、種結晶方位が上部まで継承されていることが判る。(b)の炭素濃度は、 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の検出下限以下であった。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(27) 育成した結晶の評価結果

②実証炉の設計・製造

九州大学のシミュレーション結果を基に、市販の鑄造炉の改造と炉内のヒーターおよび断熱構造の改造設計、発注製造を行った。2月に、九州大学への搬入設置、立ち上げを完了した。3月に、従来の炉内構造で鑄造結晶育成を行い、Seedを用いない多結晶の育成が完了した。



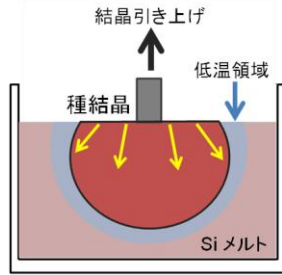
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(28) 導入した鑄造炉とこれを用いて育成した結晶

<京都大学>

1) 浮遊キャスト成長法によるインゴット多結晶の高品質化のための成長技術の基礎検討

- Si 融液中に低温領域を形成することができ、径の小さなルツボを使用しても、ルツボ壁に接触させずに大口径のインゴット結晶を成長することに成功した。直径 30 cm の小型ルツボから直径 25 cm 以上のインゴットが得られた。これにより 15.6 cm 角のウェハを得ることに成功した。
- 結晶方位解析の結果、粒界の大部分が電氣的に不活性とされる $\Sigma 3$ 粒界であることが明らかとなった。また、ネッキング技術を用いることができるため、転位密度を $10^3 / \text{cm}^2$ 以下にすることができた。

浮遊キャスト成長法

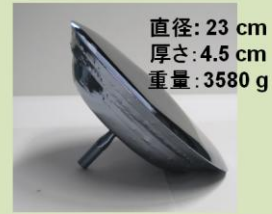


結晶をルツボと接触させずに成長することが可能な、低温領域をSi融液中に形成することに成功した。

直径30 cmの小型のルツボから、25 cm 径にインゴット多結晶が得られ、15.6 cm角のウェハーが得られた。



直径: 11 cm、厚さ: 5 cm
重量: 580 g



成長方向に対して凸状の形状をしており、融液内の低温領域で成長していることがわかる。

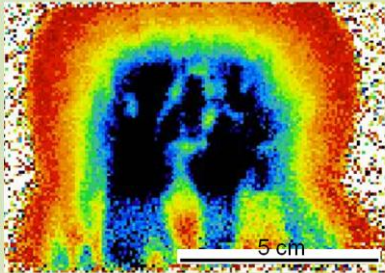


直径: 20 cm
厚さ: 10 cm
重量: 5560 g



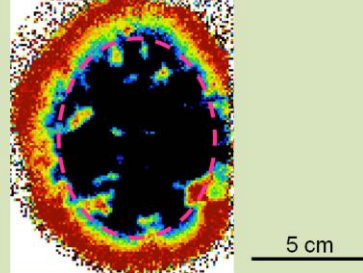
直径: 27 cm
厚さ: 8.5 cm
重量: 5980 g

結晶の縦断面の拡散長分布



面内平均: 173 μm 、最大値: 610 μm

結晶の横断面の拡散長分布



面内平均: 140 μm 、最大値: 464 μm

浮遊キャスト成長法で作製したSiインゴット多結晶の拡散長を評価した。インゴットの中心部の拡散長は高く(右図、点線内で200 μm)、最大で610 μm の拡散長が得られた。一方で、インゴットの表面に近い部分では拡散長の低下が見られた。気相雰囲気からの汚染が原因であると考えられ、その改善が今後の課題である。

図III-2-(イ)-A-1(29) 浮遊キャスト成長法

2) 浮遊キャスト成長法により作製した結晶の評価と高品質化メカニズムの解明

- 浮遊キャスト成長法により得られた多結晶の酸素・炭素濃度は、CZ法で得られた単結晶よりも1桁程度低く、キャスト成長法が多結晶と同程度であった。

拡散長の測定結果で、インゴットの中心部で最大610 mm、平均200 μm の拡散長が得られた。ただし、インゴットの表面部分では拡散長の低下が見られた。気相雰囲気からの汚染の低減策が必要である。

〈東北大学〉

1. 浮遊キャスト成長法によるインゴットの高品質化のための成長技術の基礎検討

1-1 成長初期過程における組織制御

成長初期過程における組織制御として、デンドライト成長の利用と、種結晶とデンドライト成長を併用することについて検討した。

融液表面で成長を開始する場合、ルツボ底部での核形成と比較して、核形成頻度を大幅に低下させることができる。よって、核形成時の過冷却度が、ファセットデンドライト成長の発現に必要な臨界値（およそ 10K）よりも大きくなるため、**インゴットの上面全てを複数のデンドライト結晶で覆うことが可能**である。

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(30)は、炉内の水平方向に意図的に温度勾配を持たせることで、デンドライト結晶の成長方向を制御した試みである。核形成は、主として低温側のルツボ壁近傍で起こり、高温側に向かいデンドライト結晶が成長している様子がわかる。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(31)は、(100)単結晶を種結晶としてデンドライト結晶を成長させることにより、インゴット表面に四階対称の組織を形成した例である。

このように、融液表面から結晶成長を開始することにより、**デンドライト結晶を組織制御に有効に活用できる**ことを示した。



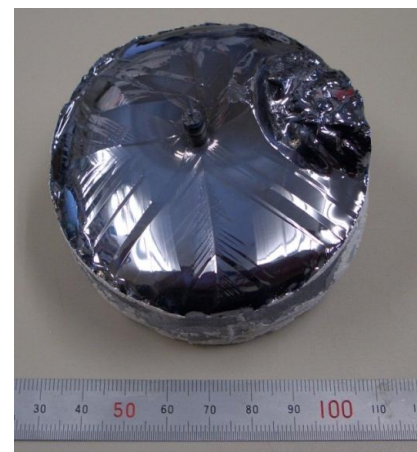
低温 → 高温

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(30) 面内温度分布による融液表面に発現するデンドライト成長の制御

1-2 成長後期過程における応力低減

融液表面から成長を行う場合、成長後期過程において残留融液をそのまま凝固させてしまうと、閉じた空間で凝固に伴う体積膨張により、インゴットに大きな応力が印加され、結晶粒の微細化や、転位密度の急激な増加が起きる。

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(32)は、インゴットの横断面を、インゴットの上部と下部で比較したものである。インゴットの上部では、上面に形成された組織を継承して成長が起こり、大粒径の結晶が得られている。しかし、インゴット下部においては、結晶粒が微細化している様子がわかる。またフォトルミネッセンスイメージングにより、下部近傍では多数の結晶欠陥が発生していることが明らかとなった。これは、Si 融液の凝固膨張に起因して、インゴットの下部近傍において、インゴットがルツボと強く接触し、大きな応力が印加されることによる。これは、インゴットの底部が、大きく下に凸になるほど変形していることより裏付けられる。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(31) 種結晶とデンドライト成長を併用することによる組織制御

このような凝固最終過程での結晶欠陥の発生を抑制するために、**二重ルツボにより残留融液が外側ルツボに自然排出される機構を考案**した(特願 2012-054072)。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(33)に、標準ルツボを用いて成長したインゴットと、二重ルツボを用いて成長したインゴットの外観を比較して示す。通常ルツボを用いて成長した場合は、インゴット底部に 1cm 以上の凸部が見られるのに対し、二重ルツボを用いたインゴットでは、底部の凸部は 1mm 以下に抑制することができた。インゴットの縦断面の組織観察を行った結果、インゴット下部近傍での結晶の微細化は観測されなかった。よって、二重ルツボを用いることにより、**凝固最終過程でのインゴットへの応力印加を低減し、結晶欠陥の発生を抑制することに成功**した。

少数キャリア拡散長の値としては、インゴットの横断面の測定で、最大値 340 μm を得た。

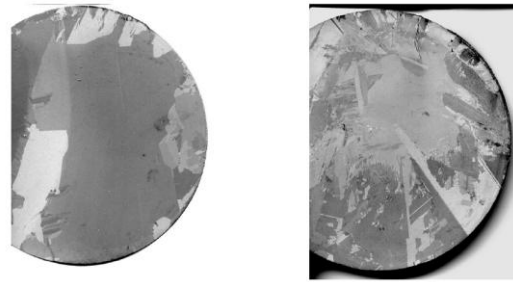
1-3 インゴットの大型化

小型インゴットでの基礎検討の成果をベースに、応力の低減機構と、デンドライト結晶による組織制御を融合したインゴット成長技術を、G2 炉に適用して成長を行った。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(34)は、成長したインゴットから切り出した 156mm 角ブロックの断面写真と、スライスしたウェハーの写真である。このように、**浮遊キャスト成長法で大型インゴット成長が可能であることを実証**し、実用サイズウェハーをコンソーシアムに提供することを開始した。

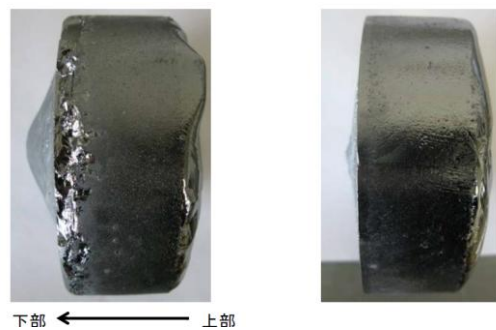
2. 浮遊キャスト成長法により作製した結晶の評価と高品質化メカニズムの解明

浮遊キャスト成長法では、表面にデンドライト結晶が稠密に形成されるため、隣り合うデンドライト結晶の接触角を、結晶粒界を特徴づけるパラメータとして系統的な研究ができる。浮遊キャスト成長法で成長した小型インゴットを縦方向に切り出した結晶を利用し、結晶粒界を含む結晶欠陥の種類と、電気的特性の関係を調べた。

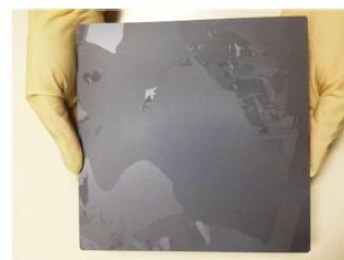
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(35)に、熱処理前後の PL イメージを比較する。熱処理前後でイメ



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(32) インゴットの横断面の写真。左がインゴット上部、右がインゴット下部に対応する。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(33) インゴットの外観写真。左が標準ルツボを用いて成長したもの。右は二重ルツボを用いて成長したもの。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(34) 浮遊キャスト成長法により作製したインゴットから切り出したブロックと、実用サイズの大粒径シリコンウェハーの写真

ージが大きく変化する様子がわかる。

より詳細な議論のため、コントラストを、欠陥近傍の明るい領域の強度から欠陥上の暗い領域の強度を引いた値を明るい領域の強度で割った値として定義し、熱処理前後での変化を調べた。その結果、転位密度の高い領域では、熱処理後にコントラストが増大し、 $\Sigma 3$ ではコントラストが低下した。この結果は、高密度の転位領域には熱処理により不純物が析出するのに対して、粒界エネルギーの低い $\Sigma 3$ 近傍では、不純物が表面にゲッターリングされたものとして理解できる。一方、ランダム粒界近傍では、コントラストが増加する粒界と減少する粒界が混在していた。

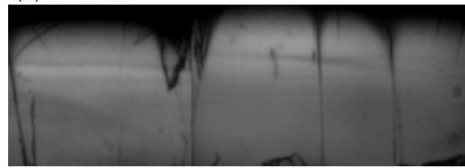
図 III-2-(イ)-A-1(36)は、デンドライト結晶の接触角を横軸にとり、熱処理前後でのコントラスト変化をプロットしたものである。この図より、接触角が 70° 近傍のランダム粒界を例外として、接触角の増加に伴い、コントラストが増加傾向にあることがわかる。

このような結果となった原因を、粒界エネルギーの観点から考察する。上面方位が揃ったデンドライト結晶の粒界エネルギーは、接触角に依存し、 10° 以内の範囲で粒界エネルギーは、角度が小さいほど小さくなる。また、 $\langle 110 \rangle$ 同士の粒界では、 $\Sigma 3$ 粒界となる 70° 付近でエネルギーが極小となる。すなわち、粒界エネルギーの接触角依存性と、熱処理前後でのコントラストの変化の傾向は一致している。つまり、粒界エネルギーの大きな粒界は不純物を多く集積させることで PL コントラストの増加を起し、エネルギーの小さな粒界では、不純物を有効に外部にゲッターリングできることがわかった。

この結果は、**浮遊キャスト成長法において、デンドライト結晶の接触角を制御して発現させることにより、セルプロセスにおける不純物ゲッターリングを有効にできる**ことを示している。

図 III-2-(イ)-A-1(37)は、本研究で考案した二重ルツボによる応力低減の効果を PL イメージにより検討した結果である。インゴットの水平断面の PL イメージをインゴット上部の成長初期の結晶と、インゴット下部の成長後期で比較している。通常ルツボを用いた場合は、成長後期において発光しない領域が顕著に広がっており、ルツボと強く接触することにより発生する応力が、非発光中心となる結晶欠陥を発生させることが明らかである。一方で、二重ルツボを用いた場合は、成長

(a) 熱処理前



(b) 熱処理後

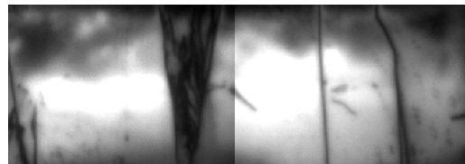


図 III-2-(イ)-A-1(35) 浮遊キャスト成長法により作製した結晶の熱処理前後の PL イメージの比較

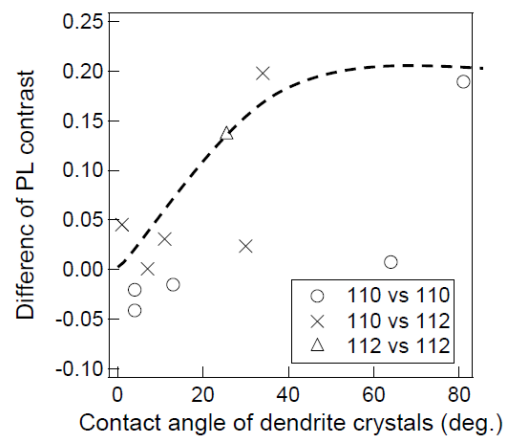


図 III-2-(イ)-A-1(36) デンドライト結晶の接触角と熱処理前後のコントラスト差の関係

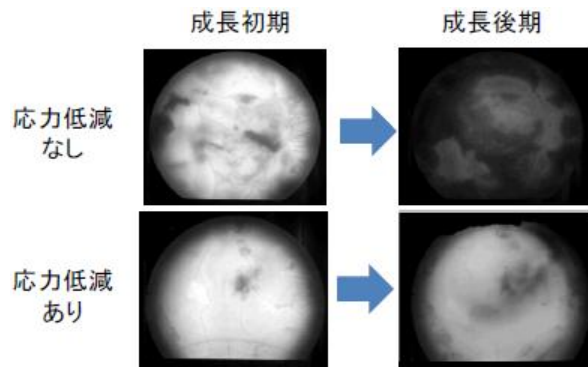
後期においても結晶欠陥の発生を抑制できている。

このように、インゴットへの**応力印加を低減することで、結晶欠陥の発生を抑制し、均質なインゴットを形成できることを実証**した。

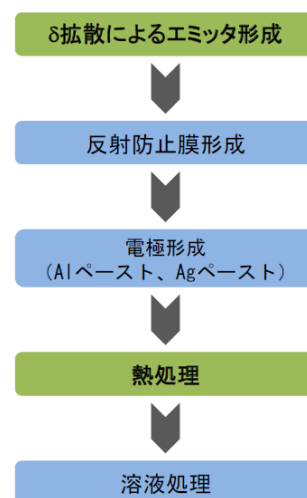
3. 太陽電池による結晶品質の評価および高効率化の検討

学内における小面積太陽電池作製プロセスを改善し、結晶品質の評価を行うことのできる体制を整備した。図III-2-(イ)-A-1(38)に、太陽電池作製プロセスの概要を示す。特徴的なのは、エミッタ形成プロセスであり、熱処理時間を極限まで低減させることにより、表面近傍に高品質なエミッタを形成する（特願 2011-179126）ことを意図している。検討を開始した当初は、CZ単結晶(抵抗率 $2.6\Omega\text{cm}$)に対して、13.1%程度の変換効率しか得られなかったのに対し、エミッタ形成プロセスを高度化することで、CZ単結晶(抵抗率 $1.0\Omega\text{cm}$)を用いた場合、17.5%程度(短絡電流密度 $35.7\text{mA}/\text{cm}^2$ 、開放電圧 642mV 、曲線因子 0.763)の変換効率が、再現性よく得られるようになった。

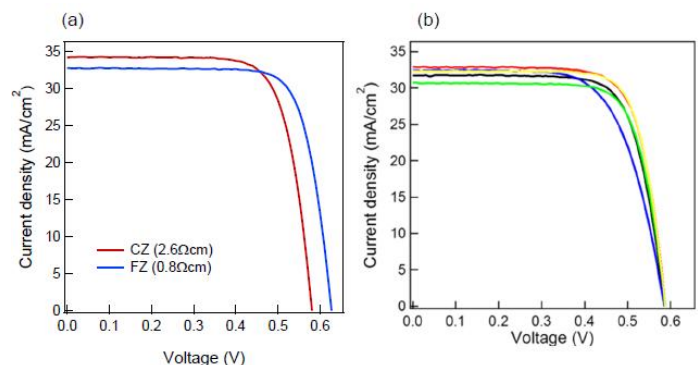
成長したインゴットの下部近傍の水平断面から、約 $15\text{mm}\times 15\text{mm}$ の試料を5個切り出し、学内の簡易プロセスによって太陽電池を作製した。その特性を比較した図面を図III-2-(イ)-A-1(39)に示す。なお、このプロセスは、前述の改善を行う前のものである。CZ単結晶と比較した、絶対効率の低下は、0.2-2.0%の範囲であった。この結果から、良質な部分に関しては、単結晶なみの品質が得られているといえる。



図III-2-(イ)-A-1(37) 応力低減による成長過程における結晶欠陥の発生を抑制するPLイメージ



図III-2-(イ)-A-1(38)結晶品質評価のための太陽電池作製プロセス



図III-2-(イ)-A-1(39) (a)標準単結晶と(b)浮遊キャスト成長法で成長した結晶をベースとする太陽電池の特性比較

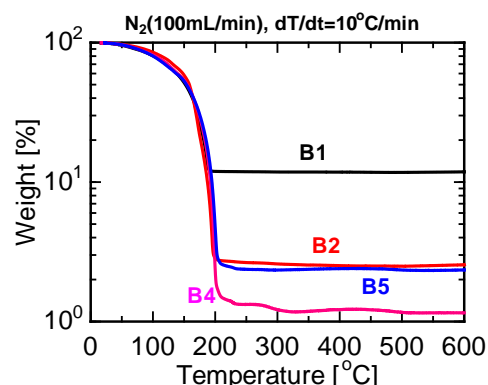
〈兵庫県立大学〉

スライス時のカーフの回収・再利用

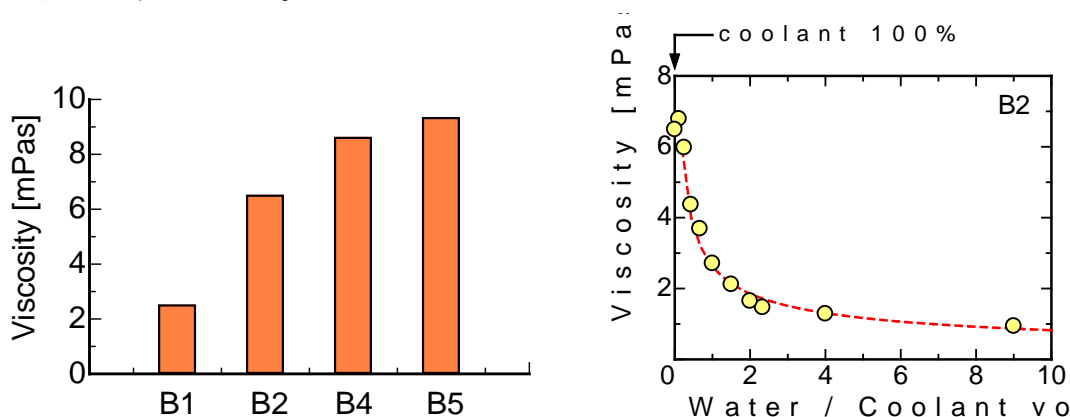
(1) カーフ／不純物の分離技術の開発

(1-1) クーラント特性の評価

スライス条件が同じとされる4種類の廃クーラントの比較を行った。熱重量分析（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(40)）および示差熱分析を行った結果、クーラントの構成成分は同等であり、高沸点側の物質も約 200°Cで蒸発することが判った。また、カーフ（シリコン微粉末）の含有量は多いもので10wt%、少ないものでは1wt%程度と大きな幅があった。これは廃クーラントの一部を取り出しているため、サンプリングの状態に依存したものと考えられる。次にろ過特性に影響を及ぼすと予測される粘性の評価を行った。その結果、図Ⅲ-2-(イ)-A-1(41)（左）に示すように、約 3~9 mPas と大きな差が確認された。廃クーラントの構成成分は同等であることから、構成成分の成分比が粘度に影響を及ぼしていると考え、廃クーラントを水で希釈し粘度を測定した。希釈率と粘度の関係を図Ⅲ-2-(イ)-A-1(41)（右）に示す。水を少量加えただけで粘度は劇的に低下し、廃クーラントと同量加えた時点で（希釈率=1）、粘度は半分以下となった。このことから、各クーラントの粘度の相違は水の蒸発率の違い（保管期間、状態）に起因するものと考えられる。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(40) 各廃クーラントの熱重量分析の結果

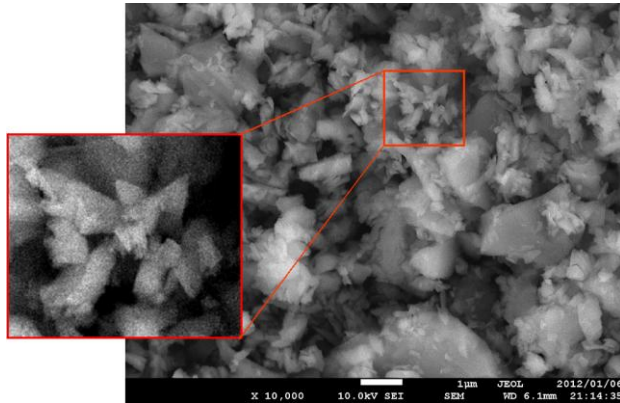


図Ⅲ-2-(イ)-A-1(41)各クーラントの粘度（左）および水希釈による粘度変化（右）

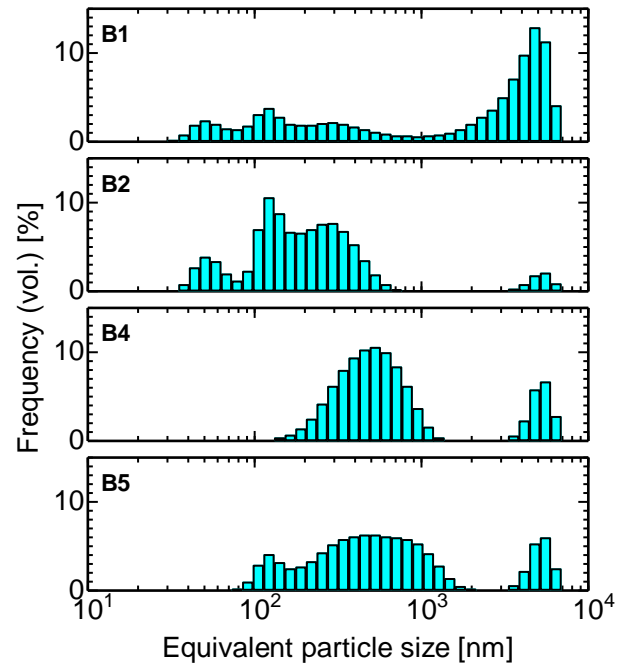
(1-2) シリコン微粉末の特性

ろ過特性に影響を及ぼすと考えられるもう一つの要素がシリコン微粉末の形状およびサイズである。そこで電子顕微鏡による観察を行った（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(42)）。数・mの比較的大きなものから、100nmを切るような小さなものまで幅広く存在していることが判る。具体的な粒径分布を評価するために、動的光散乱法による測定を行った（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(43)）。大まかな傾向として、数・mの粒子群と数100nmの粒子群が混在しているが、その比率などは廃クーラント毎に異なっている。これも前項で

述べたようにサンプリング状態の相違に起因していると考えられるため、ろ過プロセス時のパラメータ設定には注意が必要である。



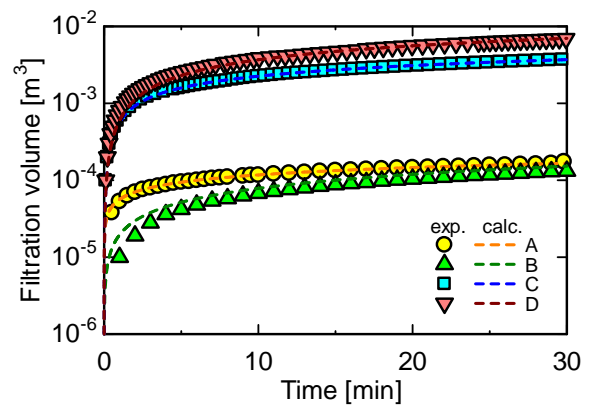
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(42) シリコン微粉末の電子顕微鏡像
(scale bar = 1・µm)



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(43) 各クーラントに含まれる微粒子の粒径分布

(1-3) ろ過特性

各廃クーラントのろ過特性を加圧ろ過装置を用いて検討を行った。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(44)にろ過時間とろ液量の関係を示す。30分後のろ液量で比較すると、多い例と少ない例では50倍程度の違いが現れている。この差が前述したクーラントの粘度とシリコン微粉末によるろ過抵抗と考え、次元解析から以下に示すモデル式を得た。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(44) ろ過時間とろ液量の関係

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu [R_0 + R_c \{\rho V(t)\}^{n+1}]} \dots \text{式 Ⅲ-2-(イ)-A-1(1)}$$

このモデル式に従い計算した結果を破線で図Ⅲ-2-(イ)-A-1(44)に示す。ろ過初期で若干の相違が見られるものの、概ねモデル式でろ過プロセスを示せることが出来た。

次にろ過プロセスの最適化について検討を行った。上式から判るように、ろ過速度はクーラント粘度を下げることにより向上する。水で廃クーラントを希釈することで粘度が下がることは(1-1)で報告したが、希釈することで、処理すべき廃クーラント

体積は当然増加する。つまり、粘度低下によるろ過速度向上とクーラント体積増加に最適点があると考えモデル式から処理時間を予測したところ、ある廃クーラントの場合では希釈率1が最適であることが予測された。実際に希釈率を変えてろ過実験を行ったところ、希釈率2が最適であり、元々の廃クーラントの場合に比べてろ過時間が半減した。この結果から、モデル式はプロセス予測に有効であると言える。

(2) 原料再生技術の開発

(2-1) 固液分離後のシリコン微粉末の不純物評価

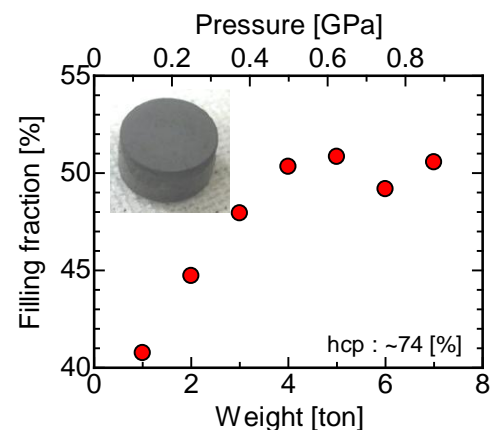
廃クーラントからろ過したシリコン微粉末を乾燥後、誘導結合プラズマ質量分析法により不純物の評価を行った。なお、本評価はシリコン結晶コンソーシアムに参加の新日本ソーラーシリコンの協力のもと実施した。表Ⅲ-2-(イ)-A-1(8)に代表的な金属不純物の含有量を示す。どの金属も非常に高い値を示している。本研究開発では回収したシリコン微粉末を直接原料として使用するのではなく、一度融解・再凝固して原料化することを想定しているため、この測定結果を元に融解・再凝固後の固化率0.9での不純物濃度を推算した。その結果、原料として十分使用可能な濃度であることが確認された。

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(8)シリコン微粉末中の代表的な金属不純物濃度と熔融・再凝固後の固化率0.9における予測不純物濃度

element	conc. [cm ⁻³]	conc. at X=0.9 [cm ⁻³]
Al	2.38×10^{17}	4.74×10^{15}
Cu	9.71×10^{16}	3.88×10^{14}
Ni	3.04×10^{18}	2.43×10^{14}
Fe	5.90×10^{17}	4.72×10^{13}
Co	6.66×10^{15}	5.33×10^{11}

(2-2) シリコン微粉末のペレット化

回収したシリコン微粉末は非常に細かいため、ハンドリングに適していない。そこで微粉末のプレス成型を行った。その結果、およそ0.5 [GPa]で充填率50%程度のペレットが得られることが判った。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(45) プレス荷重と充填率

(2-3) 融解・再凝固

ペレット1つを坩堝に設置し、融解・再凝固を行った結果、完全に融解したことが確認出来た。そこで複数のペレットを同時に融解・再凝固を実施した。図7Ⅲ-2-(イ)-A-1(46)に試料外観を示す。側面では金属光沢も見られたが、試料を切断して確認したところ、一部未融解の領域が確認された。加熱炉の温度プログラムをペレット1つの場合と同じにして実験を行ったため、複数のペレットを完全融解するには十分な加熱時間では無かったと予想される。今後、加熱時間や坩堝配置の再検討を行い、より熱効率の良い条件で融解・再凝固実験を実施する。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(46) 融解・再凝固後の試料

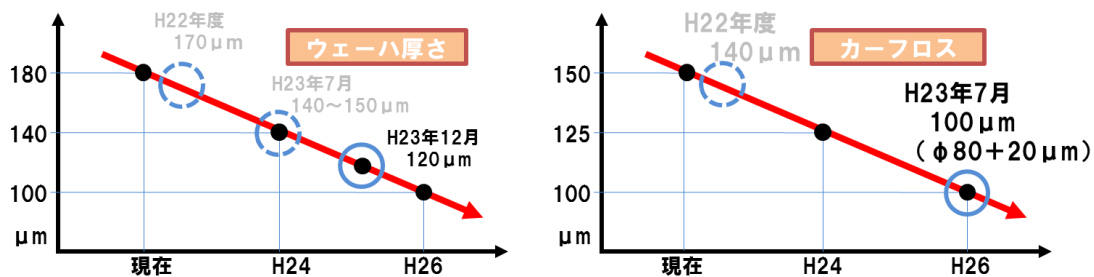
<コマツ NTC>

成果

- ① 薄板ウェハの高歩留まり生産技術の確立
 - A. □125mm相当の単結晶シリコン基板を厚さ180 μ m、140 μ m、120 μ mと段階を踏んで薄板加工を実現した。
 - B. 加工したウェハが精度、歩留りともに問題は無く加工可能であることを実証した。
 - C. 歩留りよく加工完了するための条件や加工後の搬送における割れ抑制方法などを確立した。
 - D. 加工には各市販メーカーの固定砥粒ワイヤを使用し、現在市販されているワイヤで十分に薄板ウェハ加工が可能であることを実証した。
- ② カーフロスの最少化に向けた細線ワイヤが使用できる生産設備の確立
 - A. カーフロス150 μ m（芯線120 μ m）のワイヤを使用する加工を実施した
 - B. カーフロス130 μ m（芯線100 μ m）のワイヤでの加工を実施し、歩留りよく切断加工が可能であることを実証した
 - C. カーフロス100 μ m（芯線80 μ m）のワイヤでの加工を実施し、歩留りよく切断加工が可能であることを実証した
 - D. 細線ワイヤでの加工を精度、歩留りが問題なく加工できる条件を確立した

以上の成果により、2010年初頭の状況（ウェハ厚さ180 μ m、カーフロス150 μ m）と比較し、材料コストで25%削減するスライス加工を実現した。（ウェハ厚さ120 μ m、カーフロス125 μ m）

スライス評価(歩留り95%以上) ⇒ 厚さ120 μ mウェハ、カーフロス100 μ mまで実施完了



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(47) 成果状況

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(9) 達成状況 (時系列)

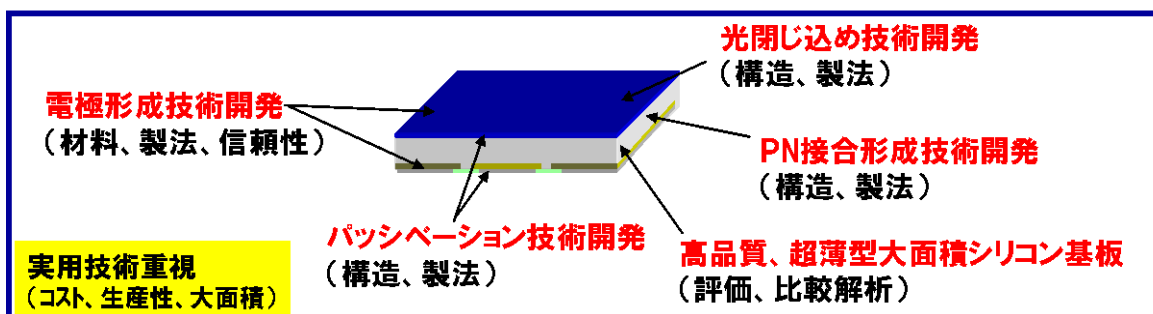
	ウェーハ厚さ	カーフロス (使用ダイヤワイヤ)
H22年度	170 μ m	140 μ m (ϕ 120+20 μ m)
H23年7月	140 μ m	100 μ m (ϕ 80+20 μ m)
H23年10月	130 μ m	115 μ m (ϕ 80+35 μ m)
H23年12月	120 μ m	125 μ m (ϕ 100+25 μ m)

まとめ

- A. 太陽電池市場に単結晶の薄板切断が可能である事を示し、コスト削減の可能性を示唆した
- B. 120 μm厚さウェハの供給 ⇒ NEDO コンソーシアム（豊田工業大学）での研究へ
- C. 各種素材（単結晶、多結晶）インゴットの加工 ⇒ 支給品テストカットなど
- D. 細線加工の対応技術を都度、ワイヤソーに反映

<京セラ>

●開発アイテム



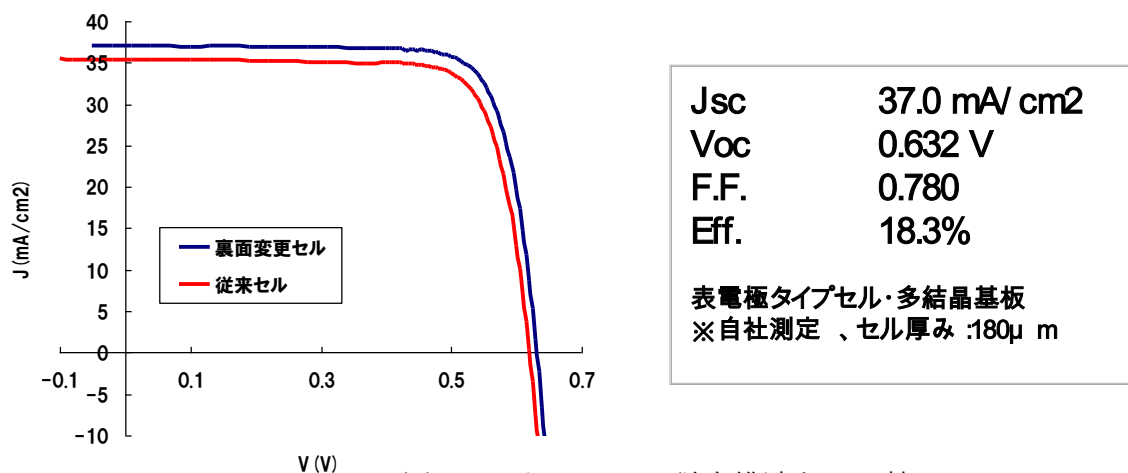
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(48) 開発アイテム

開発が完了しても実用化、事業化、低コスト化が困難な手法は採用せず、開発完了すれば実用化が容易な技術を開発アイテム選択の判断基準とした。開発アイテムとしては上記の通りとした。

高品質、超薄型大面積シリコン基板においては、最もコストパフォーマンスの高い多結晶シリコン太陽電池を選択。競争力のある多結晶基板をベースに素子構造の最適化を行うことにより、開発完了後の早期実用化、低コスト化が可能であると判断した。

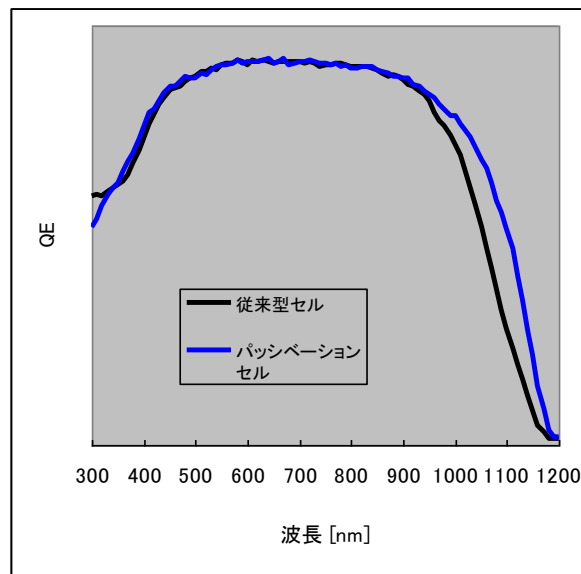
●高効率技術開発 1 裏面変更セルの開発

セル裏面構造を変更したセル変換効率において、従来構造と比較して大幅に特性が向上。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(49) 従来構造との比較

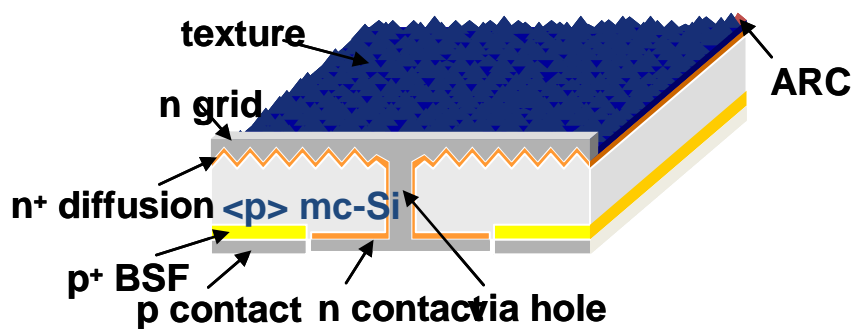
裏面変更セルの量子効率においても、長波長感度が向上しており裏面改善の効果を確認。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(50) 裏面改善の効果

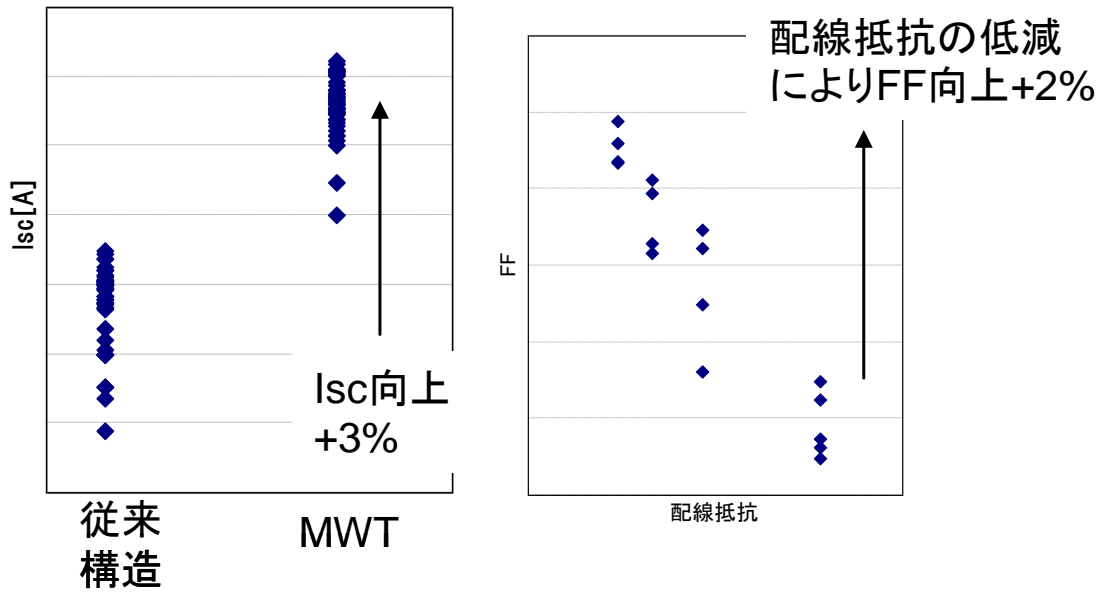
●高効率開発2 バックコンタクトセル・モジュールの開発

従来より開発を行ってきたMWT型バックコンタクトセル・モジュールの最適化を実施。セル構造は下記の通りである。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(51) バックコンタクトセル構造

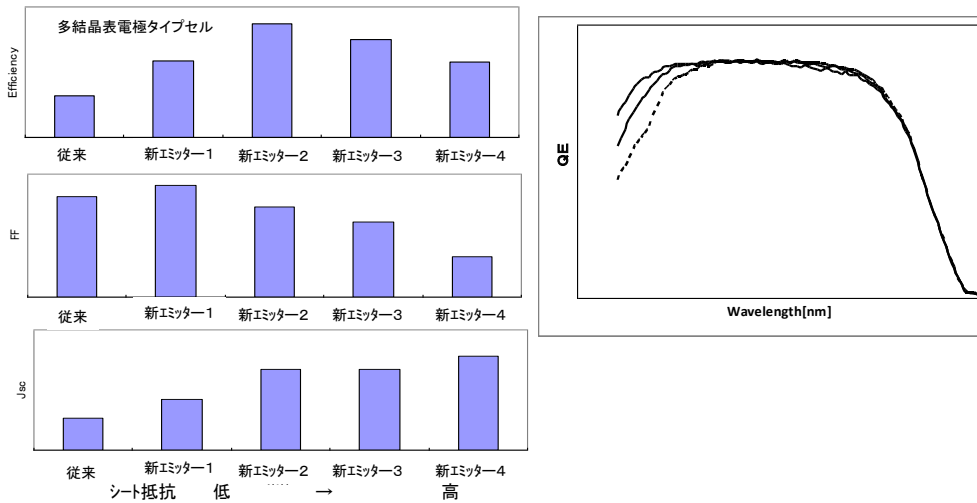
バックコンタクトセル・モジュールの特性評価



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(52) モジュール特性評価

最適化により、 I_{sc} 向上と FF 向上を合算して、5%の効率向上が見込まれる。

●高効率化開発3 : エミッターの最適化



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(53) エミッターの最適

新エミッタにより、短波長感度向上、FFとの両立が可能となり、効率向上を確認。

【成果の意義】

太陽光発電ロードマップ(PV2030+)に記載の発電コスト目標：14円/kWh(2020年)、モジュール製造コスト目標：75円/W、モジュール変換効率目標：20%(2015～2020年時点)の実現に資する各種太陽電池の高効率化、低コスト化に係る要素技術開発を行い、これを事業化する事により、現下の世界競争に打ち勝っていくための競争力を高める事に繋がり、我が国の太陽光発電システムの導入規模拡大に寄与する事が可能となる。また、本プロジェクトの実施により下記の要素技術開発についての幅広い知見が得られる。

(1) 高効率化技術開発

- ◆新規電極形成技術開発
- ◆新規光閉じ込め構造の検討とプロセス技術(ドライ、ウエットおよびレーザーとの組み合わせ等)開発
- ◆新規表面再結合低減構造の検討とプロセス開発
- ◆高品質シリコン多結晶インゴット結晶成長技術開発
- ◆N型素子技術開発

(2) サブテーマ「(a)原料・結晶の研究開発」で得られた基板のセル化評価

- ◆浮遊キャスト成長法による高品質Si多結晶基板の可能性評価
- ◆低価格EMC多結晶ソーラーシリコン利用基板の可能性評価
- ◆太陽電池用低価格単結晶シリコン基板の可能性評価

【成果の最終目標の達成可能性】

「H24年度までに裏面変更セル、バックコンタクトセル・モジュール、エミッタの最適化を確立出来る見込みの為、今後、これらの技術の組み合わせ及び高品質結晶シリコン基板との組合せを図る事で最終目標の達成は可能である」

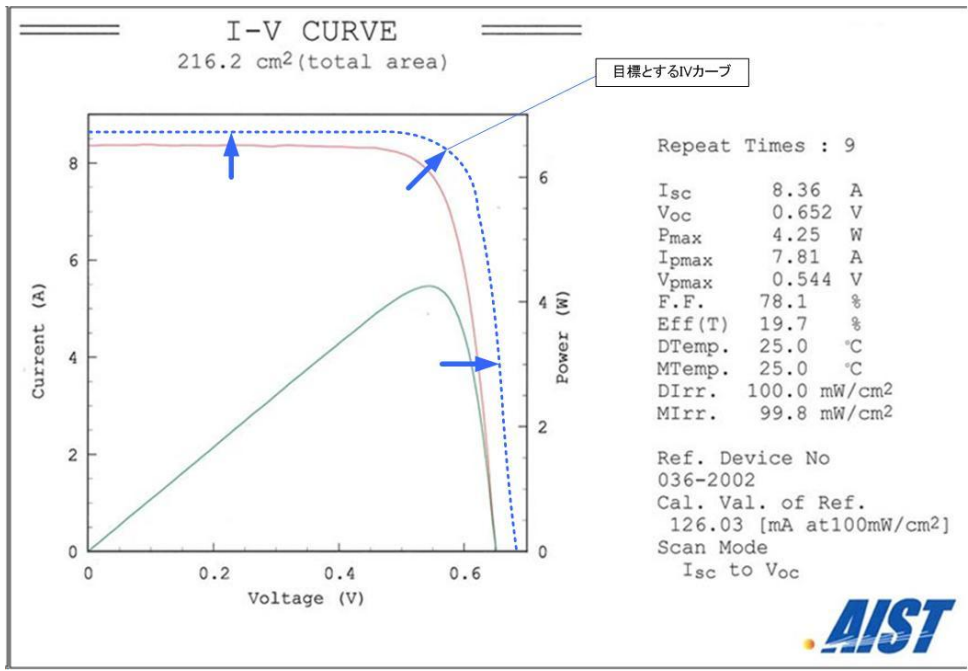
<三菱>

高効率セル製造プロセス技術

高効率セル製造プロセス技術の要素技術の確立を目的として、単結晶セル用テクスチャ形成技術の高度化を実施し、高品質接合構造として拡散接合の最適化、および電極構造等の最適化、パッシベーション構造の開発として、豊田工業大学の協力の下、低温酸化膜形成プロセス等の各種パッシベーション膜の高性能化、およびレーザー加工技術等によるポイントコンタクト開口プロセスの最適化を行いセル変換効率の向上を実施すべく、セルの試作を実施した。

これまでの所、セル製造プロセスの基本技術の確立を完了し、各要素技術を踏襲したセル製造プロセスの安定化および完成度の向上を行い、中間目標変換効率の達成を目指す。

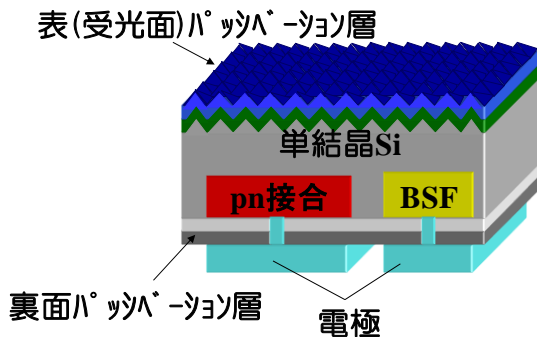
目標としているセルのIVカーブを図III-2-(イ)-A-1(54)に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(54) IVカーブ

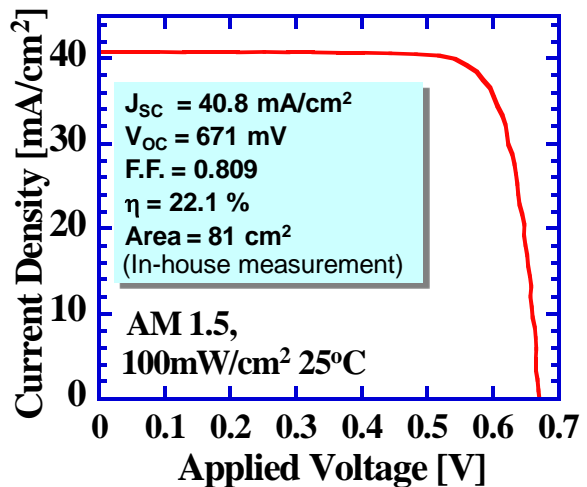
<シャープ>

バックコンタクト（裏面電極型）セルとは表面（受光面）に全く電極のない高効率単結晶シリコン太陽電池であり、p、n両電極を太陽電池裏面に配置することによって高い変換効率と優れた外観を実現することが可能である。従来構造において表電極は電流を取り出すために必要だが、同時に太陽光の入射を阻害する必要悪とも言える。これを太陽電池裏面に配置することで太陽電池への入射光量を増やすことができ、変換効率を向上させることができる。また、表面に電極やインターコネクターがないので、すっきりした外観の太陽電池モジュールを作ることができる。これまでの検討において、図Ⅲ-2-(イ)-A-1(55)に示したような構造のバックコンタクト太陽電池セルを試作し、90mm角サイズ（81cm²）で22.1%（自社測定）の変換効率を得られた（図Ⅲ-2-(イ)-A-1(56)）。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(55) バックコンタクト

試作セル構造



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(56) バックコンタクト

試作セル IV 特性

〈東工大〉

極限シリコン結晶太陽電池の研究開発（ナノ表面・界面制御による超薄型シリコン・ヘテロ接合太陽電池の高効率化に関する研究開発）（国立大学法人東京工業大学 小長井研究室）

本研究では、薄型Siウェハに対する高効率ヘテロ接合型太陽電池の開発を目的として、5cm/s以下の低い再結合速度を実現するための裏面パッシベーション膜の技術開発とセル化技術の実証を行った。

a. ナノ界面制御によるアモルファス酸化アルミニウムパッシベーション膜の技術開発

高密度な負の固定電荷を有する a-AlO_x:H の製膜技術を開発した。まず、a-AlO_x:H/Si 基板界面において構造の制御を行い、負の固定電荷の高密度化を図った。またバッファ層導入や低温堆積による界面制御を試みた。パッシベーション膜の品質評価にはマイクロ波光導電減衰法（MW-PCD）装置および擬定常状態光導電法（QSSPC）装置を用いた。構造の解析に TEM 測定等を行った。その結果、n 型ウェハに対して実効表面再結合速度 3cm/s、p 型ウェハに対しても同様に 3cm/s を得ており、平成 24 年度目標(<5 cm/s)を達成した（図 III-2-2-1-A (57)）。

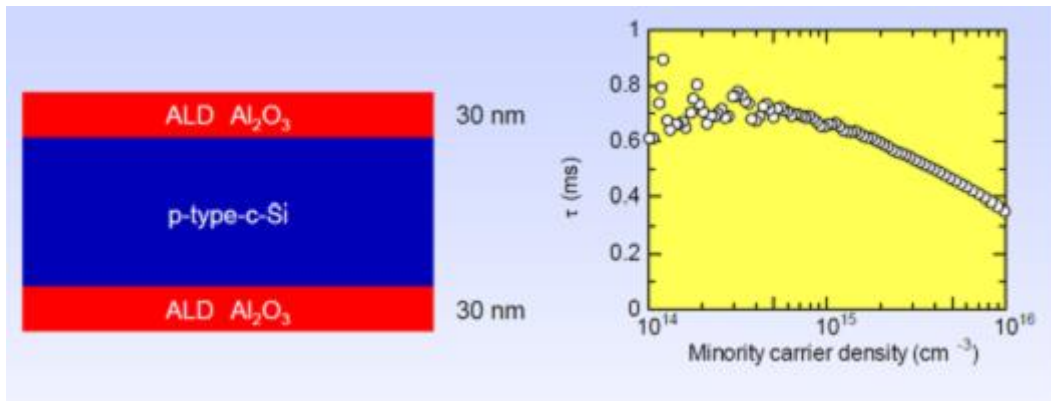


図 III-2-2-1-A (57) ALD 法により作製したアルミナ・パッシベーション膜の性能評価。キャリアライフタイムをもとに計算した表面再結合速度は 3cm/s。

b. 超薄型シリコン・ヘテロ接合太陽電池の開発

(1) n-nc-3C-SiC/p-Si/p- μ c-SiO₂ ヘテロ接合型太陽電池

ポイントコンタクトセルで高効率化を図る前段階として、n-nc-3C-SiC/p-Si/p- μ c-SiO₂ ヘテロ接合型太陽電池の光照射側ヘテロ接合の最適化を図った。特に、n-nc-3C-SiC/p-Si 界面に挿入する a-SiC バッファ層の堆積時間ならびに、製膜時のパワー依存性を詳細に検討し、最適化を図った。その結果、開放電圧 0.710V で変換効率 18.1%（厚さ 140 μ m、セル面積 1cm²）を得た。真性効率は 19.2%である。

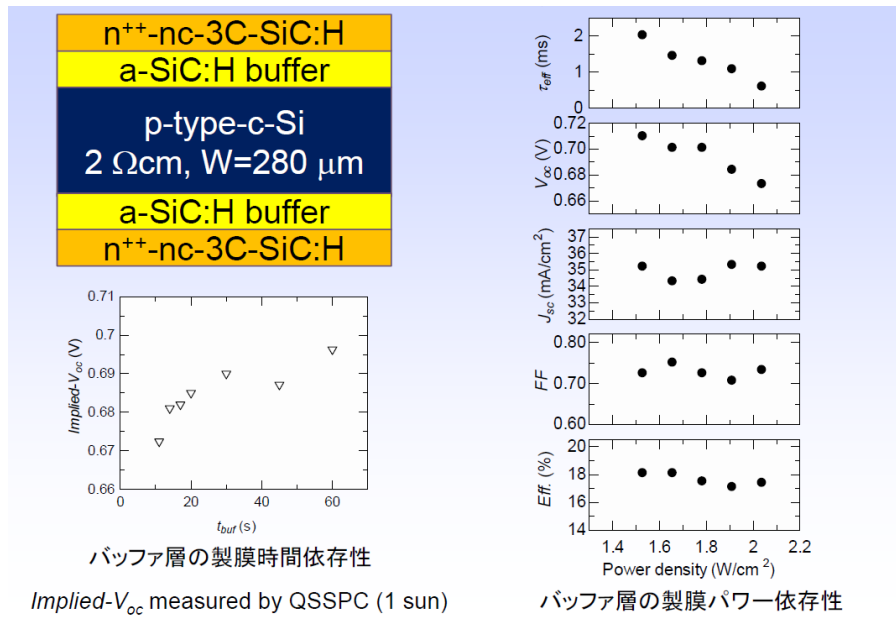


図 III-2-2-1-A (58) (a)n-nc-3C-SiC/p-Si ヘテロ接合形成時のバッファ層製膜時間と *Implied-Voc* 評価結果。(b)バッファ層の製膜パワーと Si 太陽電池特性の関係

(2) p-c-Si₀/i-a-Si₀/n-Si/i-a-Si₀/n-a-Si 太陽電池

p-c-Si₀/i-a-Si₀/n-Si/i-a-Si₀/n-a-Si ヘテロ接合太陽電池の変換効率向上に向けたプロセス開発を行った。本年度は、特に p-c-Si₀ の最適化を図った。その結果、真性変換効率 20.3% (開放電圧 0.717V) を達成した。

(3) a-Al₂O₃ を用いた裏面ポイントコンタクトセル

n 型 nc-3C-SiC を窓層に用いて、p-Si の裏面にパッシベーション膜として Al_{1-x}O_x:H 膜を用いたポイントコンタクトセルを開発した。現状での変換効率は 18.2% である。開放電圧 666mV を得ているが、いまだ十分な値ではないので、MP15 を用いて、セルの各部分における電流-電圧特性の解析・評価を行った。その結果、ポイントコンタクト部の開放電圧が低くなっていることが明らかとなり、これに基づきプロセスの改良を図った。また、ALD で形成したアルミナは、製膜後の熱過程で水疱形成によるライフタイムの劣化が起きていることが判明し、表面処理法による依存性を検討している。

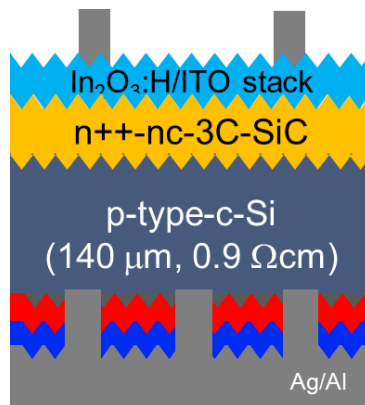


図 III-2-2-1-A (59) n-nc-3C-SiC/p-Si ポイントコンタクトヘテロ接合太陽電池の構造

<岐阜大>

① 結晶 Si 太陽電池用の光起電力顕微鏡の開発

a-Si/c-Si ヘテロ接合太陽電池における高効率化技術として c-Si 基板表面のテクスチャ形成が上げられる。しかしながら、a-Si 薄膜の膜成長は下地である c-Si の配向面によって影響を受けやすい。このため、テクスチャ構造を有する c-Si 基板上への a-Si 薄膜の堆積は均一ではないことが考えられる。また、a-Si 薄膜の膜厚は 10nm と非常に薄いために被覆が不完全であることが考えられた。これを調べるために、光起電力顕微鏡 (図 III-2-(イ)-A-1(60) 参照) を用いてテクスチャ基板における a-Si 薄膜の評価を行った。

a-Si/c-Si ヘテロ接合太陽電池用に形成されたテクスチャ付き c-Si 基板を光起電力顕微鏡によって測定する場合には、次に述べる課題があった。図 III-2-(イ)-A-1(61) に示すように c-Si 基板上に形成されたテクスチャのサイズは、幅が $\sim 5\mu\text{m}$ 、高さが $\sim 3\mu\text{m}$ 程度となっているが、これまでに使用していた光起電力顕微鏡のスキヤナ台の稼働領域は、幅が $20\mu\text{m}$ および高さが $1.5\mu\text{m}$ しかないためにテクスチャの全体像を得ることができなかった。このために、新規にスキヤナ台(走査範囲は、幅が $100\mu\text{m}$ 、高さが $15\mu\text{m}$)を導入して、テクスチャの全体を測定することが可能になった (図 III-2-(イ)-A-1(62) 参照)。

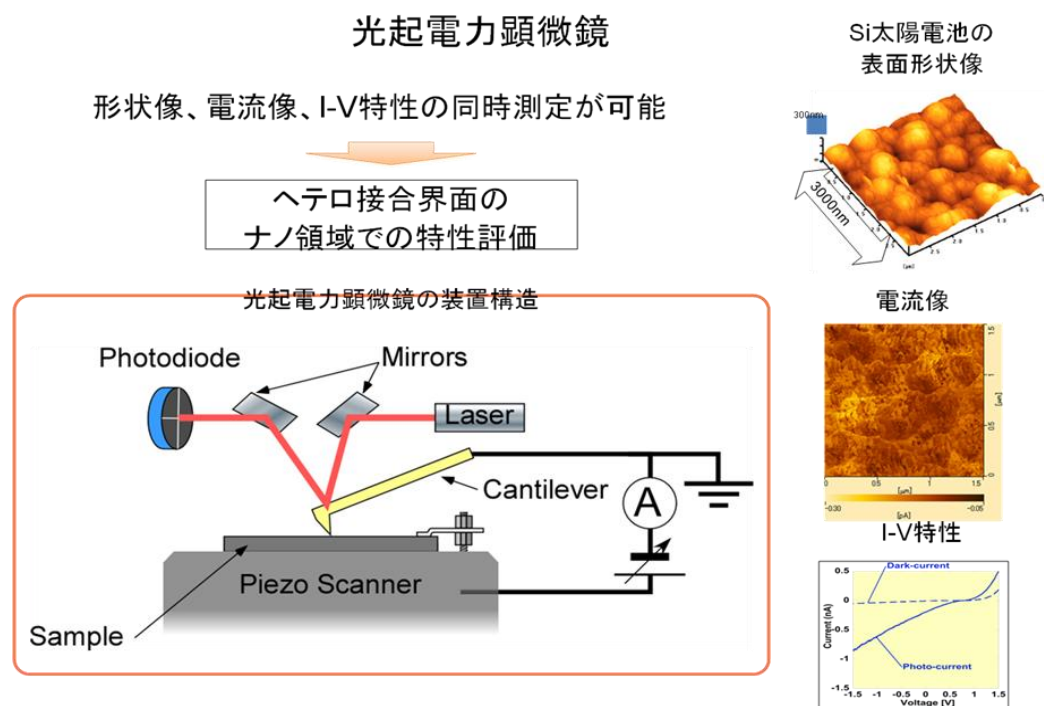
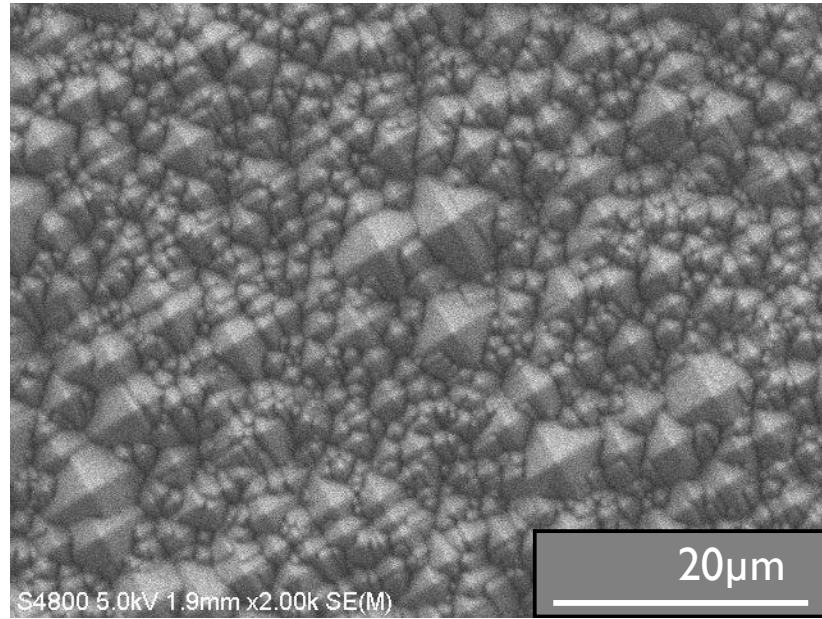
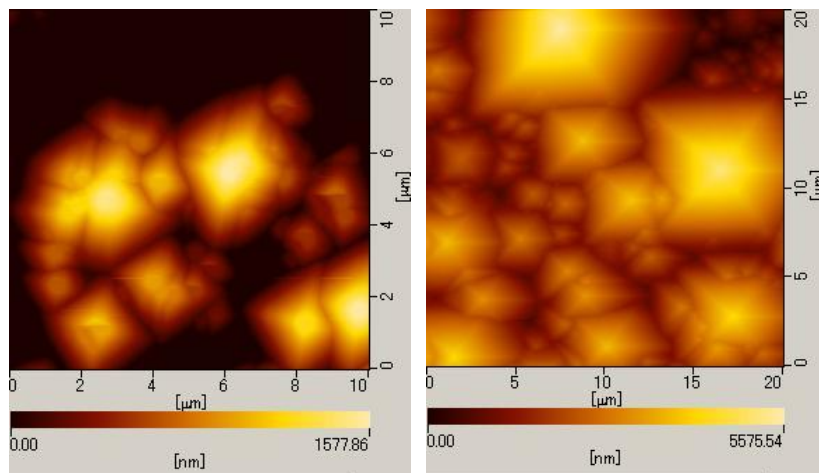


図 III-2-(イ)-A-1(60) 光起電力顕微鏡の概要



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(61) テクスチャを形成した c-Si 基板の表面 SEM 像

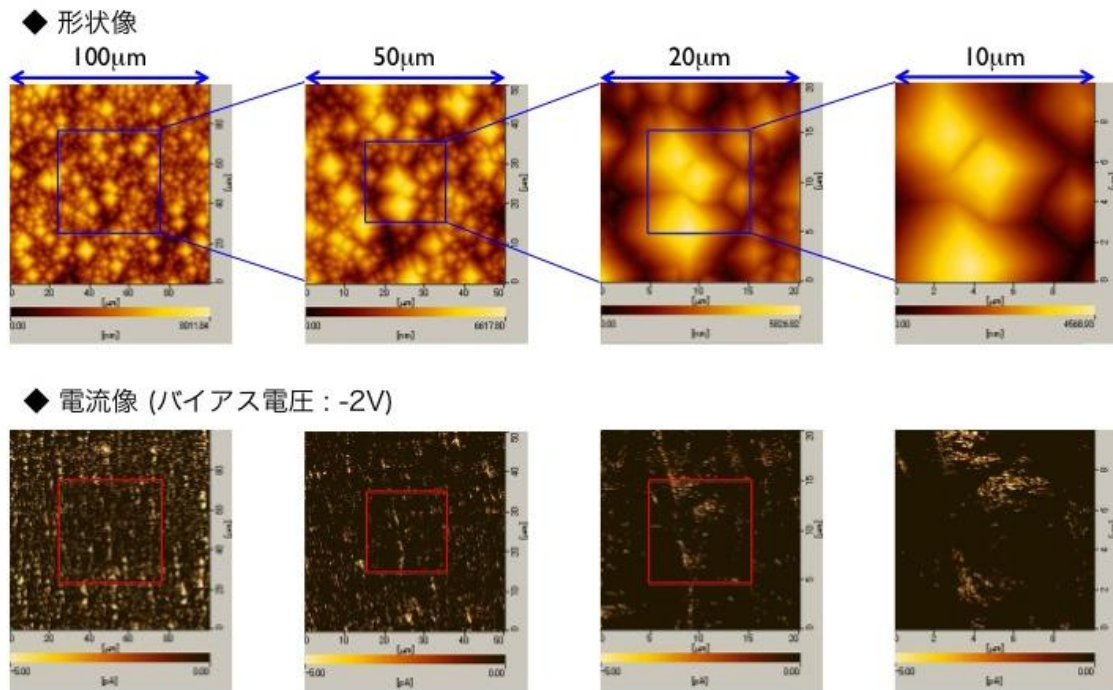


(a)改良前

(b)改良後

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(62) スキャナの改良前後におけるテクスチャ形状像

また、測定領域を $100\mu\text{m}$ 角まで拡大することができた。なお、測定領域の拡大によって形状像および電流像の解像度が低下していないことを確認した(図Ⅲ-2-(イ)-A-1(63) 参照)。これにより、結晶 Si 太陽電池のテクスチャの電気的特性解明のための基礎的計測技術の確立に目処が得られた。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(63) テクスチャ付き a-Si/c-Si 基板の表面形状像および電流

② HIT 構造を中心にテクスチャ構造界面における膜特性評価技術の開発

テクスチャ構造を有する c-Si 基板上に厚さが 10nm の a-Si 薄膜を堆積させて、保護膜としての効果を光起電力顕微鏡によって評価を行った。その結果、低バイアス電圧時に、一部のテクスチャの稜線部分において漏れ電流が流れる部分が観察された。また、高バイアス電圧をにした場合には、テクスチャの平面部分においても漏れ電流が流れる箇所が多数存在することを明らかにした。これは、鏡面研磨された c-Si 基板上に a-Si 薄膜を堆積させた場合には見られない傾向であることから、基板表面のテクスチャ構造によって a-Si 薄膜の膜質が不均一であることを明らかにした。また、これらの結果は光照射下における光起電力顕微鏡の測定によって、より鮮明に検出できることを確認した。

(2) 成果の意義

- 本成果は、HIT 構造単結晶 Si 太陽電池のテクスチャ上の保護膜の（主として）稜線部の問題点を定量的に明らかにしたものであり、課題が明確になったため今後の α -Si 保護膜性能改善の方針を絞ることができて発電効率の向上が期待できる。ひいては市場拡大につながるものと考えられる。
- 本成果は、HIT 構造のテクスチャ部分の（主として）稜線部の問題点を定量的に明らかにした点で世界初のものと考えられる。
- テクスチャ稜線部分の改善には①新しいテクスチャ形成技術や②新製膜技術が必要になると考えられる。
- 本成果は α -Si 保護膜で得られたものであるが、ヘテロ接合の評価法としてその他の保護膜への波及が可能と考えられる。

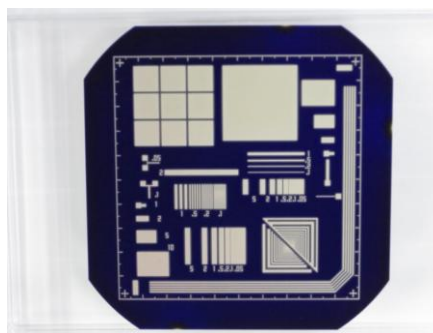
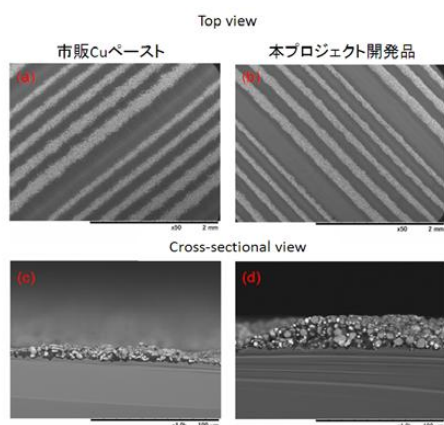
- 予算に見合う成果と考えられる。

本成果は光起電力顕微鏡の本来の機能に加えて着目すべき評価点を絞りだすノウハウにより得られたものであり、競合する他の検査方法と比べて優位性を有している。

<AIST>

銅ペーストの研究開発

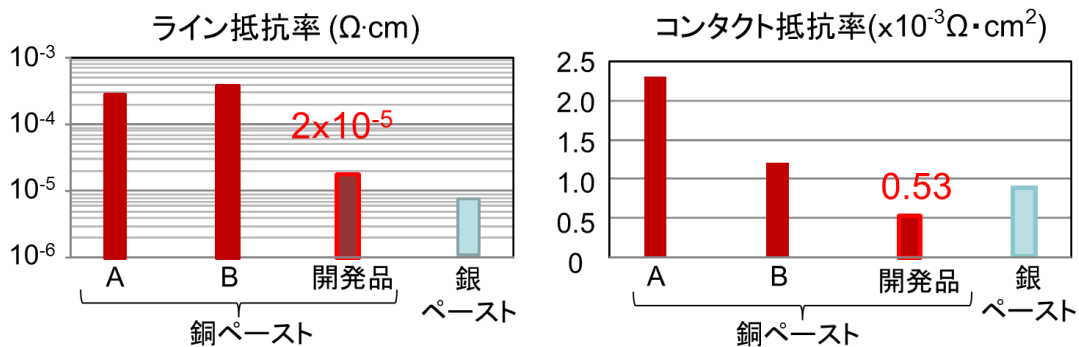
酸化されやすく、基板に拡散しやすい銅を太陽電池電極材料として適用できるよう新しい概念の銅ペーストを提案した。偏析しない均一組成のナノコンポジット粒子とした低融点合金を混合させ、200℃以下で焼成可能な銅ペーストの開発に成功した。143℃に融点を有する低融点合金を用いる事により、150℃、10分間で焼成できる事が分かった。四探針抵抗率評価システムを整備し、ライン抵抗率について他の市販銅ペーストと比較検討した。その結果、他の銅ペーストが 10^{-4} オーダーであるにもかかわらず、開発した銅ペーストはライン抵抗率は、 $7.0 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ と低いことが分かった。印刷性についても、スクリーン印刷法により、滲みの少ない細線の形成が可能であることが分かった。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(64) 銅ペーストの印刷 Ⅲ-2-(イ)-A-1(65) シリコン基板に印刷、焼成した銅ペースト

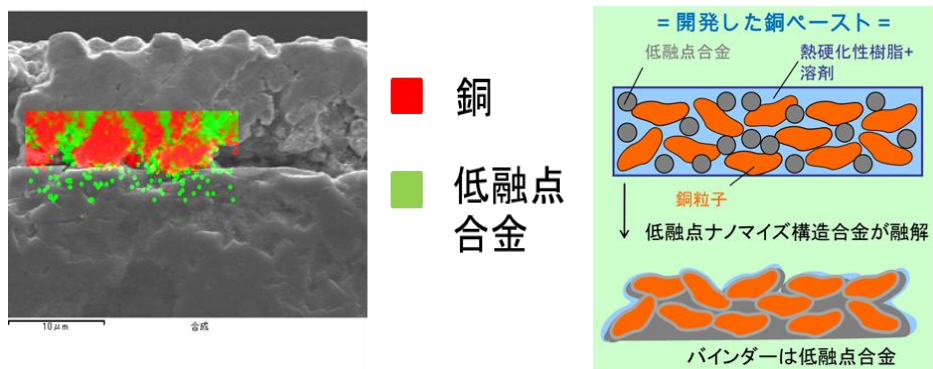
平成23年度では、さらなる抵抗率の低下をねらうとともに、銅電極としての耐久性、接着性について検討した。

ペーストの抵抗率をさらに下げる目的で、成分比を変え、焼成条件を検討した結果、ライン抵抗率 $2.2 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$ まで低下させることに成功した。さらに、透明電極上のコンタクト抵抗率は、 $0.53 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ の値を得て、いずれも平成24年度中間目標を前倒して達成することに成功した。



図III-2-(イ)-A-1(66) 開発した銅ペーストのライン抵抗率、コンタクト抵抗率

開発した銅ペーストをガラス基板上に電極化後、その形状分析を SEM 観察により行った。その結果、低融点合金は、銅粒子間また基板表面に拡散し、ひとつの凝集体を形成していることが分かった。このことから、開発した銅ペーストの低いライン及びコンタクト抵抗率は、低融点合金が融解、拡散することにより、効果的に粒子間抵抗を低下させ、また基板との接触面積の増加による接触抵抗率の低下することに基づくと考えられ、設計概念の妥当性が示された。



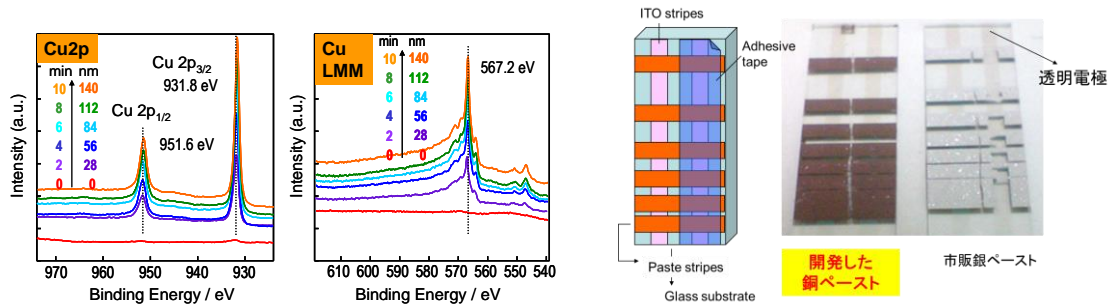
図III-2-(イ)-A-1(67) 銅電極の SEM 断面図 (左) と銅ペーストの設計概念 (右)

耐久性について、結晶シリコン基板上に、開発した銅ペーストを塗布し、銅酸化状態と銅のシリコン基板へのマイグレーションをそれぞれ XPS, SIMS により観測した。その結果、2 日室温、空気中にさらしても酸化銅のシグナルはほとんど認められなかった。2 週間後においても同様の結果を得ている。また、マイグレーションについても SIMS の深さ分析予備実験において、顕著な銅の拡散は認められなかった。これらの結果は、開発された銅ペースト中の低融点合金の存在が耐酸化性や耐マイグレーション性に大きく寄与している事を示している。

さらに作製された銅電極性能において、温度 85℃、湿度 85% 下で、ライン抵抗率の変化を追跡する環境試験を行なった。その結果、抵抗値は、2000 時間経過しても、ほとんど変化しないことが分かった。開発した銅ペーストは、耐酸化性があり安定した抵抗率を提供できるものとする。

接着性について、透明電極上に銅電極を作製し、テープ剥離試験により検討した。その

結果、市販銀ペーストでは、銀電極の剥離が認められたが、開発された銅ペーストでは、10回テスト中透明電極からの剥離は全く確認されず、透明電極との接着性が良好であることが分かった。



図III-2-(イ)-A-1(68) 銅ペーストのXPS測定結果 図III-2-(イ)-A-1(69)テープ剥離試験結果

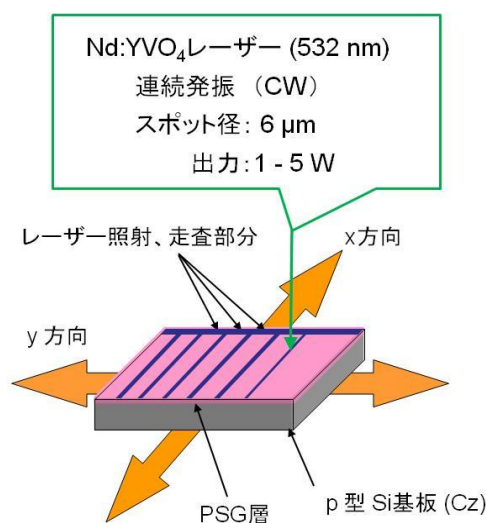
今後は、更なる信頼性試験を行うとともに、太陽電池セル上での性能評価、信頼性評価を検討する予定である。

<奈良先端>

(1) ドーピング濃度ならびに深さ制御技術の開発

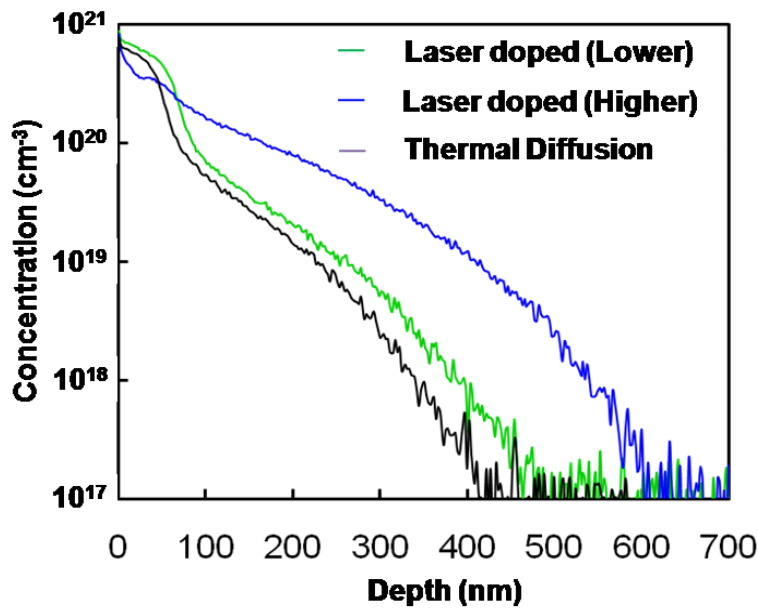
室温レーザードーピングの要素技術として、ドーピング濃度ならびに深さの制御技術を開発する。適切な波長のレーザービームを選択し、照射強度をレーザーパワーならびにビーム形状や基板走査速度を変えて制御し高濃度ドーピングを目指す。高品位電子物性を有するドーピング層ならびに接合界面を実現することを目標とする。

図III-2-(イ)-A-1(70)に基本的な装置の概略を示す。光学レンズにより集光したレーザービームを不純物拡散剤が塗布してある基板に照射する。基板温度は室温で大気中に設置してある。基板位置をX-Yステージにより走査し、任意の場所にドーピングを行う。



図III-2-(イ)-A-1(70) 実験装置の概略図

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(71)に波長 532nm の CW レーザーを用いた場合の不純物濃度の照射強度依存性を示す。参考として熱拡散による不純物導入の場合も示す(Thermal Diffusion)。レーザードーピングによりより深くまで導入されていることが分かる。レーザー照射により基板 Si が一旦熔融し、液相中での拡散となるため短時間でも深い位置まで不純物が導入されたと考えられる。高エネルギーの場合、より深くまで導入されたが、最表面においての濃度は低エネルギーの場合に比べ少し低下した。これは、拡散源の濃度が不十分なためである。いずれの場合も $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上の高濃度ドーピングを達成しているが、プロファイルの制御には照射条件の最適化が必要である。



図Ⅲ-2-(イ)-A-1(71) 不純物濃度分布

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(10)に表面抵抗の条件依存性を示す。熱拡散に比べ約 $1/3$ の低抵抗が実現されている。

今後、高効率構造作成のために、広い範囲(極浅(200nm)～深い(1000～2000nm))で濃度プロファイルを制御した接合の実現を目指す。

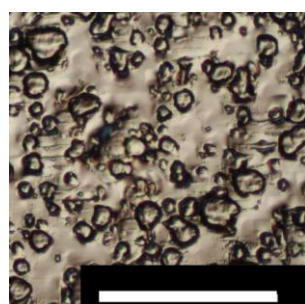
表Ⅲ-2-(イ)-A-1(10) 表面抵抗依存性

Step	R_{sheet}
Diffused	44.6 Ω/\square
Laser (Lower)	29.6 Ω/\square
Laser (Higher)	14.9 Ω/\square

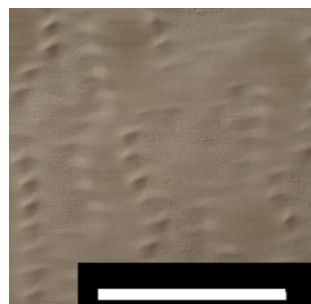
(2) 局所領域へのドーピング技術の開発

極細レーザービームの走査により、局所領域へのドーピングを実施する。ビーム走査の高精度制御技術を確立し任意形状のドーピングパターンにおける不純物導入を目指す。

集光した極細レーザービームの走査により、局所領域へのドーピングを実施した。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(72)に照射後の基板表面の形状を示す。照射前表面が粗い場合、表面にはクレーター状の凹凸が観察され（左図）、これが少数キャリアの再結合中心として悪影響を与えることが分かった。化学的研磨により基板を平坦化したところ、右図に示すようにレーザードーピング後も平滑な表面が形成されており、極細ビーム径と同程度の空間制御性を有する不純物導入が実現されたと考えられる。実際、200 ミクロン幅程度のフィンガー電極直下のみ高濃度不純物層を有するセレクトィブエミッター構造を持つ素子を試作し評価した結果、その有用性が確かめられた。今後、ビームブランキングとビーム走査の同期制御により任意形状のドーピングパターンにおける不純物導入を目指すと同時に、電子物性と表面形状との関連を精査していく。



100 μm
無処理表面

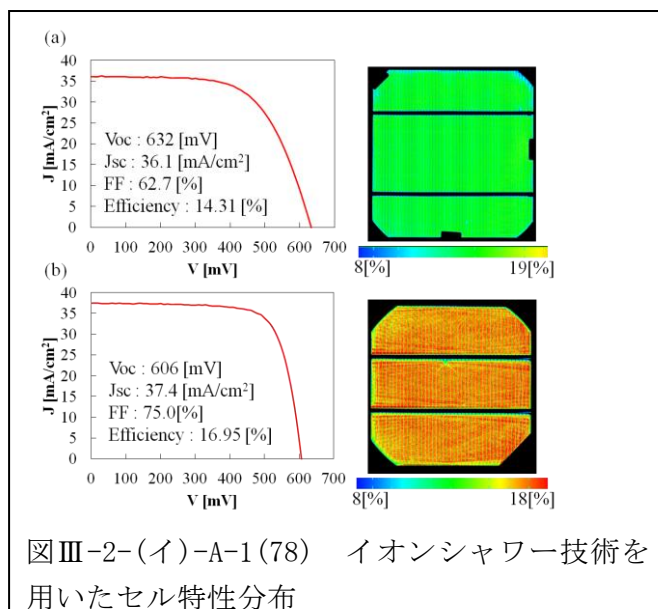
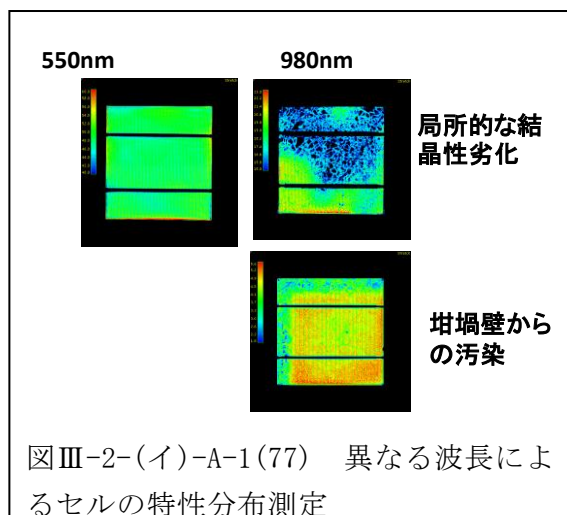


100 μm
化学研磨表面

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(72) レーザー照射後の表面状態

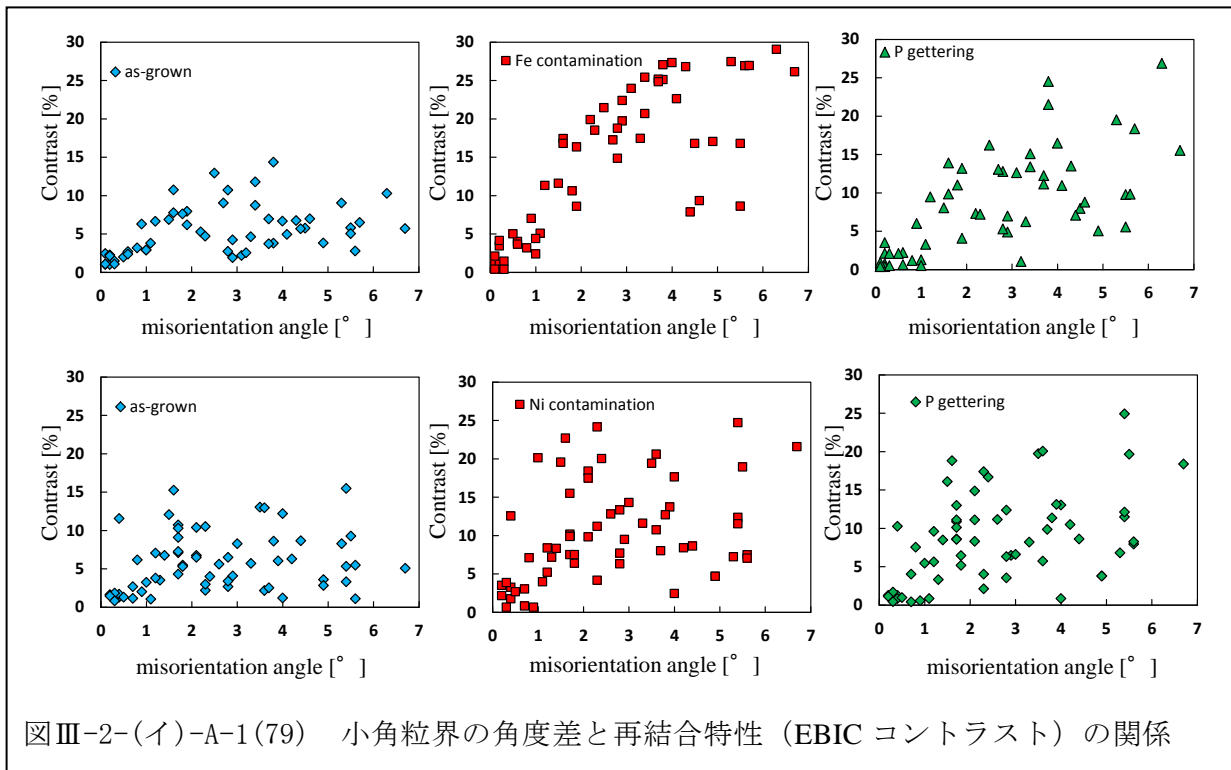
〈明治〉

低コスト原料を用いて成長させた結晶では、局所的に少数拡散長の劣化が予想される。またプロセスの不均一はそのまま特性の不均一に直結する。そのため、単に太陽電池の特性を基板間で比較するだけでは不十分であり、基板面内における各特性を定量的に評価することが必要不可欠である。我々は共通評価装置として面内効率評価装置を立ち上げ、セル評価を進めた。本装置は、2次元状の光を照射しCT解析することにより面内での効率分布情報を得ることができる。また、照射光の波長を変化させることにより、基板深さ方向の分布を同時に得ることができる。図III-2-(イ)-A-1(77)に異なる波長を用いた多結晶シリコン太陽電池の評価結果を示す。結晶成長条件と拡散長の短い領域との間に相関があることが示された。また、図III-2-(イ)-A-1(78)には低コストでイオン注入と同等の効果が期待されるイオンシャワー技術(質量分離を伴わない低コスト注入技術)を用いて、(a)通常セル及び(b)選択エミッタセルを作製した結果を示す。通常セルではセル全体に均一な値を示していることが分かる。このことからイオンシャワー技術は金属汚染、ダメージなどの特性劣化は見られない。今後、他の要素技術との組み合わせ、注入及び熱処理条件等の最適化を行うことで高効率セルの要素技術となる。



低コスト原料を使用する際、金属不純物の混入が懸念される。結晶欠陥の中で特に再結合特性が高いと言われている小角粒界と金属不純物の関係について理解することが、低コスト原料を使用する際に重要となる。我々は主な金属不純物として知られている鉄およびニッケルに関して小角粒界の角度差に対する再結合特性を確認した。図III-2-(イ)-A-1(79)に未処理の状態、強制汚染処理を行った状態、ゲッターリング処理を行った状態における小角粒界の角度差と再結合特性の関係を示す。金属種、各処理条件及び角度差によって再結合特性が異なることが分かる。また、同じ角度差でも再結合特性の異なる小角粒界の存在

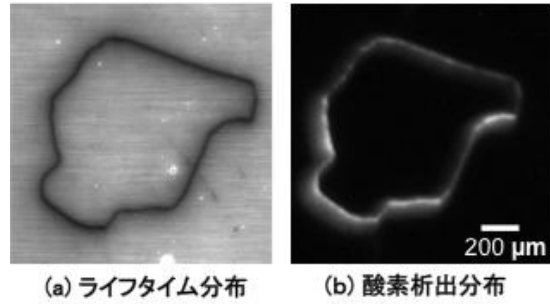
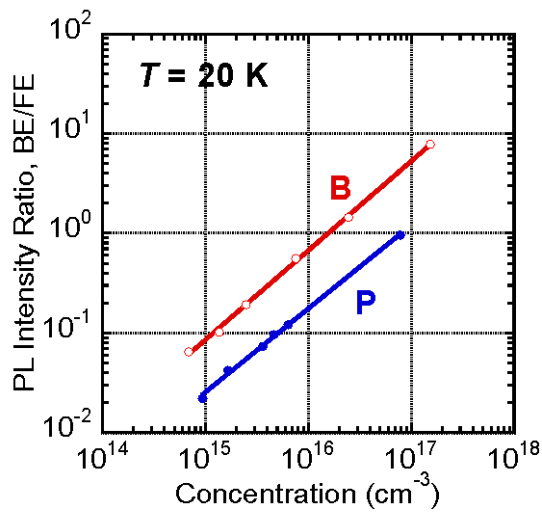
を確認した。再結合特性の差は小角粒界の微細構造に寄ることを明らかにした。上記のことから、小角粒界の再結合特性は金属種、小角粒界の角度差及び微細構造により大きく変化することを明らかにした。



図III-2-(イ)-A-1(79) 小角粒界の角度差と再結合特性 (EBIC コントラスト) の関係

高効率低コスト結晶シリコン太陽電池を実現するためには、低価格低純度 Si 原料を使いこなすことが不可欠であり、そのための第一歩が原料中のドナー・アクセプタ不純物の定量分析である。我々は電子デバイス用 Si 原料の不純物定量において JIS ならびに SEMI で標準化されているフォトルミネッセンス(PL)法を低純度原料評価に拡張した。すなわち励起光強度を上昇させることにより、ホウ素およびリンに対する定量上限を $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ まで伸展させたことに続き、試料温度を高温化することで、図III-2-(イ)-A-1(80)に示すような検量線を作成し、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の濃度域への拡張に成功した。同法により得られた結果は質量分析等の他の手法による値と良い一致を示し、十分実用化できる見通しが立った。

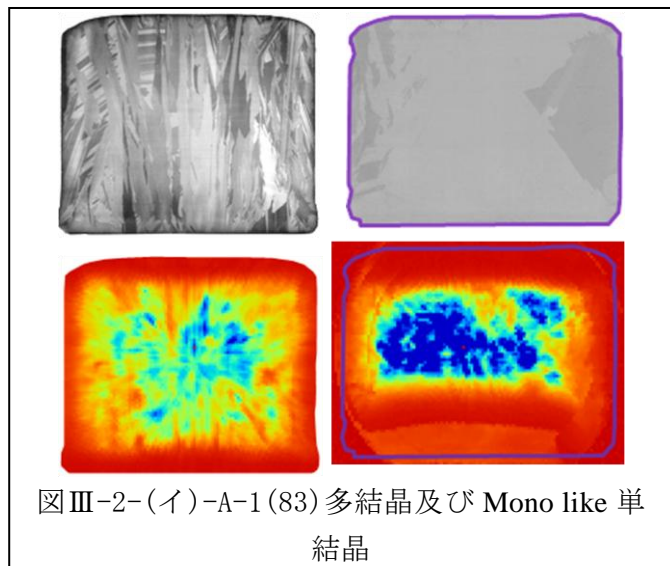
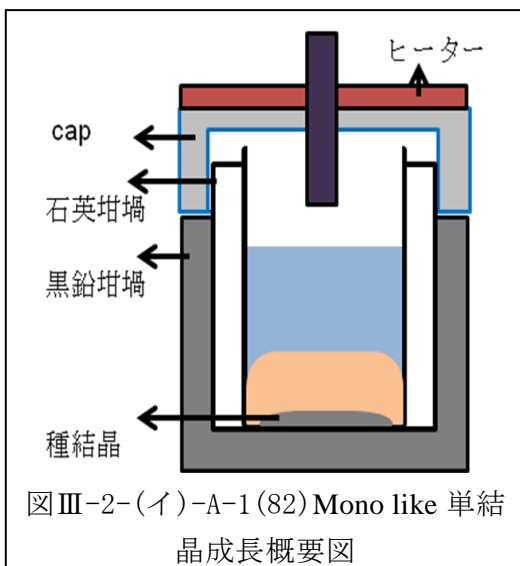
また太陽電池用多結晶ウエハの深い準位の PL マッピングの精密解析より、転位起因の発光成分と酸素析出起因の成分を分離して検出することに成功し、ウエハ内のライフタイム低下部位で酸素析出物が発生していることが捉えられ、酸素析出が高効率化の障害要因であることを明確に示した (図III-2-(イ)-A-1(81))。



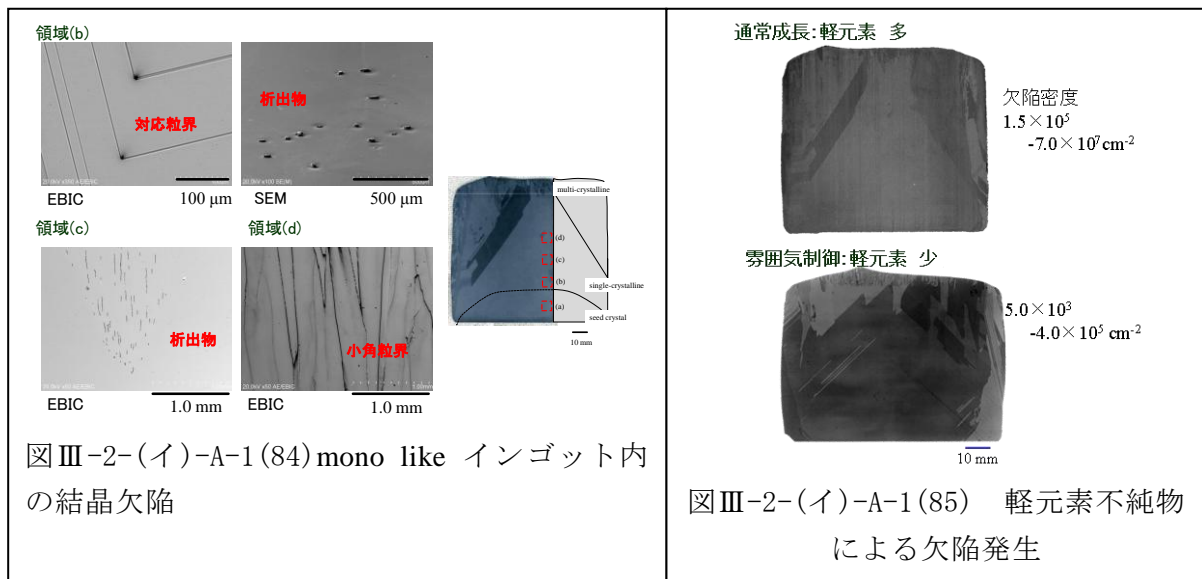
図Ⅲ-2-(イ)-A-1(81) 多結晶 Si ウエハーの PL マッピング

図Ⅲ-2-(イ)-A-1(80) PL法の不純物濃

低コスト単結晶成長法である Mono like 結晶を実用化するためには発生する結晶欠陥の特性を理解することが重要である。我々は小型の結晶成長炉で Mono like 結晶を作製し(図Ⅲ-2-(イ)-A-1(82))、結晶欠陥の発生と伝播について評価を行った。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(83)に多結晶及び Mono like 単結晶の断面図及びライフタイム分布を示す。単結晶化することで粒界起因であった縦縞状の不均一分布が消滅し、また、ライフタイムが約4倍に向上した。図Ⅲ-2-(イ)-A-1(84)に成長させたインゴット内に分布する結晶欠陥の例を示す。成長初期よりC, N関連の析出が存在し、種結晶直上では対応粒界が主な結晶欠陥であったのが、成長の進捗に従って小角粒界が支配的なることを確認した。また、雰囲気制御により軽元素の取り込みを減少することで結晶欠陥の減少を達成した(図Ⅲ-2-(イ)-A-1(85))。詳細な評価により、雰囲気から取り込まれた軽元素が析出物を発生し、析出物が原因となって小角粒界が生じ、小角粒界のもたらした結晶歪が高密度の転位の原因となることを見出された。混入軽元素の低減はこれらの結晶欠陥の抑制に有効であると考えられる。また、共通装置として導入・立ち上げた欠陥分布評価装置を用いて欠陥密度が $10^5 \sim 10^7 / \text{cm}^3$ から



$10^3 \sim 10^5 / \text{cm}^3$ に低減されていることを確認した。



本プロジェクトで開発された PL 法による定量分析法では、 $1 \times 10^{14} - 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の範囲でドナー・アクセプタ不純物の種類を同定し、濃度を決定できる。従来用いられていた SIMS、GD-MS 等の質量分析法と比べ、電気的に活性な不純物のみを検出すること（質量分析法は総量検出）、特に低濃度域での精度が高いことの大きな利点を持つことから、有力な新しい不純物定量手段として大きな注目を集め、数々の国際会議で招待講演を依頼されている。

当研究室では Si ウエハの PL マッピング技術を世界で初めて実用化させた実績がある。現在一般に広く利用されている PL イメージング法はバンド端発光強度測定からライフタイム分布を高速に得るものであるが、本プロジェクトでは深い準位の PL マッピングという未開拓の分野に挑戦し、高効率化の阻害要因である酸素析出状況の把握に成功した。

本プロジェクトで開発された変換効率分布測定装置 (MP-15) は、太陽電池セルの局所的特性劣化箇所を詳細に特定できる。また、セル全体だけでなく、局所的な電気特性の評価が可能なることから、特性劣化要因の各プロセスへのフィードバックがより詳細に行える利点を持つ。また、照射光波長の変更が可能であり、深さ方向に対する評価も可能であることから、従来行われてきたセル特性の評価よりも詳細に特性劣化要因の特定が可能となる。

本装置を用いて評価を開始したイオンシャワー技術によるエミッタ層の形成の結果は、IEEE PVSC での発表では多くの研究者から興味持って頂き、更なる実験、評価を進めることで変換効率 20% を達成する要素技術となると考えられる。

Mono like インゴットの結晶欠陥の評価、小角粒界と金属不純物の再結合特性の関係に関する評価は、低コスト単結晶、高効率多結晶作製において重要な基礎物性を示している。更なる詳細な評価を進めることで太陽電池用結晶シリコンの物性を明らかにすることが出来ると考えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-A-1(11) 研究開発項目ごとの成果・達成度

中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
新日本ソーラーシリコン			
結晶系シリコン太陽電池に適用可能なポリシリコンを製造するための原料(シリカ、金属シリコンなど)、および中間原料(クロロシラン)に求められる必要最低限の純度を明らかにする。そのために以下の課題を達成する。 (1) 不純物を多く含む原料を精度良く分析するための分析装置の選定/導入と分析技術の開発 (2) 限界組成を確認するためのサンプル収集と分析 (3) 直接塩化に適合する原料の特定と原料性状の把握した 豪州産シリカの直接塩化原料適性を確認、国産シリカのアップグレードによる適合可能性を見出した	(1)分析装置の選定と導入 出発原料分析 ICP-MS 中間原料分析 GC-FID FIA, IC シリカ直接分析技術の開発 ICP-MS : 高 Si 含有試料の分析 中間原料分析技術 (2) サンプル収集と分析 シリカ 39 試料収集/分析 カーフ Si 7 試料収集/分析 SiCl ₄ 直接塩化試料等の分析 JSS 亜鉛還元シリコン単結晶をコンソーシアムへ提供 国産シリカのアップグレード試験 (計画外の成果) 国産最純シリカ 98.5%→99.5% (3) シリカ : 国産鉱石の適合性確認 カーフ Si : 塩化戻し材適性確認 クロロシラン : 直接塩化 SiCl ₄ の亜鉛還元原料適合性確認	◎ ◎ ○ ◎ ○ ◎ ◎ ◎ ○ ○ ○	豪州産シリカの評価は完了、国産鉱石およびカーフ Si について直接塩化試験を実施、SiCl ₄ を生成し、中間原料による適合性分析を実施予定 (~H24 年度末)

九州大学			
高効率単結晶育成炉の温度分布解析シミュレータ構築	結晶成長炉内の全プロセスによる温度分布の定量予測を可能とするシミュレータを構築し、実験結果を定量的に予測可能となった。	◎	500Kg チャージ大型単結晶育成装置内の温度分布の定量予測
高効率単結晶成長炉の不純物除去解析シミュレータ構築	不純物の定量予測を可能とするシミュレータを構築し、実験結果を定量的に予測可能となった。	◎	
高効率単結晶育成炉の低転位化および低残留応力化が可能な解析シミュレータ構築	結晶成長、冷却過程における転位密度、残留応力の定量予測を可能とするシミュレータを構築し、実験結果を定量的に予測することを可能にする。	○	
NIMS			
少数キャリアライフタイム 100 μ sec 以上	MONO like 化によって、縦縞状の不均一分布が消滅 200 μ sec 以上を達成	○	
SUMCO			
(1)平成 24 年度中間目標： ライフタイムの値 (リン拡散後)を 200 μ sec (2)平成 26 年度最終目標： ライフタイムの値 (リン拡散後)を 400 μ sec	(1)中間目標に対する成果 一部のサンプルで 205 μ sec のリン拡散後ライフタイムを達成した。 その他の成果 ・ n タイプでありながら、偏析に依存しない抵抗プロファイルを実現した。 ・ 水素パッシベーションにより 400 μ sec を超える値が出た。最終目標達成の可能性が示唆された。	○	左記の通り、中間目標を達成した。しかし、変換効率は 16.2%程度に留まり p タイプ量産品に及ばない。これはセルプロセス中のボロン拡散が高温(900℃以上)であり、それによる結晶性の悪化が原因である。水素パッシベーションを利用して改善できる可能性が示唆されたが、弊社のソーラー事業撤退により開発を中止した。

京都大学			
<p>・ 残留融液の分離技術を開発し、浮遊キャスト成長法にて大型インゴット成長が可能であることを実証</p>	<p>・ 融液内に低温領域を形成し、ルツボに触れることなくインゴットを融液内で成長する手法を開発し、残留融液の影響を除外した。 ・ 26 cm 径のインゴット結晶を実現した。 ・ 15.6 cm 角のウェハ（実用セルサイズ）を実現した。</p>	<p>◎</p>	<p>・ 大きなルツボ径を使用できる大型炉を製造し、実用的な高品質大型インゴットを作製する。</p>
<p>・ 融液上部での核形成による組織形成メカニズムを解明し、その制御技術を開発する</p>	<p>・ 種結晶を用いて融液表面から核形成を行った成長のメカニズムを精査し、過冷却とインゴット径の相関、ネッキング技術による低転位効果、離型剤による多結晶化の効果、結晶粒界の双晶化に関する有効な知見を得た。 ・ これにより、低転位結晶、双晶を主たる粒界とする多結晶をルツボ径いっぱいの大きさ（φ26cm インゴット/φ33cm ルツボ使用）に成長できる技術を実現できる見通しを得た。</p>	<p>◎</p>	<p>・ 離型剤の影響を低減し、離型剤に由来しない結晶組織を形成する。 ・ ネッキング技術を精査し、無転位シリコン結晶を実現する</p>
<p>・ 従来のキャスト法に比較して結晶品質に優れるメカニズムを明確にする</p>	<p>・ 太陽電池特性に影響しないΣ3 双晶粒界を主たる結晶粒界とするシリコン多結晶を実現した。 ・ ネッキング技術が使用できることを確認し、低転位密度（$10^3/\text{cm}^2$ 以下）結晶の実現可能性を確認した。 ・ 酸素濃度は、チョコラルスキー成長法の単結晶よりも 1 桁程度低く、キャスト成長法の多結晶と同様に低濃度化できた。</p>	<p>◎</p>	<p>・ 全てが双晶粒界からなる完全な双晶結晶を実現する。 ・ インゴット結晶表面の気相汚染を防ぐ高純度装置を開発する。</p>

<p>キャスト成長法による結晶を上回る変換効率</p>	<p>180 μm 厚、10 cm 角ウェハーで、簡易プロセスにより 17.1% を達成し、現在の間時点でも通常のキャスト成長法と同等の品質ができていることを確認した。</p>	<p>○</p>	<p>・高純度化、低転位化、離型剤の影響の排除により、より高品質なシリコン多結晶を実現する。</p>
<p>10 cm 角の結晶で 200 μm 程度の拡散長を実現</p>	<p>・中心部平均拡散長：200 μm、 ・最大拡散長：610 μm、 ・ウェハー平均ライフタイム：31 μ を実現した</p>	<p>◎</p>	<p>同上</p>
<p>東北大学</p>			
<p>・残留融液の分離技術を開発し、浮遊キャスト成長法にて大型インゴット成長が可能であることを実証する。 ・融液上部での核形成による組織形成メカニズムを解明し、その制御技術を開発する。</p>	<p>融液表面でデンドライト結晶を発現させることによる組織制御と、二重ルツボによる融液分離技術を融合することにより、浮遊キャスト成長法を具現化するとともに、大型インゴット成長が可能であることを実証した。作製したインゴットから、15.6cm 角の大粒径 Si ウェハを実現した。</p>	<p>◎</p>	<p>中間目標は達成したが、最終目標達成に向けては、大型インゴットの高品質化成長技術の開発が必要である。</p>
<p>・浮遊キャスト成長法が従来のキャスト法に比較して結晶品質（結晶組織、結晶欠陥、不純物など）の点で優れるメカニズムを明確にする。 ・10cm 角の結晶で 200μm 程度の拡散長を実現する。</p>	<p>結晶の組織制御と外部応力の低減により結晶成長過程における転位の発生を抑制できることを明確に示した。結晶の少数キャリア拡散長として、最大値で 340μm、中心部の平均値は 200μm 程度を得た。</p>	<p>○</p>	<p>成長後期の応力低減、成長初期の組織制御の高精度化と不純物の低減により、高均質かつ高品質な結晶の成長を行う。</p>

兵庫県立大学			
カーフ／不純物の分離技術の開発：回分式でシリコン回収率60%以上、純度80%以上	加圧ろ過方式でシリコン回収率70%以上、純度95%以上の結果が得られた。	◎	なし
原料再生技術の開発：原料中の酸素含有量70ppma以下	再生原料中の酸素含有量60ppma以下を達成した。	◎	なし
コマツ NTC 株式会社			
120μm ウェハを歩留り95%以上で加工可能なこと	単結晶□125mm インゴットから120μm ウェハを歩留り95%以上で加工実証した	◎	なし
カーフロス120μm で加工可能なこと（固定砥粒ワイヤーを使用）	カーフロス100μmでの加工を実証した（固定砥粒ワイヤーを使用）	◎	なし
シャープ			
セル変換効率20% （単結晶シリコン基板：厚さ100μm以下、サイズ150mm角）、モジュールでの変換効率18%を達成する。	バックコンタクト太陽電池セルを試作し、90mm角（81cm ² , 220μm厚）で変換効率22.1%（J _{sc} : 40.8mA/cm ² , V _{oc} : 671mV, F.F.: 0.809）を達成。	セル変換効率：◎ 基板厚さ：△ サイズ：△ モジュール効率：△	セル変換効率については大幅達成。基板厚さ、セルサイズ、モジュール効率については年度末までに達成見込み
京セラ			
結晶シリコン太陽電池セル変換効率20%、モジュールでの変換効率18%を達成する。	セル変換効率18.3% （裏面変更構造、自社測定） モジュール変換効率17.3%	△ △	①バックコンタクトと裏面変更セルの組合せ最適化 ②基板結晶品質向上との組合せ最適化 ①バックコンタクトと裏面変更セルの組合せ最適化 ②基板結晶品質向上との組合せ最適化 ③モジュール作製

三菱			
厚さ100 μ m程度、15cm角程度のセルにおいて変換効率20%	<ul style="list-style-type: none"> ●厚さ180μm、15cm角セルにおいて変換効率19.7%を実証。 ●レーザ加工技術を用いた逆ピラミッド型TEXの形成について要素技術の開発を完了した。基板ライフタイムの改善など要素技術の完成度の向上を実施中。 ●めっき技術を用いた細線電極形成技術に関して、初期基本性能を確認した。コンタクト抵抗の改善などセル化技術の適用性向上を実施中。 	△ 平成24年12月達成予定	セル特性向上のために確立した要素技術の完成度を高め、高効率薄型セル製造プロセスの確立を目指す。
東京工業大学			
ナノ表面・界面制御による超薄型シリコン・ヘテロ接合太陽電池の高効率化に関する研究開発 厚さ150-200 μ mのセルで1cm ² において変換効率20%以上を達成する。	p-c-Si0/n-Si/i-a-Si0/n-a-Siヘテロ接合セルで変換効率20.3% (Voc=0.717V)を達成(active area、1cm ²)。 Al1-x0x:H膜を用いたポイントコンタクトセルで18.2% (total area、1cm ²)。	◎	
岐阜大学			
全体の中間目標 ヘテロ接合結晶Si太陽電池に於いて、東京工業大学と共同で変換効率20%以上を達成するための要素技術確立する。	全体成果の概要 光起電力顕微鏡を改良し、HIT結晶Si太陽電池のテクスチャ稜線部等の不具合箇所を検出に成功し、効率向上につながる要素技術を開発できた。	△	全般はH25年2月達成見込み 課題と対策は下記各項に記載。

<p>(1) 結晶Si太陽電池用の光起電力顕微鏡の開発</p>	<p>(1) 光起電力顕微鏡の改良で、計測範囲を $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ に拡大でき、結晶Si太陽電池のテクスチャの電気的特性解明のための基礎的計測技術の確立に目処が得られた。</p>	<p>△</p>	<p>課題である「迷光対策」は既存技術の応用で目途が立っている。現在は施工待ち。 (H24年12月達成見込み)</p>
<p>(2) HIT型単結晶Si太陽電池へテロ接合特性の評価</p>	<p>(2) テクスチャ構造界面の膜特性評価技術の開発の目途を得た ・テクスチャ付きc-Si基板において、10nm α-Siを堆積しても漏れ電流がある部位(稜線部)を検出。またテクスチャ構造平面部分でも検出。これらの分布は、光照射により鮮明に検出できることを確認。</p>	<p>○</p>	<p>(今後はテクスチャ上への均質α-Si保護膜製膜条件の把握に注力)</p>
<p>(3) HIT型ヘテロ接合多結晶Si太陽電池へテロ接合特性の評価</p>	<p>(3) 単結晶を優先したため多結晶はH24年度から評価を実施。</p>	<p>△</p>	<p>H24年度から多結晶の評価を実施 (H25年2月達成見込み)</p>
<p>AIST</p>			
<p>「銅ペーストの研究開発」 コンタクト抵抗 R_c: $< 1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$、ライン抵抗 R_s: $< 2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$</p>	<p>(H22) ライン抵抗率 $7 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}$ 達成 (H23) コンタクト抵抗率 $0.53 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ ライン抵抗率 $2.2 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}$ 達成 (H24見込み)太陽電池性能評価、信頼性評価を行い、現行の銀電極に匹敵する性能を得る見込み</p>	<p>◎</p>	

奈良先端科学技術大学院大学			
ドーピング濃度ならびに深さ制御技術の開発 適切な波長のレーザービームを選択し、照射強度をレーザーパワーならびに形状や基板走査速度を変えて制御し、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上の高濃度ドーピングと、深さ 100-500nm 領域での制御を目指す。最終的に高品位電子物性を有するドーピング層ならびに接合界面を実現する。	波長(紫外域(355nm)ならびに可視域(532nm))のレーザービームを選択し、照射強度をレーザーパワーや走査速度を変えて制御し、最表面において $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上の高濃度ドーピングを達成した。高効率構造作成のために、極浅(100nm)~深い(1~2 μm)接合を実現した。	○	
局所領域へのドーピング技術の開発 極細レーザービームの走査により、50 μm 以下の局所領域へのドーピングを実施する。ビームを高精度で走査し任意形状のドーピングパターンに不純物を導入する。	直径 6~20 μm の極細レーザービームの走査により、50 μm 以下の局所領域へのドーピングを実現した。ビームブランキングとビーム走査の同期制御により 200 ミクロン幅程度の細線フィンガー電極パターンに不純物を導入し選択エミッタ構造を作成した。	○	
明治			
変換効率の面内分布評価を可能とすることで、プロセスによる変換効率劣化要因の抽出技術を開発	2次元上の光照射から CT 解析を行う面内評価装置の立ち上げ、照射光波長の変化から深さ方向に対する特性劣化箇所の測定を達成。	◎	
変換効率 20%達成のための要素技術開発の支援	選択エミッタ層作製技術として期待するイオンシャワー技術の注入特性評価を達成	○	注入深さおよびイオン活性化エネルギーの詳細な解析
ホウ素およびリンに対し、 $1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の濃度領域での定量	$1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の濃度領域での検量線作成。質量分析結果と良く一致。	◎	なし
低コスト単結晶に特化した結晶評価技術の確立し、目標転位密度 $1 \times 10^3 \text{ m}^{-2}$ 以下	Mono like 転位単結晶における不純物混入と欠陥形成のメカニズムを解明し、欠陥密度 10^3 m^{-2} 、少数キャリアライフタイム 100 μsec 以上達成に貢献	○	大型化

豊田工大			
<p>試作した太陽電池の変換効率並びにその面内分布を調べ、個々のプロセスや材料おけ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で、それぞれの開発目標を明確にするとともに、コンソーシアム全体が協力して最終目標を達成できる体制を構築する。</p> <p>低品位原料に関しては金属不純物の種類やその濃度が変換効率に与える影響を定量的に明らかにする。</p> <p>低コスト結晶基板に関しては成長した結晶中あるいはスライス時に導入される欠陥密度と変換効率との関係を明らかにする。</p> <p>加えて銅ペーストや新規パッシベーションなど新たな技術を用いた太陽電池を試作し、それら技術から明らかにする。</p>	<p>125mm角、及び、156mm角の太陽電池が試作可能な試作ラインを構築し、標準工程を確立した。</p> <p>全体会議・サブグループ会議の他に、個別要素技術について、技術討論会を実施した。</p> <p>コンソーシアム内で新規開発された各研究機関の成果を元にセルの試作を行い、各機関の研究開発に貢献した。</p> <p>新日本ソーラーシリコンが新規開発中の原料を用いた結晶でセル試作評価を行い、現状の太陽電池の効率には悪影響を与えない事を示した。</p> <p>コマツ NTC が新規開発を行った固定砥粒による低コスト結晶基板で表面状態が TEX 形成に与える影響を明らかにした。</p> <p>SiN 膜、及び、アルミナ膜の基礎評価・セル試作を行い、その有効性を示し、今後の課題を明らかにした。銅ペーストに関しては基礎評価を行った。</p>	<p>○</p> <p>◎</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>△</p>	<p>銅ペーストを用いた太陽電池の試作評価を行う。</p>

<p>以上の結果を各研究機関にフィードバックし、結晶においてはキャリア寿命100μsec、太陽電池に関しては厚さ100μm、面積15cm角程度のセルにおいて変換効率20%以上、モジュール変換効率18%以上の実現に貢献する。</p>	<p>太陽電池厚さ100μm程度の試作ラインを世界で初めて構築した。</p> <p>結晶（キャリア寿命100μsec以上）・新規材料・プロセス評価を行い、各機関の研究開発に貢献し、変換効率20%以上に寄与した。</p> <p>モジュール変換効率18%は未達</p>	<p>◎</p> <p>○</p> <p>△</p>	<p>これまでに個別要素技術を達成できたので、それらを統合し、目標値を達成する。</p>
---	--	----------------------------	--

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

（※Patent Cooperation Treaty：特許協力条項）

	H22	H23	H24	計
特許出願（うち外国出願）	1(0)	24(0)	3(0)	28件
論文（査読付き）	13	25	14	52件
研究発表・講演（うち国際会議）	65(29)	124(65)	35(15)	224(109)件
新聞・雑誌等への掲載	1	1(9) ^{*1}	0	2件
受賞実績	1	5	1	7件
展示会への出展	3	5	1	9件

※平成 24 年度 7 月 23 日現在

ノウハウ流出を防止するため、戦略的に特許出願を控えている

*1 カッコ内の数値 新聞掲載 2件、テレビ 2件、Web 5件

2. 実用化・事業化見通し

(1) 低コスト原料技術

太陽電池に適用可能なシリカ原料を各種不純物の観点から明らかにした。その結果、国産シリカサンプルから太陽電池原料として適合性が期待できる鉱石が見出された。このことは、それ原料を用いた低コストシリコン原料の製造が期待される。

(2) 低コスト単結晶・高品質多結晶技術

低コスト多結晶に関しては 1) 転位密度の低減、2) 炭素や酸素の軽元素の除去、3) 坩堝壁からの多結晶成長抑止、4) 重金属汚染の防止、5) 全領域単結晶化、の研究開発成果は、各要素技術として今後複数のシリコン結晶メーカー等への技術移転を計画している。転位密度の低減技術は現在多結晶を大量に製造しているメーカーへの技術移転を検討しており、現在その詳細について企業との打ち合わせを行っている。また、3) 坩堝壁からの多結晶成長抑止、4) 重金属汚染の防止、5) 全領域単結晶化技術も、現在多結晶メーカーへの技術移転を検討しており、平成25、26年度に具体的な作業に入る。

高品質多結晶技術においては、浮遊キャストなどの方法により界面特性の良好な多結晶シリコン結晶が得られた。本技術に関しては、セルメーカーへの技術移転を検討しており、今後のさらなる研究開発を通じて実用化が期待される。

(3) 薄型スライス技術

スライス時に発生するシリコンの回収技術の実用化についてはスライスメーカーおよび原料メーカーとの連携が重要となる。具体的には、発生したシリコン微粉末を連続的にクーラントから分離することにより、スライス能力の安定およびクーラント・ワイヤの長寿命化が期待出来る。加えて、UMG-Si と競合しうる再生原料の作製が期待出来る。また、亜鉛直接還元法の原料としても期待される。

(4) 高効率・低コスト太陽電池技術

個別技術に関しては、100 μ m厚の結晶シリコン太陽電池の製造を可能とするプロセス、100ohm/sq 程度の高抵抗エミッタに対してFFが低下しないプロセス、ファインラインプロセス等を開発した。また、レーザーやイオンシャワーを用いた局所ドーピング技術により、従来よりも簡便で安価に選択エミッタ構造など高効率太陽電池に必要な構造を形成することが可能となった。薄型結晶シリコン太陽電池や高効率太陽電池に必要な高品質なパッシベーション膜に関しては、 Al_2O_3 や3c-SiCなどを使用することにより、低い再結合速度が実現された。一方、表面の銀電極に代わる銅電極に関しては、密着性が高く、抵抗の低い配線が形成できる低温ペーストが開発された。また、光起電力を利用したヘテロ接合解析技術により、異種接合の特性評価が可能となった。これらの技術は、今後の高効率・低コスト太陽電池を生産する上で必要な技術として実用化が期待される。

以上述べた本プロジェクトで開発を進めている、1) 低コスト原料技術、2) 低コスト単結晶シリコン成長技術・高品質多結晶シリコン成長技術、3) 薄型スライス技術、4) 太陽電池技術：個別要素、薄型基板太陽電池、次世代技術、を統合することにより、以下のようにセルメーカー各社の製造に大きく寄与することが期待される。

<シャープ>

本P Jの実用化は、2020年までに、モジュール製造コスト：75円/W、モジュール変換効率：20%の太陽電池モジュールを製品として市場投入するところまでを指す。

これまでの開発検討において、バックコンタクト太陽電池セルを試作し、90mm角サイズ(81cm²)で変換効率22.1%(自社測定)が得られている。また、ヘテロ接合バックコンタクトセルを試作し、Jsc35.0mA/cm²、Voc665mV、F.F.0.621、変換効率14.5%を得た。さらに導入予定のヘテロ接合開発用PECVD装置を使って1msecを超える非常に高い実効ライフタイムを得るとともに表裏電極型ヘテロ接合セルを作製し、718mVという高いVocを得た。

上記のセル技術開発と並行して、薄型バックコンタクトセルに適したモジュール構造として、配線基板上に表面実装し、セル電極を配線に直接接続する表面実装方式を検討した。上記の開発成果にヘテロ接合形成技術や、薄型バックコンタクトセルに適したモジュール構造を組み合わせ、平成26年度末までに最終目標(セル変換効率25%(単結晶シリコン基板：厚さ100μm以下、サイズ150mm角)、モジュールでの変換効率20%)を達成する。さらに、シリコン原料の低コスト製造技術、シリコン基板の薄型スライス技術など、原料の製造から太陽電池セルまで一貫した研究開発の成果を適用して、低コストで高効率な世界最高レベルの競争力を有する結晶シリコン太陽電池モジュールを実現し、製品として市場投入する。

<京セラ>

本P Jの実用化は、新構造超薄型多結晶シリコン太陽電池を事業化(量産)するところまでを指し、下記課題の克服により実現可能と考えられる。

(1) 高効率セルの事業化

⇒2013年事業化(量産)開始予定

(2) 高効率モジュールの事業化

⇒課題：低コストプロセス技術、長期信頼性

(3) 超薄型高効率セルの事業化

⇒課題：高い生産性の超薄型セル用プロセス技術
(ハンドリング、枚葉プロセス)

<三菱>

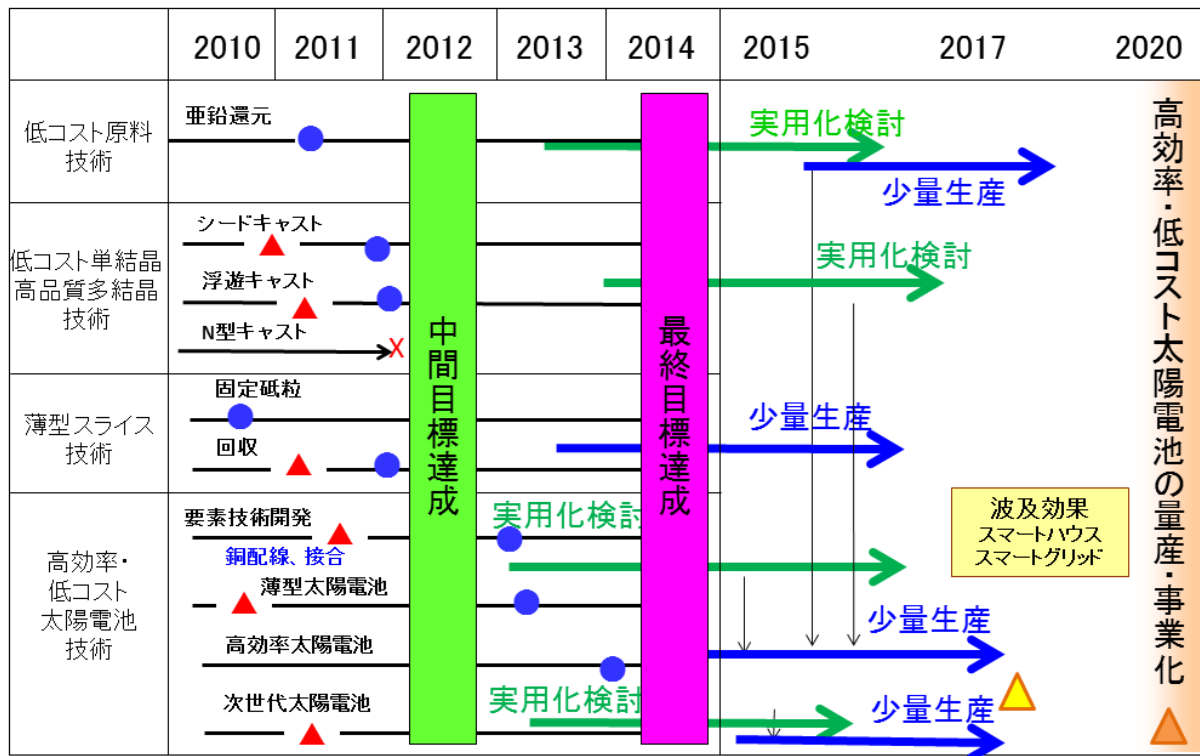
極限シリコン太陽電池セルの製造事業化計画

現在量産を実施している拡散接合型セルの製造技術を継承した、高効率セルの量産化の施を目指している。レーザー加工技術を用いた逆ピラミッド型TEXの形成においては、量産時の製造タクトを目標とし、基板表面に形成する約1億個にもおよぶ開口パターンを4秒で形成する技術を確立している。本TEXを基板表面に形成することにより、太陽電池と

して理想的な光閉じ込め効果が得られるため、セル性能が向上することが期待できる。

また、めっき法を用いた受光面側グリッド電極の形成技術においては、現在用いている印刷ペーストに比べて、材料コストを大幅に軽減することが可能となり、低温での電極形成も可能となることからセル性能が向上することが期待できる。

さらに、セルの基本構造が現行製造セルを継承しているため、現行の量産製造装置を小規模な改造のみで使用できる可能性が高く、初期の装置コストを低減できるメリットが高い。



▲：基本原理確認 ●：基本技術確認

▲：実用化（少量生産品が2017年時点で、変換効率 モジュール20% セル25%と同等以上。）

▲：事業化（量産品が2020年時点で、変換効率 モジュール20% セル25%と同等以上。）

3. 波及効果

本事業は、2014年までに変換効率25%の実現をめざし、量産化における課題を明らかにする太陽光発電の開発を目的としている。

本事業の太陽電池分野での波及効果としては、以下のことが挙げられる。

- ・プラットフォームの構築による総合的技術開発ならびに容易な太陽電池技術の統合、およびそれによる基盤技術の向上ならびに次世代太陽電池の開発の加速
- ・基板の薄型化すなわち製品の材料使用量低減による環境負荷の低減
- ・太陽電池製造における資源の確保ならびに国際環境に大きく影響されない体制の構築
- ・銀配線の銅配線に置き換えによる安定供給ならびに低価格化
- ・新規太陽電池用結晶成長における国際的競争力の確保
- ・新規プロセスや新材料による、工程の簡略化や高信頼性の確保
- ・競合国（中国等）に対する、特に変換効率・信頼性の点での高い技術的優位性および、安易に模倣されない技術の確立
- ・世界最高の変換効率とコスト競争力を有する結晶シリコン太陽電池セル・モジュールの製造・販売による日本の産業競争力強化
- ・太陽電池産業における日本企業のシェアアップ、および太陽電池分野における日本のプレゼンスの向上
- ・上記太陽電池製造ラインの構築のための生産設備製造産業、あるいは生産工場建設、ユーティリティー設備建設による建築業、施設建設産業への需要創造
- ・上記製造ライン・生産工場稼働に伴う雇用創出
- ・上記太陽電池生産のための部品、材料需要の増加による周辺産業の振興
- ・上記太陽電池開発により創出された特許等知的財産権によってもたらされる国際貿易収入の増加、および日本の技術開発力優位性の確立
- ・上記により生産された太陽電池セル・モジュールの海外輸出による日本の貿易収入の向上
- ・上記開発及び生産に携わる開発者、技術者、生産者の知識およびスキルの向上
- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進に伴うインバーター、蓄電池、スマートグリッド、ホームエネルギーマネジメントシステムなどの周辺機器の新規需要創造
- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進によるCO₂削減、地球温暖化問題の解決
- ・高効率低コスト太陽光発電システムの普及促進による電力供給の増加、特に夏場昼間の電力需要極大時期の電力不足の解消、電力網への負荷低減
- ・日本国内産業・製造業の海外流出、国内空洞化の防止
- ・競合国（中国等）に対して、特に変換効率・信頼性の点で、技術的優位性が高く、安易に模倣されない技術を確立することができる。

また、太陽電池以外への波及効果としては、高度化された結晶成長技術や確立された高度な評価解析技術の他分野への適用の可能性がある。

以上、本事業により、日本の技術優位性の維持による技術基盤強化・産業競争力向上が見込める。

4. 今後の展開

競合国（特に中国）に対し、単にコスト競争ではなく、日本として独自かつ安易に模倣できない技術を確立し、優位性を高めていく。電氣的なセル特性・モジュール特性だけでなく、特に信頼性に関する項目に対し優位性を高めていけるような技術開発をコンソーシアムとして取り組んでいく。

5. 特許論文リスト

【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)	2011-138048	国内	2011/6/22		太陽電池、及び太陽電池の製造方法	今井 隆裕
2	シャープ (株)	2011-166647	国内	2011/7/29		光電変換装置モジュール、光電変換装置モジュールの製造方法、及び光電変換素子	大岡 幸代
3	シャープ (株)	2011-250515	国内	2011/11/16		太陽電池	生野 利典
4	シャープ (株)	2011-268563	国内	2011/12/8		太陽電池の製造方法	常深 剛 他
5	シャープ (株)	2011-277669	国内	2011/12/19		界面パッシベーション構造、裏面パッシベーション型太陽電池および界面パッシベーション構造の製造方法	栗本 祐司
6	シャープ (株)	2011-279126	国内	2011/12/21		裏面電極型太陽電池の製造方法	稗田 健
7	シャープ (株)	2012-032440	国内	2012/2/17		太陽電池の製造方法	中村 淳一 他
8	シャープ (株)	2012-037013	国内	2012/2/23		光電変換装置の製造方法	西野 浩己 他
9	シャープ (株)	2012-037055	国内	2012/2/23		光電変換素子及びその製造方法	西野 浩己 他
10	シャープ (株)	2012-050244	国内	2012/3/7		光電変換素子	稗田 健
11	シャープ (株)	2012-055495	国内	2012/3/13		光電変換素子およびその製造方法	常深 剛 他
12	シャープ (株)	2012-055504	国内	2012/3/13		光電変換素子およびその製造方法	常深 剛 他
13	シャープ (株)	2012-060240	国内	2012/3/16		光電変換素子およびその製造方法	中村 淳一

14	シャープ (株)	2012-066454	国内	2012/3/23		光電変換素子および その製造方法	常深 剛 他
15	京セラ	2011-285096	国内	2011/12/27	出願	太陽電池素子、太陽 電池素子の製造方法 および太陽電池モジ ュール	村尾彰了 伊藤憲和
16	三菱電機	—	国内	2011/3	出願	レーザー加工方法	桂 智毅
17	三菱電機	—	国内	2011/9	出願	光起電力装置の製造 方法および光起電力 装置	松野 繁
18	三菱電機	—	国内	2012/1	出願	太陽電池セルの製造 方法および製造装置	松本 紀久
19	三菱電機	—	国内	2012/2	出願	光起電力装置の製造 方法	由良 信介
20	九州大学、 物質・材料 研究機構	特願 2012-042427	国内	2012/2/28	出願 完了	結晶冷却方法及び半 導体結晶	柿本 浩一 原田 博文 中野 智 ガオ ビン グ
21	原田博文、 柿本浩一、 中野 智、 高 冰	特願 2012-42427	国内	2012/2/28	出願 中	結晶冷却方法及び半 導体結晶	原田 博文
22	関口隆史、 宮村佳児、 原田博文	出願準備中	国内	出願準備中	出願 準備 中	casting シリコン多結晶 の炭素濃度低減に関 する発明	関口 隆史
23	宮村佳児、 関口隆史、 原田博文、 柿本浩一、 中野 智、 高 冰	出願準備中	国内	出願準備中	出願 準備 中	成長界面と壁との角 度	宮村 佳児
24	京都大学	特願 2011-093418	国内	2011/4/19	公開	Si インゴット結晶 の製造方法	中嶋一雄 森下浩平 沓掛健太朗

25	東北大学	特願 2011-179126	国内	2011年8月18日	出願	シリコン太陽電池の製造方法	藩 伍根、 宇佐美 徳 隆、藤原 航三
26	東北大学	特願 2012-040324	国内	2012年2月27日	出願	S i 結晶の結晶品質 評価方法及び結晶品 質評価装置	藩 伍根
27	東北大学	特願 2011-054072	国内	2012年3月12日	出願	シリコンインゴットの 製造方法	宇佐美 徳 隆、藩 伍 根
28	豊田工業 大学	出願準備中	国内	出願準備中	出願 準備 中	MIS 形光変換素子	林 豊 大下 祥雄 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
1	大岡幸代	シャープ(株)	OPTIMIZATION OF BACK-ETCHING PROCESS FOR REAR SURFACE PASSIVATION STRUCTURES OF CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS	第 21 回太陽光発電国際会議	無	2011
2	山谷宗義	京セラ	結晶系シリコン太陽電池開発の状況について －NEDO プロジェクト 成果と進捗－	PVTEC 第 22 回技術交流会	無	2011
3	檜座秀一、他	三菱電機	「結晶シリコン太陽電池セルの高効率化技術」	日本学術振興会第 175 委員会 「次世代の太陽光発電」シンポジウム	無	2011
4	檜座秀一、他	三菱電機	「結晶系太陽電池セルの高効率化技術」	第 277 回電気材料技術懇談会 若手研究発表会	無	2011
5	新延大介、他	三菱電機	DEVELOPMENT OF CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS WITH HIGHER EFFICIENCY	21st Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21)	無	2011
6	B. Gao, X.J. Chen, S. Nakano, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Crystal growth of high-purity multicrystalline silicon using a unidirectional solidification furnace for solar cells	Journal of Crystal Growth, Vol.312, (2010) 1572-1576.	有	2010
7	Xuejiang Chen ^{a,b} , Satoshi Nakano ^b , Koichi Kakimoto ^b	^a Institute of Fluid Machinery, School of Energy and Power Engineerin	Three-dimensional global analysis of thermal stress and dislocations in a silicon ingot during a unidirectional solidification process with a square crucible	Journal of Crystal Growth, Vol.312, (2010) 3261-3266.	有	2010

		g, Xi'an Jiaotong University, ^b Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University				
8	B. Gao, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Global simulation of coupled carbon and oxygen transport in a Czochralski furnace for silicon crystal growth	Journal of Crystal Growth, Vol.312, (2010) 2972-2976.	有	2010
9	Koichi Kakimoto, Bing Gao, and Satoshi Nakano	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical analysis of light elements transport in a unidirectional solidification furnace	Phys. Status Solidi C8, No.3, 659-661 (2011) / DOI 10.1002/pssc.2010001 17	有	2011
10	B. Gao, S. Nakano, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Influence of reaction between silica crucible and graphite susceptor on impurities of multicrystalline silicon in a unidirectional solidification furnace	Journal of Crystal Growth, Vol.314, (211) 239-245.	有	2011
11	B. Gao, S. Nakano, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Effect of crucible cover material on impurities of multicrystalline silicon in a unidirectional solidification furnace	Journal of Crystal Growth, Vol.318, (2011) 255-258.	有	2011
12	S. Nakano, X.J. Chen, B. Gao, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Numerical analysis of cooling rate dependence on dislocation density in multicrystalline silicon for solar cells	Journal of Crystal Growth, Vol.318, (2011) 280-282.	有	2011

13	<p>Zaoyang Li ^a, Lijun Liu ^{a,b}, WenchengMa ^a, KoichiKakimoto ^c</p>	<p>^a School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, ^b State Key Lab of Silicon Materials, Zhejiang University, ^c Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University</p>	<p>Effects of argon flow on heat transfer in a directional solidification process for silicon solar cells”</p>	<p>Journal of Crystal Growth, Vol.318, (2011) 298-303.</p>	有	2011
14	<p>Zaoyang Li ^a, Lijun Liu ^{a,b}, WenchengMa ^a, KoichiKakimoto ^c</p>	<p>^a School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, ^b State Key Lab of Silicon Materials, Zhejiang University, ^c Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University</p>	<p>Effects of argon flow on impurities transport in a directional solidification furnace for silicon solar cells</p>	<p>Journal of Crystal Growth, Vol.318, (2011) 304-312.</p>	有	2011

15	Lijun Liu ^a , Xin Liu, Zaoyang Li ^a , and Koichi Kakimoto ^b	^a ,School of Ener; and Power Engineerin g, XĪ'an Jiaotong University, ^b Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Computer Modeling of Crystal Growth of Silicon for Solar Cells	Frontiers of Energy and Power Engineering in China, DOI: 10.1007/s11708-011-0 155-9	有	2011
16	柿本浩一、 Gao Bing、 中野 智、 寒川義裕	九州大学 応用力学 研究所	特集 どのように結晶成長 現象をモデル化するか？ 総合報告：半導体バルク 結晶成長における熱と物質 の輸送と成長速度との関係	日本結晶成長学会誌 Vol. 38, No. 2, (2011) 86-92. (2011 年7月) 4-10.	有	2011
17	B. Gao, S. Nakano, K. Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Reducing Impurities of Multicrystalline Silicon in a Unidirectional Solidification Furnace for Solar Cells	JOM, Vol.63, No.10, (2011) 43-46.	有	2011
18	BING GAO, Satoshi Nakano, and Koichi Kakimoto	Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University	Influence of back-diffusion of iron impurity on lifetime distribution near the seed-crystal interface in seed cast-grown monocrystalline silicon by numerical modeling	Cryst. Growth Des. 2012, 12, 522-525.	有	2011
19	Tomihisa Tachibana, Takashi Sameshima, Takuto Kojima, Koji Arafune, Koichi Kakimoto, Yoshiji Miyamura, Hirofumi Harada, Takashi	¹ School of Science and Technology , Meiji University, ² Toyota Technologi cal Institute ³ University of Hyogo, ⁴ Kyusu University, ⁵ National Institute of	Evaluation of defects generation in crystalline silicon ingot grown by cast technique with seed crystal for solar cells	J. Appl. Phys. 111 , 074505 (2012); http://dx.doi.org/10.1063/1.3700250 (5pages)	有	2011

	Sekiguchi, Yoshio Ohshita, and Atsushi Ogura	Materials Science,				
20	宮村佳児、原田博文、伊藤俊、陳君、関口隆史	物材機構 東北大	Structural study of small angle grain boundaries in multicrystalline Si	Mater. Sci. Forum, Vol. 725	有	2012
21	K. Jiptner、原田博文、宮村佳児、関口隆史	物材機構	Effect of Si ₃ N ₄ coating on stress distribution and fracture of cast-Si ingots	Mater. Sci. Forum, Vol. 725	有	2012
22	陳君、陳斌、李雄、福澤理行、山田正良、関口隆史	物材機構, 京都工織大	Grain Boundaries in Multicrystalline Si	Solid State Phenom., 156-158,19-26	有	2010
23	福澤理行、山田正良、Md. Rafiqul Islam、陳君、関口隆史	京都工織大、物材機構	Quantitative Photoelastic Characterization of Residual Strains in Grains of Multicrystalline Silicon	J. Electronic Mat. 39,6,700-703	有	2010
24	JY.Li, T. Sekiguchi, H. Harada, Y.Miyamura, K. Kakimoto, T. Kojima, Y. Ohshita, T. Tachibana and A. Ogura	明治大、物材機構	Characterization of light element precipitates in large grain multicrystalline Silicon	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21)	無	2011
25	J.Chen	物材機構	Electrical/optical activities of grain boundaries in mc-Si	DRIP-XIV (招待講演) A-3	無	2011
26	T.Shimura, T.Matsumiya, N.Morimoto, T.Hosoi, K.Kajiwara, J.Chen,T.Sekiguchi, H.Watanabe	大阪大、物材機構	Analysis of grain orientation and lattice strain in mc-Si for PV cells	DRIP-XIV A-4	無	2011
27	Y. Miyamura, K. Jiptner, H. Harada, M. Fukuzawa, K. Kakimoto, T. Kojima,	物材機構、九大、明治大、豊田工大	Growth and characterization of large grain mc-Si	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference	無	2011

	Y. Ohsita, T					
28	陳君、 Ronit Prakash、 K. Jipter、 李健永、 宮村佳児、 原田博文、 関口隆史	物材機構	Interaction between Grain Boundaries and Dislocations in Multicrystalline Si	日本応用物理学会 (Poster 発表)	無	2012
29	宮村佳児、 原田博、 文陳君、 伊藤俊、 関口隆史	物材機構、 東北大	多結晶 Si 中の小角粒界にお ける転位と EBIC 特性の関係	日本応用物理学会 (Poster 発表)	無	2012
30	李建永、 関口隆史、 原田博文、 宮村佳児、 陳君、 大下祥雄、 柿本浩一、 小椋厚	明治大、 物材機構、 九大、 豊田工大	大粒径多結晶シリコンにお ける軽元素の析出挙動	日本応用物理学会 (口頭発表)	無	2012
31	K. Jiptner、 福澤理行、 宮村佳児、 原田博文、 関口隆史	物材機構	一方向凝固で育成した mono-like 結晶の残留歪分布 の解析	日本応用物理学会 (口頭発表)	無	2012
32	原田博文、 宮村佳児、 渡辺健太郎、 関口隆史	物材機構	鋳造法による 高品質単結晶育成 の現状と課題	日本応用物理学会 (招待講演)	無	2011
33	関口隆史	物材機構	EBIC and Cathodoluminescence Study on the Grain Boundaries and Fe Impurities in Multicrystalline Si	シリコン材料の科学 と技術フォーラム (招待講演)	無	2010
34	陳君	物材機構	Electrical, optical and mechanical properties of GBs in mc-Si	Extended Defects in Semiconductors (招待講演)	無	2010

35	関口隆史	物材機構	結晶シリコン太陽電池とシリサイド太陽電池の比較／E B I Cによるアプローチ	つくばナノテク産学独連携人材育成プログラム(招待講演)	無	2010
36	RR.Prakash, T. Sekiguchi	物材機構	Impurity decoration on extended defects in multicrystalline Silicon	Joint Symp. on Electron. Mat. (口頭発表)	無	2010
37	H.Onodera, T. Sekiguchi	物材機構	Room temperature luminescence from nanoscale silicon chips	Joint Symp. on Electron. Mat. (口頭発表)	無	2010
38	K. Jiptner, T. Sekiguchi	物材機構	Formation of SiC and Si ₃ N ₄ particles in directional solidification Si-growth	Joint Symp. on Electron. Mat. (口頭発表)	無	2010
39	K. Nakajima, K. Kutsukake, K. Fujiwara, K. Morishita and S. Ono	京都大学 東北大学 第一機電	Arrangement of dendrite crystals grown along the bottom of Si ingots using the dendritic casting method by controlling thermal conductivity under crucibles	J. Crystal Growth, Vol.319, p.13-18.	有	2011
40	K. Kutsukake, T. Abe, N. Usami, K. Fujiwara, I. Yonenaga, K. Morishita, and K. Nakajima	東北大学 京都大学	Generation mechanism of dislocation and their clusters in multicrystalline silicon during two-dimensional growth	J. Appl. Phys., Vol.110, 083530 (5 pages)	有	2011
41	N. Usami, I. Takahashi, K. Kutsukake, K. Fujiwara, and K. nakajima,	東北大学 京都大学	Implementation of faceted dendrite growth on floating cast method to realize high-quality multicrystalline Si ingot for solar cells	J. Appl. Phys., Vol.109, 083527 (4 pages).	有	2011
42	K. Nakajima, R. Murai, K. Morishita, K. Kutsukake, and N. Usami	京都大学 東北大学	Growth of multicrystalline Si ingots using noncontact crucible method for reduction of stress	J. Crystal Growth, Vol.344, 6 (6pages).	有	2012
43	I. Takahashi, N. Usami, H. Mizuseki, Y. Kawazoe, G. Stokkan, and K. Nakajima	Tohoku University, NTNU, and Kyoto University	Impact of type of crystal defects in multicrystalline Si on electrical properties and interaction with impurities	J. Appl. Phys. 109, 033504	有	2011
44	K. Nakajima, K. Morishita,	京都大学 東北大学	Growth of high-quality multicrystalline Si ingots using	J. Crystal Growth, Vol.355, 38	有	2012

	R. Murai and K. Kutsukake,		noncontact crucible method	(8 pages).		
45	N. Usami, I. Takahashi, K. Kutsukake, K. Fujiwara, and K. Nakajima	Tohoku University, and Kyoto University	Implementation of faceted dendrite growth on floating cast method to realize high-quality multicrystalline Si ingot for solar cells	J. Appl. Phys. 109 , 083527.	有	2011
46	K. Kutsukake, T. Abe, N. Usami, K. Fujiwara, K. Morishita and K. Nakajima	Tohoku University, and Kyoto University	Formation mechanism of twin boundaries during crystal growth of silicon	Scripta Materialia 65 556-559	有	2011
47	K. Kutsukake, T. Abe, N. Usami, K. Fujiwara, I. Yonenaga, K. Morishita, K. Nakajima	Tohoku University, and Kyoto University	Generation mechanism of dislocations and their clusters in multicrystalline silicon during two-dimensional growth	J. Appl. Phys. 110 , 083530	有	2011
48	K. Kutsukake, T. Abe, N. Usami, K. Fujiwara, I. Yonenaga, K. Morishita, and K. Nakajima	Tohoku University, and Kyoto University	Generation mechanism of dislocations in multicrystalline Si during 2D growth	Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1934-1937	無	2011
49	N. Usami, I. Takahashi, K. Kutsukake, K. Morishita, and K. Nakajima	Tohoku University, and Kyoto University	Floating cast method: A technique to realize high-quality multicrystalline Si ingot	Proceedings of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1986-1988	無	2011
50	K. Nakajima, R. Murai, K. Morishita, K. Kutsukake, and N. Usami	Kyoto University, and Tohoku University	Growth of multicrystalline Si ingots using noncontact crucible method for reduction of stress	J. Cryst. Growth 344, 6-11 (2012).	有	2012
51	Noritaka Usami, Wugen Pan, Satoru Matsushima, Kazuo Nakajima, and Haruna Watanabe	Tohoku University, and Kyoto University	Growth of multicrystalline silicon ingot from the top of the melt: control of microstructures and reduction of stress	Proc. IEEE PVSC38	無	2012
52	大久保 秀一	新日本ソーラーシリコン	ポリシリコンの製造	応用物理学会応用電子物性分科会	無	2012
53	Shinsuke Miyajima,	東工大	High Quality Aluminum Oxide Passivation Layer	APPLIED PHYSICS EXPRESS	有	2010

	Junpei Irikawa, Akira Yamada and Makoto Konagai		for Crystalline Silicon Solar Cells Deposited by Parallel-Plate Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition	3 (1) 012301		
54	Shinsuke Miyajima, Junpei Irikawa, Akira Yamada and Makoto Konagai	東工大	High-quality nanocrystalline cubic silicon carbide emitter for crystalline silicon heterojunction solar cells	APPLIED PHYSICS LETTERS 97 (2) 023504	有	2010
55	Junpei Irikawa, Shinsuke Miyajima, Shuheiki Kida, Tatsuro Watahiki, and Makoto Konagai	東工大	Effects of Annealing and Atomic Hydrogen Treatment on Aluminum Oxide Passivation Layers for Crystalline Silicon Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys. Vol.50 012301	有	2010
56	Junpei Irikawa, Shinsuke Miyajima, Shuheiki Kida, Tatsuro Watahiki, and Makoto Konagai	東工大	Effects of Annealing and Atomic Hydrogen Treatment on Aluminum Oxide Passivation Layers for Crystalline Silicon Solar Cells	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 50, 012301-1~012301-5	有	2011
57	Junpei Irikawa, Shinsuke Miyajima, Tatsuro Watahiki, Makoto Konagai	東工大	High Efficiency Hydrogenated Nanocrystalline Cubic Silicon Carbide/Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells Using an Optimized Buffer Layer	APPLIED PHYSICS EXPRESS 4, No.9, 092301-1~092301-3 3pages SEP	有	2011
58	Suttirat	東工大	Improvement of Rear Surface	JAPANESE	有	2011

	Rattanapan, Tatsuro Watahiki, Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai		Passivation Quality in p-Type Silicon Heterojunction Solar Cells Using Boron-Doped Microcrystalline Silicon Oxide	JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 50 , No.8 , 082301-1~082301-4 AUG		
59	Shinsuke Miyajima, Junpei Irikawa, Akira Yamada, and Makoto Konagai	東工大	Modeling and simulation of heterojunction crystalline silicon solar cells with a nanocrystalline cubic silicon carbide emitter	J. Appl. Phys. 109 054507-1~054507-6	有	2011
60	Daisuke Hamashita, Yasuyoshi Kurokawa, Makoto Konagai	東工大	Preparation of p-type Hydrogenated Nanocrystalline Cubic Silicon Carbide / n-type Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells by VHF-PECVD	Energy Procedia vol.10 , pp.14-19, Jan	有	2012
61	Irikawa Junpei, Miyajima Shinsuke, Watahiki Tatsuro and Makoto Konagai	東工大	Development of the Transparent Conductive Oxide Layer for Nanocrystalline Cubic Silicon Carbide/Silicon Heterojunction Solar Cells with Aluminum Oxide Passivation Layers	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 51, No.2, 02BP04, 4 pages	有	2012
62	H. Natsuhara, X. Zhuo Me, Y. Natsume, D. Hoso, M. Kawai, F. Ohashi, T. Itoh, N. Yoshida, S. Nonomura	岐阜大	Development of photovoltaic microscope for thin film solar cell	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference	無	2011
63	三木 祥平、 門田 昌郎、	兵庫県立 大学	シリコンインゴットスライス時の廃棄スラッジ特性の	第8回「次世代の太陽光発電システム」	無	2011

	早川 宗久、 佐藤根 大士、 新船 幸二		評価	シンポジウム		
64	S.Miki, N.Iio, S.Taniguchi, H.Satone, K.Arafune	兵庫県立 大学	Recycle of Silicon Powder in Multi-wire-saw-sludge for Silicon Feedstock	21st Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	無	2011
65	S.Miki, N.Iio, S.Taniguchi, H.Satone, K.Arafune	兵庫県立 大学	Recycle of silicon powder In Multi-Wire-Saw-Sludge for Silicon feedstock	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference	無	2011
66	飯尾 成央、 三木 祥平、 佐藤根 大士、 新船 幸二	兵庫県立 大学	シリコンインゴットスライ ス時の廃棄クーラントから のシリコン再原料化の検討	第9回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	無	2012
67	漆畑 孝、 三木 祥平、 新船 幸二	兵庫県立 大学	補償系シリコンインゴット の作製およびその評価	第9回「次世代の 太陽光発電システ ム」シンポジウム	無	2012
68	Shohei Miki, Norihisa Iio, Sho-ichi Taniguchi, Hiroshi Satone, Koji Arafune	兵庫県立 大学	Filtration of Waste Coolant from Fixed-Abrasive Wire Sawing and Recycle of Retrieved Silicon Powder for Feedstock	38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	無	2012
69	伊東宇一他	産総研	Screen printed finger electrode with high aspect ratio by single printing for crystal Si solar cell using novel screen mask	38th IEEE PVSC Proceedings	無	2011
70	徳久英雄他	産総研	Cu Alloy Pastes Containing Low Melting Point (LMP) Alloys For Silicon Solar Cells Requiring Low Temperature Sintering	21-PVSC Technical Digest	無	2011
71	吉田学 他	産総研	Grass-fritless Cu alloy pastes for silicon solar cells requiring low temperature sintering	26th EUPVSEC Proceedings	無	2011
72	徳久英雄他	産総研	Grass-fritless Cu alloy pastes	37th IEEE	無	2011

			for silicon solar cells requiring low temperature sintering	PVSC Proceedings		
73	平田憲司、高山環、西村英紀、片桐卓哉、高本総一郎、杉村恵美、冬木隆	NAIST	レーザードーピングによるセレクトィブエミッター型太陽電池の作製その最適化	第8回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	無	2011
74	平田憲司、高山環、長谷川光洋、舟谷友宏、西村英紀、冬木隆	NAIST	結晶シリコン太陽電池作製プロセスにおけるレーザードーピングの開発	2011年春季第58回応用物理学関係連合講演会	無	2011
75	西村英紀、平田憲司、長谷川光洋、舟谷友宏、高山環、冬木隆	NAIST	多結晶シリコン太陽電池におけるレーザードーピングプロセスの開発	2011年春季第58回応用物理学関係連合講演会	無	2011
76	高山環、平田憲司、斎藤貴志、長谷川光洋、舟谷友宏、冬木隆	NAIST	紫外光レーザーを用いた電極下高濃度エミッター層の作製と最適化	第7回「次世代の太陽光発電システム」	無	2010
77	舟谷友宏、平田憲司、斎藤貴志、高山環、長谷川光洋、冬木隆	NAIST	ドーパント層制御によるレーザードーピングプロセスの最適化	第7回「次世代の太陽光発電システム」	無	2010
78	長谷川光洋、平田憲司、斎藤貴志、高山環、舟谷友宏、冬木隆	NAIST	多結晶シリコン太陽電池におけるレーザーを用いたドーピングプロセスの開発	第7回「次世代の太陽光発電システム」	無	2010
79	長谷川光洋、平田憲司、高山環、舟谷友宏、冬木隆	NAIST	多結晶シリコン太陽電池の作製における室温レーザードーピング	電子情報通信学会シリコン材料・デバイス研究会	無	2010

	隆					
80	舟谷友宏、 平田憲司、 高山 環、 長谷川光洋、 冬木 隆	NAIST	結晶系シリコン太陽電池に おけるドーパントプレカー サー制御によるレーザード ーピングプロセスの最適化	電子情報通信学会 シリコン材料・デバ イス研究会	無	2010
81	Hideki Nishimura, Kenji Hirata, Mitsuhiro Hasegawa, Takuya Katagiri and Takashi Fuyuki.	NAIST	IMPROVED ELECTRONIC PROPERTIES OF LASER DOPED EMITTERS BY REDUCING SURFACE ROUGHNESS	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference	無	2011
82	Kenji Hirata, Hideki Nishimura, Takuya Katagiri, Sohichiroh Takamoto, Emi Sugimura, and Takashi Fuyuki.	NAIST	OPTIMIZATION OF SELECTIVE EMITTER PROFILES BY LASER DOPING IN CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference	無	2011
83	Takuya Katagiri, Tomohiro Funatani, Kenji Hirata, Hideki Nishimura and Takashi Fuyuki.	NAIST	Investigation of Precursor Layer for Laser Doping Technique in Crystalline Silicon Solar Cell.	26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	無	2011
84	Kenji Hirata, Tamaki Takayama, Mitsuhiro Hasegawa,	NAIST	Optimization of Selective Emitter Formation using Laser Doping in Crystalline Silicon Solar Cell	26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition	無	2011

	Tomohiro Funatani, and Takashi Fuyuki.					
85	Hideki Nishimura, Kenji Hirata, Mitsuhiro Hasegawa, Tomohiro Funatani, Tamaki Takayama, and Takashi Fuyuki.	NAIST	Improvement of multi-crystalline silicon solar cell fabricated by Laser Doping Technique Using Continuous Wave Laser	37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference	無	2011
86	Mitsuhiro Hasegawa, Kenji Hirata, Takashi Saitoh, Tamaki Takayama, Tomohiro Funatani, Emi Sugimura, Shinichiro Tsujii, Ayumi Tani, Takashi Fuyuki	NAIST	Laser Doping Technique using Continuous Wave Laser in Multi-crystalline Silicon Solar Cell Process.	35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	無	2010
87	Takashi Saitoh, Kenji Hirata, Tamaki Takayama, Mitsuhiro Hasegawa, Tomohiro Funatani, Emi Sugimura, Takashi Fuyuki	NAIST	Laser doping for several types of emitter layer.	RENEWABLE ENERGY 2010	無	2010

88	Kenji Hirata, Takashi Saitoh, Tamaki Takayama, Mitsuhiro Hasegawa, Tomohiro Funatani, Takashi Fuyuki	NAIST	Selective Emitter Formation in Crystalline Silicon Solar Cell by Laser Doping at Room Temperature.	5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion	無	2010
89	Kenji Hirata, Tamaki Takayama, Tomohiro Funatani, Mitsuhiro Hasegawa, Takashi Fuyuki	NAIST	Application of Laser Doping to Form Selective Emitter in Silicon Solar Cells	2010 MRS Fall Meeting	無	2010
90	H. Hashiguchi, T. Tachibana, M. Aoki, T. Kojima, Y. Ohshita, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学	Ion Shower Doping for Emitter Fabrication in Crystalline Si Solar Cells	38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (38th IEEE PVSC),	有	2012
91	N. Miyazaki, Y. Tsuchiya, T. Sameshima, T. Tachibana, T. Kojima, Y. Ohshita, K. Arafune and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、 兵庫県立 大学	Behaviors of Fe and Ni at Crystal Defects in Multi-crystalline Silicon by Intentional Contamination and Phosphorus Gettering	38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (38th IEEE PVSC),	有	2012
92	Y. Tsuchiya, H. Kusunoki, N. Miyazaki, T. Sameshima, T. Tachibana, T. Kojima,	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学、 神奈川県 産業技術	Correlation between Carbon Incorporation and Defect Formation in Quasi-Single Crystalline Silicon	38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (38th IEEE PVSC),	有	2012

	K. Arafune, Y. Ohshita, H. Ono, and A. Ogura	センター				
93	T. Tachibana, T. Sameshima, T. Kojima, K. Arafune, K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, T. Sekiguchi, Y. Ohshita, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学、 NIMS、九 州大学	Evaluation of defects generation in crystalline silicon ingot grown by cast technique with seed crystal for solar cells	J. Appl. Phys. 111, (2012) 074505	有	2012
94	T. Sameshima, N. Miyazaki, Y. Tsuchiya, H. Hashiguchi, T. Tachibana, T. Kojima1, Y. Ohshita, K. Arafune, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学	Interaction between Metal Impurities and Small-Angle Grain Boundaries on Recombination Properties in Multicrystalline Silicon for Solar Cells	Applied Physics Express 5 (2012) 042301	有	2012
95	T. Tachibana, T. Sameshima, T. Kojima, K. Arafune, K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, T. Sekiguchi, Y. Ohshita, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学、 NIMS、九 州大学	Impact of Light-Element Impurities on Crystalline Defect Generation in Silicon Wafer	Japanese Journal of Applied Physics 51 (2012) 02BP08	有	2012
96	宮崎直人、 土屋佑樹、 鮫島 崇、 立花福久、 小島拓人、 大下祥雄、	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学	強制汚染およびリングエッタ リングによる多結晶 Si 中の 鉄およびニッケルの挙動	2012 年春季第 59 回 応用物理学関係連合 講演会(17p-B10-14)	無	2011

	新船幸二、 小椋厚志					
97	楠木宏毅、 立花福久、 小島拓人、 大下祥雄、 小椋厚志、 小野春彦	明治大学、 神奈川県 産業技術 センター、 豊田工業 大学	シードキャスト法における 種結晶シリコンからの酸素 不純物の混入	2012 年春季第 59 回 応用物理学関係連合 講演会(17p-B10-6)	無	2011
98	立花福久、 楠木宏毅、 土屋佑樹、 鮫島崇、 小島拓人、 新船幸二、 柿本浩一、 宮村佳児、 原田博文、 関口隆史、 大下祥雄、 小野春彦、 小椋厚志	明治大学、 神奈川県 産業技術 センター、 豊田工業 大学、 兵庫県立 大学、 NIMS、 九州大学	疑似単結晶シリコン中の軽 元素不純物が結晶欠陥に与 える影響	2012 年春季第 59 回 応用物理学関係連合 講演会(17p-B10-5)	無	2011
99	T. Sameshima, N. Miyazaki, Y. Tsuchiya, T. Tachibana, Y. Ohshita, K. Arafune, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学	GETTERING EFFECT ON RECOMBINATION PROPERTIES AT INTRA-GRAIN DEFECTS IN MULTICRYSTALLINE SILICON	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21), 2D-1P-08	無	2011
100	T. Tachibana, T. Sameshima, T. Kojima, K. Arafune, K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, T. Sekiguchi, Y. Ohshita, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学、 NIMS、九 州大学	STUDY OF CRYSTALLINE DEFECT GENERATION CAUSED BY LIGHT ELEMENT IMPURITIES IN SILICON SUBSTRATE	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21), 2D-1P-15	無	2011
101	T. Sameshima,	明治大学、	Impacts of Metal	220th Electrochemical	無	2011

	Y. Tsuchiya, N. Miyazaki, T. Tachibana, Y. Ohshita, K. Arafune, and A. Ogura	豊田工業 大学、兵庫 県立大学	Impurities on Recombination Properties at Small Angle Grain Boundaries in Multicrystalline Silicon for Solar Cells	Society (ECS) Meeting, Abstract #1988		
102	T. Sameshima, Y. Tsuchiya, N. Miyazaki, T. Tachibana, Y. Ohshita, K. Arafune, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学	Impacts of Metal Impurities on Recombination Properties at Small Angle Grain Boundaries in Multicrystalline Silicon for Solar Cells	ECS Transactions 41 (4), pp29-36, 2011	有	2011
103	T. Tachibana, T. Sameshima, T. Kojima, K. Arafune, K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, T. Sekiguchi, Y. Ohshita, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学、 NIMS、九 州大学	Impact of Light-Element Impurities on Crystalline Defect Generation in Silicon Wafer	2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), L-9-3	無	2011
104	T. Sameshima, N. Miyazaki, Y. Tsuchiya, T. Tachibana, Y. Ohshita, K. Arafune, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学	EBIC Study on Metal Contamination at Intra Grain Defects in Multicrystalline Silicon for Solar Cells	14th International Conference on Defects - Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP XIV), PM-10	無	2011
105	T. Tachibana, T. Sameshima, T. Kojima, K. Arafune, K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, T. Sekiguchi,	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学、 NIMS、九 州大学	Evaluation of Silicon Substrate Fabricated by Seeding Cast Technique	14th International Conference on Defects - Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP XIV),	無	2011

	Y. Ohshita, and A. Ogura			B-3		
106	T. Tachibana, T. Sameshima, N. Miyazaki, T. Kojima, K. Arafune, K. Kakimoto, Y. Miyamura, H. Harada, T. Sekiguchi, Y. Ohshita, and A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学、 NIMS、九 州大学	Evaluation of Crystalline Defects in Silicon Ingots Fabricated by Seeding Cast Growth	26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (26th EU PVSEC), 2BV.4.39	無	2011
107	宮崎直人、土 屋佑樹、鮫 島崇、立花福久、 大下祥雄、新 船幸二、小椋 厚志	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学	アルミゲッターリングによる 太陽電池用多結晶 Si 中の結 晶粒界での少数キャリア再 結合の挙動	2011 年秋季第 72 回 応用物理学会学術講 演会(1p-ZH-13)	無	2011
108	立花福久、鮫 島崇、小島拓 人、新船幸二、宮 柿本浩一、宮 村佳児、原田 博文、関口隆 史、大下祥雄、 小椋厚志	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学、 NIMS、九 州大学	種結晶を用いて作製したシ リコン基板中の結晶欠陥に 関する評価(2)	2011 年秋季第 72 回 応用物理学会学術講 演会(1p-ZH-10)	無	2011
109	鮫島崇、土屋 佑樹、宮崎直 人、立花福久、 大下祥雄、新 船幸二、小椋 厚志	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学	太陽電池用多結晶 Si 中の小 角粒界における金属不純物 が少数キャリア再結合に与 える影響	2011 年秋季第 72 回 応用物理学会学術講 演会(1p-ZH-7)	無	2011
110	T. Tachibana, T. Sameshima, Y. Ohshita, K. Arafune, And A. Ogura	明治大学、 豊田工業 大学、兵庫 県立大学	Influence of high temperature annealing on electrical activity at small angle grain boundaries in multi-crystalline silicon for solar cells	Proceedings of the Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2010, pp. 383-387	無	2010

111	立花福久、鮫島崇、小島拓人、新船幸二、柿本浩一、宮村佳児、原田博文、関口隆史、大下祥雄、小椋厚志	明治大学、豊田工業大学、兵庫県立大学、NIMS、九州大学	種結晶を用いて一方向凝固法で作製したシリコン基板の評価	2010年第58回応用物理学関係連合講演会(27a-BL-2)	無	2010
112	田島道夫、岩田恭彰、岡山太、豊田裕之、関口隆史、小野寺尚志	明治大学、JAXA 宇宙研、物材研	Deep-Level Photoluminescence Due to Dislocations and Oxygen Precipitates in Multicrystalline Si	J. Appl. Phys. 111(11) 113523-1 ~6	有	2012
113	岡山太、田島道夫、豊田裕之、小椋厚志	明治大学、JAXA 宇宙研	High-speed Deep-level Luminescence Imaging in Multicrystalline Si Solar Cells	Mater. Sci. Forum, Vol. 725 (印刷中)	有	2012
114	田島道夫	明治大学、JAXA 宇宙研	Photoluminescence techniques for materials characterization: From electronic to photovoltaic Si	Abstracts of E-MRS 2012 Spring Meeting, Symposium A, No. 5-1 (口頭; 招待講演)	無	2012
115	田島道夫、小松賢司、岩田恭彰、岡山太、豊田裕之	明治大学、JAXA 宇宙研	Photoluminescence Analysis of Oxygen Precipitation around Small-Angle Grain Boundaries in Multicrystalline Silicon	Technical Digest of 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21) No. 2A-10-03	無	2011
116	岡山太、田島道夫、豊田裕之、小椋厚志	明治大学、JAXA 宇宙研	多結晶 Si セルにおける深い準位の高速フォトルミネッセンス分光イメージング法	第59回応用物理学会関係連合講演会予稿集, p. 16-083	無	2012
117	田中香次、田島道夫、小椋厚志、Sébastien Dubois, Jordi Veirman	明治大学、JAXA 宇宙研、CEA-INES	PLによる太陽電池用高補償比 Si 結晶のドナー・アクセプタ不純物定量	第59回応用物理学会関係連合講演会予稿集, p. 16-081	無	2012
118	Michio Tajima,	明治大学、JAXA 宇宙	Towards the Quantification of Donor, Acceptor and	5th International Workshop on Science an	無	2011

	Takaaki Iwai, Kenji Komatsu, Koji Tanaka and Hiroyuki Toyota	研	Light-Element Impurities in Solar-Grade Si by Photoluminescence	d Technology of Crystalline Si Solar Cells (CSSC-5) (口頭；招待講演)		
119	Michio Tajima, Takaaki Iwai, Yasuaki Iwata, Futoshi Okayama, Koji Tanaka and Hiroyuki Toyota	明治大学、JAXA 宇宙研	Impurity and Defect Analysis in Solar Cell Si by Photoluminescence Spectroscopy and Topography	MRS Workshop on Photovoltaic Materials and Manufacturing Issues II (口頭；招待講演)	無	2011
120	田島道夫、岩井隆晃、豊田裕之、S.ビネッティ、D.マクドナルド	明治大学、JAXA 宇宙研	Donor-Acceptor Pair Luminescence in Compensated Si for Solar Cells	J. Appl. Phys. 110(4) 043506-1 ~5	有	2011
121	Futoshi Okayama, Yasuaki Iwata, Michio Tajima, Yoshio Ohshita and Atushi Ogura	明治大学、JAXA 宇宙研	Deep-Level Photoluminescence Analysis at Room Temperature in Small-Angle Grain Boundaries in Multicrystalline Silicon	Proceedings of the Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2010, pp. 388-393	無	2010
122	Takaaki Iwai, Michio Tajima and Atushi Ogura	明治大学、JAXA 宇宙研	Photoluminescence analysis of high concentrations of donor and acceptor impurities in Si	Proceedings of the Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2010, pp. 394-400	無	2010
123	岡山太、岩田恭彰、田島道夫、大下祥雄、小椋厚志	明治大学、JAXA 宇宙研	多結晶 Si における小角粒界近傍の深い準位の室温フォトルミネッセンス解析	2011 年春季 第 58 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、p. 16-085	無	2010
124	岩井隆晃、田島道夫、小椋	明治大学、JAXA 宇宙研	フォトルミネッセンスによる低純度太陽電池用 Si の不	2011 年春季 第 58 回応用物理学関係連合	無	2010

	厚志	研	純物評価	講演会講演予稿集、 p. 15-327		
125	T. Kojima、 M. Aoki、 N. Kojima、 Y. Ohshita、 M. Yamaguchi	TOYOTA TECHNOL OGICAL INSTITUT E	Annealing Effects on Recombination Activity of Nickel AND Copper at (110)/ (100) Direct Silicon Bonded Interface	21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21)	無	2011
126	小島拓人、 大下祥雄、 青木真理、 小島信晃、 山口真史	豊田工業 大学	太陽電池材料開発の現状と 課題（多結晶シリコン・キャ スト単結晶シリコン）	SPring-8 コンファレンス 2011	無	2011
127	T. Kojima、 M. Aoki、 N. Kojima、 Y. Ohshita、 M. Yamaguchi	TOYOTA TECHNOL OGICAL INSTITUT E	Impact of Metal Impurities on Recombination Activity of (110)/ (100) Direct Silicon Bonded Interface	14th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP-XIV)	無	2011
128	小島拓人、 青木真理、 小島信晃、 大下祥雄、 山口真史	豊田工業 大学	シリコン直接接合界面の電 気的特性に対する Ni 汚染の 影響（2）	第 72 回応用物理学 会 学術講演会（2011 年秋季）	無	2011
129	T. Kojima、 M. Aoki、 N. Kojima、 Y. Ohshita、 M. Yamaguchi	TOYOTA TECHNOL OGICAL INSTITUT E	Annealing Effects on Recombination Activity of Nickel at (110)/(100) Direct Silicon Bonded Interface	21st Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes	無	2011
130	小島拓人、 青木真理、 小島信晃、 大下祥雄、 山口真史	豊田工業 大学	(110)/(100)シリコン直接 接合界面のキャリア再結合 に対する金属不純物の影響	第 8 回次世代の太陽 光発電システムシン ポジウム	無	2011
131	上甲朋広、 小島拓人、 小島信晃、 大下祥雄、 山口真史	豊田工業 大学	多結晶シリコン中の結晶粒 界構造に対する遷移金属不 純物の影響	第 8 回次世代の太陽 光発電システムシン ポジウム	無	2011

132	T. Kojima、 M. Aoki、 N. Kojima、 Y. Ohshita	TOYOTA TECHNOL OGICAL INSTITUT E	EFFECTS OF Ni AND Cu ON RECOMBINATION ACTIVITY OF (110)/ (100) DSB INTERFACE	Proceedings of the 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1489-1491	無	2011
133	大下祥雄	豊田工業 大学	結晶シリコン太陽電池の現 状と課題	応用電子物性分科会 研究例会 結晶シリ コン太陽電池の最前 線	無	2011
134	大下祥雄	豊田工業 大学	結晶シリコン系太陽電池	PVJapan2011 SEMI Tutorial 「太陽光発電技術」	無	2011
135	大下祥雄	豊田工業 大学	太陽電池材料開発の現状と 課題（基調講演）	SPrig-8 コンファレンス 2011	無	2011
136	大下祥雄	豊田工業 大学	シリコン太陽電池の基礎と 将来の展望	「九州地域環境・ エネルギー成長産業 振興 ・発展対策活動事業」 平成 23 年度第 1 回新 事業創出セミナー 「太陽光発電セミナー」	無	2011
137	大下祥雄	豊田工業 大学	結晶シリコン太陽電池の研 究開発動向と将来展望	第 72 回応用物理学 会 学術講演会 (2011 年秋季)	無	2011
138	大下祥雄	豊田工業 大学	ドーピング不純物や金属不 純物が少数キャリア寿命に 与える影響	第 72 回応用物理学 会 学術講演会 (2011 年秋季)	無	2011
139	大下祥雄	豊田工業 大学	結晶シリコン太陽電池研究 開発：オールジャパン	第 8 回次世代の太陽 光発電システムシン ポジウム	無	2011
140	大下祥雄	豊田工業 大学	企画の意図 極限シリコン 結晶太陽電池の実現に向け て	2011 春季 第 58 回 応用物理学関係連合 講演会	無	2011
141	大下祥雄	豊田工業 大学	ドーピング不純物や金属不 純物が少数キャリア寿命に 与える影響	2011 春季 第 58 回 応用物理学関係連合 講演会	無	2011

142	小島拓人, 青木真理, 大下祥雄, 小島信晃, 山口真史	豊田工業大学	(110)/(100)シリコン直接接合界面の再結合特性に対する Ni および Cu の影響	2011 春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会	無	2011
143	小島拓人	豊田工業大学	(110)/(100)シリコン接合界面の電気的特性に対する Ni 汚染の影響	シリコン材料の科学と技術フォーラム 2010	無	2010

受賞実績

<東北大学>

受賞者：Noritaka Usami

タイトル：Best Poster Award

受賞内容：The 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference の Area 4 Crystalline Silicon の最優秀ポスター（約 140 件中の最優秀）

授賞団体：IEEE Photovoltaic Specialist Conference Program Committee

受賞年月日：2012 年 6 月 7 日

<京都大学>

受賞者：Kentaro Kutsukake

タイトル：Young Researcher Paper Award

受賞内容：『Study of dislocation generation during two-dimensional growth of multicrystalline silicon』

受賞団体：21th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21)

受賞年月日：2011 年 12 月 2 日

受賞者：杳掛健太朗

タイトル：イノベティブ P V 奨励賞

受賞内容：『多結晶シリコンのインゴット成長過程における転位形成機構』

受賞団体：第 8 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム)

受賞年月日：2011 年 7 月 1 日

受賞者：Kazuo Nakajima

タイトル：CGCT Distinguished Engineer Award 2011

受賞内容：『The development of the dendritic casting method of silicon multi-crystal growth for the Production of high-efficiency, large-scale solar cells』

受賞団体：The 5th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-5)

受賞年月日：2011 年 6 月 29 日

<AIST>

受賞者 徳久英雄、吉田学、伊東宇一、鎌田俊英、住田勲勇、関根重信

受賞タイトル Best Poster Award

受賞内容 GLASS-FRITLESS CU ALLOY PASTES FOR SILICON SOLAR CELLS REQUIRING LOW TEMPERATURE SINTERING

受賞団体 IEEE electron devices society

受賞年月日 2011 年 6 月 21 日

<明治大学>

受賞者：岡山太

受賞のタイトル：シリコン材料の科学と技術フォーラム Young Researcher Poster Award

受賞内容：「Deep-Level Photoluminescence Analysis at Room Temperature in Small-Angle Grain Boundaries in Multicrystalline Silicon」の講演に対して

受賞団体・機関：シリコン材料の科学と技術フォーラム実行委員会

受賞年月日：2010年11月16日

<NIMS>

受賞者：Karolin Jiptner

受賞のタイトル：International Conference on Defect Recognition, Imaging and Physics of Semiconductors (DRIP-XIV) Young Scientist Award

受賞内容：「Effect of Si₃N₄ coating on stress distribution and fracture of cast-Si ingots」の講演に対して

受賞団体・機関：DRIPIXV 組織委員会

受賞年月日：2010年9月28日

<九州大学>

受賞者 高 冰

受賞タイトル 日本結晶成長学会第八回奨励賞

受賞内容 「結晶シリコン中の不純物制御に関する基礎研究」、

受賞団体・機関：日本結晶成長学会

受賞年月日：2010年8月8日

B マルチワイヤーソーによるシリコンウエハ切断技術の研究開発

表Ⅲ-2-(イ)-B-1[1] 研究開発毎の成果・達成度

中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
カーフロス 120 μ m未 満	<120 μ m	○	なし
ダメージ層 5 μ m以下	\leq 5 μ m	○	なし
表面粗さ 0.5 μ m以下	Ra : 0.5~1.0 μ m	△ (平成24年11 月達成予定)	新規装置の導入とサイ クル数の最適化で 達成予定
ウエハ厚さ 130 μ m	131 μ m	○	なし
切断速度 0.3 mm/min 以上	0.2mm/min	△ (平成24年11 月達成予定)	新規装置の導入と加 工油、フィード同期 の最適化で達成予定
洗浄の簡便化	純水洗浄にてセル評 価を実施	○	なし
エッチング時間の短縮 あるいは省略に目処	浅いテクスチャで達 成可能	○	なし
125角 x0.2mm 単結晶 ウエハを試作してセル 評価を実施	R ワイヤ方式による 変換効率低下要因の 無いことを確認	○	なし

◎：大幅達成、○：達成、△：達成見込み、×：未達成

表Ⅲ-2-(イ)-B-1[2] 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT 出願	査読付 き	その他	
平成22年度	0	0	0	0	0	研究発表・講演3件
平成23年度	1	0	0	2	0	研究発表・講演3件 新聞発表1件
平成24年度	0	0	0	0	0	研究発表・講演1件

1. 成果詳細

(1) 中間目標と達成状況

最重要項目の低カーフロスと低ダメージを同時に達成することができた。ダメージ層5 μ m以下は他に例を見ない画期的な成果であり、セルメーカーが浅いテクスチャ技術（後述）を本格的に開発を開始するきっかけとなった。今後の太陽電池の高性能化と

コストダウンが期待されている。

表面粗さおよび切断速度は新規導入のマルチワイヤーソー（後述）を待つ平成 24 年 11 月までに達成する予定である。表面粗さはサイクル数の最適化、切断速度は低粘度加工油とフィード同期の最適化により達成する。

(2) 他のスライス方式に比較した R ワイヤ技術の特徴

R ワイヤは一般的にソーワイヤに用いられる鋼線に樹脂をコーティングしたソーワイヤである。R ワイヤの一例を図 III-2-(イ)-B-1[1]に示す。この R ワイヤとダイヤモンド遊離砥粒と組み合わせてシリコンインゴットをスライスすることにより、これまでのスライス方式では実現できなかった低カーフロスと低ダメージを同時に実現することが初めて可能となり、結晶太陽電池の高性能化と大幅なコストダウンに結びつくものと期待されている。R ワイヤ方式の開発を行っている機関は世界的に見ても他に存在しない。

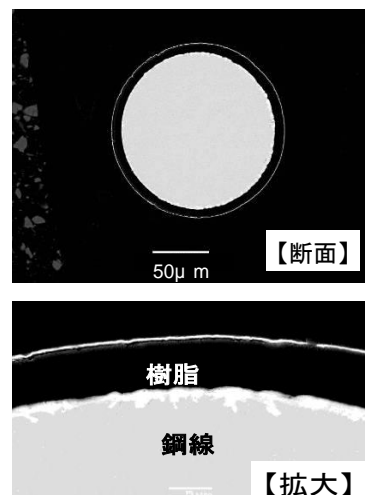


図 III-2-(イ)-B-1[1] R ワイヤ

図 III-2-(イ)-B-1[2]に各スライス方式でのシリコンウエハのダメージ層の観察結果を示す。一般的に遊離砥粒方式のダメージ層は 15 μm 程度、固定砥粒方式のダメージ層は 10 μm 程度あり、

これに対し R ワイヤのダメージ層は 5 μm 未満と大幅に浅くなっている。図 III-2-(イ)-B-1[3]に R ワイヤ方式のダメージ層観察において、ダメージを観察するためのエッチング前後における、転位のエッチ

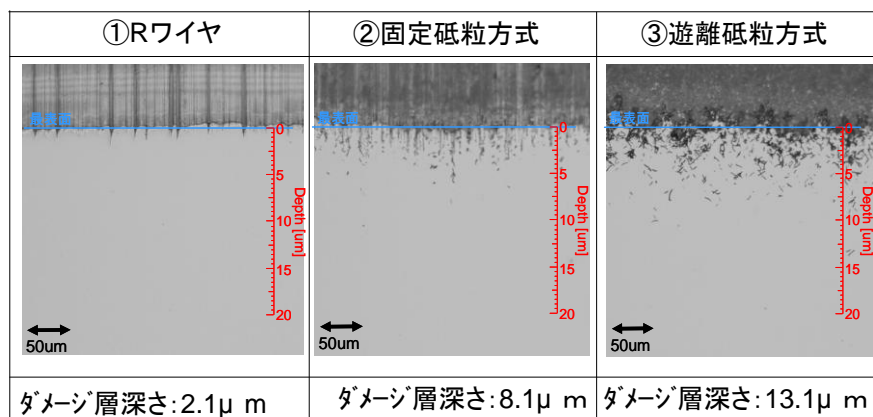


図 III-2-(イ)-B-1[2]各スライス方式のダメージ層深さ

ピット（ダメージ）の観察状況を示す。遊離砥粒方式、固定砥粒方式ではエッチピットの深さがダメージ層の深さを決めているのに対し、R ワイヤではエッチピットがほとんど観察されず、切断溝の深さがダメージ層深さを決めている。

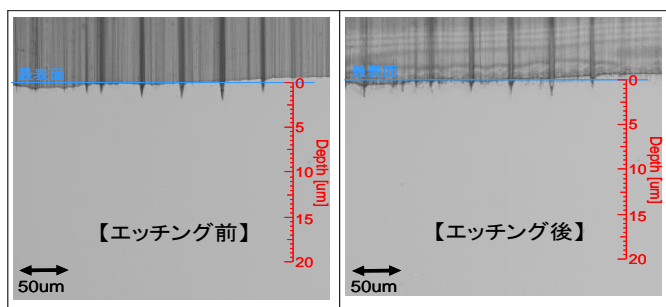


図 III-2-(イ)-B-1[3] R ワイヤウエハのエッチピット

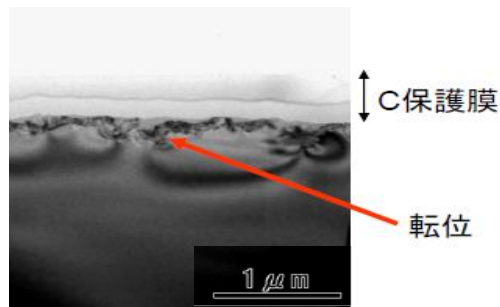


図 III-2-(イ)-B-1[4] TEM 観察結果

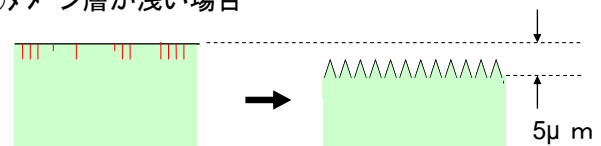
図Ⅲ-2-(イ)-B-1[4]に R ワイヤウエハの TEM 観察結果を示す。ウエハ表面に転位は存在するものの、深さは $0.5\mu\text{m}$ 以下となっている。このように R ワイヤウエハでは、ウエハ表面の転位が存在する深さが他の切断方式に比較して圧倒的に浅く、遊離砥粒方式あるいは固定砥粒方式とは大きく異なる低ダメージのウエハとなっている。R ワイヤウエハではダメージ層深さは実質的に $0.5\mu\text{m}$ 以下となっていると結論でき、表面を $0.5\mu\text{m}$ 除去すれば、セル工程に流せるものと考えられる。

(3) 太陽電池製造工程における低ダメージのメリット

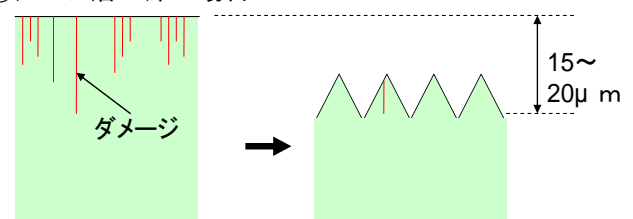
遊離砥粒方式あるいは固定砥粒方式でスライスされたウエハを用いて太陽電池を製造する際には、ダメージ層（転位）を除去するためウエハ表面を 15 から $20\mu\text{m}$ エッチングしてテクスチャを形成し、次のセル工程に流している。これに対し R ワイヤでは表面をほとんど除去することなく、例えば $5\mu\text{m}$ 以下の浅いテクスチャ形成でセル工程に進むことができる。ウエハ両面で 30 から $40\mu\text{m}$ のエッチング除去が不要となることは、R ワイヤウエハではスライス上がりで 20 から $30\mu\text{m}$ ウエハの厚みを薄くして、他のスライス方式と同じ厚みでセル工程に流すことができることを示している。結晶太陽電池ではウエハの厚みが薄くなるほど変換効率が低下することが知られており、セル工程前で同じ厚みのウエハをより薄いスライス上がりで得ることは、太陽電池の性能を落とさずにウエハコストの低減が可能となることを示している。ウエハのコストに占めるシリコンの比率は大きく、大きなコストダウン効果が期待される。

図Ⅲ-2-(イ)-B-1[5]にこの差異を模式的に示す。テクスチャは細かいほど光の散乱効果が大きく、太陽電池の変換効率の向上に繋がると言われている。15 から $20\mu\text{m}$ のエッチングではテクスチャは現状の $5\sim 10\mu\text{m}$ 程度より細かくすることが難しいと言われており、エッチング量の

①ダメージ層が浅い場合



②ダメージ層が深い場合



図Ⅲ-2-(イ)-B-1[5]エッチング除去量の比較

浅い R ワイヤウエハではより微細なテクスチャが形成できると期待されている。またウエハ表面に均一に存在する $0.5\mu\text{m}$ 深さの転位の存在が、これまでになく微細でかつ均一なテクスチャの形成に繋がることも期待される。今後の浅く均一なテクスチャ技術の確立により、変換効率の向上が図れるものと期待される。

(4) マルチワイヤーソーの導入と 0.12mm 素線 R ワイヤによる切断実験の開始

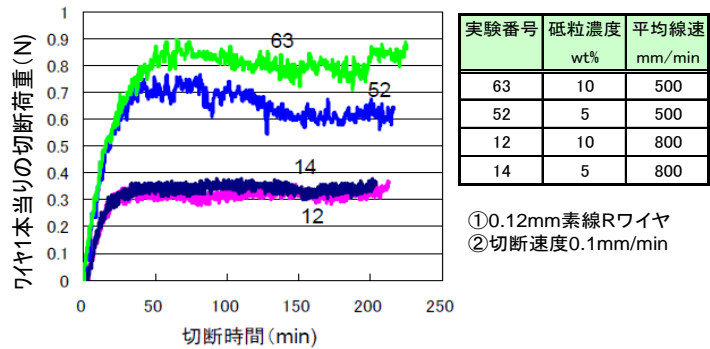
平成 23 年 4 月に、遊離砥粒用マルチワイヤーソーを R ワイヤ用に改装した装置を設置し、切断実験を開始した。プロジェクト開始前の金沢工業大学における事前の検討で、R ワイヤでは線速が切断性に大きな影響を及ぼすことが予想されていたため、線速は $1200\text{m}/\text{min}$ の高線速仕様とした。また切断実験中にシリコンに負荷される荷重を測定するため、ロードセルを設置した特別仕様とした。

図Ⅲ-2-(イ)-B-1[6]に線速と切断荷重との関係を示す。線速が早いほど切断荷重は低く、また一定値で安定しており、当初見込み通り高線速で切断性が大幅に改善している。

装置立ち上げより1年間は、事前検討で使用していた0.12mm素線Rワイヤ

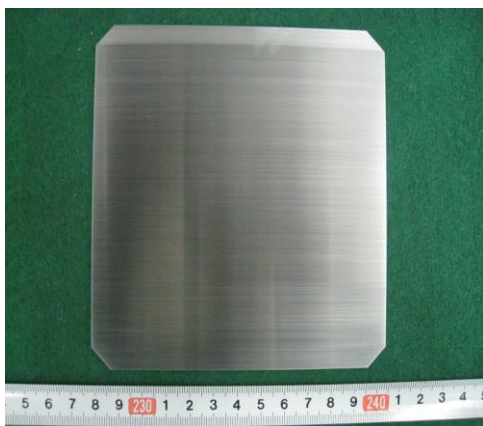
(樹脂を含めたワイヤ外径は

0.13mm)を中心に実験を行い、表Ⅲ-2-(イ)-B-1[3]に示す成果を得るに至った。切断実験には、幅60x高さ20x長さ50mm、おび幅120x高さ20x長さ50mmのシリコンインゴットを使用している。また平行して125角単結晶シリコンインゴットの切断にも挑戦し、図Ⅲ-2-(イ)-B-1[7]および表Ⅲ-2-(イ)-B-1[4]に示す125角x0.18mmウエハを得るに至っている。この125mm角ウエハはセルメーカーに提供し、セル評価が開始されている。



図Ⅲ-2-(イ)-B-1[6]線速の効果

表Ⅲ-2-(イ)-B-1[3]中間目標の達成度



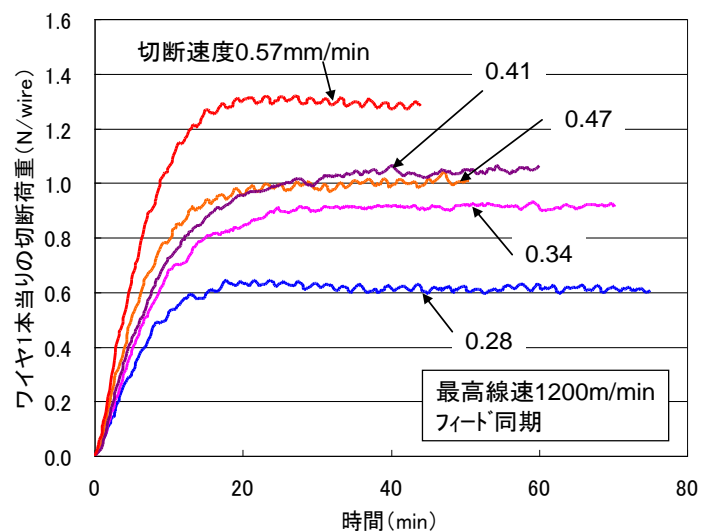
図Ⅲ-2-(イ)-B-[7]125mm角ウエハ

中間目標	達成度	
	0.12mm素線	0.1mm素線
①カーフロス<120μm	<140μm	○
②ダメージ層≤5μm	○	○
③Ra≤0.5μm	○	△
④ウエハ厚さ130μm	180μm	○
⑤切断速度≥0.3mm/min	◎ 0.57mm/min	△

表Ⅲ-2-(イ)-B-1[4]125角x0.18mmウエハの性状

実験番号	ウエハ厚さ μm	カーフロス μm	表面粗さ Ra:μm	ダメージ層 μm	TTV μm	反り Wt:μm
S130	183	137	0.4	4.2	20	29

Rワイヤ方式では図Ⅲ-2-(イ)-B-1[6]に示すごとく線速が早いほど切断性が向上する。このため最高線速に達したときのみシリコンインゴットを動かして切断を行うフィード同期を用いた切断実験を24年7月より開始し、切断速度0.57mm/minを達成するに至っている。最高線速を1200m/minに設定し、徐々に切断速度を上げた切断実験の結果を図Ⅲ-2-(イ)-B-1[8]に示す。切断速度0.57mm/minにて安定した切断荷重が得られている。



図Ⅲ-2-(イ)-B-1[8] 切断速度

(5) 0.1mm 素線 R ワイヤによる切断実験

カーフロス 120 μ 未満は 0.1mm 素線 R ワイヤを用いて初めて可能となる。このため 0.1mm 素線 R ワイヤ（樹脂を含めたワイヤ外径は 0.11mm）を用いた切断実験を平成 24 年 4 月より開始した。残念ながら現行のマルチワイヤーソーは 0.1mm 素線 R ワイヤで幅 120mm ウエハを切断する際に断線が頻発するため、切断条件を緩くして実験を行っている。このため表面粗さと切断速度が中間目標に届いていない。現在細線対応可能な新規のマルチワイヤーソーの設置（後述）を予定しており、この装置により 0.1mm 素線 R ワイヤで中間目標を全て達成できる見込みである。

表Ⅲ-2-(イ)-B-1[5]に示す S131 から 133 の 3 実験ではサイクル数を 0.5 回/min に設定している。サイクル数を下げると表面粗さが粗くなることが避けがたく、このため S131 から S133 ではカーフロス、ダメージ層は目標値を達成しているものの、表面粗さは目標値を満足していない。S95、96 は同じく 0.1mm 素線 R ワイヤで幅 60mm ウエハを切断した結果で、負荷が軽いためサイクル数を 2.5 回/min としており、カーフロス、ダメージ層と共に表面粗さも目標値を満足している。

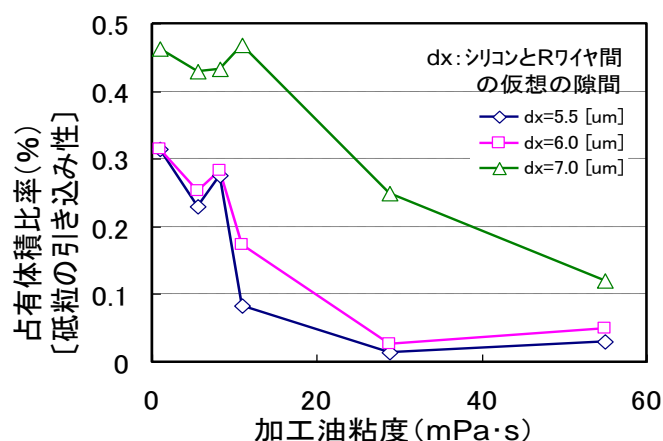
切断速度は現状の緩い切断条件にて 0.2mm/min を達成している。今後は新規のマルチワイヤーソーを用い、低粘度加工油（後述）とフィード同期条件の最適化により中間目標の 0.3mm/min を達成する計画である。

表Ⅲ-2-(イ)-B-1[5] 0.1mm 素線 R ワイヤでの中間目標の達成状況

実験番号	ワイヤピッチ μm	ウエハ厚み μm	カーフロス μm	ダメージ層 μm	表面粗さ Ra: μm	Si ⁺ ロック幅 mm	サイクル数 回/min	切断速度 mm/min
S131	250	132	118	4.5	0.7	120	0.5	0.1
S132	250	135	115	4.0	1.0	120	0.5	0.2
S133	250	131	119	3.0	0.5	120	0.5	0.1
S94	1000	886	114	2.8	0.4	60	2.5	0.1
S95	1000	886	114	4.9	0.4	60	2.5	0.1

(6) 砥粒挙動の数値解析と低粘度加工油の検討

R ワイヤでは砥粒の挙動が切断性に決定的な影響を及ぼすものと予想していたため、数値シミュレーションによる砥粒挙動の解析に注力してきた。R ワイヤでは加工油を変えると切断性が大きく変化する。このため加工油の粘性に着目し、粘性と砥粒の挙動の関係を詳しく解析した。その結果を図Ⅲ-2-(イ)-B-1[9]に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-B-1[9]加工油粘度解析結果

加工油の粘性を下げるほど砥粒の引き込み性（図中では砥粒の占有体積比率）が上がるという解析結果となった。このため粘度の異なる 15 種類の加工油を試作して切断実験を実施した。この中で粘度 1 mPa·s の加工油で最も良好な結果が得られ、数値解析

の有効性が確かめられた。

図Ⅲ-2-(イ)-B-1[10]に現在標準加工油として使用している加工油（K29、粘度29mPa・s）と粘度1mPa・sの加工油（K1）を用いて0.12mm素線Rワイヤにて切断実験を実施した結果を示す。切断速度0.1mm/minではK29、K1ともに同程度の切断荷重となっており切断性に差は無いが、K29では砥粒濃度5wt%、K1では砥粒濃度1wt%となっている。すなわちK1では切断性が向上するため低い砥粒濃度で同じ切断性を得ることができることを示している。これは切断コストの大幅な低減に結びつくことになるため、今後低粘度を中心に加工油の最適化を図る計画である。

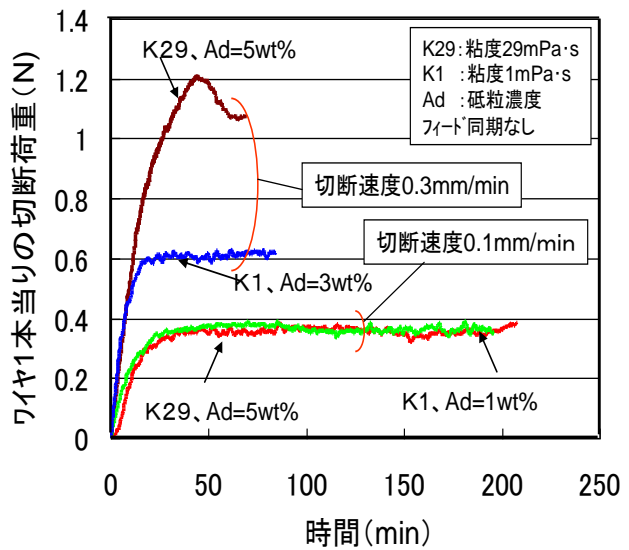
切断速度0.3mm/minでは、K29では切断荷重が安定せず、シリコンのフィード速度と砥粒がシリコンを研削する速度がバランスしていないが、K1では切断荷重が大幅に下がるとともに荷重が一定値となり、安定した切断が行えていることがわかる。低粘度加工油ではフィード同期無しで切断速度の改善が達成できており、今後加工油とフィード同期条件の最適化により、0.1mm素線Rワイヤによる切断速度0.3mm/minを達成する予定である。

K1は分散性、消泡性などに課題があり、このままで実用化することはできない。そのためさらなる加工油の最適化の検討を重ねている。

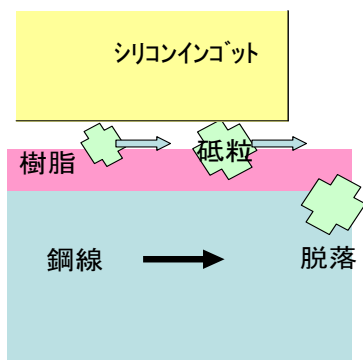
(7) 可視化実験とRワイヤ切断メカニズムの考察

Rワイヤでは図Ⅲ-2-(イ)-B-1[11]に示すごとく、砥粒がRワイヤの樹脂に抱えられ、鉋をかけるようにして砥粒がシリコンを研削していくものと考えている。砥粒はシリコンの端部に達するとRワイヤから脱落し、切断が完了したRワイヤには砥粒は残っていない。砥粒は加工油と混ぜて遊離砥粒スラリーとしてワイヤに掛けているが、切断は固定砥粒として進んでいるものと考えている。これを確認するために金沢工業大学の小型マルチワイヤーソーを使用し、ガラスを切断して砥粒を直接顕微鏡付の高速カメラで観察した。結果は予想通りで、Rワイヤでは砥粒は回転せずワイヤと同じ速度で進行していること、また鋼線では砥粒は回転しており進行速度はワイヤの進む速度に大きく遅れて進行していることを確認した。

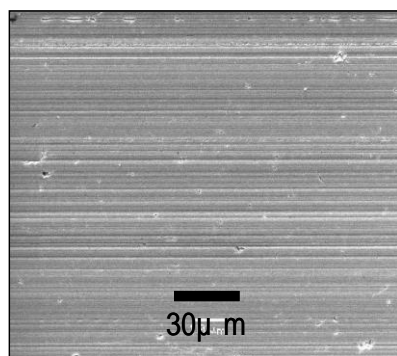
図Ⅲ-2-(イ)-B-1[12]に示すごとくRワイヤウエハの表面は微細な線状痕となっていること、また図Ⅲ-2-(イ)-B-1[13]に示すごとくシリコンの切粉がカールした線状の切粉となっていることから、図Ⅲ-2-(イ)-B-1[11]に示す切断メカニズムが正しいことが推察される。半固定砥粒方式と命名しており、多結晶インゴットの切断も可能なことを確認している。



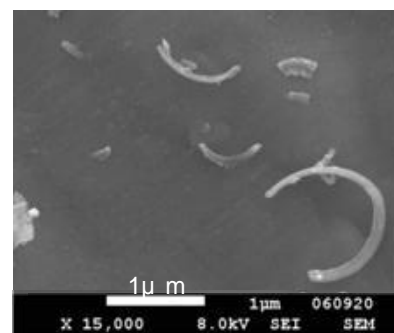
図Ⅲ-2-(イ)-B-1[10]低粘度加工油の効果



図Ⅲ-2-(イ)-B-1[11]
切断メカニズム



図Ⅲ-2-(イ)-B-1[12]
Rワイヤウエハの表面性状



図Ⅲ-2-(イ)-B-1[13]
シリコン切粉の性状

(8) セルメーカーでのRワイヤウエハの評価

平成23年9月より0.12mm素線Rワイヤを用いて125角x長さ50mmの単結晶インゴットの切断実験を開始した。ウエハ厚は当初0.86mmから徐々に薄い切断に移行し、平成24年1月には0.22mm、5月には実用厚みである0.18mmウエハを得るに至った。得られたウエハはセルメーカーに提供し太陽電池セルを試作して評価を受けている。また豊田工業大学にも125角x0.18mmウエハを提供し、セル評価を実施している。

これまでの評価で、Rワイヤウエハのダメージ層はセルメーカーがこれまで評価したウエハの中で最も浅いこと、ウエハの均一性に問題のないこと、テクスチャは均一に形成され問題のないこと、および変換効率もリファレンスに比較して遜色のないことが確認された。今後はRワイヤの低ダメージのメリットを最大限追及するため、浅く微細なテクスチャを形成する技術の開発を行い、変換効率の向上と大幅なコストダウンを達成する計画である。

(9) 新規マルチワイヤーソーの導入と最終目標の達成

現在切断実験に使用しているマルチワイヤーソーは、遊離砥粒用の装置を改装しており、Rワイヤの切断実験を行う中で改善したい点がいくつか出てきている。特に0.1mm素線Rワイヤの断線が切断実験の障害となっており、当初の予定より緩い切断条件にて切断実験を実施している。このため新規に図Ⅲ-2-(イ)-B-1[14]に示す固定砥粒用の装置を改装した新規の装置の導入を計画している。

0.08mm素線Rワイヤが使用できる

装置とし、カーブロス100μm以下を新たな目標に設定し開発を実施したい。

【現有の装置】

- ①遊離砥粒装置をベースにRワイヤ用に改装した実験機
 - ・最高線速:1200/min
 - ・インゴット長さ:50mm
 - ・切断荷重測定用ロードセル設置



【新規導入装置】

- ②固定砥粒装置をベースにRワイヤ用に改造した半量産機
 - ・最高線速:1300m/min以上
 - ・インゴット長さ:300mm以上

図Ⅲ-2-(イ)-B-1[14]新規導入装置の特徴

このマルチワイヤーソーの導入で中間目標のみならず、表Ⅲ-2-(イ)-B-1[6]に示す最終目標の達成が可能となるものと考えている。最終目標の達成には新規装置をベースとした切断条件の最適化とともに、加工油のさらなる最適化が必要であり、数値解析も交えながら総力を挙げて対応したい。

表Ⅲ-2-(イ)-B-1[6]最終目標の達成予想

中間目標	中間目標 120x20mmウエハ		最終目標 125/156mm角ウエハ
	現時点	年度末	
カーフロス<120μ m	○	○	○
ダメージ層≤5μ m	○	○	○
Ra≤0.5μ m	△	○	○
ウエハ厚さ130μ m	○	○	○
切断速度≥0.3mm/min	△	○	○
カーフロス<100μ m			○

(10) 特許の取得および対外発表

特許は R ワイヤの基本特許と位置づけている 1 件を出願している。現在国内優先出願の準備中で、出願と同時に審査請求および PCT 出願を予定している。なお NEDO プロジェクト開始前に、国内 7 件、海外 11 件の出願を行っており、国内 1 件、海外 2 件が成立している。

学会発表、論文発表等も積極的に実施しており、発表内容を見て数社より R ワイヤ提供依頼が来ている。

2. 実用化・事業化見通し

(1) Rワイヤスライスのコスト試算

表Ⅲ-2-(イ)-B-2[1]

に現在切断実験に採用している切断条件を基にした R ワイヤ方式での変動費の試算結果を示している。

表Ⅲ-2-(イ)-B-2[1] ウェハ変動費の比較

項目		単位	Rワイヤ	固定砥粒	遊離砥粒
前提条件	ウェハ厚み		0.15	0.17	0.18
	素線径	mm	0.1	0.1	0.12
	カーフロス	μ m	120	120	160
変動費計		相対比較	100	109	130

比較として現行の遊離砥粒方式および固定砥粒方式での変動費の試算結果を併せて示している。シリコンインゴットのコストを 6 千円/kg に置き、125mm 角ウェハをスライスしたときの試算結果である。スライス上がりのウェハ厚は、セル工程に流すときのウェハ厚を同じにするとの観点から、遊離砥粒方式では 0.18mm、固定砥粒方式では 0.17mm、R ワイヤでは 0.15mm とした。R ワイヤはスライス上がりのウェハ厚みが薄いこともあり、最も変動費が低い試算結果となっている。

表Ⅲ-2-(イ)-B-2[2]にこれ

までに得られている実験結果より推定し、R ワイヤ方式で今後 2 年間で達成可能と見込まれるコストダウン要因を加味して、

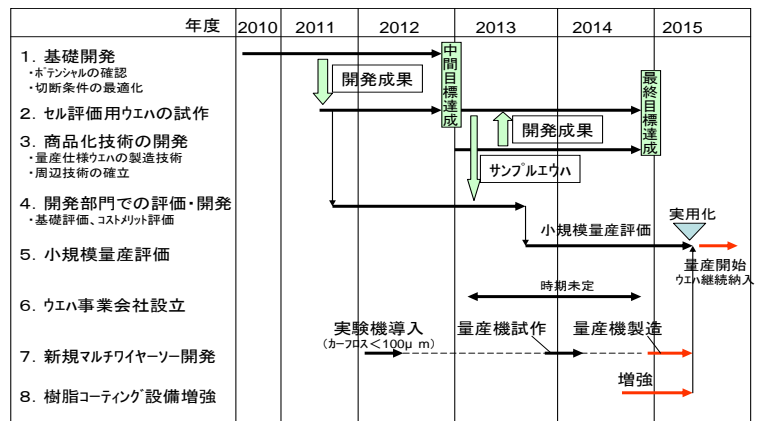
表Ⅲ-2-(イ)-B-2[2] ウェハ変動費の比較

項目		単位	Rワイヤ	固定砥粒
前提条件	ウェハ厚み		0.14	0.14
	素線径	mm	0.08	0.08
	カーフロス	μ m	100	100
変動費計		相対比較	100	104

変動費の試算を行った結果を示す。比較として将来固定砥粒方式のコストが到達する可能性のある究極の条件での試算結果を併せて示す。同じ 0.14mm 厚みのウェハの切断において、R ワイヤ方式は固定砥粒方式より変動費を下げられる結果となっており、この結果がウェハ事業進出の大きなドライビングフォースとなっている。ダメージ層が薄いことによるコストダウン効果を除いても R ワイヤ方式の変動費が固定砥粒方式より下がる可能性が出てきており、R ワイヤは将来の太陽電池のコストダウンに大きく貢献するものと期待される。

(2) Rワイヤウェハ事業の検討

上記のコスト試算結果に基づき、太陽電池用シリコンウェハの切断メーカーとジョイントベンチャーで新会社を設立し、国内の太陽電池工場向けに R ワイヤウェハ事業を開始することを計画している。ウェハ事業を展開することにより、R ワイヤの特徴である低カーフロスおよび低



図Ⅲ-2-(イ)-B-2[1] 実用化のスケジュール

ダメージのメリットを最大限事業に生かすことが可能となると考えている。またウエハ事業では、セルメーカーの要望が直接聞けるメリットも大きい。すでに固定費、変動費、要員、資本金などの算定を終えており、セルメーカーの採用計画に合わせていつでも新会社(JV)を設立できる準備を整えている。

Rワイヤウエハはまず国内のセルメーカーでの採用を目指している。国内工場でのRワイヤウエハの小規模量産採用を実現し、その後海外にも展開していく計画である。事業化のスケジュールを図Ⅲ-2-(イ)-B-2[1]に示す。赤矢印が実用化のフェーズを表している。

(3) Rワイヤの外販

海外のセルメーカー向けにはRワイヤの外販を計画している。国内はRワイヤウエハを、海外はRワイヤを提供する計画である。

海外ではマルチワイヤーソーメーカーと連携してRワイヤ技術のPRを実施し、固定砥粒方式に比較した総合的なコストメリット(低ダメージのコストメリット含めて)を強みに世界的なRワイヤの展開を考えている。

(4) Rワイヤ製造設備の拡充

Rワイヤの製造コストを現状の試作コストの数分の一とすべく、製造装置の設計とコスト試算を進めている。市場の動向を見てタイムリーな設備投資を行うべく、準備を進めつつある。

3. 波及効果

(1) 半導体用シリコンインゴットのスライスへの適用

半導体ウエハメーカーより R ワイヤを半導体用シリコンインゴットの切断で評価したいとの要望があり、NEDO と協議の結果、R ワイヤの提供を開始している。超高品質シリコンウエハに繋がるポテンシャルを有しているものと期待されている。

小型シリコンブロックを用いた継続的な切断実験が実施されており、ウエハメーカーで切断したウエハにて低ダメージが確認されている。引き続き評価が実施される予定であり、お互いの技術の発展に結びつけるべく密接な情報交換を行っている。

(2) SiC インゴットのスライスへの適用

R ワイヤは樹脂でコーティングされているため、薬液の腐食に強い。このため SiC に代表される難スライス材料のメカノケミカルスライシングに R ワイヤが使える可能性が考えられる。シリコンに留まらず幅広い材料のスライスで R ワイヤの活躍の場があるものと期待している。図 III-2-(イ)-B-2[2] に半導体および SiC 分野での展開予想を示す。

	2012	2013	2014	2016	2017	2018
半導体用シリコンウエハへの展開	ポテンシャルの確認		切断技術の開発 マルチワイヤーの製作		量産技術の確立	実用化
SiCウエハへの展開	ポテンシャルの確認		切断技術の開発 マルチワイヤーの最適化		量産技術の確立	実用化

図 III-2-(イ)-B-2[2] 半導体、SiC 分野への展開予想

4. 今後の展開

(1) 海外ユーザへの R ワイヤの提供と技術供与

海外への R ワイヤ販売が本格化すると、新たに規模の大きい R ワイヤ製造設備が必要となる。自社で設備投資を行うほかに、他社に技術供与して製造販売を委託し、ライセンス事業とすることも視野に入れている。

(2) 半導体用シリコンウエハ、SiC ウエハへの展開

太陽電池用シリコンウエハに比べてハードルが高いと予想しているが、可能性を追求していきたい。

5. 特許論文リスト

表Ⅲ-2-(イ)-B-5[1] 特許・論文・学会発表・新聞発表

	H22	H23	H24	計
特許出願(うち外国出願)	0	1(0)	0	1件
論文(査読付き)	0	2(2)	0	2件
研究発表・講演(うち国際会議)	3(0)	3(1)	1(0)	7件
新聞・雑誌等への掲載	0	1	0	1件
受賞実績	0	0	0	0
展示会への出展	0	0	0	0

平成 24 年 7 月 24 日現在

C 太陽電池用ポリシリコンのシリコン原料転換の研究開発

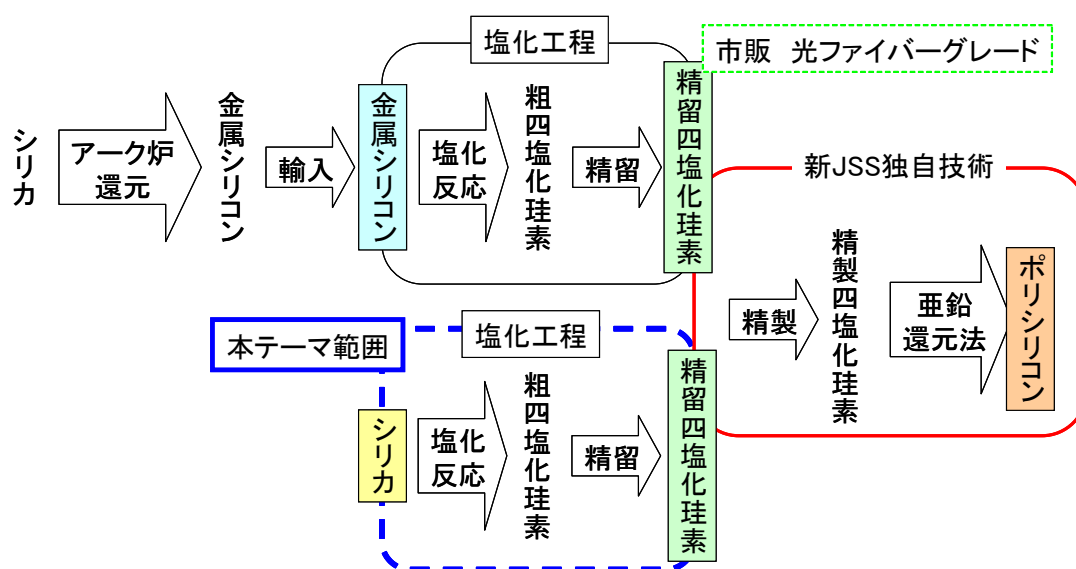
1. 成果詳細

共同研究の内容

本件は、太陽光発電ロードマップ (PV2030+) に記載の発電コスト目標：14 円/kWh (2020 年)、モジュール製造コスト目標：75 円/W、モジュール変換効率目標：20% (2015～2020 年時点) の実現に資するシリコン系太陽電池の低コスト化に係る研究開発である。

本研究は、ポリシリコンの原料として全量輸入に頼っている粗金属シリコン (Si) に代わって、より安価に調達できるシリカ (SiO₂) を原料とする太陽電池用ポリシリコンの生産技術を開発することである。この方法によれば、亜鉛還元法によるポリシリコン製造の中間原料となる四塩化珪素 (SiCl₄) を安価に生産することができ、製造コストを大幅に低減しうる利点を有する。

目標としている亜鉛還元法プロセスと本研究の範囲 (点線枠内) を下図に示す。



図Ⅲ-2-(イ)-C-1(1) 亜鉛還元法プロセスと研究範囲

また、本研究の中間目標 (平成 24 年度) を以下に示す。

表Ⅲ-2-(イ)-C-1(1) 中間目標値 (平成 24 年度)

中間目標項目	達成目標
シリカ塩化の生産性 ^{注1}	0.7 トン-SiCl ₄ /m ² /h 以上
四塩化珪素の品質 ^{注2}	純度 6N 以上
シリコン単結晶の品質	10 Ω・cm 以上

(注 1) 塩化炉の内径断面積当りの四塩化珪素生産速度

(注 2) 光ファイバー用原料グレード

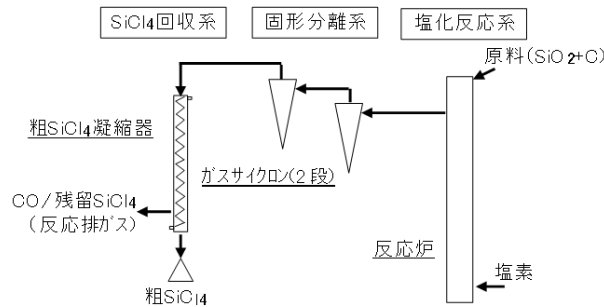
(1) シリカ塩化の生産性

シリカ塩化反応の生産性の検討において、始めに小型のラボ装置での試験、ついでベンチサイズの反応装置での試験、とスケールアップしながら、その反応条件及び生産性の検討を行なった。

塩化反応に関する基本条件を把握する目的で、シリカ及び炭材は比較的入手が容易で、高純度のオーストラリア産シリカと中国産コークスを標準材料として使用した。

塩化反応試験装置は主に、塩化反応系（反応炉）、固形分離系（ガスサイクロン）、四塩化珪素回収系（凝縮器）で構成される。また、一酸化炭素や残留四塩化珪素などから成る反応排ガスは、アルカリ洗浄した後に専用の除害装置にて処理される。

なお、安全対策として、吸引減圧が可能なブース内に同装置を設置して行った。



図III-2-(イ)-C-1(2) 試験装置の概略

試験装置の概略を図III-2-(イ)-C-1(2)に示す。

反応炉内を外熱ヒータで所定温度に昇温した後、炉内に原料(シリカ、炭材)を装填し、底部より所定量の塩素を炉内に導入した。塩化反応が開始した後、消費された原料に相当する分の原料を上方より連続的に炉内に追加供給した。

生成した四塩化珪素(気体)は、同伴する微粒の原料(一部)をガスサイクロンで捕集した後、冷媒(-10℃以下)で深冷した凝縮器にて凝縮、回収した。また、回収した粗 SiCl₄(塩化不純物や微粒原料を含む四塩化珪素)は、単位時間(1分間)毎に管状容器に集めてその回収量を実測して、四塩化珪素の生成速度を計測し、反応炉の内断面積当りの四塩化珪素の生成速度(トン-SiCl₄/m²/h)を算出し、生産性の指針とした。

ラボ反応試験の結果を下表にまとめる。

表III-2-(イ)-C-1(2) ラボ試験の結果(例)

項目		実績例
条件	原料シリカ	珪砂(豪州品)
	反応方式	固定層/流動層
結果	四塩化珪素回収率(液化率)	~70%
	塩化生産性(注)	0.57 (最高) (トン-SiCl ₄ /m ² /h)

(注) 反応炉の内断面積当りの四塩化珪素の生成速度

ベンチ試験

シリカの塩化試験(再委託先：東邦チタニウム)

本試験では、原料となるシリカ(SiO_2 分 99.8%、珪砂)と炭材(石油系コークス)を所定の方法でベンチ試験(流動層)に適した造粒体にした。

この原料造粒体を使って流動層を形成し、塩化反応を行った。
反応条件の最適化を進めながら、ベンチ試験を実施した。

その結果として、最良例を表Ⅲ-2-(イ)-C-1(3)にまとめる。

表Ⅲ-2-(イ)-C-1(3) ベンチ試験結果 例

項目		試験条件／結果
条件	シリカ原料	珪砂(豪州産)
	炭素原料	コークス(石油系)
結果	塩化生産性 ^{注1} (トン- SiCl_4 / m^2 /h)	0.90(瞬間値、 ^{注3}) 0.79(平均値、 ^{注3})
	四塩化珪素品質 ^{注2}	3N程度(簡易蒸留品)

(注1) 中間目標値は0.7トン- SiCl_4 / m^2 /h

(注2) 精留前の四塩化珪素純度

(注3) 凝縮回収した四塩化珪素量より計算(瞬間値は1分間の最高値)

同結果の生産性(シリカ塩化)は、前述した中間目標値を達成している。

高効率反応試験

前述したベンチ試験の成果を踏まえ、更なる塩化の生産性を探求すべく、技術改良を検討した。

塩化反応時には、吸熱反応であり、外部からの加熱が必要であった。この反応を詳細に検討した結果、あらかじめ造粒体を高温で前処理を行ない、原料のシリカと炭材の一部をSiC化することで、塩化反応時にSiCと塩素の発熱反応により、一定の反応温度を維持しやすくなることを見出し、高効率反応試験として検討を行った。

高温加熱処理

高温加熱処理試験機を導入して、原料造粒体を所定の温度で加熱時間を変えながら高温加熱処理した。

その結果、

- 高温加熱処理で、造粒体強度が未処理品の約2倍に向上した。
- 高温加熱時間に伴い、造粒体中にSiCが生成、増加することが確認された。
- SiC生成の進行と共に、造粒体のかさ密度(タップ)が低下した。

塩化試験

高温加熱処理後の原料を使って、前述したベンチ試験装置で塩化試験を実施した。
その結果、

- a 塩化生産性が向上した。
→生成 CO を含む不純物低減による四塩化珪素ガス凝縮性能の改善
 - b 原料のキャリーオーバーが約 30%低減した。
→原料造粒体強度の向上
 - c 生成 SiC 量の増加に伴って、塩化炉加熱ヒータの消費電力が低下した。
→SiC と塩素の発熱反応の寄与が確認された。
- 以下に、高効率反応試験結果を示す。

表Ⅲ-2-(イ)-C-1(4) 高効率反応試験結果

項目		試験条件／結果
条件	シリカ原料	珪砂 (豪州産)
	炭素原料	コークス (石油系)
結果	塩化生産性 ^{注1} (トン-SiCl ₄ /m ² /h)	0.98 (瞬間値、 ^{注3}) 0.88 (平均値、 ^{注3})
	四塩化珪素品質 ^{注2}	3N 程度 (簡易蒸留品)

(注1) 中間目標値は 0.7 トン-SiCl₄/m²/h

(注2) 精留前の四塩化珪素純度

(注3) 凝縮回収した四塩化珪素量より計算 (瞬間値は 1 分間の最高値)

この高効率反応により、四塩化珪素の生産性は、平均値で 0.88 (トン-SiCl₄/m²/h) となり、中間目標の 0.7 を大きく上回る結果となった。

(2) 四塩化珪素の品質

ラボ試験およびベンチ試験で得られた粗四塩化珪素を小型蒸留装置、精留塔により、蒸留・精製を行った。その品質を調べた。

得られた蒸留四塩化珪素をガスクロマトグラフ分析装置で評価した結果、その純度は 3N(99.9%)以上であることが確認された。

粗四塩化珪素の精留

精留後の四塩化珪素を分析(GC-MS)した結果、6N以上の純度であることが確認され、中間目標(四塩化珪素の品質)を達成した。

また、精製後の四塩化珪素の金属不純物分析を ICP-MS で行った。以下に分析結果を示す。

分析値から、精留後の四塩化珪素は、一般の光ファイバークレードと同等の品質であることを確認した。



写真Ⅲ-2-(イ)-C-1(6) 精留塔

表Ⅲ-2-(イ)-C-1(5) 精留後の四塩化珪素の ICP-MS による金属不純物分析結果 (ppb)

	Li	Na	Mg	Al	K	Ca	Ti	Cr	Mn
精留後の SiCl ₄	<0.1	0.5	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	<0.1
	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Sn	Pb	
	3.3	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	

(3) 単結晶シリコンの品質評価

精製後の四塩化珪素を用いて単結晶原料となるポリシリコンを試作する水素還元装置を製作した。

本装置は、四塩化珪素と大過剰の水素を流通させ、高温度で四塩化珪素を還元し、Si を生成させる反応装置である。



水素還元反応により、直接塩化反応で生成した四塩化珪素からポリシリコンを製造し、分析・単結晶評価を実施した。

得られたポリシリコンの ICP-MS による分析の結果から、ポリシリコンの金属不純物は、すべて 0.1ppm 未満であった。

一方、晶癖線が明瞭な単結晶インゴットが得られた。この単結晶インゴットを切断し、ミドル部分の抵抗率を測定した結果、N型で約 30Ω・cm となり、当初の中間目標値を達成した。

表Ⅲ-2-(イ)-C-1(6) 研究開発項目ごとの成果・達成度

中間目標	研究開発成果	達成度	コメント
シリカ塩化の生産性 0.7 トン-SiCl ₄ /m ² /h 以上	シリカ塩化反応において、生産性は 0.79 に達し、さらに、高効率化試験においては、0.88 の値を得た。	◎	なし
四塩化珪素の品質 純度 6N 以上	上記反応において生成した四塩化珪素を精留し分析した結果から、純度は 99.9999% (6N) 以上であった	○	なし
シリコン単結晶の品質 10Ω・cm 以上	ポリシリコン製造装置により、精製四塩化珪素からシリコンを製造し、分析評価をおこなった結果、N型で 30Ω・cm の抵抗値を得た	○	なし

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

2. 実用化・事業化見通し

本検討技術の目的は、新規のポリシリコン製造方法である亜鉛還元法の原料として、現在使用している金属シリコンの塩化による四塩化珪素から、シリカ直接塩化法による四塩化珪素に原料転換することである。

実用化試験においては、パイロット規模でのスケールアップ試験を行い、少量生産を行い、生成ポリシリコンの品質評価を実施する。その結果から量産機的设计を行うことになるが、直接塩化反応の生産性の数値は、最終目標値も達成しているため、量産設備的设计は可能と考えている。

また、本法が事業化された場合の効果としては、下記が見込まれる。

a. 太陽電池用ポリシリコン製造におけるコスト低減

亜鉛還元法によるポリシリコンの製造において、原料四塩化珪素の低コスト化が見込まれ、結果としてポリシリコンの低コスト化が図れる。

b. 国際情勢の影響を受けない

金属シリコンを原料としないため、国際情勢の変化による影響（金属シリコンの輸出入制限など）を受けず原材料を確保できる。

これらの効果により、国際競争力を持つ結晶シリコン太陽電池産業への貢献する。

3. 波及効果

本法は、シリカ原料から直接四塩化珪素を製造する技術である。本技術の波及効果先としては、光ファイバー製造、ヒュームドシリカ製造など、四塩化珪素を原料として用いる分野への転用が考えられる。

更に、最も大きな期待を得られる分野として、半導体シリコン原料の戦略的転換がある。

現状半導体向けポリシリコンを始め、PV用途のポリシリコンの大半は、金属シリコンを原料として輸入し、塩酸塩化反応によりトリクロロシランを製造し、これを原料とするシーメンス法により製造している。シーメンス法は、技術的にも完成されている製造技術であり、今後もポリシリコン製造法の主流であることは変わらない。

しかしながら、その出発原料となる金属シリコンに関しては、全量輸入品であり、国内需要の約8割以上を中国からの輸入品に頼っている。

今後、国際情勢の変化により、主たる輸出元である中国からの入手が困難になった場合には、よりコストの高い産地から輸入せざるを得なくなり、国内のポリシリコンメーカーの国際競争力が低下する。

そこで、将来、結晶シリコン太陽電池の生産量を拡大する際には、そのポリシリコン製造のための出発原料（トリクロロシラン）を、シリカ直接塩化法による四塩化珪素を出発原料とする製法に転換することが可能になる。

四塩化珪素からトリクロロシランを製造する技術は、すでにサンシャイン計画にて検討実施済みであり、且つポリシリコンメーカーにおいてコンバージョン技術として実施済みなので、技術的な問題はない。

更に、シリカ原料は広く輸入することも可能であるが、ポリシリコンの需給価格と、為替動向によっては、国内産シリカ原料の活用も可能となり、国内産業の裾野の拡大の可能性も期待できる。

4. 今後の展開

中間目標及び、四塩化珪素の生産性については最終目標を達成している。次のステップとしては、パイロット設備による原料転換実用化技術開発を進めて行くことになる。

5. 特許論文リスト

、論文、外部発表等の件数（内訳）

	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT 出願	査読付き	その他	
平成 22 年度	0	0	0	0	0	0
平成 23 年度	1	0	0	0	0	0
平成 24 年度	0	0	0	0	0	0

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条項) (添付資料) 特許論文リスト

【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	新日本ソーラー シリコン (株)	特願 2012-012024	国内	2012/1/24	出願	四塩化珪素の 製造方法	深澤英一 大久保秀一

【論文】

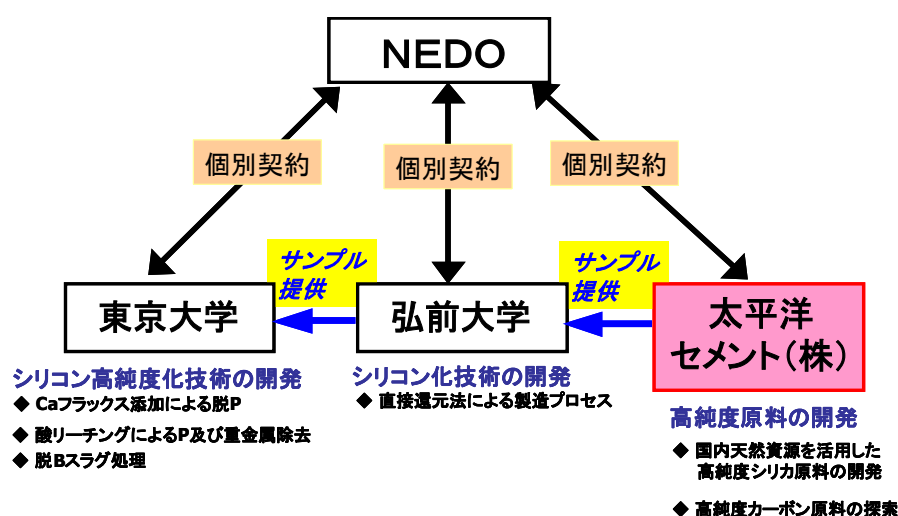
なし

D 太陽電池用シリコンの革新的プロセスの研究開発

1. 成果詳細

(2) 中間目標の達成度

本プロジェクトの技術開発は、最新の高純度化及び製錬技術の進歩を取り込んだシリコンの革新的プロセス研究を開発する。本プロジェクトの開発体制は、図Ⅲ-2-(イ)-D-1 [1]に示すように、各個別テーマごとに NEDO がそれぞれの研究機関と契約を個別に締結し開発を進めてきた。平成 22 年度から平成 24 年度にかけて、各研究機関は相互に情報共有及びサンプル提供を行い、本プロジェクトの最終目標達成に向けて活動してきた。以下に各個別テーマごとの中間目標と成果を示す。



図Ⅲ-2-(イ)-D-1 [1] 本プロジェクトの開発体制

a. 高純度原料の開発

太平洋セメント株式会社（以下、太平洋セメント(株)）は、シリカ原料と炭素材（カーボン）の高純度化技術を開発し、工業化に向けたプラント設計を検討するとともに、開発中の高純度化原料を弘前大に提供する。本テーマの中間目標は、シリコン（SOG-Si）を直接還元法で製造する際に一方向性凝固で除去できない特定の元素（B及びP）の含有量が1ppm未満のシリカ原料及びカーボンを開発することである。平成23年度までに、国内に豊富に存在する天然鉍石を出発原料としたシリカ合成及び精製技術を検討し、表Ⅲ-2-(イ)-D-1[1]に示すように、Bが0.05ppm未満及びPが1ppm未満の非晶質シリカの合成に成功した。また、安価なカーボン原料を探索し、シリカ原料同様、表Ⅲ-2-(イ)-D-1[1]に示すように、Bが0.1ppm及びPが1ppm未満のアモルファスカーボンを見出した。今後の課題は、本プロジェクトのSOG-Siの想定生産量（10,000t/年）に対応できる量産技術を開発と製造コストの達成に目処を付けることである。この課題の達成に向け、プラントの設計に必要なスケールアップ実験によるデータ取得と目標製造コスト実現（2,000円/kg-SOG-Si）のための生産効率化技術の検討を行う。

b. シリカの直接還元プロセスの開発

弘前大学は太平洋セメント・東海カーボンから供給される高純度原料を用いて、純度を低下させることなく、シリコンに還元することにより、太陽電池級シリコン原料を低コストで提供できるプロセスの開発を行った。本テーマの中間目標は、シリコン (SOG-Si) を直接還元法で製造する際に太陽電池特性への影響が大きい (B 及び P) の含有量が 1ppm 未満のシリコンの還元を行うために、表Ⅲ-2-(イ)-D-1[1] に示すように①シリカ・炭素の混練材最適化 ②ハイブリッド加熱法(≥1900℃)の確立を行うことにより、③Si 純度 (B<1ppm) の達成を中間目標とした。シリカ(SiO₂)の還元反応は、総合反応式 $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ をみると単純に見えるが、実際には亜酸化物(SiO)ガスや炭化物(SiC)を経た複雑な反応経路を取る。従来のアーク炉による還元法は、コンタミが多く、開放系での反応であるため、収率が低いという問題点があった。熱力学計算によれば、原料であるシリカ・炭素の配合や中間物質である SiC との固相-気相反応を正確に制御することの必要性が示唆される。そこで、準閉鎖系である反応するつぼの中で、シリカ・炭素の配合や中間物質である SiC の最適化を行うことにより、アーク炉による対照実験に比べて約 4.5 倍以上のシリコンを得ることに成功した (残留 SiC 量 85%→30%に抑制)。総合収率としては 45%と見積もられ、スケールアップによって壁面・断熱材への付着を相対的に抑制すれば、60%程度まで向上することができると考えられる。

課題として、(1) 反応炉サイズが非常に小型であるため、実験室レベルの検証炉へのスケールアップと、(2) 下流プロセスへ流すために脱 SiC 脱炭素のプロセス技術の確立が今後の課題である。

c. シリコン精製プロセスの開発

東京大学では、シリカ精製 (太平洋セメント)、還元プロセス (弘前大学) で得られた Si を太陽電池級に精製するプロセスの確立を目指し、フラックス処理による還元脱 P、酸リーチング併用による脱 P、脱 B スラグ処理および凝固精製の一連のプロセス開発を行っている。前段の Si 化プロセスで、残留 P 濃度が 10ppm、B 濃度が数 ppm であることを想定し、Ca 添加フラックス処理による還元脱 P プロセスの確立:脱 P 率>90%、酸リーチング処理併用による脱 P 率の向上:脱 P 率>98%、脱 B スラグ処理のためのスラグ組成の最適化を中間目標とした。

まず、フラックス処理プロセスとフラックス中 P の分別定量分析技術を確立した上で、P がフラックス中に P³⁻イオンとして除去されていることが明らかにした。引き続き、種々の条件で P および Ca を添加した金属 Si を CaO-CaF₂系フラックスと熔融平衡させ、強還元雰囲気下における Si からフラックス中への P 除去の効果について検証した。また、スラグ処理により P が低減した Si 試料について、酸リーチング処理を行い、更なる脱 P の効果について合わせて検証した。フラックス処理による最高脱 P 率は 82% (目標値 90%) であったが、酸リーチングを施すことにより 96%の脱 P 率を得ることができ、ほぼ目標 (98%) を達成しつつある。今後はフラックス組成を変えて高い P 除去率を得るための最適組成を見出し、さらに酸リーチング条件 (酸濃度、シリコン粒径) の模索により、目標値は十分達成されると考

えられる。

表Ⅲ-2-(イ)-D-1[1] 中間目標の達成度

個別テーマ名	目標	成果	達成度	今後の課題と対策
高純度原料の開発 (太平洋セメント(株))	シリカ及びカーボン原料の高純度化 (B, P<1ppm)	目標物性を満足する各原料を開発した。 ・シリカ: B<0.05, P<1.0 ・カーボン: B=0.1, P<1.0 ※単位はppm	○	課題: シリコン想定生産量(10,000t/年)に対応する量産技術の開発と製造コスト達成の目処付け 対策: ・スケールアップ実験によるプラント設計のデータ取得と生産の効率化の検討
シリカの直接還元プロセスの開発 (弘前大学)	①シリカ・炭素の混練材最適化 ②ハイブリッド加熱法の確立 ③Si純度(B<1ppm)	①シリカ・炭素の混合比の最適化を行い、②ハイブリッド加熱法の開発に成功した(1900℃以上)③従来法より高い収率でSiを製造できることを確認した。	△ (H24年12月) (達成の見込み)	課題: (1) 収率の向上(Si元素として回収率で60%以上) (2) 下流プロセスに流せる生産量の確保 対策: るつぼ構造の高アスペクト化・多段化と反応炉のスケールアップ実験
Si精製プロセスの開発 (東京大学)	脱P率98%以上および脱Bフラックス組成の最適化	フラックス中にPを還元する新手法を開発し、酸リーチング処理との組み合わせで、目標脱P率に近い96%を達成。強還元雰囲気でも脱B50%を確認。	△ (H24年9月) (達成の見込み)	課題: フラックス処理による脱P率の向上(目標90%) 対策: フラックス組成を変えて、より脱P率の高くなる条件を検討し、最適化処置条件を確立する。

◎: 大幅達成(特筆すべき成果あり), ○: 達成, △: 達成見込み, ×: 未達

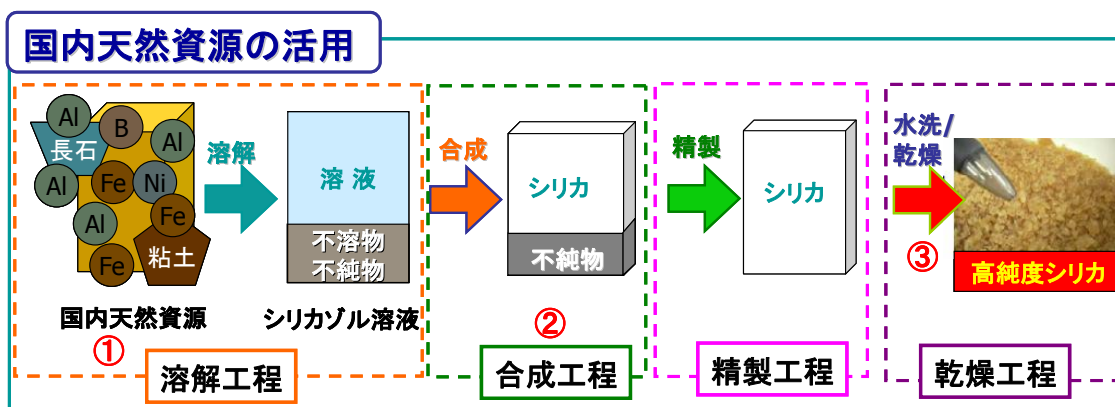
(3) 個別テーマの成果

a. 高純度原料の開発

本テーマの高純度シリカ原料は、国内に豊富に存在する天然鉱石を出発原料とする。このため、我が国の保有資源を有効に活用することができ、かつ定常的に安価な製造コストを実現できる。図Ⅲ-2-(イ)-D-1[2]に本テーマの高純度シリカ製造技術の特徴を示す。本テーマで開発した高純度シリカの製造技術は、溶解工程、合成工程、精製・水洗・精製工程及び乾燥工程で構成される。溶解工程は、天然鉱石中に含まれるシリカ(非晶質)成分をアルカリ溶液中に抽出する工程である。天然鉱石からシリカ成分を抽出するには、従来は高温高压処理による溶解処理が必要となり、莫大な熱エネルギーとオートクレーブと呼ばれる特殊な設備が必要であった。本工程では常圧及び100℃以下の温度による溶解処理で、シリカ成分を抽出できるため、従来よりも設備コスト及びエネルギーコストを安価にすることが可能となった。また、合成及び精製技術は、従来と異なり、酸性側領域から合成反応を活用することで、従来よりも安価な薬剤で合成し、効率よく不純物を除去する精製技術を見出し、前項の表に示すようにBが0.05ppm未満、Pが1ppm未満のシリカの合成に成功した。さらに、廃液の中和に生石灰を使用することで、得られる沈殿物をセメント原料としてリサイクルする仕組みの構築や遠心分離機の効率的な活用による洗浄水量の低減などランニングコストを抑える工夫をした。この結果、シリカの原材料費が200円/kg-シリカ以下で製造できる目処がついた。

高純度カーボン原料の調査結果を表Ⅲ-2-(イ)-D-1[2]に示す。低コスト化を狙い、液状樹脂2品種及びアモルファスカーボンの純度を評価した。この結果、アモルフ

アスカーボンが、B が 0.1ppm、P が 1ppm 未満を達成することを確認した。



★ 開発ポイント

- ① シリカ源に安価な国内天然資源を使用する。(低エネルギーのシリカゾル溶液製造技術の開発)。
- ② 酸性側領域からの合成。合成と精製処理に使用する酸を再利用する。(従来技術より安価な薬剤による合成・精製技術の開発)。
- ③ 水洗工程を工夫し、洗浄水量を5割削減する。(遠心分離機の有効活用による効率的な洗浄技術の開発)。
- ④ 廃液の中和に、生石灰を使用する。(セメント会社ならではの取り組み)
- ⑤ 目標純度を満足するガラス状炭素を見出した。(東海カーボン株式会社)

図Ⅲ-2-(イ)-D-1[2] 本テーマの高純度シリカの製造技術の特徴

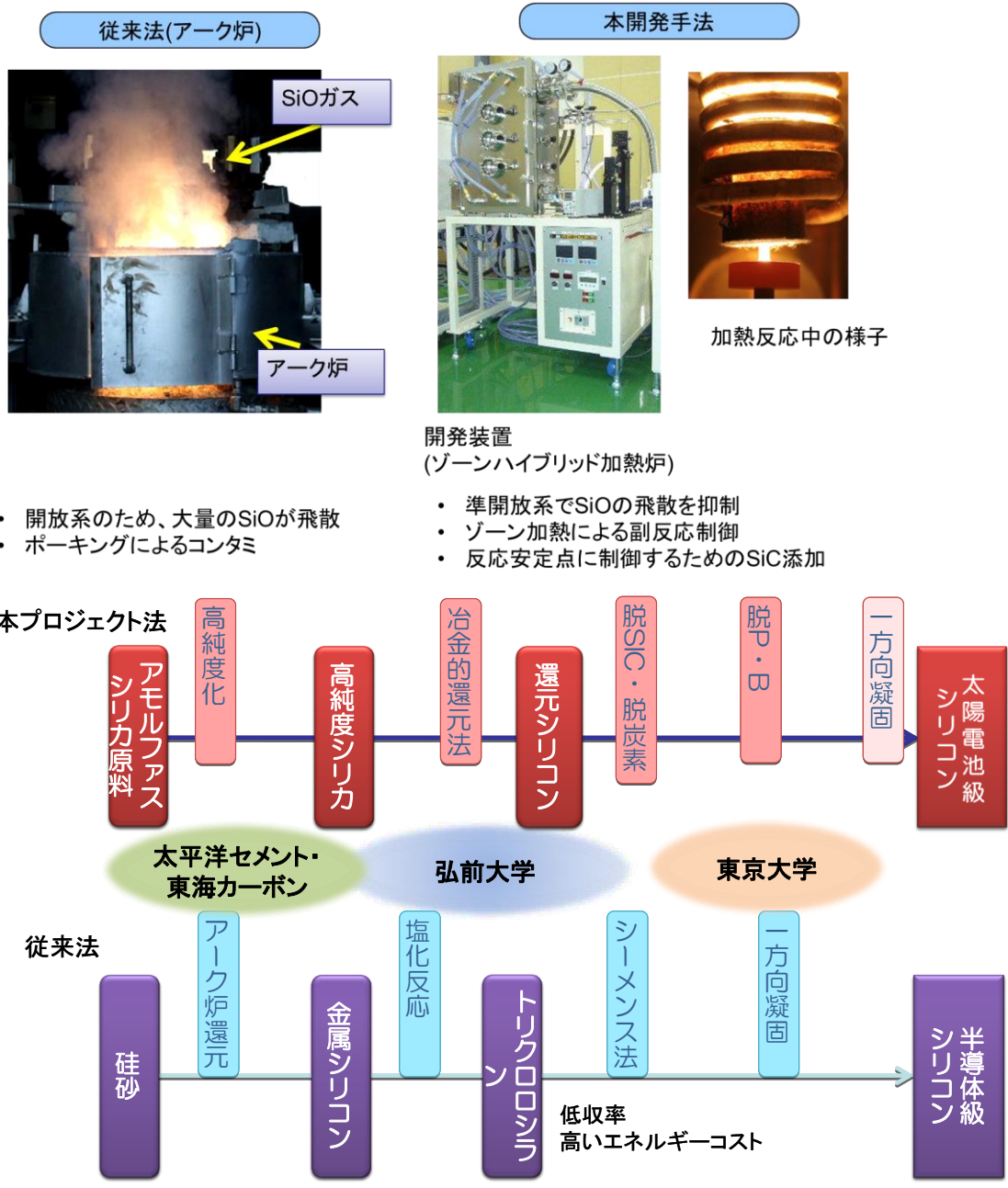
表Ⅲ-2-(イ)-D-1[2] 高純度カーボン原料の調査結果

	灰分	B	P	Al	Ca	Ti	Fe
アモルファスカーボン	-	0.1	1 未満	7	26	0.5 未満	11
樹脂A 炭化物 粉末	520	0.1未満	10 未満	28 ^{*1}	4.7	1.2	11
樹脂B 炭化物 粉末	370	0.1未満	10 未満	42 ^{*1}	3.3	2.3	69 ^{*1}

*1 テストに使用した粉砕機の使用部材からの汚染と確認済。

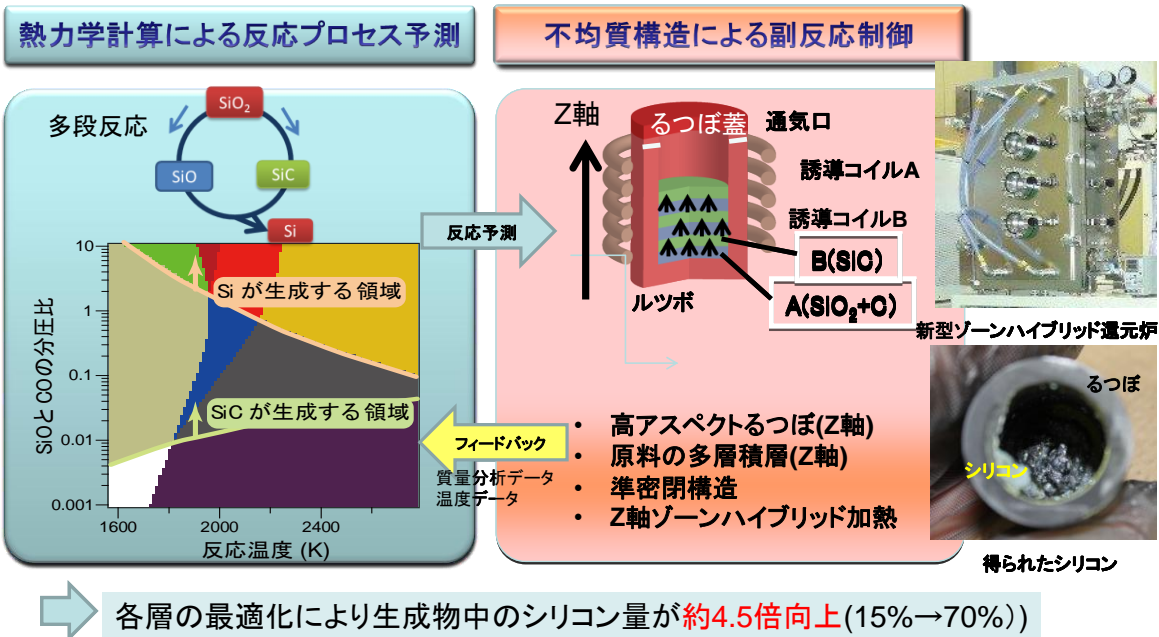
b. シリカの直接還元技術の開発

本技術の特徴は、高純度非晶質シリカを原料として、①純度を維持して、②高い収率でシリコンに還元することにある。高純度のプロセスによってコストが増大している非晶質シリカを出来るだけロスすることなく、還元することが非常に重要であるが、図Ⅲ-2-(イ)-D-1[3]に示すように従来法であるアーク炉では開放系であるために、大量の SiO₂ ガスを失うために収率が低く、またポーキングによるコンタミも大きな問題である。本開発手法は、熱力学計算に基づいて反応プロセスを設計することによって、コンタミを防ぎながら、収率の向上を図ることでプロセス設計した。ポイントとなるのは、①原料であるシリカと炭素の配合比の制御と、②副反応の制御するために中間生成物である SiC を添加すること、③反応サイトを z 軸(上下方向)に区分して、配合比・温度などを位置的に分離して最適化するために、原料配合の不均質化とゾーン加熱を行うことであり、これらによって準閉鎖系でシリカ還元反応を安定して進行させることに成功した。



図Ⅲ-2-(イ)-D-1[3] 従来法と本開発手法

シリカ(SiO₂)の還元反応は、総合反応式 $SiO_2 + C \rightarrow Si + 2CO$ をみると単純に見えるが、実際には亜酸化物(SiO)ガスや炭化物(SiC)を経た複雑な反応経路を取る。図Ⅲ-2-(イ)-D-1[4]右に示すように不均質化させた原料配分にするのと温度傾斜制御を行うことによって従来法であるアーク炉に比べて高い収率でシリコンが得られることに成功した。

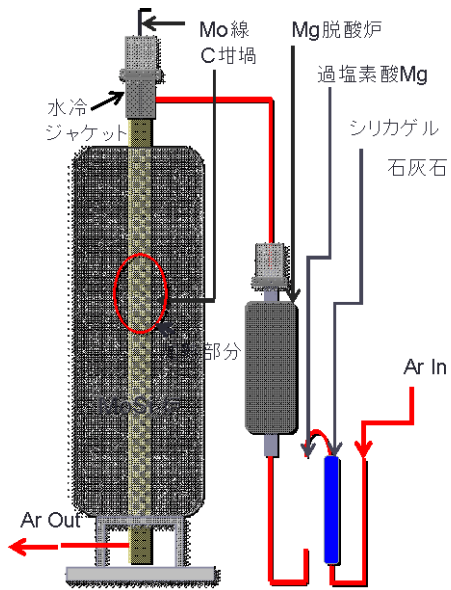


図Ⅲ-2-(イ)-D-1[4] 本テーマの成果と特徴

c. シリコンの精製技術の開発

本精製技術は、前段となる原料シリカ精製およびシリカ直接還元で生成したシリコン中の不純物をさらに低減することを目的としたプロセスである。特にPとBについてはシリカ原料や炭材に含まれていた場合に、製錬時にシリコンとともに還元されてしまい、その後の諸過程で容易に混入する。しかし、酸化除去もできず多くの不純物元素と違って凝固時の偏析係数が大きいため凝固精製も困難であり、シリコン精製プロセスにおいてはその除去法の開発に力が注がれてきた。金属シリコンの精製法として開発されたNEDO法では、Pは電子ビームによる真空精製、Bは水蒸気添加プラズマ法で除去されるが、時間とコストの低減が必要である。また、安価なフラックス精製法では、Bはある程度酸化除去できるものの、Pについてはほぼ不可能とされてきた。

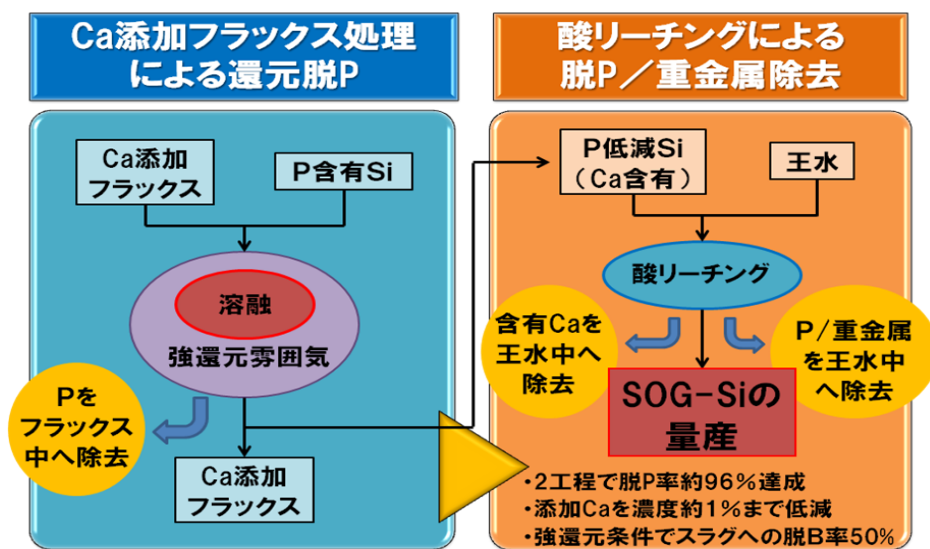
本方法は、Pはリン酸イオン PO_4^{3-} (P^{5+})として酸化除去するのではなく、リン化物イオン P^{3-} としてフラックス中に還元除去するもので、シリコンの酸化ロスを抑制できる。また、還元剤として添加されるCaはシリコン中に残留後、シリコンの粒界でPを濃縮しながらシリコンとの化合物を形成し、酸浸出による除去も併せて可能となる。その結果、98%のPを除去することが可能となり、原料シリカ精製およびシリカ直接還元で得られたシリコン中にPが50ppm含まれていても、本プロセスにより除去が可能であることが示された。また、NEDO法などではPとBをそれぞれ別プロセスでしか除去できなかったが、本精製技術では、PとBの双方が除去できるプロセスであり、本プロジェクトで目標とする一連のプロセスのみならず、金属シリコンを出発原料とした精製プロセスへの適用も十分考えられる。



図Ⅲ-2-(イ)-D-1[5] 装置の外観



図Ⅲ-2-(イ)-D-1[6] 精製シリコンの外観



図Ⅲ-2-(イ)-D-1[7] シリコン精製プロセス

2. 実用化・事業化見通し

(1) 成果の実用化の可能性

本プロジェクトの実用化の定義は、10,000t/年のシリコンの製造を想定した場合に、B及びPの純度が1ppm以下のSiを2,000円/kg以下の価格で、市場に提供できた時点を実用化と捉える。各テーマの実用化のための課題と対策について、以下に示す。

a. 高純度原料の開発

本テーマでは、SOG-Siを製造時に行われる一方向性凝固で除去が困難な元素であるB及びPの含有量が1ppm未満となる高純度シリカ粉末とカーボン粉末を開発した。今後は、想定したSOG-Si製造量(10,000t/年)に対応できる製造設備の設計と固定費を含んだ総コストが700円/kg-Si以下を達成することが課題である。この課題を解決するために、生産効率を高めた量産技術の検討を行い、この技術を元に製造設備を設計し、実用化を検討する。

b. シリカの直接還元技術の開発

本テーマでは、太平洋セメント・東海カーボンから供給される高純度原料を用いて、純度を低下させることなく、シリコンに還元することにより、太陽電池級シリコン原料を低コストで提供できるプロセスの開発を行うことであった。複雑な副反応を熱力学計算とつき合わせながら、反応最適化を行うことにより、シリコンのロスを極力抑えながら反応させることに成功した。SiCを添加することによって、反応制御を行っているが、そのコスト増を上回る収率を上げることが重要である。現在は様々なモニタリングを行うために非常に小規模な反応炉で実験しており、プロダクトは1g程度と非常に少ない。次ステップの課題として、想定したSOG-Si量を見据えて、Si製造プロセスをスケールアップした反応炉で検証することと、反応生成物(還元シリコン)に残留しているSiCとCを除去する技術開発を行うことが挙げられる。

c. シリコンの精製技術の開発

本方法により、シリコン中Pはフラックス中にリン化物イオン P^{3-} として還元除去されることが明らかになり、シリコンの酸化ロスを伴わない新たなPのフラックス除去法が確立され、酸浸出による効果的なP除去方も組み合わせて、98%のPを除去することが可能となった。(目標値99%)シリコンの歩留まりは96%とシリコンのロスは比較的小さい。また、従来知見よりBもフラックス中への除去は期待されるため、原料シリカ精製およびシリカ直接還元で残留するPやBについては、本プロセスにより除去が可能であると考えられる。

本プロセスのトータルコストは351円/kg-Siと試算され、シリコンロス約4%による前段プロセスの目標コスト上昇分を上乗せしても409円/kg-Siとなるため当初の目標600円/kg-Siは十分クリアしている。しかし、大量生産によるスケールメリットで本試算に含まれない設備償却や人件費を補う必要があり、スケールアップに取り組みその最適プロセス条件を明らかにすることが残された課題と考えられる。

(2) 事業化までのシナリオ

本プロジェクトの事業化までのシナリオを図Ⅲ-2-(イ)-D-2[1]に示す。また、個別テーマごとについては以下に通りである。

a. 高純度原料の開発

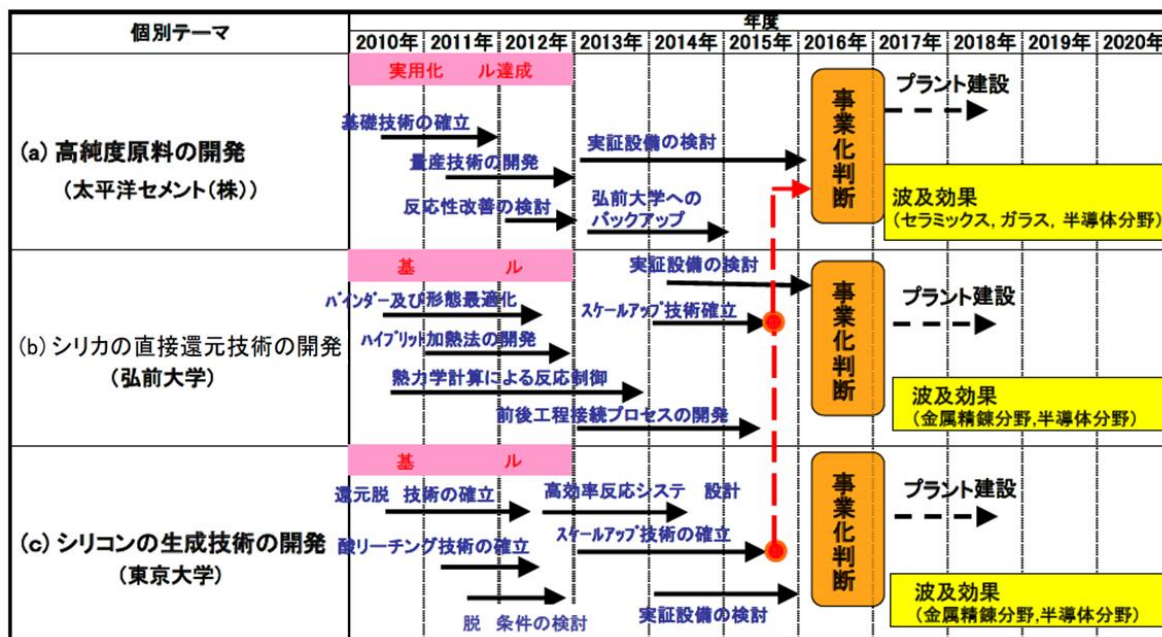
2012年度時点で量産化技術と高反応性付与技術の目処付けを行う。2013年に事業化検討に着手する。具体的には、10,000t/年の SOG-Si 製造量に対応できる原料製造設備を設計し、製造費を試算するとともに、事業環境を調査する。その結果を元に2016年度以降、事業化判断を実施する。事業化する基準としては、シリカとカーボンの製造コストの総額が700円/kg-Si以下であること、弘前大学が開発中のシリカの直接還元技術の実用化が目処付けされていること、また、後述する用途展開先で事業が成立すること等が挙げられる。

b. シリカの直接還元技術の開発

量産化技術としての大きな指標となるのが、収率である。すなわち、収率が50%ではロスだけで700円/kg-Siが本プロセスにかかってしまうため、他のコストを考えると60%~70%の収率までの向上が必要不可欠である。現状の炉が小規模であり、るつぼが小さいために、SiO₂ガスのロスも大きくなってきている。長尺化したるつぼを採用することによってこれを抑えることができる。スケールアップによって安定継続的に収率が60%を超えることができれば、コストをより精密に試算して事業が成立する可能性の検討が可能となる。

c. シリコンの精製技術の開発

当初目標通り、高純度シリカ原料の製造、その直接還元によるシリコン製造が場合、本精製プロセスを後段に組み入れることで、太陽電池級シリコンの大量製造は可能と考えられる。また、それぞれのプロセスを切り離して考える必要はなく、還元生成したシリコンを直ちに処理することで合理的なプロセス実現も可能である。また、同じ高純度シリカ原料から今後開発される他のプロセスを経由したシリコンも供給源として期待され、前段で純度と目標プロセスコストを達成し、本精製方法のスケールアップ技術が確立した時点で、事業化は可能となる。



図Ⅲ-2-(イ)-D-2[1] 本技術の事業化のシナリオと波及効果

3. 波及効果

a. 高純度原料の開発

本テーマで開発したシリカ粉末は、シリカを原料とした製品への用途展開が期待できる。例えば窒化珪素及び炭化珪素などのセラミックス部材分野や石英坩堝、光ガラス製品等のガラス製品分野、さらには半導体用治具等の原料といった半導体分野への展開が期待できる。

b. シリカの直接還元技術の開発

現在ホール・エルー法（電気分解）で得られているアルミニウムについても、炭素での還元がかつて検討されており、シリコン還元に通じた課題がネックとなり、実現していない。しかしながら、本開発技術をうまく展開できれば、アルミニウムのような金属精錬分野への技術の波及効果は大きいものと考えられる。

c. シリコンの精製技術の開発

これまで、NEDO法などではPとBをそれぞれ別プロセスでしか除去できなかったが、本精製技術は、PとBの双方が除去できるプロセスとして、純度の低い金属シリコンを出発原料とした精製プロセスへの適用も十分考えられることから、技術の波及効果は大きい。特に、ステンレスをはじめとする高合金鋼や、融液成長で得られる半導体原料の精製処理など、酸化し易い材料からのPの除去において有用な技術であると考えられる。

4. 今後の展開

a. 高純度原料の開発

本プロジェクトの最終目標と達成の見通しを表Ⅲ-2-(イ)-D-4[1]に示す。本テーマの最終目標は、SOG-Siの製造量が10,000t/年を想定した場合に、SOG-Siの価格が2,000円/kg以下で製造できる原料費の見通しをつけることである。このためには、シリカとカーボンを合計した原料費が、SOG-Si 1kg当たり700円以下で実現しなければならない。開発中の製造技術では、目標純度（B及びP）を満足するシリカとカーボンの製造に要する変動費は、シリカ：420円/kg-Si及びカーボン：190円/kg-Siと試算される。このため、今後の課題は、SOG-Siの製造量が10,000t/年に対応できるシリカの量産技術の開発と固定費を含めた目標製造コストの達成であり、その実現のために、スケールアップによるデータの取得と生産効率化技術の開発を検討する。

b. シリカの直接還元技術の開発

シリコン直接還元技術の開発の最終目標は、10,000t/年のSOG-Siの製造量を想定した場合に、2,000円/kg-Si以下でSOG-Siができるよう還元コストを700円/kg-Si以下としなければならない。熱コスト・消耗品コストが重要であり、これらは還元炉のスケールによっても大きく異なる。しかしながら、本工程でコストに影響を与える最も重要な因子は収率であり、700円/kg-Siで製造された非晶質シリカ・炭素の原料を最低でも本工程で700円/kg-Siにする最低ラインは50%以上にすることが必要である。現状、40%程度であるため、これを少なくとも60%以上を目指した反応設計する必要がある。これには、スケールアップしてつぼの長尺化させることによってSiO₂ガスのロスを抑えることができると考えられる。

ただし、電気代、部材費、設備償却費、人件費、輸送費等含めていないため、大量生産によるスケールメリットで目標達成を図る必要がある。

c. シリコンの精製技術の開発

シリコン精製技術の開発の最終目標は、10,000t/年のSOG-Siの製造量を想定した場合に、2,000円/kg-Si以下でSOG-Siができるよう精製コストを600円/kg-Si以下としなければならない。さらに、シリコン製造工程までに1400円/kg-Siが実現したとしても、精製プロセスにおける歩留まりを考慮すればロスによる原料コストの上昇分も上乘せして評価する必要がある。現時点では、フラックス等原料費（石灰石、蛍石、金属Ca）110円/kg-Si、酸処理原料費237円/kg-Si、電力料金4円/kg-Siであり、本プロセスのトータルは351円/kg-Siと試算される。さらに、本プロセスでのシリコンのロス約4%による前段プロセスの目標コスト上昇分 $1400\text{円/kg-Si} \times (100/96 - 1) = 58\text{円/kg-Si}$ を上乘せすると409円/kg-Siとなる。ただし、設備償却費、人件費、輸送費等含めていないため、大量生産によるスケールメリットで目標達成を図る必要がある。今後は、大型設備を製造し、スケールアップによる還元脱P処理時間の検討を行うと共に、各エネ

ルギーコストや耐火物など維持経費などが最小にする指針を明確化する。

表Ⅲ-2-(イ)-D-4[1] 最終目標と達成の見通し

個別テーマ名	研究課題	最終目標 (平成26年)	達成の見通し
高純度原料の開発 (太平洋セメント(株))	SOG-Siの想定生産量に対応可能な量産技術の開発と目標製造コストの達成	700円/kg-SOG-Siの原料費の目処付け	基礎製造技術と3.6t年の生産スケールでの製造検証は確立されている。プラント設計用データの取得と生産の効率化を図ることで目標達成が目処付けられる
シリカの直接還元プロセスの開発 (弘前大学)	スケールアップによる収率向上・熱効率向上・純度維持できるシステム設計	「700円/kg-SOG-Siの還元技術の目処付け」	SiCを適度に導入することで、反応プロセスが促進できる見通しはついており、SiO ₂ ガスの逃げを抑制することで、目標達成の実現が高まる。
Si精製プロセスの開発 (東京大学)	スケールアップ時の高効率反応システム設計と設備費・人件費込みの低コスト化の実現	600円/kg-SOG-Siの精製技術の目処付け	前段プロセスによりP濃度<25ppm、B濃度<2ppmの原料Siの安定供給により実現可能である。

本プロジェクトの最終目標は、SOG-Siの製造量が10,000t/年を想定した場合に、SOG-Siの価格が2,000円/kg以下で製造できることである。本プロジェクトの目標達成のために、前述したように、各個別テーマごとの目標価格を、それぞれ高純度原料に係る費用：700円/kg-Si以下、シリカ直接還元に係る費用：700円/kg-Si以下、及びシリコン精製に係る費用：600円/kg-Si以下と暫定的に設定し開発を進めてきた。しかし、本プロジェクトは個別テーマの成果に応じて、適宜組み合わせることが可能であり、その結果、SOG-Siの製造価格を大幅に下げられる可能性がある。例えば、シリカの直接還元技術で、高純度原料の純度を維持したまま、シリカを直接還元することができ、SOG-Siの純度を保つことができれば、最終工程のシリコン精製技術を省略することができるようになり、1400円/kg-Siで製造することが可能となる。

5. 特許論文リスト

本プロジェクトに関係する特許出願、論文及びその他外部発表（プレス発表等）を取りまとめたものを表Ⅲ-2-(イ)-D-5[1]に示す。個別テーマの「高純度原料の開発」においては、ノウハウ的な技術が多いことから、特許出願は1件のみとした。

表Ⅲ-2-(イ)-D-5[1] 知的財産権等の取得及び成果の普及

	H22	H23	H24	計
特許出願(うち外国出願)	0(0)	1(0)	0(0)	1件
論文(査読)	0(0)	0(0)	0(0)	0件
研究発表・講演(うち国際会議)	1(0)	2(0)	3(0)	6件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0件
受賞実績	0	0	0	0件
展示会への出典	0	0	0	0件

ノウハウ流出を防止するため、戦略的に特許出願は控えている。

特許リスト及びその他外部発表リストを表Ⅲ-2-(イ)-D-5[2]および表Ⅲ-2-(イ)-D-5[3]に示す。「高純度原料の開発」については、前項で記載したように、ノウハウ的技術が多々あるため、発表等を控えた。

表Ⅲ-2-(イ)-D-5[2] 本プロジェクトの特許リスト

番号	出願人	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名称	発明者
1	太平洋セメント(株)	特願2012-108989	国内	2012/5/11	出願	非晶質シリカの洗浄方法	増田賢太他

表Ⅲ-2-(イ)-D-5[3] 本プロジェクトの外部発表リスト

年月日	発表媒体・内容	発表者
平成24年8月1-4日	The 8th International Forum on Advanced Material Science and Technology, H.Kawamura, Y.Yanaba, T.Yoshikawa and K.Morita, "Reductive removal of phosphorus in silicon using CaO-CaF2 slag"	東京大学
平成25年3月28-30日	日本金属学会2012年春期(第150回)大会, 河村浩彰、築場豊、吉川健、森田一樹, 「CaO-CaF2スラグを用いたシリコンの還元脱リン」(12月申込み予定)	東京大学
平成23年3月24日	緊急シンポジウム:新エネルギー供給の未来を考える —ソーラーシリコンの生産技術革新とサハラスーパーエネルギー戦略 伊高 健治、古屋泰文、鯉沼秀臣 「シリカ直接還元 ー低コストシリコン製造に向けてー」	弘前大学
平成23年8月23-26日	1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum, Nagoya, Japan H.Sato, Y.Furuya, K.Itaka, M. Kamimoto, "Strategy For Beyond SIEMENS SOG-Si Process"	弘前大学
平成23年8月23-26日	1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum, Nagoya, Japan K. Itaka, H.Sato, Y.Furuya, M. Kamimoto, "Combinatorial Reducing Furnace For Direct Production Process from Silica to Silicon"	弘前大学
平成24年5月15-16日	2nd Asia-Arab Sustainable Energy Forum, in Algeria, Kenji Itaka, "Metallurgical reduction process for solar grade silicon by combinatorial furnace"	弘前大学

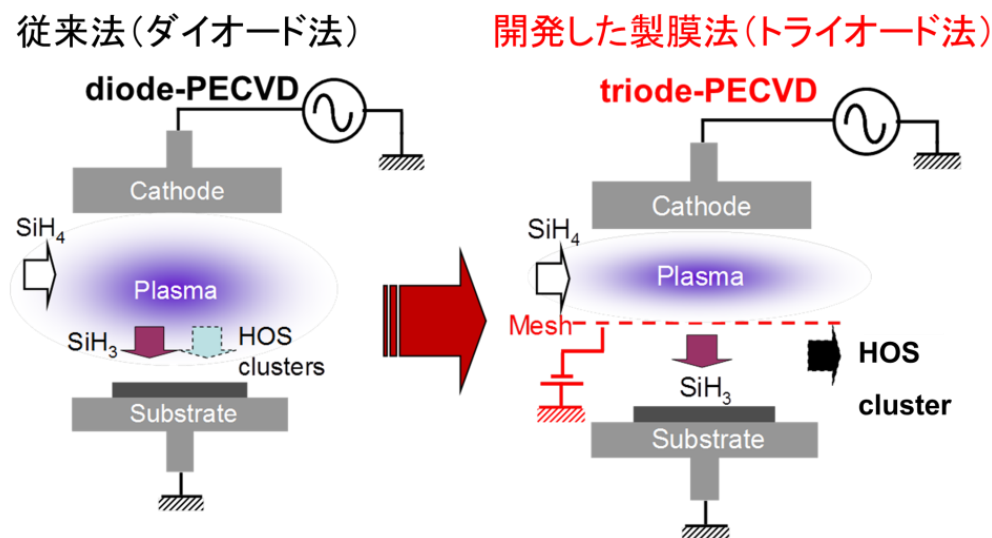
(ロ) 薄膜シリコン太陽電池

A 次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による開発（高効率化）

1. 成果詳細

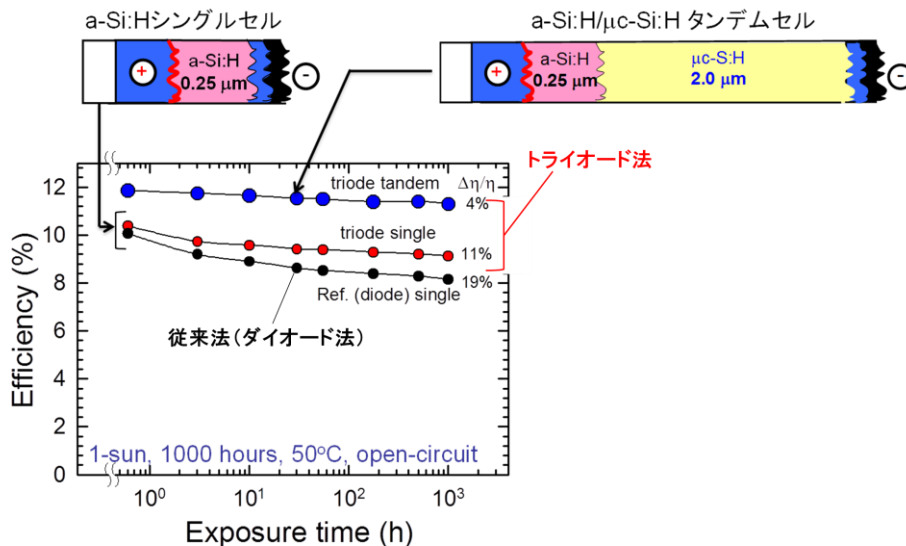
a-1. アモルファスシリコン太陽電池の高電流・高安定化技術開発（担当：独立行政法人産業技術総合研究所）

光劣化の少ない a-Si:H の製膜技術として、独自に開発してきたトライオード型プラズマ CVD 法（三極放電：図Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a1(1)）を適用した。これにより、光劣化の要因として考えられる高次シラン系ラジカルの膜への取り込みを抑制することができる^{Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a（1,2）}。この製膜技術を用いて a-Si:H 単接合太陽電池や a-Si:H/ μ c-Si:H タンデム型太陽電池の a-Si:H 光吸収層を作製し、その光照射安定性を評価した。



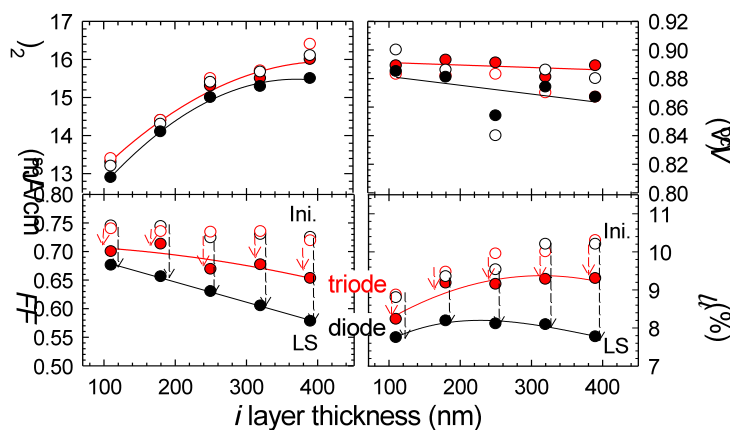
図Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a1(1) 一般的なダイオード型プラズマ CVD 法（左）と独自に開発したトライオード型プラズマ CVD 法（右）の概念図。

図Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a1(2)は、a-Si:H i 層膜厚 250 nm の単接合およびタンデム型太陽電池の光照射時における変換効率の時間推移をプロットしたものである。トライオード法で作製した単接合セルは約 200 時間後に変換効率は安定化し、1000 時間の光照射後の光劣化率は 11%であった。一方、ダイオード法で作製した太陽電池（リファレンス）はより大きな光劣化特性を示し、1000 時間後の劣化率は 19%であった。



図III-2- (ロ) -A-1-a1(2) ダイオード型プラズマ CVD 法およびトライオード型プラズマ CVD 法を用いて作製した太陽電池の変換効率の光照射時間依存性。

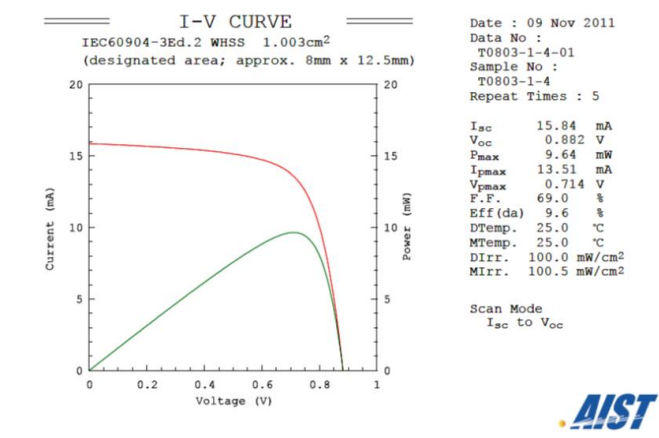
図III-2- (ロ) -A-1-a1(3)は異なる製膜手法で作製した単接合セルにおける発電特性の i 層膜厚依存性について示している。初期特性は製膜手法によらず同じ特性を示しているが、光照射後においては、両者の差が i 層膜厚の増加とともに顕著になっている。特にリファレンスの太陽電池では光劣化後の曲線因子 (FF) が膜厚増加とともに単調に低下するのに対して、トライオードプラズマ CVD で作製した太陽電池では FF の劣化が小さく、200-400 nm の膜厚範囲で 9%以上の安定化効率が得られた。



図III-2-(ロ)-A-1-a1(3) ダイオード型プラズマ CVD 法とトライオード型プラズマ CVD 法を用いて作製した単接合セルにおける太陽電池特性 (初期(ini)、劣化後 (LS)) の膜厚依存性。

トライオード型プラズマ CVD 法を用いて作製した a-Si:H 太陽電池の最適化を行った結果、安定化効率 9.6%を得た。図III-2- (ロ) -A-1-a1 (4)に AIST 評価・標準チームで測定した I-V 特性を示す。この太陽電池の安定化効率はこれまでに報告された最高効率(10.1%) III-2- (ロ) -A-1-a1 (3)の a-Si:H 太陽電池とほぼ同等の性能であるが、光劣化率は約 5%低いことがわかった。さらに、この a-Si:H をトップセルとした a-Si:H (250 nm)/ μ c-Si:H (2 μ m)タ

ンデム型太陽電池を作製した結果、光安定性はさらに改善され、光劣化率を4%まで抑制することができた。これまでに a-Si:H (350 nm)/ μ c-Si:H (3 μ m) タンデム型太陽電池で、安定化効率 11.6% (J_{sc} =12.6 mA/cm², V_{oc} =1.345 V, FF=0.687, ガラス面 AR 膜あり) を得ている。



図Ⅲ-2- (ロ) -A-1-a1 (4) 光劣化後の a-Si:H (250 nm)単接合太陽電池の電流電圧特性

参考文献

- Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a1 (1) : A. Matsuda, T. Kaga, H. Tanaka, and K. Tanaka, J. Non-Cryst. Solids 59-60 (1983) 687.
- Ⅲ-2- (ロ) -A-1-a1 (2) : S. Shimizu, M. Kondo, and A. Matsuda, J. Appl. Phys. 97 (2005) 033522.
- Ⅲ-2- (ロ) -A-1-a1 (3) : S. Benagli et al., Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conf., 2009, p. 21.

a-2. 高効率アモルファスシリコンによるトップセル高効率化 (三菱重工株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所)

水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)の光劣化には、膜中のSi-H₂結合が影響していることが広く知られている。このSi-H₂結合はSiH₄プラズマ中のシリコンナノ粒子が起源と考えられている(文献Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a2(1)及び(2))。本研究開発項目では、シリコンナノ粒子の発生を抑制する新規構造電極の開発とシリコンナノ粒子計測技術を活用した成膜条件の適正化により、30×40cm²以上の製膜プロセスを用いて作製したa-Si:H単接合太陽電池において短絡電流16mA/cm²と、劣化率5%以下の実現を目標としている。

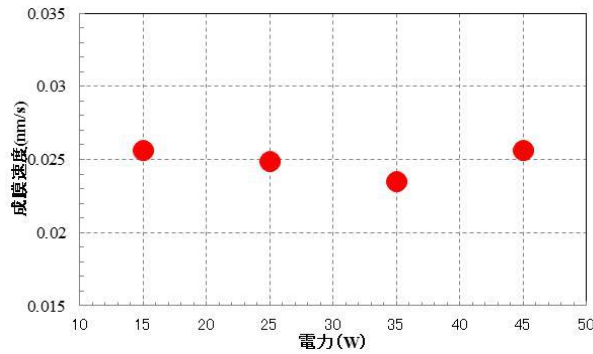
始めにシリコンナノ粒子量と劣化率との関係の把握するため、共同研究先である九州大学のシリコンナノ粒子計測技術を活用してシリコンナノ粒子計測モニタを製作し、小面積プラズマCVD装置に設置した。小面積プラズマCVD装置の電極構造には、シリコンナノ粒子計測モニタ設置によるプラズマへの影響が小さく、かつ低光劣化a-Si:H太陽電池作製の報告実績があるトライオード型電極構造を用いた(文献Ⅲ-2-(ロ)

-A-1-a2(3))。表Ⅲ-2-(ロ) -A-1-a2(1)に主な試験条件を示す。また、図Ⅲ-2-(ロ) -A-1-a2(1)にa-Si:H成膜速度のSiH₄プラズマ放電電力依存を示す。本試験ではトライオード電極構造のためか、放電電力を増加しても成膜速度はほとんど変わらない結果となっている。図Ⅲ-2-(ロ) -A-1-a2(2)にシリコンナノ粒子量体積分率のSiH₄プラズマ放電電力依存を示す。縦軸はa-Si:H膜中に取り込まれるシリコンナノ粒子量体積分率を表している。各数値は電力25Wでのシリコンナノ粒子量体積分率で規格化している。放電電力を増加させるとシリコンナノ粒子量体積分率が増加する結果となっている。このように、SiH₄プラズマの放電条件の変化が、a-Si:H膜中に取り込まれるシリコンナノ粒子量に影響を及ぼすことが確認できた。次に、図Ⅲ-2-(ロ) -A-1-a2(3)にa-Si:H単接合太陽電池の劣化率のシリコンナノ粒子量体積分率依存を示す。横軸は図Ⅲ-2-(ロ) -A-1-a2(2)と同様に、電力25Wでのシリコンナノ粒子量体積分率で規格化している。また、縦軸の劣化率は、光照射強度：AM1.5、300mW/cm²、基板温度：60℃、照射時間：6時間の加速劣化条件での簡易計測結果である。a-Si:H膜中に取り込まれるシリコンナノ粒子量が低下すると劣化率も低下することが確認できた。このように、ナノ粒子計測モニタでのa-Si:H膜中への取り込み量の観測が、a-Si:H太陽電池の劣化率改善に適用できることを確認できた。

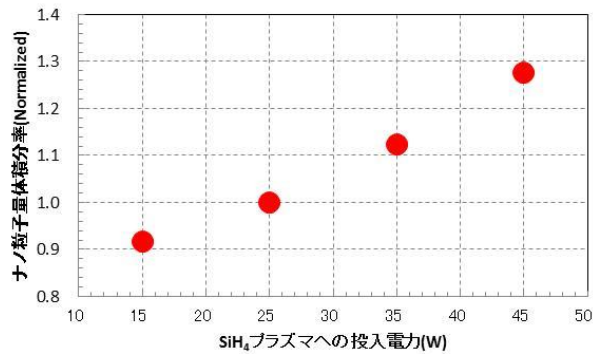
上記ナノ粒子計測モニタの開発と並行して、30×40cm²基板成膜用プラズマCVD装置の電極ユニットを設計・製作した。公知の発電層成膜技術と比較した本電極・成膜ユニットの特長は以下の通りである。①大面積成膜用電極に展開可能とするため、トライオード型電極構造の第3電極に適用されているメッシュなど強度のない構造物を用いない。②プラズマ内のガス滞留時間を最小化するため、ガス導入を工夫するとともに電極を介してその背面から排気する。この構成により、従来と比較してより高い安定化発電効率を達成できる見込みである。a-Si:Hの成膜条件の適正化には、小面積プラズマCVD装置と同様にシリコンナノ粒子計測モニタを使用し、小面積プラズマCVD装置で蓄積したシリコンナノ粒子量に関するデータを30×40cm²装置に展開することでa-Si:H単接合太陽電池の劣化率低減を実現する。また、Ⅲ-2-(ロ) -A-1-a8.の「デバイス高効率化に向けた新規光閉じ込め技術の開発」で開発した光閉じ込め技術を適用することで、短絡電流16mA/cm²かつ劣化率5%以下のa-Si:H単接合太陽電池を実現する。

表Ⅲ-2-(ロ) -A-1-a2(1) SiH₄プラズマ放電

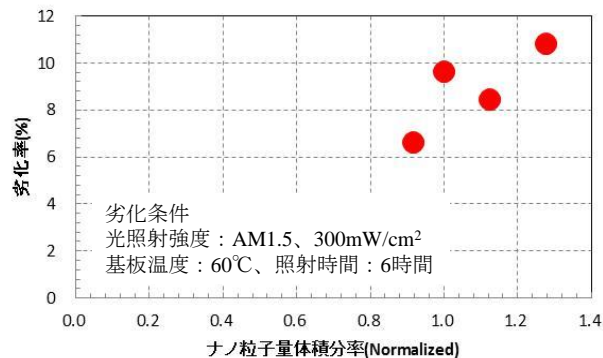
ガス流量 (sccm)	SiH ₄	25
	H ₂	25
圧力	(Torr)	0.10
電源周波数	(MHz)	60
間隔(mm)	メッシュ -カソード	26.5
	成膜表面 -メッシュ	12



図Ⅲ-2- (口) -A-1-a2 (1) a-Si:H 膜成膜速度の電力依存



図Ⅲ-2- (口) -A-1-a2 (2) シリコンナノ粒子量体積分率の電力依存



図Ⅲ-2- (口) -A-1-a2 (3) a-Si:H 単接合太陽電池の劣化率のシリコンナノ粒子量体積分率

参考文献

Ⅲ-2- (口) -A-1-a2 (1) :T. Nishimoto, M. Takai, H. Miyahara, M. Kondo, and A. Matsuda, “Amorphous silicon solar cells deposited at high growth rate”, J. Non-Crys. Solids. vol. 299, 1116 (2002).

Ⅲ-2- (口) -A-1-a2 (2) :M. Shiratani, K. Koga, N. Kaguchi, K. Bando, and Y. Watanabe, “Species responsible for Si-H₂ bond formation in a-Si:H films deposited using silane high frequency discharges”, Thin Solid Films, vol. 506, 17 (2006).

Ⅲ-2- (口) -A-1-a2 (3) :S. Shimizu, M. Kondo, and A. Matsuda, “A highly stabilized hydrogenated amorphous silicon film having very low hydrogen concentration and an improved Si bond network”, J. Appl. Phys. vol. 97, 033522 (2005).

a-3. ナノ粒子制御によるアモルファスシリコンセルの高光安定化に関する研究（国立大学法人九州大学 白谷研究室）

本研究開発では、シランプラズマ中のナノ粒子計測技術と膜中ナノ粒子の抑制技術により、高光安定な a-Si セルの実現に結びつける研究開発を行い、小面積セルで劣化率 5%以下の a-Si:H 太陽電池を実現する。

開発項目(1)P層、N層の単膜でのナノ粒子取り込み量と膜の光安定性に及ぼす影響の解明
マルチホロー放電プラズマ CVD を用い、膜中へのナノ粒子の取り込みを抑制した P 層および N 層を作製し、単膜での光安定性の評価を実施した。ナノ粒子の取り込みを抑制した P 層および N 層は良い光安定性を示すことを明らかにした。

開発項目(2)TCO を含めた複数層膜、及びその界面の光安定性に対するナノ粒子取り込みが及ぼす影響の解明

界面近傍のナノ粒子取り込みの影響を評価するため、プラズマ ON, OFF に伴うナノ粒子取り込みと、ショットキーセルの曲線因子 FF の光劣化との関係を調べた。図 III-2- (ロ) -A-1-a3 (1) にショットキーセルの I-V 特性を示す。(a) は I 層成膜初期の界面にナノ粒子が取り込まれたセル、(b) は界面近傍のナノ粒子取り込みの無いセル、(c) は I 層成膜終了時の界面にナノ粒子が取り込まれたセルの I-V 特性である。図 III-2- (ロ) -A-1-a3 (2) に

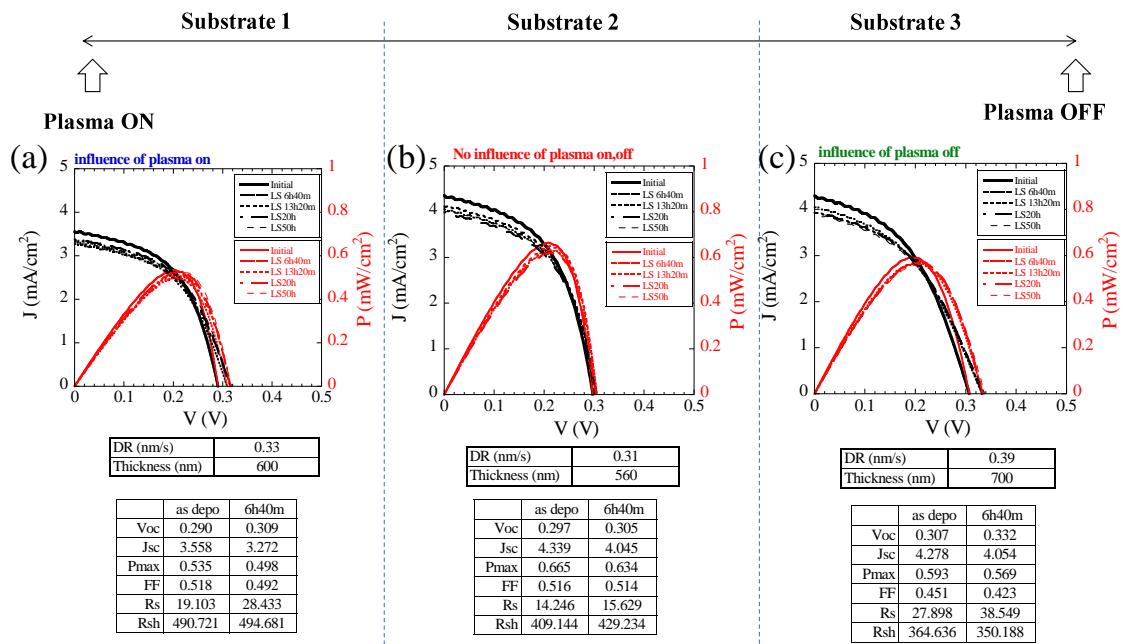
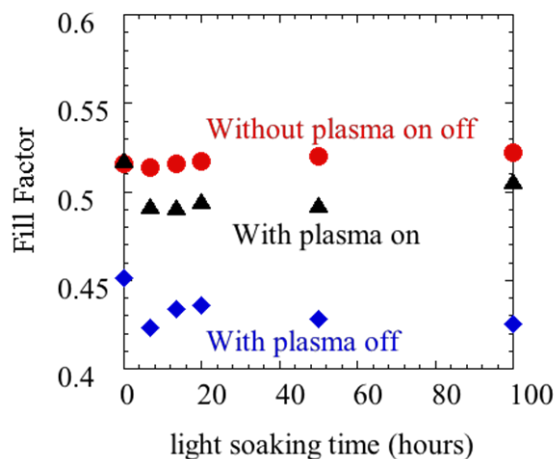


図 III-2- (ロ) -A-1-a3 (1) ショットキーセル I-V 特性。(a) I 層成膜初期の界面にナノ粒子が取り込まれたセル、(b) 界面近傍のナノ粒子取り込みの無いセル、(c) I 層成膜終了時の界面にナノ粒子が取り込まれたセル。

これらのセルの FF の照射時間依存性を示す。界面近傍のナノ粒子取り込みの無いセル（赤丸）において、ショットキーセルの初期 FF=0.516、劣化率 1%以下を実現した。以上のように、プラズマ ON, OFF に伴う I 層上下の 2 つの界面近傍のナノ粒子取り込みを抑制することが光安定性の改善に重要であることを初めて明らかにした。



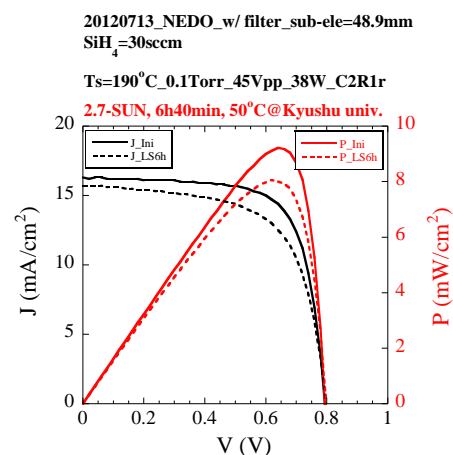
図III-2- (口) -A-1-a3 (2) ショットキーセルの FF の照射時間依存性。(黒三角)I 層成膜初期の界面にナノ粒子が取り込まれたセル、(赤丸)界面近傍のナノ粒子取り込みの無いセル、(青菱形)I 層成膜終了時の界面にナノ粒子が取り込まれたセル。界面近傍のナノ粒子取り込みの無いセル（赤丸）で光劣化率 1%未満を達成。

開発項目 (3) PIN セルの光安定性を高める方法の開発

クラスター除去フィルター設置でナノ粒子取り込みを抑制することにより光劣化率 1.95%の a-Si:H 膜ショットキーセルの作製に成功した。クラスター除去フィルターを成膜基板前面に設置することにより、劣化率が未設置の 9.09%から設置後の 1.95%へと大きく改善した。

開発項目 (2) での結果と上記の結果より、劣化率改善には、I 層へのナノ粒子取り込み抑制が重要であること、特に界面近傍のナノ粒子の取り込み抑制にも注意を払う必要があることが明らかになった。

マルチホロー放電プラズマ CVD を用い a-Si:H 膜 I 層を堆積し、PIN 太陽電池を試作した。マルチホロー放電中で成長したナノサイズのクラスターを、そのガス流により下流側へと搬送し、ナノ粒子の膜中への取込を低減している。図III-2- (口) -A-1-a3 (3) に PIN セルの I-V 特性を示す。初期効率 9.19%、劣化率 12.6%と中間目標には達していない。ショットキーセル作製装置に比べて PIN セル作製に用いている装置でのナノ粒子の膜中への取り込み抑制が不十分であることが問題点である。抑制効率を飛躍的に高める方法を現在、開発中である。



図III-2- (口) -A-1-a3 (3) PIN セルの I-V 特性

a-4. 微結晶シリコンゲルマニウムを用いたボトムセル高電流化技術開発(独立行政法人産業技術総合研究所)

微結晶 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ ($\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$) は Si/Ge 組成比により赤外感度領域を制御できることから、多接合型太陽電池のボトムセル材料への応用が期待できる。しかし、我々はこれまでに、Ge の添加にともなって発生するアクセプター準位が太陽電池特性を低下させる要因となっていることを見出した^{III-2-(ロ)-A-1-a4 (1)}。そこで、本研究では $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ に存在するアクセプター準位を補償することを目的に酸素を用いたカウンタードーピングを試みた。

作製した太陽電池の構造は単接合 p-i-n 型で、i 層の Ge 濃度を 10-30% の範囲とし、i 層に添加する酸素源としては CO_2 ガスを用いた。図 III-2-(ロ)-A-1-a4 (1) は Ge 濃度および膜厚が異なる $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ 太陽電池の量子効率スペクトルで、i 層製膜時における CO_2 ガス濃度依存性について示している。Ge 濃度が 30 at. %、膜厚 $1\ \mu\text{m}$ の太陽電池の場合、原料ガス総流量に対する CO_2 ガスの流量比を $C_{\text{CO}_2}=2.4\%$ としたときに全波長領域で量子効率の改善が確認された。また、i 層の Ge 濃度が 10 at. % と低い場合においても膜厚が厚い ($3.4\ \mu\text{m}$) 太陽電池では、 CO_2 の添加効果 ($C_{\text{CO}_2}=0.3\%$) として短波長領域の量子効率の改善が得られる。その結果、短絡電流密度は約 $5\ \text{mA}/\text{cm}^2$ 増加し、 $-1\ \text{V}$ のバイアス印加時では $29\ \text{mA}/\text{cm}^2$ の光電流密度を確認した。一方、過度の CO_2 添加は長波長感度の低下をもたらすことがわかった。これらのことより、添加した酸素は Ge 欠陥に起因するアクセプター準位を補償するドナーとして働くことが明らかとなり、 $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ 太陽電池の特性改善に有効であることが示された。

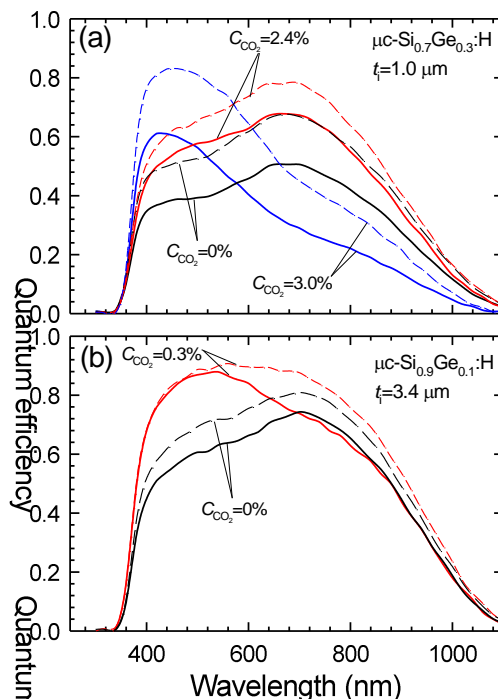


図 III-2-(ロ)-A-1-a4 (1) CO_2 ガスを用いて i 層に酸素を添加した $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ 単接合 p-i-n 型太陽電池の量子効率スペクトル [(a) $x=0.3$, $t_i=1.0\ \mu\text{m}$ 、(b) $x=0.1$, $t_i=3.4\ \mu\text{m}$]。実線および点線はそれぞれ $0\ \text{V}$ と $-1\ \text{V}$ のバイアス電圧を印加したときのスペクトルを表す。

Ge 濃度 10 at. %、i 層膜厚 3.4 μm の単接合 p-i-n 型 $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ 太陽電池において、i 層中にドーブした酸素濃度と太陽電池特性の関係を調べた結果 (表 III-2-(口)-A-1-a4 (1))、 $\sim 7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の酸素添加で短絡電流密度は最大値 27.5 mA/cm^2 を示し、酸素添加のないセルに比べて約 5 mA/cm^2 の改善が得られた。

表 III-2-(口)-A-1-a4 (1) i 層に添加した酸素濃度と $\mu\text{c-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ 単接合 p-i-n 型太陽電池 [$x=0.1$, $t_i=3.4 \mu\text{m}$] の電流電圧特性との関係。

0 content (cm^{-3})	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF	efficiency (%)
3.0×10^{17}	22.7	449	0.576	5.86
3.6×10^{18}	27.0	439	0.511	6.06
7.3×10^{18}	27.5	451	0.504	6.24
1.1×10^{19}	26.5	454	0.527	6.35

参考文献

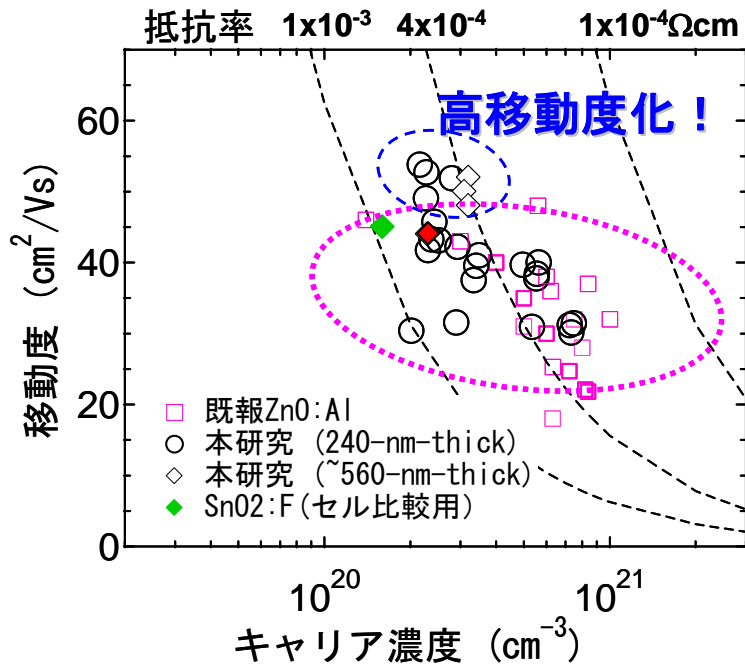
III-2-2-(口)-A-1-a4 (1): T. Matsui, C.W. Chang, M. Kondo, K. Ogata, and M. Isomura, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 102111.

a-5. 高性能・低コスト透明電極材料の開発 (担当: 独立行政法人産業技術総合研究所)

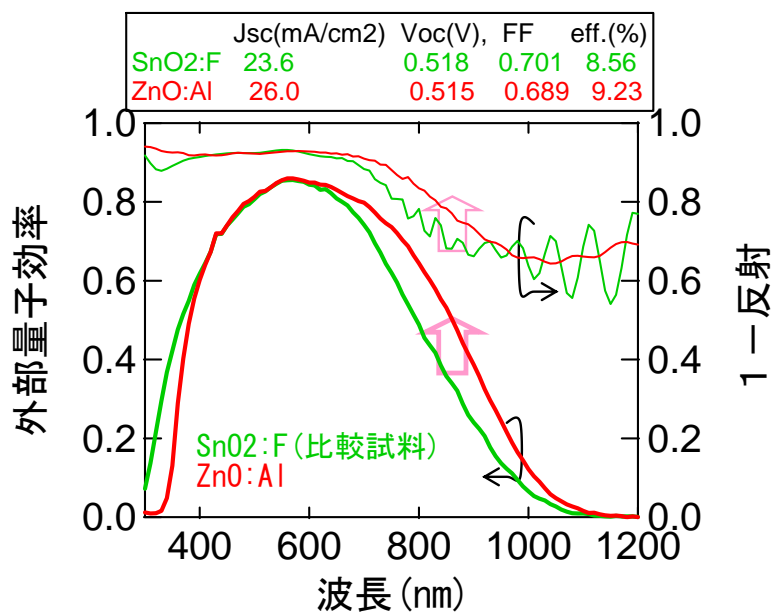
可視・近赤外域において透明かつ光閉じ込め効果の高い、高導電性 ZnO 薄膜の開発を目的に、スパッタ法による ZnO:Al および MOCVD 法による ZnO:B 薄膜を検討している。具体的には、縮退した ZnO 半導体薄膜において、アクセプター型欠陥とキャリア濃度 (ドナー濃度-アクセプタ濃度) を同時に減らすことで移動度を向上させ、高導電性を維持した状態で欠陥および自由キャリアに起因する吸収を減少させた薄膜を形成させる。

これまで、Al 濃度に応じた薄膜作製条件の最適化を行うことにより、結晶性およびキャリアの活性化率を向上させ、その結果、図 III-2-(口)-A-1-a5 (1) にしめすように、膜厚 240nm では移動度 $30\text{--}40 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、膜厚約 560nm では移動度 $50 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 程度の ZnO:Al 薄膜を形成できることを確認した。これまで報告されている ZnO:Al 薄膜のなかでも高い性能を示している。また、酸素分圧を制御した環境下でのポストアニール処理により、膜厚 240nm の ZnO:Al 薄膜の移動度を $50\text{--}60 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 程度まで向上 (図中の青の点線で囲った領域) できることを見出した。一方、膜厚約 700nm の ZnO:Al 薄膜を希塩酸でエッチングすることによりテクスチャー化させた ZnO:Al 薄膜 (図中の桃色の菱形) 上に $\mu\text{c-Si:H}$ (i 層厚 $2 \mu\text{m}$) シングルセルを作製したところ、比較試料として用いた $\text{SnO}_2\text{:F}$ 基板 (図中の緑色の菱形) と比べ、セル特性は大幅に向上することを確認した。図 III-2-(口)-A-1-a5 (2) に示すように、長波長域 (波長 800–1100nm) の分光感度 80% 増加、短絡電流密度 10% 増加をしている。なお、本セルに用いた ZnO:Al 薄膜は前述のポスト処理は行っていない。一方、ZnO:B

薄膜に関しては、MOCVD 装置の設計・開発を行い、既報と同等のテクスチャー構造と電気特性（抵抗率： $1.4 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ 、キャリア濃度： $1.3 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 、移動度： $37 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）を示す薄膜の作製を確認している。今後、ZnO:Al 薄膜と同様に、欠陥制御による透明導電膜の高性能化、セルでの効果の実証を図る。



図Ⅲ-2- (口) -A-1-a5 (1) 本研究と一般的な ZnO:Al 薄膜との特性比較



図Ⅲ-2- (口) -A-1-a5 (2) $\mu \text{c-Si:H}$ シングルセル (i 層厚： $2 \mu \text{m}$) のセル特性と分光感度特性

a-6. 表面凹凸構造制御・高ヘイズZnO透明導電膜を用いた高効率アモルファスシリコン太陽電池の研究開発（国立大学法人東京工業大学 小長井研究室）

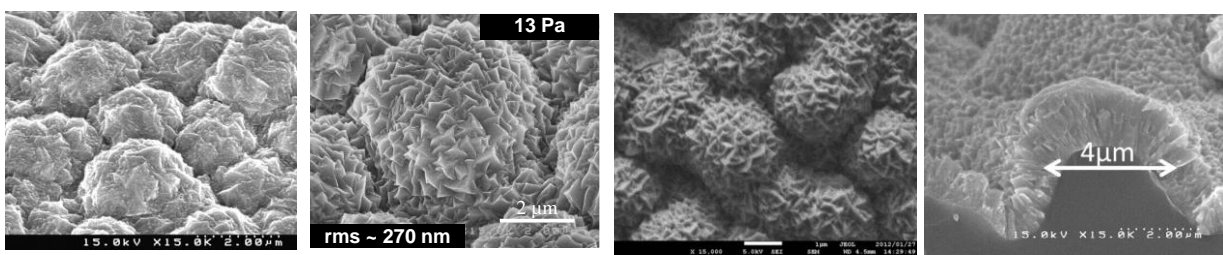
a) 表面凹凸構造制御・高ヘイズZnO透明導電膜の開発（高ヘイズZnO）

平成26年度までに、アモルファスSiシングル接合太陽電池で12%の安定化効率を得ることを目的として、表面凹凸形状が制御されたZnO透明導電膜を用いたセル開発を行っている。アモルファスSiシングル接合太陽電池で光劣化率を減少させるには、i層を200nm程度まで薄くし、内部電界を強くする必要がある。i層を薄くすると、光劣化の原因となるi層内部での再結合減少するとともに、光誘起欠陥がセル特性に与える影響が小さくなる。一方、i層を薄くすると光の吸収量が減少するため、より有効な光閉じ込め構造の開発が必要不可欠である。

本研究では、まずガラス基板をRIE（反応性イオンエッチング）でエッチングすると表面にミクロンサイズの凹凸が形成され、その上にMOCVD（有機金属気相成長法）によりZnO透明導電膜を形成すると、非常にヘイズ率が高いダブルテクスチャーZnOが形成されることを世界に先駆けて見出した。

まず、Corning7059ガラス、Corning Eagleガラス、青板ガラス、白板ガラスをRIEエッチングし、その上にMOCVD法によりZnOを製膜したところ、各ガラス基板ごとにエッチング条件が異なるものの、いずれの基板でも超高ヘイズのダブルテクスチャー透明導電膜の形成に成功した。波長1 μ mでも90%を超すヘイズ率が得られている。これほど高いヘイズ率を得たのは、本研究が世界初である。

図III-2-(ロ)-A-1-a6(1)は、各種ガラス基板を凹凸加工した後、MOCVD法にて形成したZnOの表面SEM（走査型電子顕微鏡）観察の結果である。いずれの場合も、きれいなダブルテクスチャーになっている。どの基板でも大きなヘイズ率を得ているが、ガラスの価格と透過率の両面から判断して、今後は白板でいっそうの条件の最適化を図っていく必要がある。



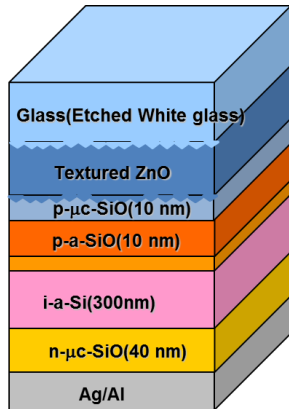
(a) Corning 7059 (b) 青板ガラス (c) Corning Eagle (d) 白板ガラス

図III-2-(ロ)-A-1-a6(1) 種々のガラス基板上に形成したダブルテクスチャーZnO透明導電膜

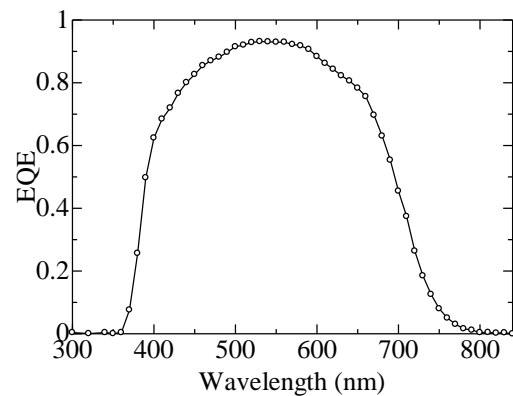
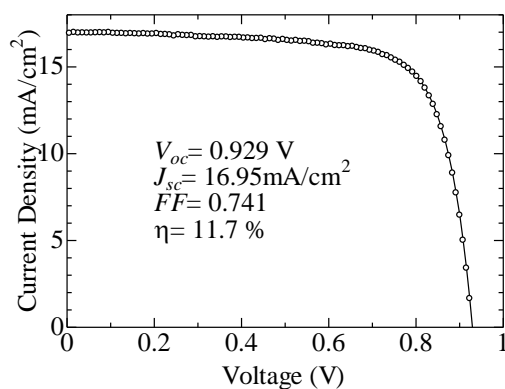
ついで、これらのTCO基板を用いてアモルファスSiシングル接合型太陽電池を作製した。セル構造は、図III-2-(ロ)-A-1-a6(2)に示す。ダブルテクスチャー基板では、深い溝の部分で漏れ電流が発生しやすくなる。そこで、本研究では、製膜後にRIE処理を行った。RIE処理により大幅に漏れ電流が減少し、これまでに初期効率11.7%を

得ることに成功した。また、i層の厚さが300nmのセルで、短絡電流密度17mA/cm²が得られ、平成24年度の中標を達成した。さらに、初期的ながら安定化効率の測定をおこなったところ、9.6%を達成した（i層の厚さ300nm）。

図Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a6（3）、図Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a6（4）は、それぞれ標準状態での太陽電池特性、ならびに収集効率スペクトルを示している。ダブルテクスチャー構造の採用により、非常に有効な光閉じ込め効果が得られ、波長 600nm～700nm の範囲でも高い収集効率を示しているのが特徴である。



図Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a6(2) 白板ガラス上に形成したダブルテクスチャーZnOを用いたa-Siセル構造（p, n層ともにSiO系）



図Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a6（3）a-Si シングル接合太陽電池の 図Ⅲ-2-（ロ）-A-1-a6（4）同収集効率スペクトル特性。

(b) ワイドギャップ p 層の研究開発

禁制帯幅が2.2eVの微結晶p型3C-SiCを用いたアモルファスSi太陽電池を開発することを目的に、TCO開発、TCO/p界面制御を行っている。これまでに、p型窓層として適用可能な導電率を有する微結晶p型3C-SiCの製膜技術は確立されたが、p-nc-3C-SiC/i-a-Si/n-a-Siセルを作製したところ、開放電圧がまだ0.6V程度と低い。これはp層製膜時の水素ラジカルによる還元のためであり、引き続き界面の改善を試みている。

a-7. スパッタ法による低コスト高性能TCOの開発（学校法人金沢工業大学 宮田研究室）

変換効率向上を目的として、薄膜シリコン太陽電池用透明電極に最適な表面テクスチャー構造を有するZnO系透明導電膜を開発する。具体的には、本研究で提案する①成膜技術、②加工技術及び③材料技術を使用して、高品質なZnO系透明導電膜を実現すると共に光閉じ込め機能の高度化を図る。

1. 高効率化

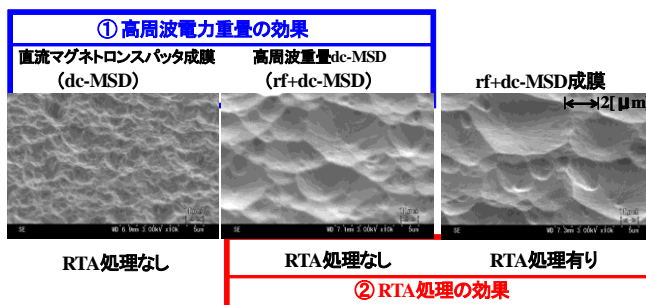
①成膜技術では、直流マグネトロンスパッタ成膜(dc-MSD)に高周波電力を重畳する成膜(rf+dc-MSD)技術を開発することにより、c軸配向性に優れたZnO系透明導電膜を実現した。その結果の一例として、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(1)中の「①高周波重畳の効果」に示したように、rf+dc-MSDにより作製したAl添加ZnO(AZO)膜を湿式エッチング加工して得られた表面テクスチャー構造は、dc-MSDで作製した場合と比較して大きなエッチピット径を実現している。dc-MSDではエッチピット径の大きさが1 μ m以下であったが、rf+dc-MSDでは最大3 μ m程度まで大きさが分布したエッチピットを実現できた。また、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(2)に示したように、ヘイズ率スペクトルも大きく改善された。②加工技術では、成膜後のZnO系透明導電膜に対するラピッドサーマルアニーリング(RTA)処理技術を開発することにより、エッチピット径の増大を実現できた。その結果の一例として、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(1)中の「②RTA処理の効果」に示したように、rf+dc-MSDで作製したAZO膜をエッチング処理前にRTA処理(空气中で、500 $^{\circ}$ Cで5分間)して作製した表面テクスチャー構造は、RTA処理無しの場合と比較して大きなエッチピット径を実現している。また、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(2)に示したように、RTA処理を施したAZO膜ではヘイズ率がさらに改善し、可視から波長1200[nm]付近までの広い波長域で約80[%]以上の高ヘイズ率を達成できた。ここには示していないが、RTA処理を施したAZO膜においては、処理後に膜中のキャリア密度が減少したことにより、長波長域の透過率の大幅な改善を実現できた。③材料技術では、薄膜シリコン太陽電池の透明電極としての適合性を明らかにするために、不純物の種類及び含有量の異なるZnO系透明導電膜を作製し、表面テクスチャー構造形成に対する添加不純物の影響を明らかにした。ZnO系透明導電膜の得られる膜特性は使用する成膜技術や成膜条件に依存するため、不純物の種類の影響についてはパルスレーザー蒸着(PLD)法を用いてAZO、B添加ZnO(BZO)及びGa添加ZnO(GZO)透明導電膜を作製した。図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(3)にPLD法を用いて同一条件下で成膜後、湿式エッチングにより形成したAZO、GZO及びBZO膜の表面テクスチャー構造を示す。同図に示すようにGZO、BZOそしてAZO膜の順に大きなエッチピット径が形成されている。ここでは示していないが、近赤外域でのヘイズ率はBZO、AZO、GZOの順で高かった。一方、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(4)に示すように、これらの膜の抵抗率はほぼ同じで、電気伝導機構が全てイオン化不純物散乱に支配されていると考えられる。すなわち、AZOやGZO膜においても膜中のそれぞれのAl及びGa含有量を低減すれば、BZO膜と同様に低いキャリア密度と高い移動度を実現できることが示唆される。したがって、AZOやGZO膜の近赤外域での低いヘイズ率は、これらの膜の高い不純物含有量(キャリア密度)に起因する低い透過

率が主因である。また、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(5)に示すように、BZO膜の耐湿安定性はAZO及びGZO膜と比較してやや低かったが、これも主として膜中の不純物含有量の違いによると考えられる。膜中の不純物含有量の最適化について検討した一例として、図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(6)にrf+dc-MSD法で作製したGZO膜の表面テクスチャー構造のGa含有量依存性を示す。同図に示すように、膜の表面テクスチャー構造は膜中のGa含有量に依存し、約2[at. %]の含有量において比較的大きなエッチビットが形成できた。また、ここには示していないが、RTA処理を施した膜においては不純物の種類に関わらず耐湿安定性が改善されることがわかった。したがって、上述の①～③の技術を併用することにより、いずれの不純物を使用しても同様の用途適合性を実現できることを明らかにした。

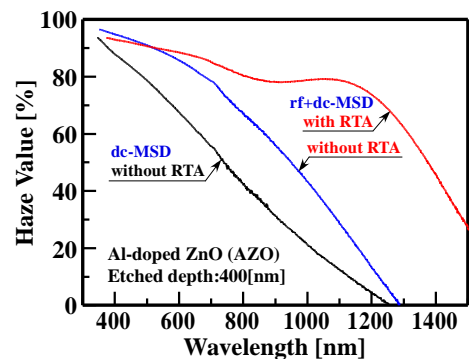
そこで、上記のrf+dc-MSD法により成膜し、大気中、550°Cで5分間RTA処理を施した後に、湿式エッチング法により作製された表面テクスチャー構造を有するAZO膜上に産総研において、 μ c-Si:H pin太陽電池を試作した。表Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(1)に示すように、Asahi-Uガラス上に作製した同様の構造の太陽電池と比較して短絡電流密度を約10%改善でき、中間目標を達成できた。

2. 製造コスト低減

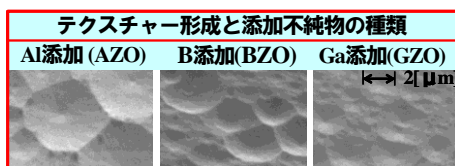
低酸素含有 ZnO 系焼結体ターゲットを採用する高周波重畳直流マグネトロンスパッタ成膜において、約 1.7nm/s の高い成膜レートを実現できた。



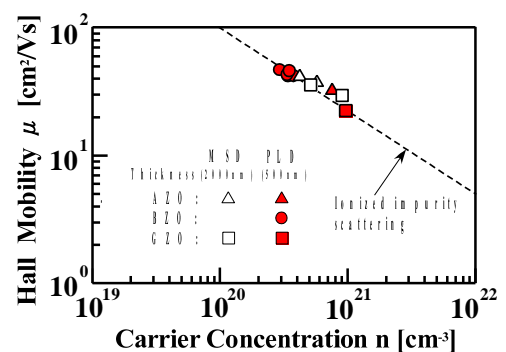
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(1)
AZO 膜の表面テクスチャー構造



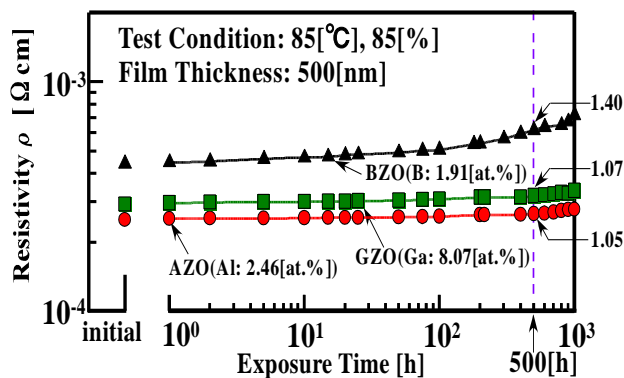
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(2)
AZO 膜のヘイズ率スペクトル



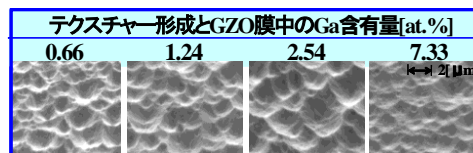
図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(3)
AZO,BZO,GZO 膜の表面テクスチャー構造



図Ⅲ-2-(ロ)-A-1-a7(4)
AZO,BZO 及び GZO 膜の μ -n 関係



図Ⅲ-2- (口) -A-1-a7(5)
AZO,BZOGZO 膜の耐湿安定性



図Ⅲ-2- (口) -A-1-a7(6)
GZO 膜の表面テクスチャー構造の不純物含有量依存性

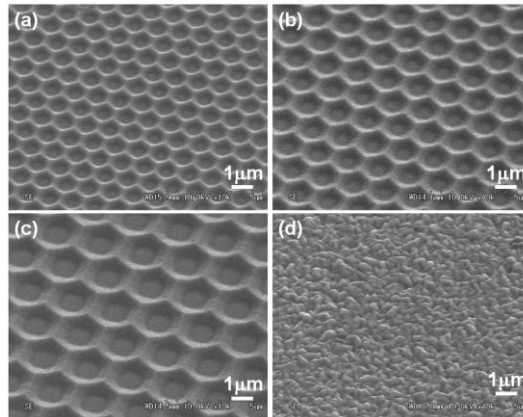
表Ⅲ-2- (口) -A-1-a7(1) 表面テクスチャー構造 AZO 膜上に作製した μ c-Si:H pin 太陽電池特性

	開放端電圧 [V]	短絡電流密度 [mA/cm ²]	曲線因子	効率 [%]
AZO	0.498	25.81	0.652	8.38
Asahi-U	0.497	23.55	0.695	8.14

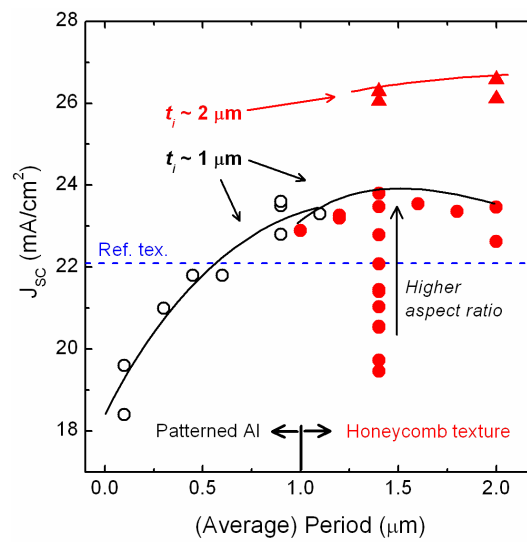
a-8. デバイス高効率化に向けた新規光閉じ込め技術の開発 (担当: 独立行政法人産業技術総合研究所、三菱重工業株式会社)

μ c-Si:H 太陽電池の光閉じ込め効果・光路長増大効果の最大化を目的として、新規ハニカムテクスチャ構造を作製した。低コスト作製プロセス開発も不可欠な開発要素ではあるが、まずは光閉じ込め効果のポテンシャルの見極めを行うために制御性に富むフォトリソグラフィを利用したテクスチャ開発を実施した。また、テクスチャ構造と太陽電池特性の相関をより明確化するためにランダム性を排した周期構造を用いることとした。なお、周期構造を用いてもランダム構造と遜色ない発電特性が得られることは理論的・実験的に確認されている (文献Ⅲ-2- (口) -A-1-a8(1) 及び(2))。各種条件を適正化し、図Ⅲ-2- (口) -A-1-a8(1) に示すような種々のテクスチャ構造を作製した。図中 (a) (b) (c) はそれぞれ周期 $1\mu\text{m}$ 、 $1.4\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ のハニカム構造であり、(d) は参照テクスチャ基板である。同条件にて作製したサブストレート型 μ c-Si:H 太陽電池の短絡電流密度 J_{sc} とハニカムテクスチャ構造の周期との相関をまとめたものが図Ⅲ-2- (口) -A-1-a8(2) である。図には過去に Al 陽極酸化法で作製した基板 (周期 $1\mu\text{m}$ 以下) の結果も示している (文献Ⅲ-2- (口) -A-1-a8(3))。この結果から、光閉じ込め効果を最大化する適切な周期があること、その周期は太陽電池の膜厚に依存する傾向があること、高アスペクト比を持つ基板ほど高電流が得られることが理解される。本図における最大の J_{sc} は膜厚 $2\mu\text{m}$ において 26.7mA/cm^2 であるが、更なるテクスチャ構造の探索により、現時点で $J_{sc}=27.7\text{mA/cm}^2$ 、逆バイアス電圧印可状態における量子効率スペクトルの積分値としては 28.9mA/cm^2 を得た (図Ⅲ-2- (口)

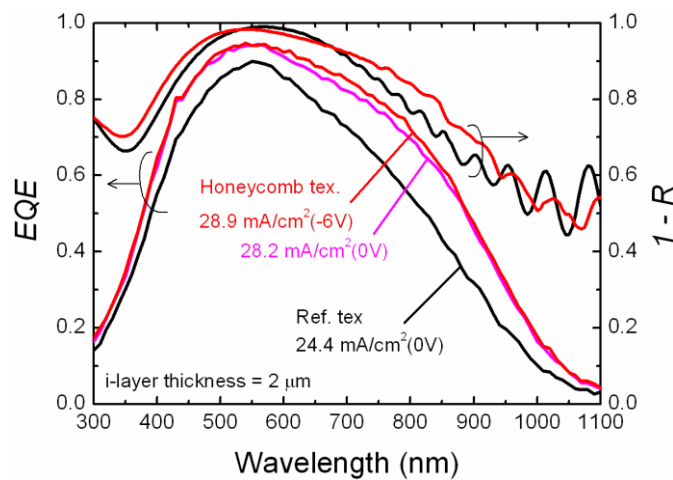
-A-1-a8(3))。テクスチャ構造の最適化・吸収損失の抑制並びに反射防止構造等の適用によって中間目標値 $30\text{mA}/\text{cm}^2$ は十分達成可能と考えられる。



図Ⅲ-2- (ロ) -A-1-a8(1) 新規開発したハニカムテクスチャ構造の走査型電子顕微鏡



図Ⅲ-2- (ロ) -A-1-a8(2) ハニカムテクスチャ構造の周期と短絡電流密度 J_{sc} の相関



図Ⅲ-2- (ロ) -A-1-a8(3) ハニカムテクスチャ上の $\mu\text{c-Si:H}$ 太陽電池の量子効率スペクトル

参考文献

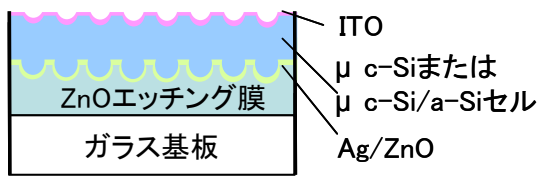
- III-2- (口) -A-1-a8 (1) :C. Battaglia, C.-M. Hsu, K. Söderström, J. Escarre, F.-J. Haug, M. Charrière, M. Boccard, M. Despeisse, D. T. L. Alexander, M. Cantoni, Y. Cui, and C. Ballif, “Light Trapping in Solar Cells: Can Periodic Beat Random?”, ACS Nano, vol. 6, 2790-2797 (2012).
- III-2- (口) -A-1-a8 (2) :S. E. Han and G. Chen, “Toward the Lambertian Limit of Light Trapping in Thin Nanostructured Silicon Solar Cells”, Nano Lett., vol. 10, 4692-4696 (2010).
- III-2- (口) -A-1-a8 (3) :H. Sai, M. Kondo, “Effect of self-ordered textured back reflectors on light trapping in thin-film microcrystalline silicon solar cells”, J. Appl. Phys. vol. 105, 094511 (2009).

a-9. サブストレート型薄膜シリコン系太陽電池の光閉じ込め構造に関する研究開発（担当：富士電機株式会社）

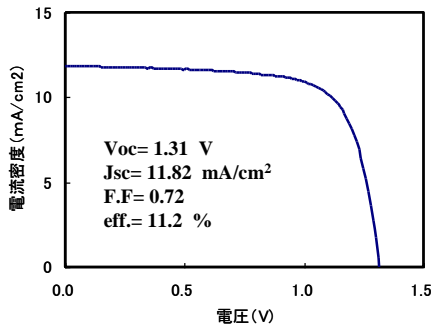
フレキシブル薄膜シリコン太陽電池の高出力化のために光閉じ込め技術について検討している。太陽電池はサブストレート型であり、裏面電極面に凹凸形状を付与することで光を発電層内に閉じ込める。ここでは、光閉じ込めの最適構造検討として制御された凹凸構造を用いてその構造を探索している。フィルム基板太陽電池に適用できる光閉じ込め構造として選択的反応性スパッタリング法を検討している。これらをサブストレート型太陽電池に適用し、2 接合太陽電池において 13%以上の変換効率を得ることを目標としている。

光閉じ込め構造の最適化では ZnO エッチング法の検討を行った。この方法はガラス基板に製膜した ZnO 膜（厚さ $2\mu\text{m}$ ）を希塩酸でエッチングするものであり、ZnO 膜に比較的整った円形の窪みが形成される。この基板に Ag/ZnO を製膜して凹凸状の裏面電極とした。円形の窪みはエッチング時間とともに大きくなり、乱反射の指標である拡散反射率が高くなった。窪みがガラス基板に達すると拡散反射率が徐々に低くなった。窪みの直径が $2.4\sim 3.5\mu\text{m}$ を越えると拡散反射率が 80%以上に増加する傾向があった。薄膜 Si 太陽電池で広く用いられている Type-U 基板上に形成した裏面電極（拡散反射率 46%）と比較しても高い拡散反射率が得られた。ここで、拡散反射率の代表値は波長 700nm の値とした。次に、裏面電極の上に微結晶 Si の n 層、i 層と p 層、そして、ITO 透明電極を形成して太陽電池とした（図 III-2- (口) -A-1-a9(1)）。その短絡電流密度 (J_{sc}) は拡散反射率とともに増加した（図 III-2- (口) -A-1-a9(2)）。分光感度特性において 600nm 以上の長波長領域で量子効率が増加することからも、光閉じ込めの効果によることがわかる。エッチング時間 120s のときに変換効率 9.3%（拡散反射率 92%、 J_{sc} $23.8\text{mA}/\text{cm}^2$ ）を得た。同時に形成した Type-U 基板では変換効率 9.0%（拡散反射率 46%、 J_{sc} $22.7\text{mA}/\text{cm}^2$ ）と同等の特性であった。さらに、微結晶 Si 太陽電池とアモルファス Si

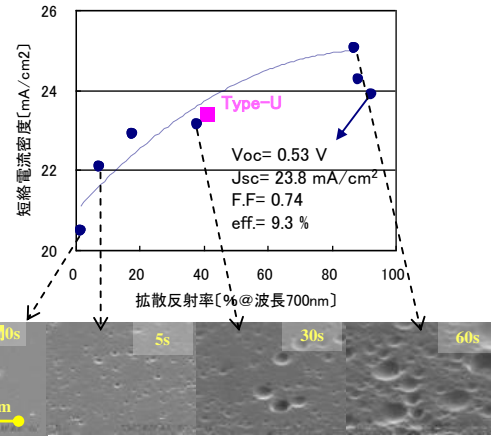
太陽電池を積層した 2 接合太陽電池は変換効率 11.2%であった（図 III-2- (口) -A-1-a9(3)）。また、開放電圧 (V_{oc}) 1.31V、 J_{sc} $11.8\text{mA}/\text{cm}^2$ 、曲線因子 (FF) 0.723 であった。



図III-2-(口)-A-1-a9(1) ZnOエッチング膜上に作製した太陽電池構造



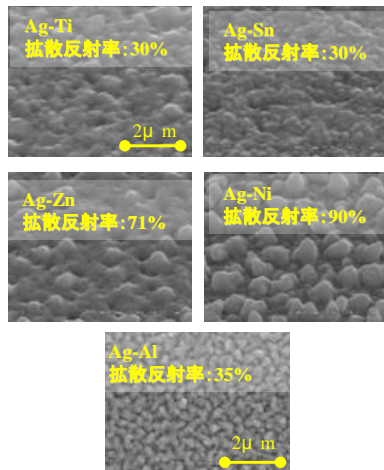
図III-2-(口)-A-1-a9(3) ZnOエッチング膜上に作製した2接合太陽電池の電圧電流特性



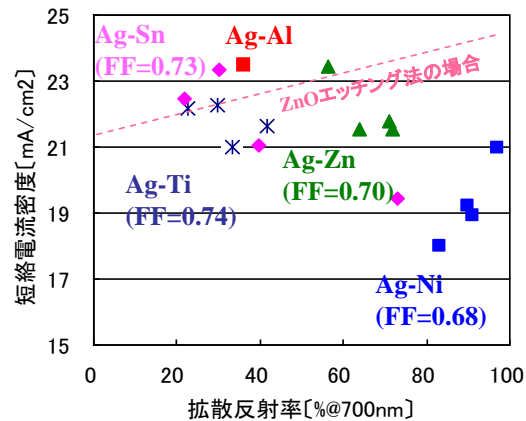
図III-2-(口)-A-1-a9(2) ZnOエッチング膜の拡散反射率と太陽電池の電流密度の関係およびZnOエッチング膜の表面形状

選択的反応性スパッタリング法は富士電機の独自技術で太陽電池の裏面電極の形成に使用されている。これはAl添加のAg合金を酸素添加のArガスでスパッタするものであり、更なる高性能化のために新たなAg合金材料の検討をしている。4種類の添加元素(Zn、Sn、Ti、Ni)を選定して裏面電極を形成した。Ag-Ni合金は最も突起が大きく、拡散反射率が80%を超え、Ag-Al合金の値(40%)よりも高かった(図III-2-(口)-A-1-a9(4))。

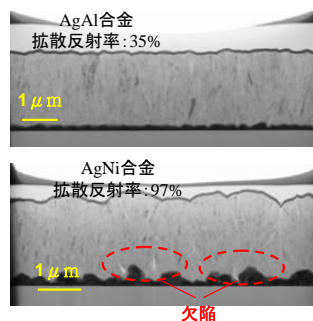
次に、これらを裏面電極として微結晶Si太陽電池を形成した。各合金とも短絡電流密度は拡散反射率とともに大きくなる傾向が見える(図III-2-(口)-A-1-a9(5))。一方、拡散反射率が高いAg-Ni合金やAg-Zn合金は短絡電流密度が小さくなり、FFの減少とも対応していた。太陽電池の断面を透過電子顕微鏡観察すると、Ag-Ni合金の裏面電極界面からSi膜中に線状の欠陥が観察される(図6)。これが太陽電池特性の低下を招いたものと考えられる。このため、Ag-Ni合金太陽電池の変換効率は7.0%($J_{sc}=20.9\text{mA/cm}^2$)とAg-Al合金の変換効率8.5%($J_{sc}=23.5\text{mA/cm}^2$)には至っていない。欠陥を発生させない凹凸形状を検討する必要がある。



図III-2- (ロ) -A-1-a9(4) Ag合金膜の表面形状と拡散反射率



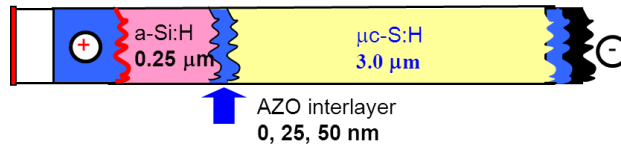
図III-2- (ロ) -A-1-a9(5) Ag合金膜の拡散反射率と太陽電池の電流密度の関係



図III-2- (ロ) -A-1-a9(6) 太陽電池の断面透過電子顕微鏡像

a-10. 安定化効率15%以上の小面積薄膜シリコン太陽電池セルの開発 (担当: 独立行政法人産業技術総合研究所)

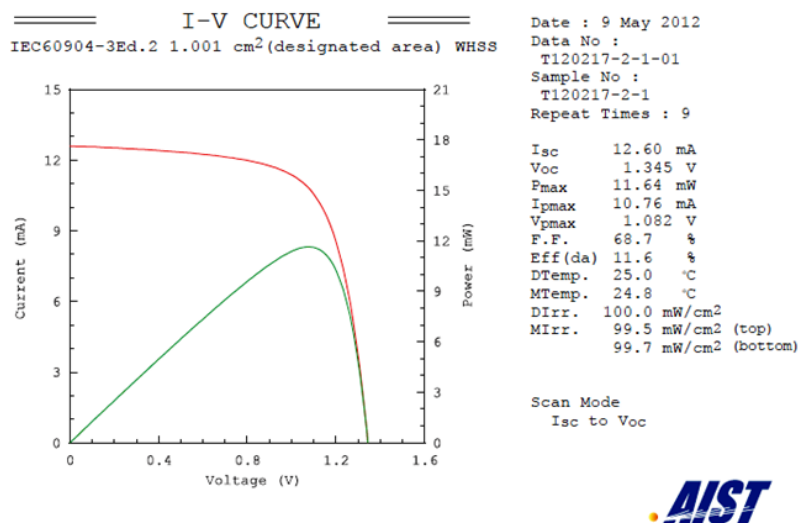
これまでに、a-1 で開発中の高光安定な a-Si:H を用いて a-Si:H/ μ c-Si:H タンデム型太陽電池の開発を行ってきた。タンデムセルの特性改善のために、トップセルとボトムセルの間に中間反射層を導入し、a-Si:H トップセルの高電流化を図るとともに、セルの電流律則条件と光安定性の関係について調査した。具体的にはトップ・ボトムセルの間に、Al ドープ ZnO (AZO) を中間反射層として挿入し、その膜厚を変化させたタンデムセルを作製した。図III-2- (ロ) -A-1-a10(1) に、異なる膜厚の中間反射層 ($t_{AZO}=0, 25, 50$ nm) を具備した a-Si:H (250 nm)/ μ c-Si:H (3 μ m) タンデムセルの素子構造と、各要素セルの電流密度と電流電圧特性について示す。中間反射層を用いないセルではトップセル電流律則となり、 $t_{AZO}=25, 50$ nm でそれぞれ電流整合、ボトム電流律則となった。これらのタンデムセルの中で、ボトム電流律則となるセルでは、光劣化率が約 3% と最も小さく、光劣化後の FF が 0.75 ときわめて高い値を示した。一方、最も高い安定化効率を示したのは、電流整合した太陽電池で、1.25 sun、48°C、310 時間の光照射条件下で安定化効率 11.3% を得た (AIST 評価・標準チーム測定)。



t_{AZO} (nm)	J_{top} / J_{bottom} (mA/cm ²)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF	η (%)	
0	12.1 / 14.7	Ini	12.0	1.314	0.742	11.7
		LS	11.9	1.343	0.715	11.2
		Δ (%)	-0.83	2.21	-3.64	-4.27
25	12.9 / 13.4	Ini	12.8	1.300	0.727	12.0
		LS	12.6	1.330	0.687	11.4
		Δ (%)	-1.56	2.31	-5.50	-5.00
50	13.7 / 11.7	Ini	11.3	1.324	0.780	11.7
		LS	11.3	1.330	0.755	11.3
		Δ (%)	0.00	0.45	-3.21	-3.42

図III-2- (ロ) -A-1-a10 (1) 中間反射層を用いた a-Si:H/ μ c-Si:H タンデム型太陽電池のデバイス構造と、各要素セルの電流密度および電流電圧特性の中間層膜

上記の AZO はタンデムセルの中間反射層として機能するものの、AZO の膜厚を増加させるとフリーキャリア吸収による光学ロスが発生し、それに起因してボトムセルの電流が減少することがわかった。そこで、より透明性の高い μ c-SiO_x:H^{III-2-} (ロ) -A-1-a10(1) の適用を検討した。また、トライオード PECVD 法で作製する高光安定性な a-Si:H 太陽電池は、従来よりセル膜厚を厚くしても光劣化の増加を抑えることができるため、トップセルの高電流化のためにトップセルの厚膜化 (250⇒350 nm) を検討した。a-Si:H (350 nm)/中間反射層 μ c-SiO_x:H (25 nm)/ μ c-Si:H (3 μ m) タンデムセルを試作した結果、光照射 (125 mW/cm²、310 h、48°C) による光劣化率は約 7% であり、安定化効率 11.6% (J_{sc} =12.6 mA/cm², V_{oc} =1.345 V, FF=0.687, ガラス面 AR 膜あり) を得た。図III-2- (ロ) -A-1-a10(2) にこの太陽電池の I-V 特性 (AIST 評価・標準チームで測定) を示す。



図III-2- (ロ) -A-1-a10(2) 光劣化後の a-Si:H (350 nm)/ μ c-Si:H (3 μ m) タンデム型太陽電池の電流電圧特性。

参考文献

III-2- (□) -A-1-a10 (1) P. Buehlmann, J. Bailat, D. Dominé, A. Billet, F. Meillaud, A. Feltrin, and C. Ballif, *Appl. Phys. Lett.* 91 (2007) 143505.

III-2- (□) -A-1-a10 (2) A. Hongsingthong, T. Krajangsang, I. A. Yunaz, S. Miyajima, and Makoto Konagai, *Appl. Phys. Express* 3 (2010) 051102.

表Ⅲ-2- (ロ) -A-1(1) 研究開発項目ごとの成果・達成度

中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
<p>a-1. アモルファスシリコン太陽電池の高電流・高安定化技術開発 (担当: 独立行政法人産業技術総合研究所)</p> <p>(平成 24 年度末中間目標)</p> <p>2 接合または 3 接合で 1cm²以上の小面積セルで安定化効率 14%。</p>	<p>単接合セルと 2 接合化セル (1cm²) でそれぞれ安定化効率 9.6%と 11.6%を達成。</p> <p>単接合セルと 2 接合化セル (a-Si:H 膜厚: 250 nm) の光劣化率が、それぞれ 10%と 5%程度。</p>	△	<p>p/i 界面のバッファ層の高品質化 (高光安定化) による光劣化のさらなる抑制。</p> <p>市販 TCO 基板から高へイズ基板に移行し、高電流化・高効率化を図る。</p>
<p>a-2. 高効率アモルファスシリコンによるトップセル高効率化 (三菱重工株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所)</p> <p>(平成 24 年度末中間目標)</p> <p>30×40cm²以上の製膜プロセスで単接合セルの短絡電流 16mA/cm²と、劣化率 5%以下のセル実現</p>	<p>シリコンナノ粒子計測モニタの設計・製作完了。計測技術を確認し、小面積プラズマ CVD 装置でシリコンナノ粒子のモニタリングが可能となった。</p> <p>シリコンナノ粒子量と a-Si:H 単接合太陽電池の劣化率との関係を確認。ナノ粒子量低減により劣化率が改善可能であることを確認した。</p> <p>30×40cm²基板成膜用プラズマ CVD 装置の電極・成膜ユニットの設計・製作を完了した。</p>	△	<p>30×40 cm² 基板成膜用プラズマ CVD 装置の新規電極・成膜ユニットで成膜した a-Si:H 膜中のシリコンナノ粒子量の制御。</p> <p>小面積プラズマ CVD 装置で蓄積したシリコンナノ粒子量に関するデータを 30×40 cm² 装置に展開。</p> <p>光閉じ込め技術適用による短絡電流の増加。</p>
<p>a-3. ナノ粒子制御によるアモルファスシリコンセルの高光安定化に関する研究 (国立大学法人九州大学 白谷研究室)</p> <p>(平成 24 年度末中間目標)</p>	<p>ナノ粒子の取り込みを抑制した P 層および N 層は、良い光安定性を示すことを明らかにした。</p> <p>I 層に関して、プラズマ ON, OFF に伴う I 層上下の 2 つの界面近傍のナノ粒子取り込みを抑</p>	△	<p>これまでの方法では抑制が難しい、サイズの小さいクラスターの膜中への混入を防止し、光安定性をさらに高める。</p> <p>複数層膜に対して、その場ナノ粒子膜中取り込み量モニター装置を用いて、ナノ粒子取</p>

<p>ナノ粒子を抑制する放電技術を確立し、小面積セルの光劣化5%以下を実現し、産総研プロセスにその成果を反映。</p>	<p>制することが光安定性の改善に重要であることを初めて明らかにした。界面近傍のナノ粒子取り込みの無いセルにおいて、ショットキーセルの初期FF=0.516、劣化率 1%以下を実現した。また、クラスター除去フィルター設置でナノ粒子取り込みを低減することにより光劣化率 1.95%の a-Si:H 膜ショットキーセルの作製に成功した。</p> <p>PIN セルにおいて、I 層成膜時のナノ粒子を抑制することにより、現在までに初期効率 9.19%、劣化率 12.6%を達成した。</p>		<p>り込み量と光安定性の関係を定量的に把握する。</p> <p>ナノ粒子取り込み抑制効率を飛躍的に高める、新型放電電極を開発する。また、PIN セル作製時の界面のナノ粒子取り込み抑制を行う。</p>
<p>a-4. 微結晶シリコンゲルマニウムを用いたボトムセル高電流化技術開発（独立行政法人産業技術総合研究所） （平成 24 年度末中間目標） Ge 濃度 25%以上で短絡電流密度 35 mA/cm² の小面積単接合セルを開発。</p>	<p>Ge 濃度 10-30%のセルで、酸素添加により短絡電流密度を 5 mA/cm² 改善した。厚さ 3.4 μm、Ge 濃度 10%で 27.5 mA/cm² を得た。</p>	<p>△</p>	<p>高 Ge 濃度領域 (>20%) における結晶粒径の大粒径化。</p> <p>表面 TCO、裏面電極、ドーピング層の寄生吸収ロスを低減するとともに、高ヘイズ基板の適用による高電流化。</p>
<p>a-5. 高性能・低コスト透明電極材料の開発（担当：独立行政法人産業技術総合研究所） （平成 24 年度末中間目標） 太陽電池の長波長光感度を 20%向上。</p>	<p>開発中の ZnO:Al 基板を用いることで、比較試料より長波長域（波長 800-1100nm）の分光感度 80%増加、短絡電流密度 10%増加することを μc-Si:H セルにおいて確認</p>	<p>○</p>	

<p>a-6. 表面凹凸構造制御・高ヘイズZnO透明導電膜を用いた高効率アモルファスシリコン太陽電池の研究開発（国立大学法人東京工業大学 小長井研究室） （平成 24 年度末中間目標） 小面積 a-Si 単接合セルで 17 mA/cm²以上の短絡電流を実証。</p>	<p>Corning 7059、Eagle ガラス、青板ガラス、白板ガラスのそれぞれに対して、反応性イオンエッチングにより表面の凹凸化を図り、その後で、ダブルテクスチャー構造の ZnO を製膜する革新技术を開発した。これにより、i 層の膜厚 300nm において短絡電流密度 17 mA/cm²を達成した。</p>	○	
<p>a-7. スパッタ法による低コスト高性能TCOの開発（学校法人金沢工業大学 宮田研究室） （平成 24 年度末中間目標） 開発した表面テクスチャー構造を有する ZnO 系透明導電膜を採用した薄膜シリコン太陽電池において、現状の SnO₂系透明導電膜付きガラスを採用した薄膜シリコン太陽電池と比較して、10%以上の短絡電流密度の向上を実現。</p>	<p>新規に開発した高周波重畳直流マグネトロンスパッタ成膜法により ZnO 系透明導電膜を形成後、化学的 surface 加工を施すことによりテクスチャー構造を形成する基本技術を確立。 ZnO 系透明導電膜において、波長 1000nm におけるヘイズ率約 40%を達成。 高周波重畳直流マグネトロンスパッタ成膜法を用いて作製した低抵抗率 ZnO 系透明導電膜の RTA 処理技術を確立。最適な RTA 処理条件は空气中、500[°C]で 5[min]であり、AZO 膜では RTA 処理後のエッチング、GZO 膜では RTA 処理前のエッチング処理により近赤外域のより長波長まで高いヘイズ率を実現。テクスチャー-AZO 膜で波長 1200[nm]で 80[%]以上のヘイズ率を達成。 B、Al 及び Ga をそれぞれ添加した BZO、AZO 及び GZO 膜を作</p>	○	

	<p>製し、添加不純物の種類及び含有量と得られる電気的特性及び光学的特性との関係を検討。</p> <p>Si 系薄膜太陽電池用途に適合する特性を実現するためには、添加不純物の種類よりむしろ不純物添加量が重要であり、最適な不純物含有量は約 2[at. %]程度であることを明らかにした。</p> <p>高周波重畳直流マグネトロンスパッタ成膜法により成膜後、RTA 処理を施してテクスチャ構造を形成した AZO 膜上に、産総研において μc-Si:H pin 太陽電池を試作。その結果、asahi-U ガラス上に作製した同様の構造の太陽電池と比較して短絡電流密度を約 10%改善でき、中間目標を達成。</p> <p>製造コスト低減(中間目標に対する到達度: 68[%])</p> <p>低酸素含有 ZnO 系焼結体ターゲットを採用する現有の高周波重畳直流マグネトロンスパッタ成膜において、約 1.7nm/s の高い成膜レートを実現。</p>		
<p>a-8. デバイス高効率化に向けた新規光閉じ込め技術の開発(担当: 独立行政法人産業技術総合研究所、三菱重工業株式会社)(平成 24 年度末中間目標)</p> <p>誘電体層を用いた裏</p>	<p>新規開発したハニカムテクスチャ型反射基板を用いたサブストレート型 μc-Si 単接合セル(膜厚 2 μm)において、短絡電流密度 27.7mA/cm²、逆バイアス電圧下における量子効率スペクトルでは 28.9mA/cm²を得、従来構造に較べて 4mA/cm²程度の向上を実現。</p>	<p>△</p>	<p>テクスチャ構造の高アスペクト化および最適化。</p> <p>反射防止構造の適用。</p> <p>p 及び n 型層の吸収損失低減最。</p> <p>表面/裏面 TCO の吸収損失低減。</p>

<p>面反射層などの活用を含めた他の吸収損失抑制技術と合わせ、膜厚 2 μm 程度の μc-Si 単接合セルで短絡電流 30mA/cm² の実現。</p>	<p>また、白色顔料を用いた反射材が優れた拡散反射特性を有することを確認した。またタンデム太陽電池の裏面反射材として適用した結果、Ag 電極と比較し 2~6%の Jsc 向上を確認。</p>		<p>裏面反射層の透過損失低減。 デバイス形状の最適化。</p>
<p>a-9. サブストレート型薄膜シリコン系太陽電池の光閉じ込め構造に関する研究開発（担当：富士電機株式会社） （平成 24 年度末中間目標） サブストレート型 2 接合太陽電池セルにおいて 13%以上の変換効率を達成。</p>	<p>ZnO 膜のエッチングにより凹凸を形成した基板に、Ag 裏面電極/日結晶 Si セル/アモルファス Si セル/透明電極を積層したサブストレート型 2 接合太陽電池において、11.2%の変換効率を得た。</p>	<p>△</p>	<p>高い効率（効率 12.5%）が得られる薄膜 Si 製膜装置でセルを形成する。このため、ZnO 膜エッチング基板の設置方法、製膜条件の最適化を行う必要がある。</p>
<p>a-10. 安定化効率 15%以上の小面積薄膜シリコン太陽電池セルの開発（担当：独立行政法人産業技術総合研究所） （平成 24 年度末中間目標） 各社と協力して 14%以上の安定化効率を達成。</p>	<p>μc-SiO_x:H (25 nm) の中間反射層を具備した a-Si:H (350 nm)/μc-Si:H (3 μm) タンデム型太陽電池 (1cm²) で安定化効率 11.6%を達成。</p>	<p>△</p>	<p>a-1 で開発する a-Si:H 太陽電池のさらなる高効率化・高光安定化。 高い電流を保持した状態でボトム電流律則条件となるように、中間層の厚膜化とボトムセルの赤外光閉じ込めを強化する。 高ヘイズ基板に適応する a-Si:H/μc-Si:H の成長条件の適正化。 3 接合セルに向けた高光安定 a-Si_{1-x}Ge_x:H ミドルセル（カネカと共同実施）や a-4 で開発する μc-Si_{1-x}Ge_x:H ボトムセルの適用。</p>

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

表Ⅲ-2-（ロ）-A-1(2) 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

	H22	H23	H24	計
特許出願（うち外国出願）	0	1（0）	0	1件
論文（査読付き）	8	5	4	17件
研究発表・講演（うち国際会議）	24（12）	28（13）	9（5）	61件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	1	1件
受賞実績	1	1	0	2件
展示会への出展	1	1	0	2件

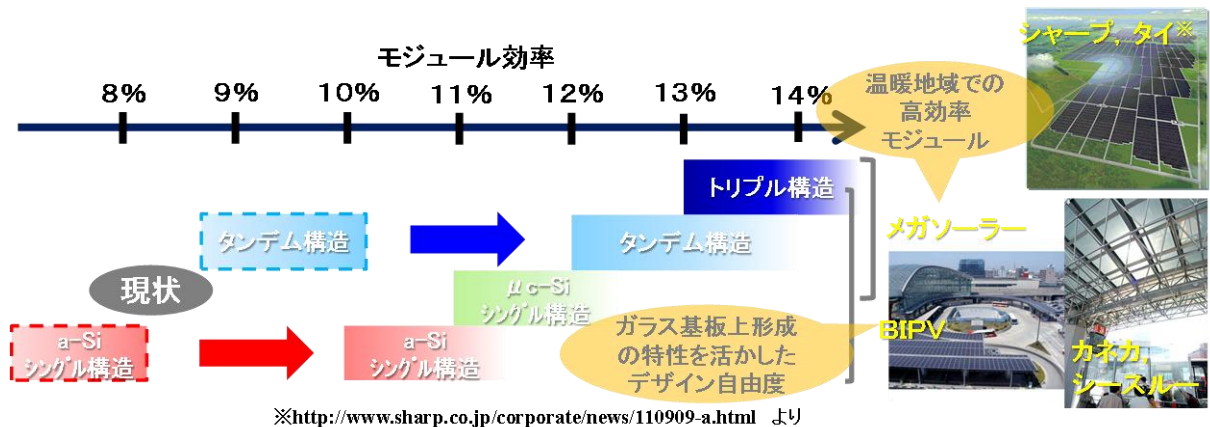
2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクト成果の実用化は、本コンソーシアム企業が2017年度において、G5サイズで変換効率～14%（出力200W以上）でかつコスト競争力のある生産プロセスで事業化するための装置・技術を提供することを指すが、多接合薄膜シリコン太陽電池の高効率化開発においては、大面積化可能な高効率化技術を確立することが課題である。

これを達成するためには、光安定なアモルファスシリコン膜形成技術と高度な光マネジメント技術が必要であるが、現状トライオード製膜法により世界トップレベルの光安定なアモルファスシリコン膜形成がなされているものの、本方法の装置構成ではスケールアップが困難なため、スケールアップ可能な新電極等を用いた製膜法を30×40cm²(G1)サイズレベルで検証した後、G5（実機）サイズへ展開し、実用化を目指す計画である。このスケールアップした製膜法は、コンソ企業プロセスへの適用検討を進めると同時に、新規CVD装置事業としても展開していく計画である。

また、高度な光マネジメント技術においては、本開発で得られたテキスチャガラスやハニカムテキスチャ構造応用部材、新規裏面反射材料等のスケールアップおよび低コスト化技術を確立し、コンソ企業プロセスへの適用検討を進める。

これらの技術開発による2017年度における事業化イメージとしては、高効率モジュールによる温暖地域におけるメガソーラー展開や、またBIPV（建材一体型太陽電池モジュール）に対して、高効率モジュールだけでなく、微結晶シリコンやアモルファスシリコンといった単接合モジュールによる展開も進むことが考えられる。



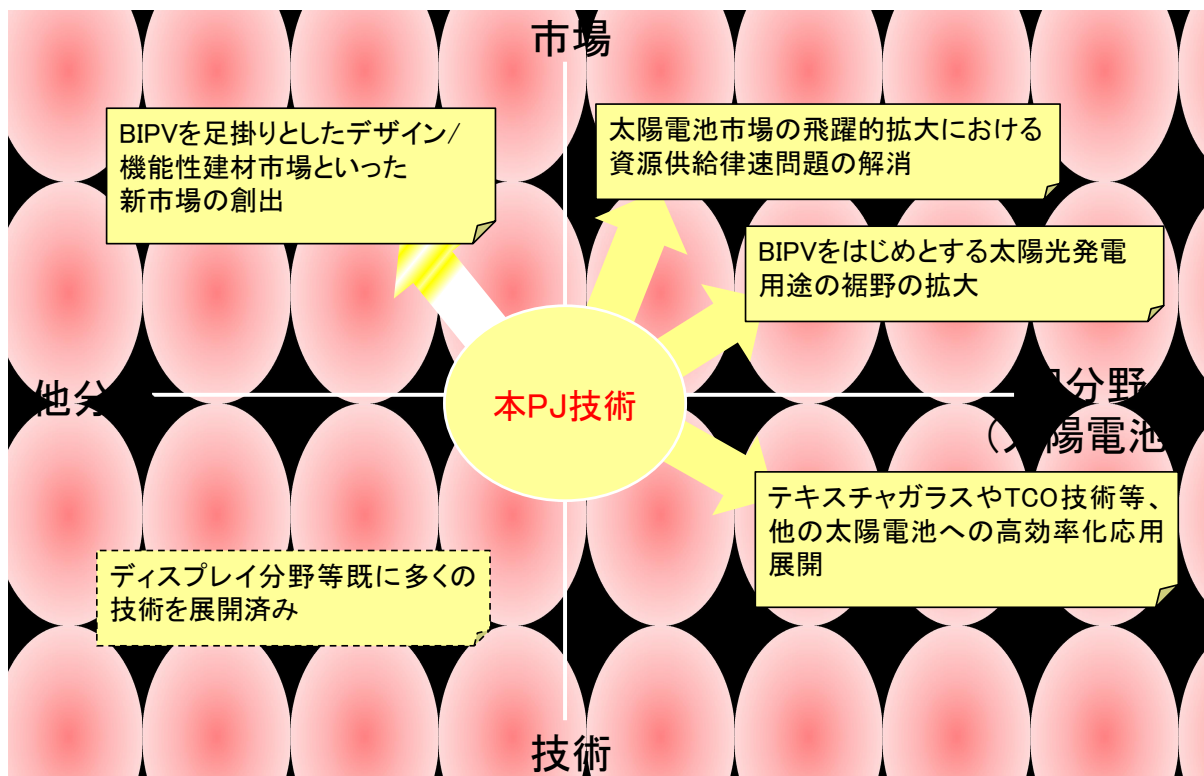
図Ⅲ-2-（ロ）-A-2(1) 2017年度の事業化イメージ

3. 波及効果

薄膜シリコン太陽電池で培われてきた技術は、既にディスプレイ分野を中心に多くの技術が他分野に展開されてきたが、本開発で得られた、テキスチャガラスやハニカムテキスチャ構造応用部材、新規裏面反射材料等は他の薄膜電池やヘテロ接合太陽電池、有機太陽電池等の高効率化に今後展開が可能な技術である。

また、この高効率化技術により、薄膜シリコン太陽電池の市場でのプレゼンス向上が期待できるが、特に薄膜シリコン太陽電池が得意とする BIPV 市場拡大に対する貢献において、太陽光発電用途の裾野を拡大することだけでなく、デザイン／機能性建材市場といった新たな市場を創出していくものと考えられる。

さらに、高効率化によるコスト競争力向上により、年産100GW以上となる太陽電池市場において、結晶シリコンや薄膜化合物系太陽電池で顕在化してくると予測されている資源供給律速問題の解消に大きく貢献することができる。



図Ⅲ-2- (ロ) -A-3(1) 薄膜シリコン太陽電池プロジェクト多接合薄膜シリコン太陽電池の高効率化開発技術の波及効果

4. 今後の展開

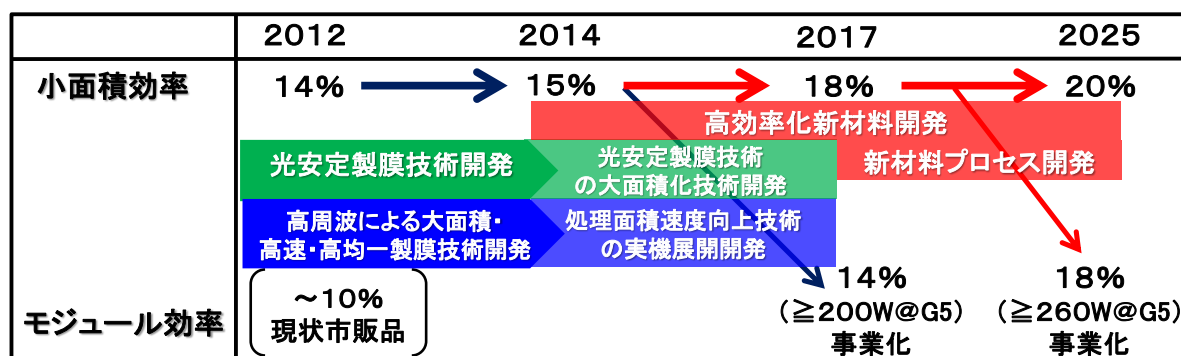
これまでの太陽電池市場は7割以上を占めるヨーロッパが主であったが、今後は新興国を中心とした他の地域市場も拡大し、2016年にはヨーロッパ以外が7割程度を占めると予測されている。その中で、中国や中東・アフリカ地域、環太平洋地域の市場は、政策主導シナリオでは2016年に29GW規模、市場全体の1/3程度を占めると予測されている。Ⅲ-2-(ロ)-A-4(1) さらに、これら地域に相当するいわゆる Sunbelt 地域の累積導入量は、加速成長シナリオにおいて2030年に403GWが予測されている。Ⅲ-2-(ロ)-A-4(2)

これら低緯度・中緯度地域においては、結晶シリコン太陽電池に比べて低い負の温度特性や短波長側の高い感度といった薄膜シリコン太陽電池の特性により、年間総発電量としては結晶シリコン太陽電池を上回る発電量も期待される。また、豊富な資源量と薄膜といった少ない材料使用量から、このような大きな太陽電池導入量の伸びに対しても、高い資源供給安定性の確保が見込める。

このため、薄膜シリコン太陽電池の高効率化による BOS コストの低減を図ることにより、特に今後伸ばしていくこれら低緯度・中緯度地域市場を中心とした展開が期待される。

また、ガラス基板上形成とそのモジュール形成プロセスから、薄膜シリコン太陽電池は、デザイン自由度の高さやシースルー型構造の形成等、他のタイプの太陽電池では作製困難なデザイン・機能を有する太陽電池製造が可能である。特に高効率化することにより、単接合タイプの微結晶シリコンやアモルファスシリコン太陽電池の BIPV 分野への展開も期待される。

これら市場の機会と期待に応えるべく、PV2030+の技術ロードマップを基本として、現行PJ成果およびそれを更に発展させた光安定製膜の大面积化技術確立等により、2017年にはモジュール効率14%での事業化を計画している。さらに、2017年には小面積での変換効率18%を達成し、2025年を目途に18%の変換効率を有するモジュールで事業化ができるように研究開発を進める計画であるが、これら効率達成に対しては、新材料およびそのプロセス開発といった今までと異なる新たなアプローチも必要となる。



図Ⅲ-2-(ロ)-A-4(1) 薄膜シリコン太陽電池プロジェクトの今後の展開

参考文献

Ⅲ-2-(ロ)-A-4(1) EPIA, Global market outlook 2012

Ⅲ-2-(ロ)-A-4(2) EPIA, Unlocking the Sunbelt Potential of Photovoltaics

5. 特許論文リスト

表Ⅲ-2- (ロ) -A-5(1) 特許リスト

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	富士電機(株)	特願 2012-054377	国内	2012/03/12	出願	裏面電極、 裏面電極の製造 方法、 及び薄膜太陽電 池	稲員 ふみ

表Ⅲ-2- (ロ) -A-5(2) 論文リスト

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
1	Takuya Matsui	産業 技術 総合 研究 所	Amorphous-Silicon-Base d Thin-Film Solar Cells Exhibiting Low Light-Induced Degradation	Jpn. J. Appl. Phys	有	2012 印刷中
2	古閑一憲、 他	九州 大学	Deposition of cluster-free P-doped a-Si:H films using SiH ₄ +PH ₃ multi-hollow discharge plasma CVD	Phys. Status Solidi C, 1- 4, 201100229	有	2011
3	白谷正治, 他	九州 大学	Characteristics of stable a-Si:H Schottoky cells fabricated by suppressing cluster deposition	MRS Proceedings	有	2012 印刷中
4	Yeonwon Kim、他	九州 大学	In-situ Measurements of Cluster Volume Fraction in Silicon Thin Films Using Quartz Crystal Microbalances	MRS Proceedings	有	2012 印刷中
5	Aswin Hongsingtho ng, Ihsanul Afdi Yunaz,	東工 大 大学 院理 工	Preparation of ZnO thin films using MOCVD technique with D ₂ O/H ₂ O gas mixture for use as TCO in silicon-based thin	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS 95, pp. 171-174	有	2011

	Shinsuke Miyajima, Makoto Konagai		film solar cells			
6	Liping Zhang, Ihsanul Afidi Yunaz, Shunsuke Kasashima, Hidetoshi Wada, Aswin Hongsingthong, Taweewat Krajangsang Yasuyoshi Kurokawa and Makoto Konagai	東工大大学院理工	Light management of a-Si:H solar cells using textured zinc oxide with adjustable haze values	Physica Status Solidi C,1-4, DOI 10.1002/pssc.201001180	有	2011
7	H. Sai, et.	産業技術総合研究所	Investigation of Textured Back Reflectors with Periodic Honeycomb Patterns in Thin-Film Silicon Solar Cells for Improved Photovoltaic Performance	IEEE J. Photovolt.	有	2012
8	Tadatsugu Minami, Jun-ichi Oda, Jun-ichi Nomoto, and Toshihiro Miyata	金沢工大	Spatial resistivity distribution of transparent conducting impurity-doped ZnO thin films deposited on substrates by dc magnetron sputtering	J. Vac. Sci. Technol. A 28, p.842-845	有	2010
9	Jun-ichi Nomoto, Manabu Konagai,	金沢工大	Resistivity characteristics of transparent conducting impurity-doped ZnO films for use in oxidizing	J. Vac. Sci. Technol. A 28, p.861-866	有	2010

	Toshihiro Miyata, and Tadatsugu Minami		environments at high temperatures			
10	Jun-ichi Oda, Jun-ichi Nomoto, Toshihiro Miyata, Tadatsugu Minami	金沢工大	Improvements of spatial resistivity distribution in transparent conducting Al-doped ZnO thin films deposited by DC magnetron sputtering	Thin Solid Films, 518, p.2984-2987	有	2010
11	Jun-ichi Nomoto, Manabu Konagai, Kenji Okada, Tomoyuki Ito, Toshihiro Miyata, Tadatsugu Minami	金沢工大	Comparative study of resistivity characteristics between transparent conducting AZO and GZO thin films for use at high temperatures	Thin Solid Films, 518, p.2937-2940	有	2010
12	Tadatsugu Minami, Jun-ichi Oda, Jun-ichi Nomoto, Toshihiro Miyata	金沢工大	Effect of target properties on transparent conducting impurity-doped ZnO thin films deposited by DC magnetron sputtering	Thin Solid Films, 519, p.385-390	有	2010
13	Jun-ichi Nomoto, Jun-ichi Oda, Toshihiro Miyata, Tadatsugu Minami	金沢工大	Effect of inserting a buffer layer on the characteristics of transparent conducting impurity-doped ZnO thin films prepared by dc magnetron sputtering	Thin Solid Films, 519, p.1587-1593	有	2010
14	Jun-ich Nomoto, Tomoyasu Hirano,	金沢工大	Electrical Property Improvements by Inserting a Buffer Layer in Impurity-Doped ZnO	Proc. of the 17th Int. Display Workshops, p. 833 - 836	有	2010

	Toshihiro. Miyata and Tadatsugu. Minami		Transparent Electrodes Prepared by Magnetron Sputtering Depositions			
15	Jun-ich Nomoto, Tomoyasu Hirano, Toshihiro Miyata and Tadatsugu Minami	金沢 工大	Effects of Superimposing r.f. Power on the Preparation of Impurity-Doped ZnO Transparent Electrodes by d.c. Magnetron Sputtering	Proc. of the 17th Int. Display Workshops, p. 837 - 840	有	2010
16	Jun-ichi Nomoto, Toshihiro Miyata, and Tadatsugu Minami	金沢 工大	Optical and electrical properties of transparent conducting B-doped ZnO thin films prepared by various deposition methods	J. Vac. Sci. Technol. A 29, p.041504	有	2011
17	Tadatsugu Minami, Toshihiro Miyata, Tomoyasu Hirano, Jun-ichi Nomoto	金沢 工大	Reduction of obtainable resistivity in transparent conducting impurity doped ZnO thin films deposited with a very thin buffer layer by magnetron sputtering	Proc. of SPIE, 8204, p.820435-820439	有	2011

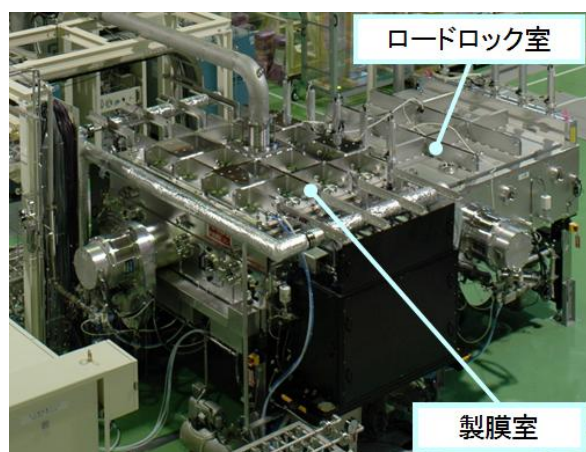
B 次世代多接合薄膜シリコン太陽電池の産学官協力体制による開発（大面積化）

1. 成果詳細

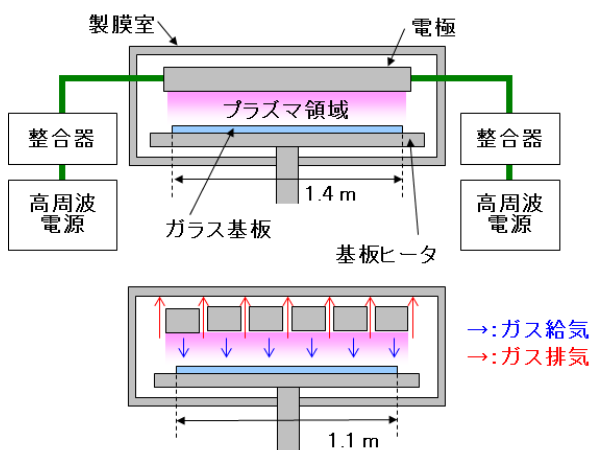
b-1-1. 大面積高生産性製造装置の開発（三菱重工業株式会社） （マルチロッド電極方式の G5 基板サイズでの膜厚均一化）

大面積製膜における高変換効率化を促進するために、平成 24 年度までに三菱重工業がこれまで開発してきたマルチロッド電極を用いた G5 相当サイズの基板を処理可能な装置で、微結晶シリコンの製膜で±10%以下の膜厚均一性を達成することを目標として製膜試験を実施し膜厚均一性の確認を行った。

本研究に用いたマルチロッド電極方式 G5-プラズマ CVD 装置の概観写真および模式図を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(1)に示す。ガラス基板は電極と対向する位置に設置された基板ヒータ上に配置される。電極は 6 本に分割されており、電極両端に高周波電源から高周波が給電される。原料ガスは電極内部に設けられたガス供給口より給気され、分割された電極間のスリットおよびガラス基板周囲を介して排気される。原料ガスは電極に印加された高周波電力により生成されたプラズマによって分解され、ガラス基板上にシリコン膜を形成する。



(a) 装置概観写真



(b) 装置模式図

図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(1) マルチロッド電極方式 G5-プラズマ CVD 装置

本研究では G5 サイズ（1100mm×1400mm×厚さ 4mm）のガラス基板上に製膜を行い、膜厚均一性を評価した。代表的な製膜条件を表Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(1)に示す。膜厚均一性はエリプソメトリーにより製膜基板上的シリコン膜の膜厚を測定し、式Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(1)に示す定義式で評価した。結晶性についてはラマン分光法により評価した。

表Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(1) 製膜条件

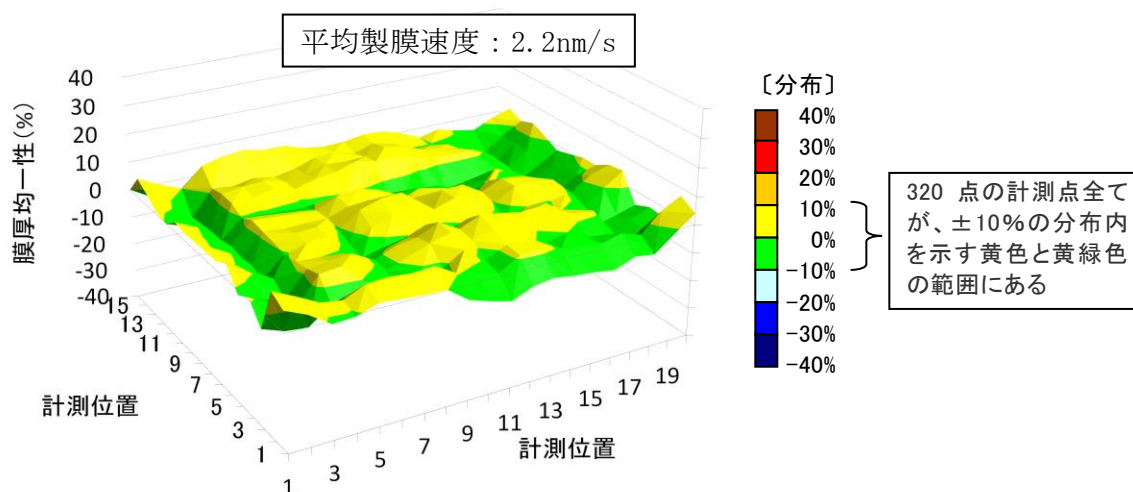
水素希釈率 (H ₂ /SiH ₄)	製膜圧力 [Pa]	投入電力 [W/cm ²]	基板-電極間 距離 [mm]	高周波電源 周波数 [MHz]
60	1500	1.2	6	60

$$\text{膜厚均一性}[\pm\%] = 100 \times \frac{\text{最大膜厚値} - \text{最小膜厚値}}{2 \times \text{平均膜厚値}} \quad \text{式Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(1)}$$

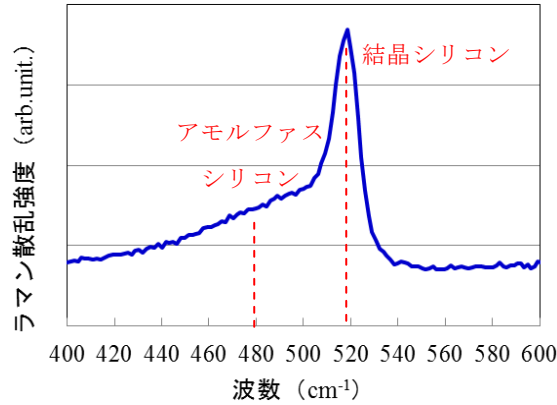
通常 60MHz の超高周波数を用いた場合、G5 サイズ基板上へ均一な膜厚分布を得ることは困難である。これは波長が短いことから定在波の電圧分布が電極上に発生するためである。本装置では、図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(1)-(b)の上図の方向に対しては位相変調法にて、下図の方向に対しては分割した電極毎に投入する電力を調整することで、膜厚分布：±15%を得ていたが、6分割した電極の内、両端の2本に対向する基板上の膜厚分布が全体の膜厚分布に大きく影響していることが課題として残っていた。本研究では更なる分布改善のために、位相変調時の定在波電圧の振幅の変位を計測・検討し、その差が分布の一因であることを見出した。このため従来に比べより高度な制御が可能な方法を開発し、位相変調法に適用した。

上記方法を適用した製膜結果を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(2)に示す。膜厚均一性は±9.9%であり、平成24年度の目標である±10%以内を達成できた。また、シリコン膜のラマンスペクトルの測定結果の代表例を図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(3)に示す。アモルファスシリコンの波数 480cm⁻¹と結晶シリコンの波数 520cm⁻¹においてピークが検出されていることから、製膜したシリコン膜は微結晶シリコンとなっていることを確認した。

これらの結果から、本研究開発の平成24年度の目標を達成したことを確認した。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1(2) 製膜結果



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-1 (3) ラマンスペクトル測定結果

b-1-2. 大面積高生産性製造装置開発に向けた超高周波プラズマ源の開発

i. 共振電極対アレイ方式プラズマ源 (東京エレクトロン株式会社、国立大学法人東北大学 平山昌樹)

G8.5 サイズ(2.8m×2.2m)ガラス基板に高品質微結晶シリコンを高速で製膜可能な PECVD を開発するに当たり、産総研・三菱重工で開発された高圧枯渇法成膜を前提に、励起周波数：60MHz 以上、圧力：500~1500Pa、電極～基板間 Gap：10mm 以上、上方排気機構、の装置仕様を設定した。

大面積・高均一プラズマを励起する為に2つの新手法を開発した。

先ず、長手方向の均一化技術 (共振伝搬技術) について説明する。矩形導波管の管内波長 λ_g は、次式で表される。

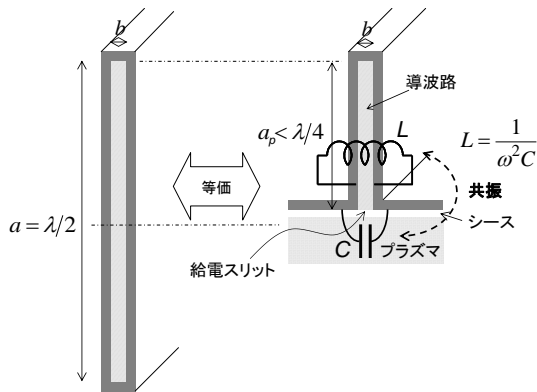
矩形導波管

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$$

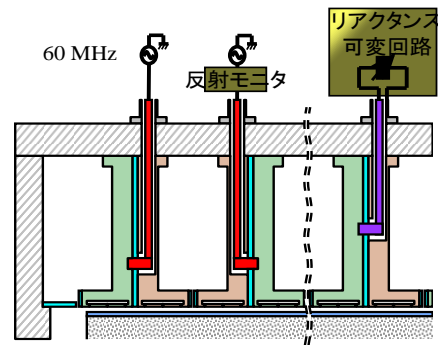
式Ⅲ-(ロ)-B-1-b1-2-i (1)

ここで、 a は導波管断面の長辺の長さ、 λ は自由空間の波長である。 $a = \lambda/2$ となると、上式の分母が0となり管内波長 λ_g が無限大になり、導波管はカットオフ状態となり、導波管長手方向に同一強度、同一位相の高周波が印加され、定在波は立たなくなる。

左は、 $a = \lambda/2$ でカットオフ状態の導波管を示したものである。本プラズマ源は、図Ⅲ-(ロ)-B-1-b1-2-i (2)右のように、カットオフ状態の導波管の下半分を取り除いて下部に平板上の電極を取り付けた構造になっている。

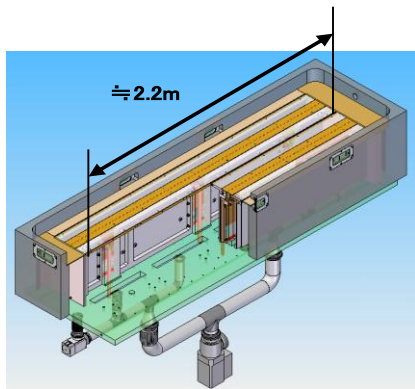


図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i(2)
共振伝搬概念

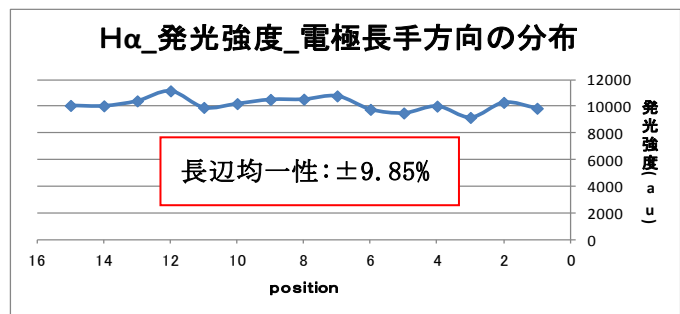


図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i(3)
プラズマ可視化装置の伝播機構

本共振伝搬技術の有効性を検証する為、2.2m×0.56m のプラズマ可視化装置（図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i(4)）を製作し、定在波が立たない事を確認し、更に、 H_2 プラズマではあるが、高圧（500Pa）狭 Gap：5mm、低 Power：0.32W/cm² 条件にて、グラフⅢ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i(5) の如く、OES（分光発光分析）での長辺 $H\alpha$ 強度：±9.85%、長辺電界強度：±8.8%を達成。60MHz、VHF 帯にて、世界初の定在波の立たない大面積プラズマ源を実証した。

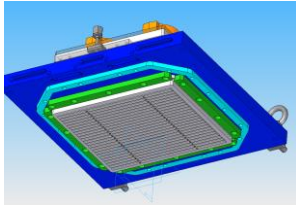


図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i(4)
プラズマ可視化装置



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i(5) 長辺均一性

次に、図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i(6)に示す短辺均一性を実現するコプレーナラインタイプのプラズマ源を考案した。これは、電極ピッチを基板—電極間 Gap 程度（10 mm）まで狭くしたもので、幅 3 mm、深さ 1.5 mm の溝が設けられている。この溝部には、多数のガス放出孔が設けられ、シャワープレートとホローカソードの機能を有している。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i
(6) 短辺均一性評価用
コプレーナ電極

	500Pa	1000Pa	1500Pa
旧型電極 1.29w/cm ²			
ステージ無し(Gap:200mm 以上)、斜め下方より撮影 電極サイズ: 270mm×280mm、SiH4:5sccm、H2: 250sccm			
新型電極 1.55W/cm ² 2			
短辺均一性			
Gap: 170mm、電極サイズ: 230mm×280mm、SiH4:20sccm、H2:			

図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i (7) 新旧電極でのプラズマ広がり確認

図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-i (7)に旧型電極とコプレーナ電極に於ける、概ね実プロセス条件下でのプラズマ発光状態を示す。旧型電極ではプラズマが広がらずに、給電部近傍に局所的に集まっているが、コプレーナ電極では両端まで均一にプラズマ発光が観察されている。

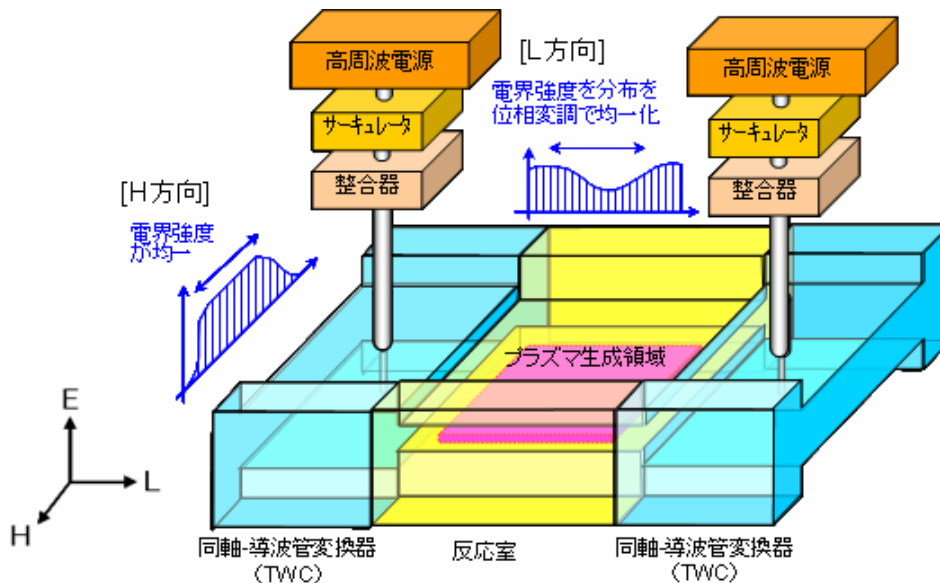
ii. 大面積化に向けたダブルリッジ導波管方式プラズマ源の検証（三菱重工業株式会社、国立大学法人九州大学 河合研究室）

ダブルリッジ導波管方式のプラズマ源は、図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii(1)のように、H型の断面を持つダブルリッジ型導波管（反応室）を、同じくH型の断面を持った同軸-導波管変換器（TWC）で挟み込んだ構造をしており、高周波電源から同軸モードで供給された高周波電力がTWCで導波管の基本伝播モードに変換されて反応室に投入され、反応室の狭ギャップ部分でプラズマが生成される仕組みとなっている。導波管の性質上、図中のH方向は均一な電界強度分布が得られる。一方、L方向は定在波によりそのままでは均一な電界強度分布は得られないが、位相変調法^{Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii(1)}、^{Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii(2)}の適用により均一化されると考えられている。また、導波管内での高周波伝播モードは高周波電力の周波数と導波管サイズで決まるため、反応室の面積は周波数を変えれば容易に変更できる。

一方、薄膜 Si 太陽電池においてはモジュール製造コストの低減が喫緊の課題であり、 μ c-Si 膜の大面積高速製膜の実現がコスト低減に有効であると考えられている。また、 μ c-Si 膜は、40~100MHz の VHF 帯を用いた高圧枯渇法により高品質かつ 2nm/s を超える高速で製膜されることが知られている。VHF 帯を伝播できるダブルリッジ型導波管では 2m×2m のプラズマ面積が得られると見込まれるため、VHF 帯でダブルリッジ導波管方式のプラズマ源の実現が 2m×2m の大面積高速製膜技術の確立に繋がると考えられる。そこで、本研究では、ダブルリッジ導波管方式のプラズマ源の実用性を確認するため、小型のプラズマ可

視化装置を設計・製作し、原理検証を行った。

まず、ダブルリッジ導波管方式のプラズマ可視化装置を製作するため、3次元電磁界シミュレーションにより均一な電界強度分布となる導波管寸法を検討した。原理検証用の小型装置であることから、プラズマ面積が 0.1 m^2 程度となる周波数 $400\sim 500\text{ MHz}$ の範囲で解析を行い、周波数 450 MHz においてH方向の電界強度分布が $\pm 3.6\%$ となる導波管寸法を見出した。この結果を基に、高周波電源の周波数 450 MHz に対して電極面積にあたるプラズマ生成領域の面積が $1/3\lambda$ 以上 $\times 1/3\lambda$ 以上となるプラズマ可視化装置を製作した。



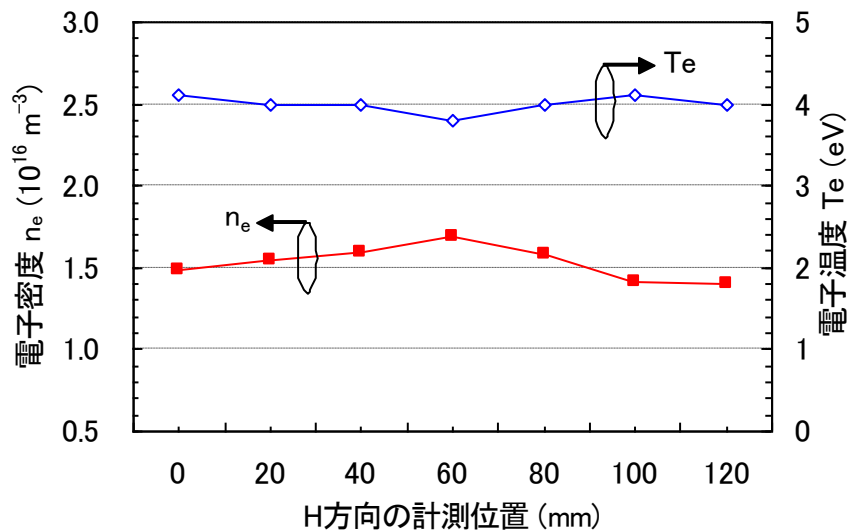
図III-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii (1) ダブルリッジ導波管方式のプラズマ源イメージ

上記の可視化装置において大気圧下でプラズマ生成領域の電界強度を計測した結果、位相変調のない状態では、H方向の電界は均一分布となり、L方向は中央部で強く、端部に向かうほど弱くなるのが確認され、理論通りの結果が得られた。また、位相変調の適用によりL方向の電界も均一化されるのを確認した。このとき、プラズマ生成領域全体の電界強度分布率は $\pm 3.6\%$ で、H方向の電界強度分布の計算値と同値であった。

次に、 H_2 プラズマ中でプラズマパラメータ計測を行った結果、図III-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii (2)に示す電子密度と電子温度のH軸上分布が得られた。分布率は電子密度が $\pm 9.6\%$ 、電子温度が $\pm 3.8\%$ であった。なお、プラズマ電位は分布率 $\pm 3.5\%$ であった。H方向については、中間目標値であるプラズマパラメータ分布 $\pm 10\%$ 以下を達成する均一性を確認できた。

一方、L方向については、現時点では位相変調時にプラズマがTWC側に局在化してしまうため、均一分布は得られていない。また、図III-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii (2)は圧力 50 Pa の結果であり、現時点では、 $\mu\text{c-Si}$ 薄膜の高速製膜が望める数百 Pa を超える高圧力で均一なプラズマを生成できていない。これらの課題に対しては、プロセス条件の調整により改善可能か検証しているところである。また、これらの課題はともに導波管の改良により改善できる可能性がある。現可視化装置の導波管寸法は真空中での解析結果を基に決められ

ているため、プラズマが発生していない状態では均一な電界分布が得られるものの、プラズマ発生時はプラズマの誘電率により高周波の波長が短縮されるため、波長に応じた不均一分布になると考えられる。そのため、プラズマパラメータの計測結果を基にプラズマ存在下の解析を行い、その結果を基に導波管を改良し、プラズマ分布の均一性向上を目指していく。



図III-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii (2) H軸上に対する電子密度と電子温度の分布

参考文献

III-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii(1) K. Kawamura, H. Mashima, Y. Takeuchi, A. Takano, M. Noda, Y. Yonekura, and H. Takatsuka, Thin Solid Films 506-607 (2006) 22.

III-2-(ロ)-B-1-b1-2-ii (2) H. Mashima, H. Yamakoshi, K. Kawamura, Y. Takeuchi, M. Noda, Y. Yonekura, H. Takatsuka, S. Uchino and Y. Kawai, Thin Solid Films 506-507 (2006) 512.

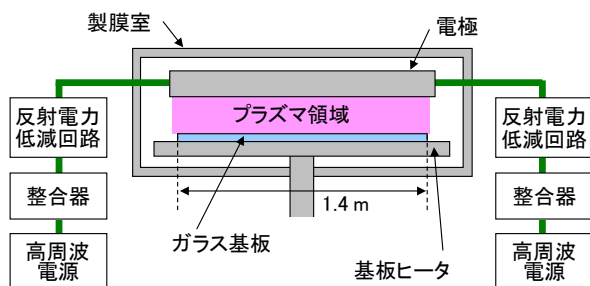
b-1-3. 超高周波を用いた大面積製膜技術の開発 (三菱重工業株式会社)

本研究では三菱重工業がこれまで開発してきた G5 サイズ相当の基板を処理可能なマルチロッド型電極を G5 サイズ以上の基板に適用するため、電極の長尺化の検討を行うことを目的としている。

平成 24 年度までに 100~120MHz の超高周波をマルチロッド型電極方式の CVD 装置 (G5 装置) に導入し反射電力比率を 20%以下とすることを目標としている。

本研究に用いる G5 装置の模式図を図III-2-(ロ)-B-1-b1-3 (1) に示す。G5 サイズの基板に対しては位相変調技術を導入することにより幅広い条件で±10%以下の膜厚均一性を得ている。基板サイズの大面積化には電極の長尺化が必要となるが電極を長くした場合、電極上に定在波の最大値と最小値が生じてしまう。現在の G5 装置で前述の定在波の影響を検証するために超高周波を導入する。一般的には高周波電源の周波数を高くすると高周波電

源の周波数に対応する波長が短くなるため、高周波電源の周波数を高くすることで G5 装置において前述の定在波の状況を模擬することができる。これにより G5 サイズを超える大面積基板に対する装置設計の技術的検証が可能となる。



G5 装置仕様	
取扱基板サイズ	1400×1100×厚さ 4mm
製膜圧力 : P	(60) ~ 2300Pa
基板電極間距離 : D	3~25mm
最大高周波電力	24kW
高周波電源周波数	60MHz

図 III-2-(ロ)-B-1-b1-3 (1) G5 装置模式図

現在の 60MHz での大面積製膜時における反射電力低減技術の実績を図 III-2-(ロ)-B-1-b1-3 (2) に示す。製膜条件は幅広い範囲となるため、反射電力比率が 20%以下となることを確認できた条件の製膜圧力と基板-電極間距離で整理した。60MHz における実績では、位相変調技術と反射電力低減回路との組み合わせにより、幅広い製膜条件下においても反射電力比率を 20%以下に抑制する技術を確立した。現在は 100MHz の高周波電源設計・製作を実施中であり、60MHz で得た知見をベースに 100MHz での検証を進めていく。

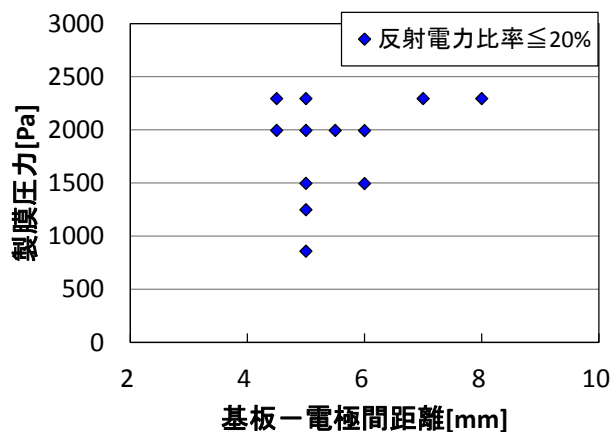


図 III-2-(ロ)-B-1-b1-3 (2) 60MHz での反射電力比率実績

b-2. VHF プラズマを用いたシリコン合金系薄膜高速大面積製膜技術の開発 (株式会社カネカ)

シリコン合金系薄膜開発をより一層加速し目的を達成するべく、PVTEC つくば研究所及びカネカ拠点の両拠点で検討を行った。

カネカ拠点では、これまでの a-SiGe に関する知見を活用し、カネカ m 角級 CVD 設備 (パ

イロット設備)を用いた、シリコン合金系薄膜大面積製膜の各種課題抽出及び高品質化を実施。ガス流れの均一性や流量に対する依存性を確認し、また電極間隔による課題を抽出することにより小面積設備と同等の高品質膜を太陽電池セル構造にて確認した。

PVTEC つくば研究所においては G5 装置稼働後、60MHz での a-SiGe 大面積高品質均一製膜検討を開始。カネカ拠点での結果を G5 スケールヘフィードバックし小面積検討及びカネカ m 角級 CVD 設備 (パイロット設備) とほぼ同等な高品質膜にて a-SiGe の膜厚分布 11% という高い膜厚均一性を得た。

本サブテーマの目標は「セル化した際の J_{sc} 分布が $\pm 10\%$ 以下を達成する」であるため、セル化の検討を実施。本質的な a-SiGe 薄膜による発電層の影響を確認するため、p 層はカネカ拠点の小面積設備で作製したのを用いた。G5 サイズ基板面内 9 点に p 層製膜済み基板を設置の上、前述の良好な均一性条件を用いて a-SiGe 薄膜からなる発電層を 100nm 製膜した。その後 PVTEC つくば研究所内の設備にて n 層及び裏面電極層を形成し、面積 1 cm^2 の太陽電池セルを作製の上、評価を実施した。図 III-2-(ロ)-B-1-b2(1) に示すように J_{sc} の分布は 5.5% が得られ、また、初期変換効率も図 III-2-(ロ)-B-1-b2(2) に示すように、6.7% というプロセス及び構造を加味した上では良好と判断できる結果が得られた。これらの結果より、本サブテーマの目標は前倒しで達成した。

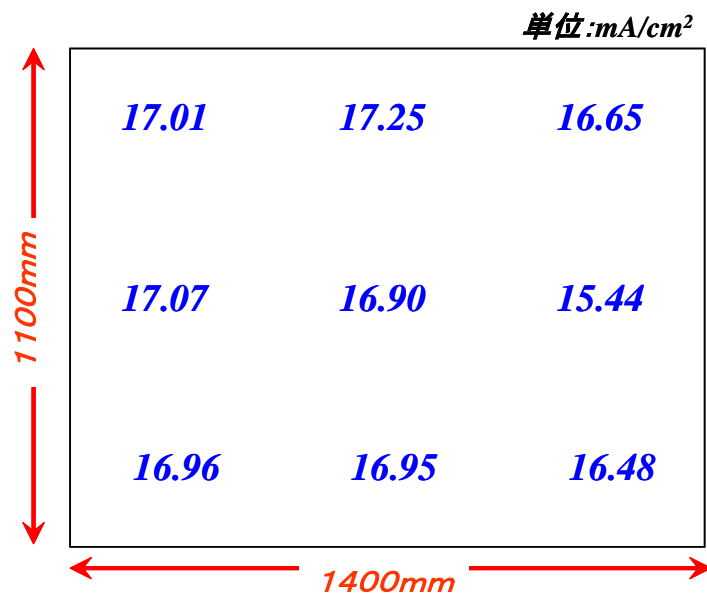
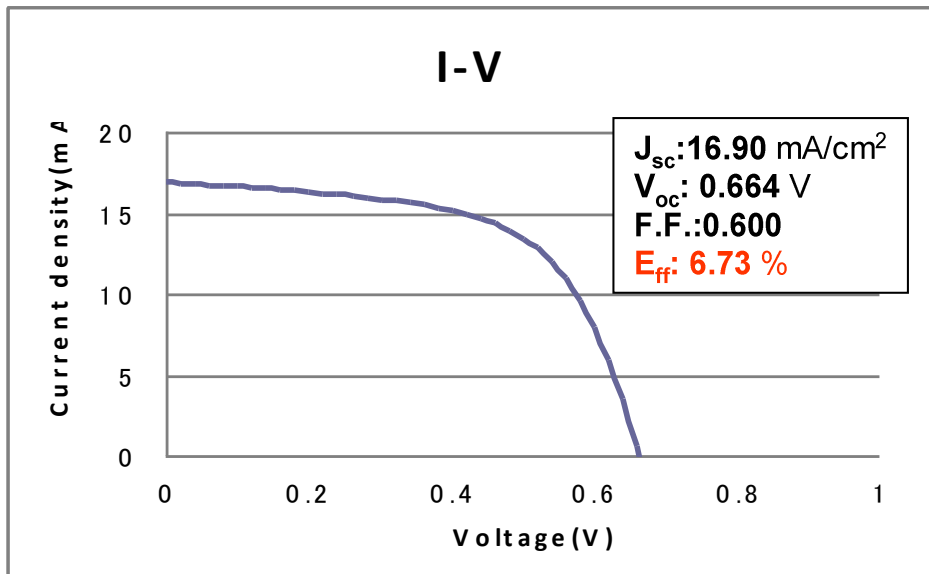


図 III-2-(ロ)-B-1-b2 (1) G5 装置による a-SiGe 膜を用いた単接合セルの電流密度分布

セル構成 5cm角基板(1400サイズ基板上に設置) セル面積 1cm²
 Asahi-VU/p(kaneka a-SiC) / air brake / i:a-SiGe (G5 PVTEC Tsukuba)
 / air brake / n ZnO Ag (PVTEC 小面積設備)



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b2 (2) G5 装置による a-SiGe 膜を用いた単接合セルの I-V カーブ

更に、より本質的な高品質化の実現のため、G5 装置での最適化のみならず、トライオード型 CVD や新たな原料ガスの適用等の製膜処方面、TCO 基板の形状が a-SiGe 膜質へ与える影響及びその最適化、及びデルフト大学や EPFL/IMT 等の外部機関の優れた知見を用いた膜物性分析等の 3 方面からのアプローチによる高品質化を検討中であり、途中経過としてトライオード型 CVD を用いることで通常の平行平板型 CVD より高いセル特性を確認した。

b-3. VHFプラズマを用いた微結晶シリコン高速大面積製膜技術の開発 (パナソニック株式会社)

○H24 年度末中間目標

- ① プラズマ高精度評価技術 (G5 サイズでの実製膜速度予測誤差 : <10%)
- ② 基板/電極(E/S)間距離 10 mm 以上で微結晶 Si 薄膜の高速製膜技術 (>1 nm/sec)

○成果

微結晶Si膜の高品質化、高能率・均一製膜に重要な原子状水素(発光水素(H^{*}), 非発光水素(H))の実測システムを構築し(図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b3(1))、SiH₄/H₂プラズマ中におけるH^{*}およびH密度の実測を可能にした。また、H密度測定におけるSiH₄添加時のSiH₄分子による励起光吸収の問題を明らかにし、これを抑制するために新たに設計・開発した励起光の吸収長を制御できるプローブを水素原子モニタ装置へ実装した。さらに、吸収長を制御することで、水素原子モニタ装置における測定可能密度領域の上下限値が10¹⁰ ~ 10¹⁶ cm⁻³オーダーとなり、微結晶Siの高压高速製膜中に存在するH原子密度(10¹³ ~ 10¹⁴ cm⁻³)の測定を可能にした。(図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b3(2))。

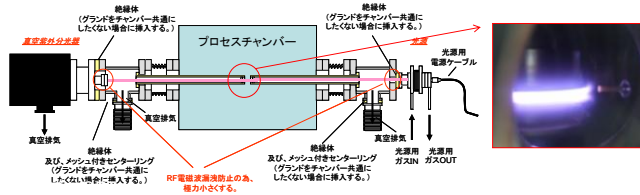


図 III-2-(ロ)-B-1-b3(1)
水素原子の実測システム

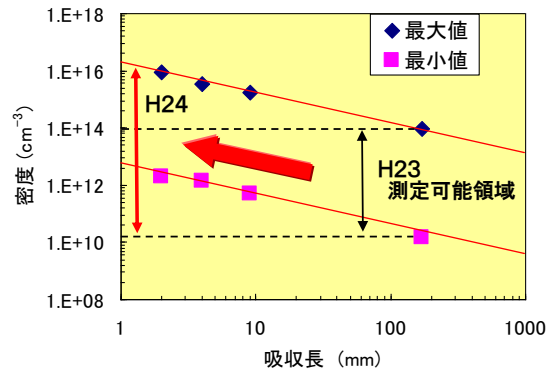


図 III-2-(ロ)-B-1-b3(2)
測定可能密度領域

また、製膜速度予測に必要なフラックス等を計算する弊社独自の高圧SiH₄プラズマシミュレータ (High pressure SiH₄ plasma simulator: HiP-SPS) を用いて計算したH原子密度と水素原子モニタ装置を用いて実測したH原子密度を比較し、計算値に対する補正係数を算出した。これにより、微結晶Si製膜中におけるH原子密度の実測値を高圧SiH₄/H₂プラズマシミュレータを用いて、ほぼ再現することに成功した(図 III-2-(ロ)-B-1-b3(3))。

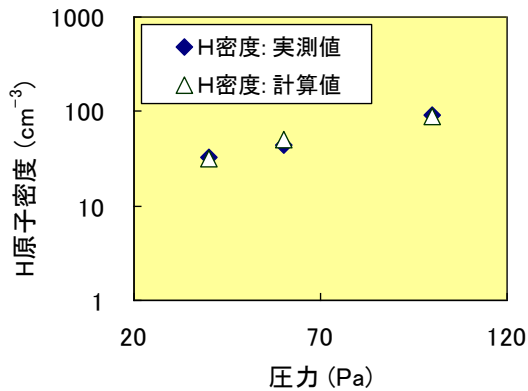


図 III-2-(ロ)-B-1-b3(3) 水素原子密度の計算値と実測値 (SiH₄/H₂プラズマ)

このHiP-SPSを用いて小面積における微結晶Siの製膜速度を予測した結果、実測値0.87 nm/sec に対して0.78 nm/sec という予測値が得られ、予測誤差-10.3%を確認した。(図 III-2-(ロ)-B-1-b3(4))。

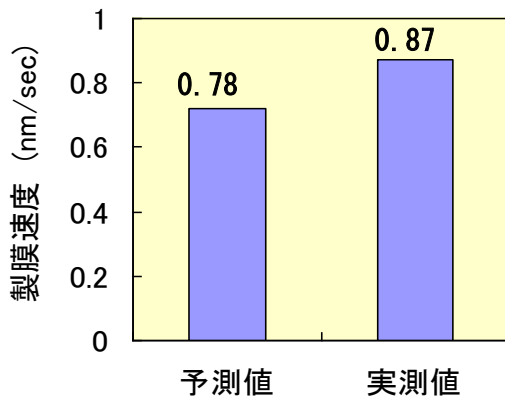
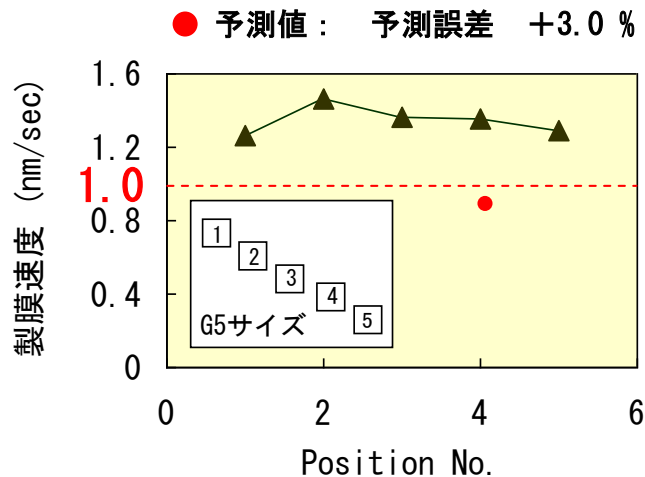


図 III-2-(ロ)-B-1-b3(4)
小面積サイズ微結晶Siにおける製膜速度の予測値と実測値

上記システムを用いて、大面積均一化に有効な基板/電極(E/S)間距離 10 mm 以上で製膜速度 1.0 nm/sec 以上を実現する製膜条件を検討した。予測値が 1.4 nm/sec となる製膜条件で大面積(G5)において微結晶 Si 膜を実製膜した結果、製膜速度 1.3 nm/sec (均一性 7%) が得られ、製膜速度 1.0 nm/sec 以上を達成すると共に、製膜速度予測誤差約+3%が得られ、H24 年度末中間目標である製膜速度予測誤差 10%を達成した。(図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b3(5))。

製膜速度予測誤差に関しては、プロセス(大面積 or 小面積など)における予測誤差にバラツキがあることから、今後、プラズマシミュレーション技術の改善による予測精度の向上を図る。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b3(5) 大面積サイズ微結晶Siにおける製膜速度の実測

b-4. バンドプロファイル評価技術の開発とプラズマ励起周波数効果の解明 (シャープ株式会社)

a) 欠陥や結合状態とバンドプロファイルとの相関の調査

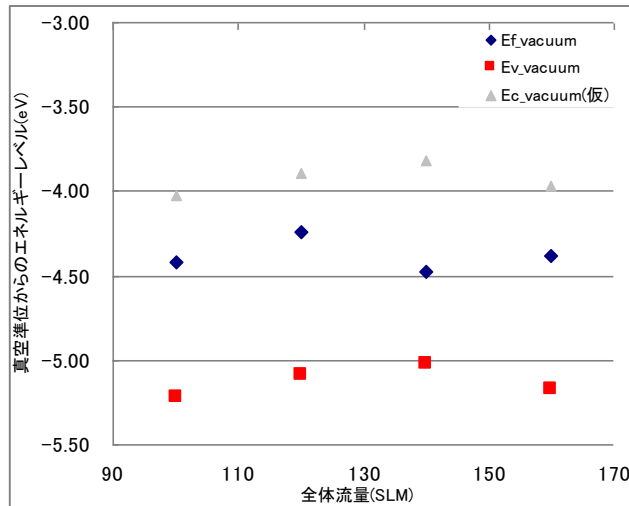
G5 サイズにおける 60MHz 放電での微結晶シリコン i 層のバンドプロファイル分析を実施。以下 3 つの測定方法より i 層のバンドプロファイルを調査し、図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4 (1)を得た。

光電子分光測定 → イオン化ポテンシャル (E_{v_vacuum})

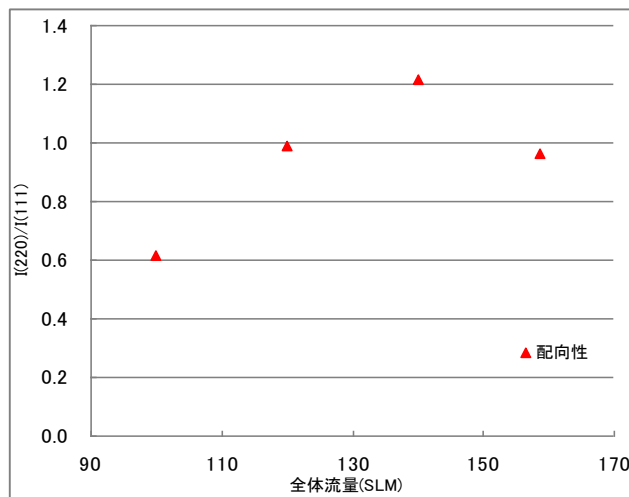
ケルビン法測定 → 仕事関数 (E_{f_vacuum})

光学測定 → バンドギャップ (E_{c_vacuum})

このとき光学測定によるバンドギャップは全て 1.2eV と仮定。



図III-2-(ロ)-B-1-b4(1) i層バンドプロファイル



図III-2-(ロ)-B-1-b4(2) XRDによるi層(220)配向性

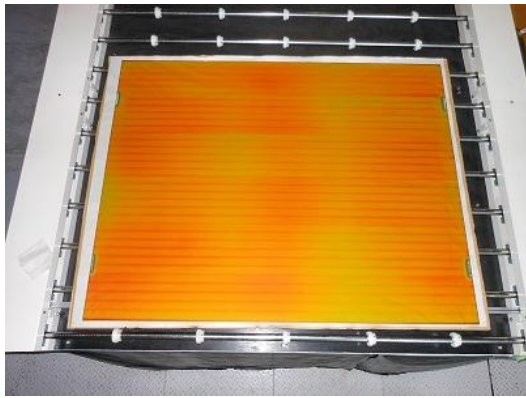
ここから、全体流量 140SLM において i 層のフェルミ準位が中央にシフトするとき、図 III-2-(ロ)-B-1-b4 (2) より (220) 配向性が極大値を持つことがわかる。微結晶 Si の i 層バンドプロファイル分析において (220) 配向性との相関が得られた。

b) プラズマ励起周波数変化に伴う、特性・分布変化の分析手法確立

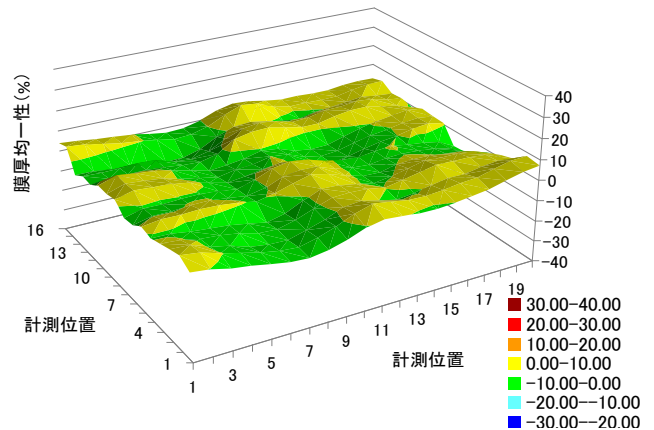
目標：G5 サイズにおける高周波（60MHz）p, n 層製膜技術

p, n 層、膜厚 30nm 以下にて、結晶化度 30%以上、膜厚分布±10%以下

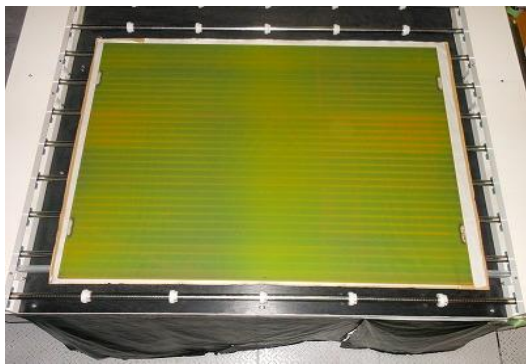
結果として、中央部と端部で位相変調やガス流量を分割供給することにより p 層は膜厚分布±8.5%、n 層は±9.2%を得た。膜厚が 30nm 以下で結晶化度 30%以上の場合、エリプソのモデルフィッティングが合わないため、今回のデータは膜厚 50nm-80nm を使用している。どちらの場合も十分に結晶化度があるため、薄膜にしたときの結晶化度の問題は無く、均一化の分布改善目標はほぼ達成された。



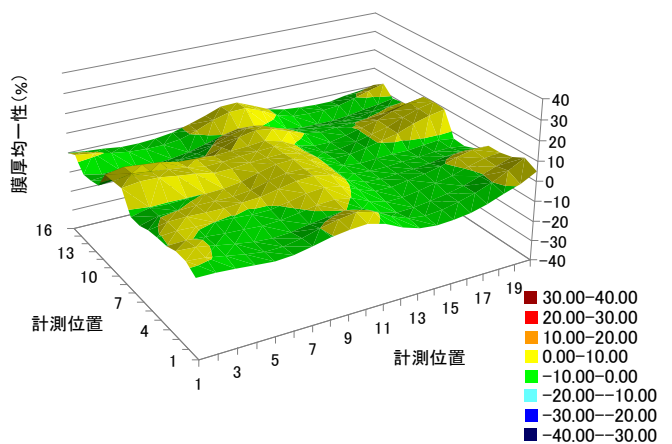
図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4(3) p層均一化外観写真



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4(4) p層均一化エリプソ結果



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4(5) n層均一化外観写真



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b4(6) n層均一化エリプソ結果

c) 界面構造、セル構造におけるバンドプロファイル評価・制御技術の確立

目標：界面層の最適化により μc -Si 太陽電池の開放電圧で 550mV 以上

微結晶 Si 太陽電池のセルの場合、SnO₂ 基板に直接セルを作製すると水素高希積によって SnO₂ 基板が黒色化、導電性が劣化。耐水素対策として、5月下旬に G5 基板サイズの GZO 付き TCO 基板を導入し、微結晶 Si 太陽電池のセル試作を開始。

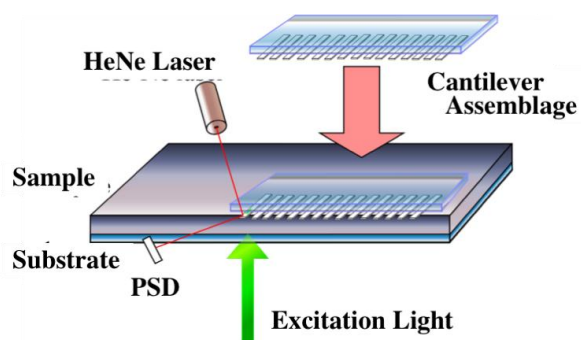
現在、セル条件が最適化できていないため、開放電圧は 424mV。今後、各層の最適化とバンドプロファイル分析を駆使して開放電圧 550mV を目指す。

b-5. 大面積薄膜シリコン太陽電池の欠陥評価手法に関する研究開発（国立大学法人岐阜大学 野々村研究室）

薄膜シリコン太陽電池において6m²の大面積基板に対応可能な光活性層の欠陥評価手法を開発することを目標とし、接触マルチカンチレバー方式光熱変換分光法および非接触式光熱輻射分光法を用いた欠陥評価技術の開発に取り組んだ。以下に、成果に

ついて述べる。

接触マルチカンチレバー方式光熱変換分光法は、カンチレバーを用いた光熱変換分光法^{Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5(1)}により薄膜シリコンの光吸収係数スペクトルを測定する際、複数のカンチレバーを使用することにより大面積試料の欠陥評価を可能とする手法である。図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5(1)に測定系の概念図を示す。カンチレバーを用いた光熱変換分光法^{Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5(1)}では試料に光を照射したときの温度上昇を、試料に接触させたポリエチレン製カンチレバーの曲げに変換し、この曲げを光てこ法により検出する。光吸収係数 α の大きさに応じてカンチレバーの曲げ量は大きくなるため、サブバンドギャップ領域の光吸収係数 α を測定することにより、試料の欠陥密度評価が可能となる。このような評価を図のような複数のカンチレバーを用いて行うことにより、大面積試料の欠陥評価が可能となると思われる。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5(1) 接触マルチカンチレバー方式光熱変換分光法の概念図。

これまでに、励起光とカンチレバーの幅を同程度とすること、および複数のカンチレバーの固定を一括方式から個別方式に変更するなどの技術的検討を行った。このことにより、アモルファスシリコン(a-Si:H)薄膜においてサブバンドギャップ領域($h\nu < 1.7$ eV)の光吸収係数 α が $\sim 10^1 \text{cm}^{-1}$ まで測定可能となった。

一方、非接触式光熱輻射分光法は、光励起キャリアの非輻射再結合による試料の温度上昇を直接的に測定して、試料の光吸収スペクトルを評価する方法である。励起光照射による試料の温度上昇 ΔT は

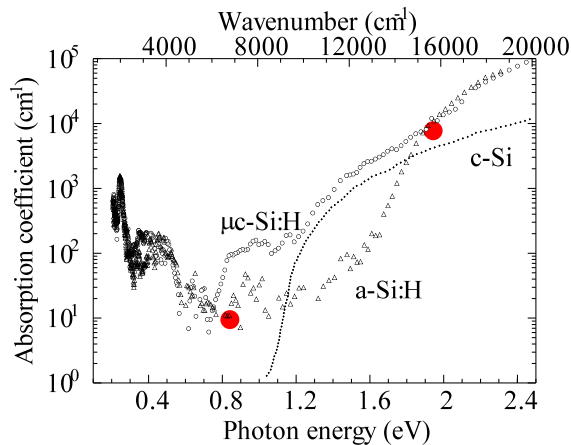
$$\Delta T = \alpha I_0 V / 2 \pi^{1/2} \kappa r \quad \text{式Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5(1)}$$

で表わされる^{Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5(2)-(4)}。ここで、 I_0 は光出力、 V は光照射下の試料の体積、 κ は試料の熱伝導度および r は光のスポット半径である。この式を用いることにより、以下の方法で欠陥密度に関連するサブバンドギャップ領域の光吸収係数 α を評価することができる。はじめに、バンドギャップより大きなフォトンエネルギーを有する光を試料に照射し、そのときの試料の温度上昇 ΔT を測定する。次にサブバンドギャップ光を照射するのであるが、式Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5(1)より

$$\alpha \sim \Delta T \kappa r / I_0 V \quad \text{式Ⅲ-2-(ロ)-B-1-b5(2)}$$

の関係があるため、同じ ΔT となるように光強度 I_0 を調整すれば、 I_0 の逆数をモニターすることにより光吸収係数 α が評価可能となる。本研究では励起光源としてHe-Neレーザー($h\nu = 2.0$ eV)および半導体レーザー($h\nu = 0.84$ eV)を用い、試料の温度はサーモグラフィにより測定した。

光吸収係数 α の評価結果を図Ⅲ-2-(□)-B-1-b5(2)の●印で示す。試料には膜厚1.3 μm のa-Si:Hを用いた。He-Neレーザによる温度上昇 ΔT は光出力10mWで $\sim 1\text{K}$ であった。また、半導体レーザにより同じ温度上昇 ΔT を得るのに必要な光出力は10Wであった。ここで、 $h\nu = 2.0\text{ eV}$ (He-Neレーザ)におけるa-Si:Hの光吸収係数 α は $\sim 10^4\text{ cm}^{-1}$ であるので、 $h\nu = 0.84\text{ eV}$ (半導体レーザ)におけるa-Si:Hの光吸収係数 α は $\sim 10^1\text{ cm}^{-1}$ と評価することができる。この値は他の光熱変換分光法(光熱ベンディング分光法)で評価した光吸収係数 α Ⅲ-2-(□)-B-1-b5(5)と良い一致を示した(図の△印)なお、実験に用いたa-Si:Hにおける欠陥密度は $\sim 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ である。



図Ⅲ-2-(□)-B-1-b5(2) 光熱輻射分光法で評価した a-Si:H の光吸収係数(●印)。他の光熱変換分光法(光熱ベンディング分光法)で評価した a-Si:H の光吸収スペクトルⅢ-2-(□)-B-1-b5(5)を△印で示す。

この手法をX-Yステージ上に設置した試料で行い光吸収係数 α の面分布を測定することにより、大面積試料の欠陥密度評価が可能となると思われる。現在までに、小面積(18mm x 6mm)a-Si:Hを用いて(3 x 5)の15箇所における光吸収係数 α の面分布評価を試み、 $2.8 \times 10^1\text{ cm}^{-1}$ から $11 \times 10^1\text{ cm}^{-1}$ の分布を有している結果を得た。

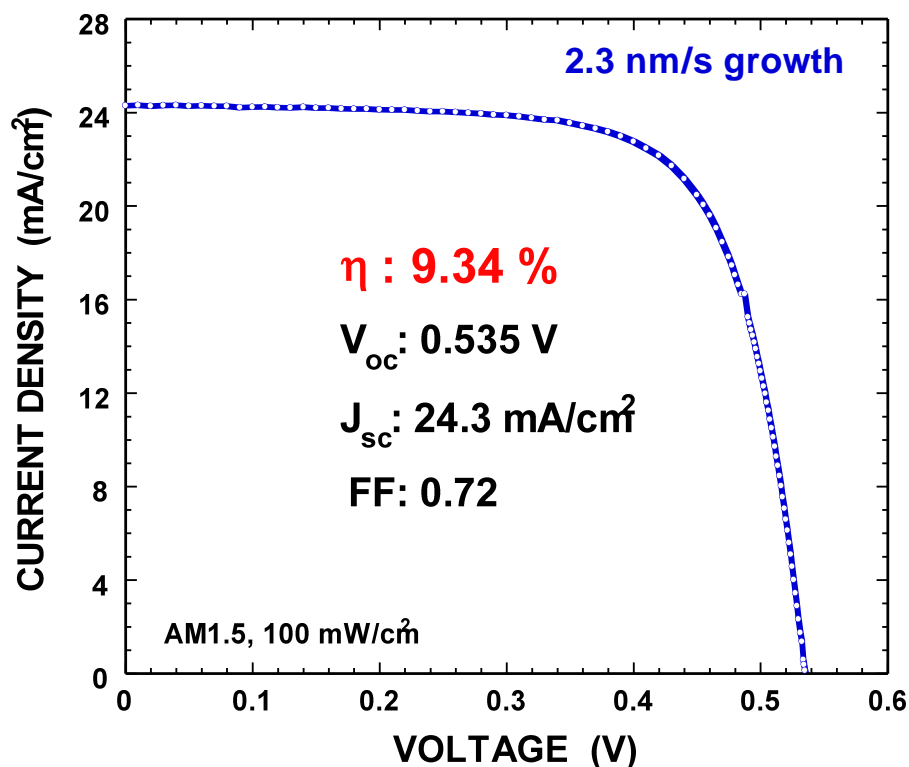
非接触式光熱輻射分光法は測定の容易さの観点から、実用的な大面積試料の光吸収係数(欠陥密度)評価に展開可能(基板の大きさ、厚さ、試料雰囲気を問わない欠陥評価手法)と思われる。また、光吸収係数 α は $\sim 10^1\text{ cm}^{-1}$ の感度に到達したため、原理的に欠陥密度 $10^{16}\sim 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ の検出が可能である。励起光強度の改善等、測定系の高感度化により、さらに高品質なシリコン系薄膜における欠陥密度の評価も可能であると思われる。

参考文献

- Ⅲ-2-(□)-B-1-b5(1) T. Gotoh, Rev. Sci. Instrum., 80 (2009) 074902.
- Ⅲ-2-(□)-B-1-b5(2) J. P. Gordon et al., J. Appl. Phys., 36 (1965) 3.
- Ⅲ-2-(□)-B-1-b5(3) K. Weiser et al., Appl. Phys. Lett., 22 (1973) 48.
- Ⅲ-2-(□)-B-1-b5(4) H. Hisakuni and K. Tanaka, Appl. Phys. Lett., 65 (1994) 2925.
- Ⅲ-2-(□)-B-1-b5(5) J. Kitao et al., Analytical Sciences Special Issue, 17 (2001) s302.

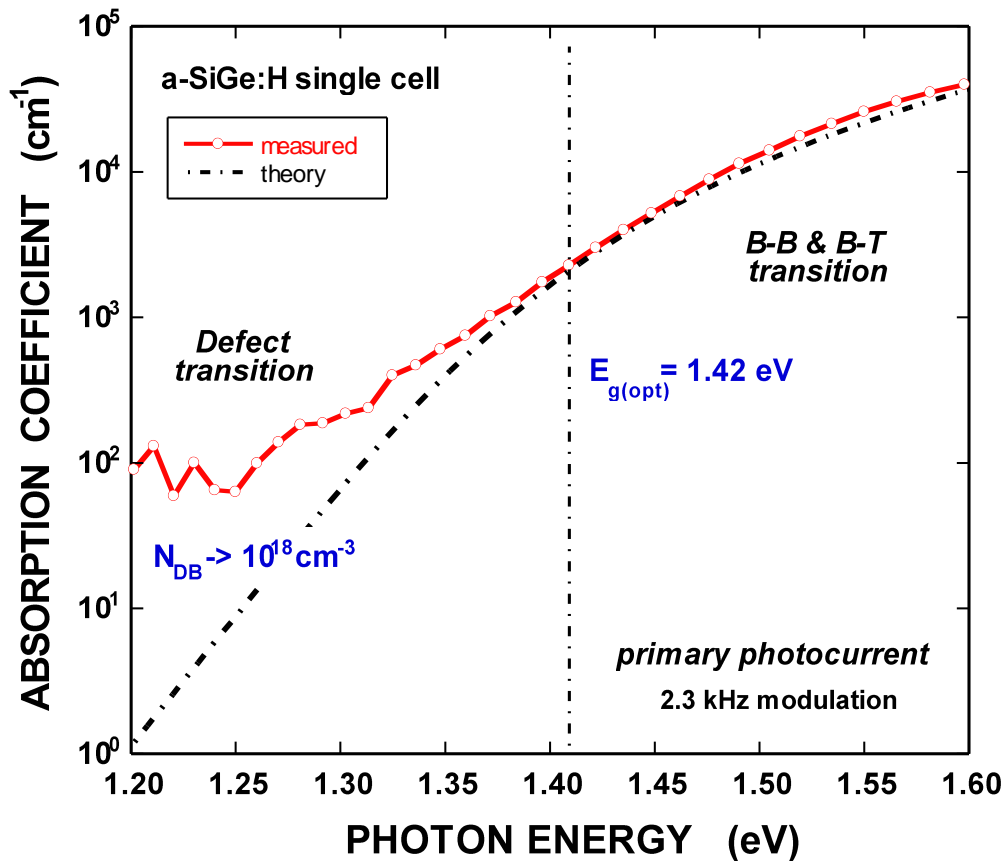
b-6. 膜質・接合界面特性の評価と制御技術開発 (国立大学法人大阪大学 岡本研究室)

リアルタイムプラズマ発光分析により、高速製膜微結晶i形Si製膜初期層 (n/i界面近傍) での高次シラン系粒子堆積の抑制、電子温度低減やP原子オートドーピング阻止などのプラズマプロセス制御が、接合界面ならびに光電流活性層特性の改善に重要であるとの知見を得た。この知見を踏まえて、1) 高速製膜微結晶アンドープSi製膜初期プラズマの制御 (n/i界面、i層特性改善) と、2) 製膜最終段階で「欠陥制御層」を設ける (i/p界面特性) 試みを行なった。その結果、図III-2-(ロ)-B-1-b6(1)に示すように、2nm/s以上の高速製膜条件で作製された微結晶Si n-i-pサブストレート型単接合太陽電池で、開放端電圧535mVにて変換効率9.34%を達成した。この値は、2nm/sを超える製膜速度では、世界最高値である。



図III-2-(ロ)-B-1-b6(1)

さらに、実際の太陽電池において様々な膜質や界面特性を評価解析する手法を提案し、さらなる変換効率向上のための膜質や接合界面制御策確立に関する予備的な研究開発を開始した。図III-2-(ロ)-B-1-b6(2)に、アモルファスSiGe単接合太陽電池におけるサブバンドギャップ光電流スペクトルの測定例を示しているが、これより膜中の欠陥密度の大凡を判定することができ、高品質に向けたプラズマプロセスやデバイス構成技術の改善への指針が得られるものと期待される。



☒ III-2-(□)-B-1-b6(2)

表Ⅲ-2- (ロ) -B-1(1) 研究開発項目ごとの成果・達成度

中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
<p>b-1-1. 大面積高生産性製造装置の開発（三菱重工業株式会社） （平成 24 年度末中間目標） マルチロッド電極を用いた、G5 相当サイズのガラス基板を処理可能な規模の装置において、μc-Si 製膜において$\pm 10\%$以下の膜厚均一性の達成</p>	<p>G5 サイズ（1100×1400×厚さ 4mm）のガラス基板上に製膜した μc-Si 膜で$\pm 9.9\%$の膜厚均一性を達成した。</p>	○	
<p>b-1-2. 大面積高生産性製造装置開発に向けた超高周波プラズマ源の開発 a. 共振電極対アレイ方式プラズマ源（東京エレクタロン株式会社、国立大学法人東北大学 平井研究室） （平成 24 年度末中間目標） VHF プラズマ周波数（60MHz 以上）に対応する波長λに対して長さ $1/4\lambda$以上、幅 $1/10\lambda$以上の電極を用いて μc-Si 薄膜の製膜速度 1.5nm/s 以上、$\pm 10\%$以下の膜厚均一性を達成しうる、$\pm 10\%$以内のプラズマパラメータの均一性の達成</p>	<p>長辺均一性確認用プラズマ可視化本機（2.2m×0.56m 電極）を製作し、定在波が立たない事を目視確認し、H2 式プラズマ源（東京エレクタロン株式会社、国立大学法人東北大学 平井研究室）にて、$H\alpha$ 強度：$\pm 9.85\%$以下、電界強度：$\pm 8.8\%$以下達成。 また、短辺均一性に関しては、十分な均一性目視確認済。</p>	○	
<p>b-1-2. 大面積高生産性製造装置開発に向けた超高周波プラズマ源の開発 b. 大面積化に向けたダブルリッジ導波管方式プラ</p>	<p>電磁界シミュレーションの結果を元に、周波数 450MHz に対して各辺が $1/3\lambda$ 以上のプラズマ生成領域を持つ小型のプラズマ可視化装置</p>	△	<p>位相変調時に TWC にプラズマが局在化しないような導波管の改良。</p>

<p>ズマ源の検証（三菱重工業株式会社、国立大学法人九州大学 河合研究室） （平成 24 年度末中間目標） VHF プラズマ周波数（60MHz 以上）に対応する波長λに対して長さ $1/4\lambda$ 以上、幅 $1/10\lambda$ 以上の電極を用いて μc-Si 薄膜の製膜速度 1.5nm/ s 以上、$\pm 10\%$以下の膜厚均一性を達成しうる、$\pm 10\%$以内のプラズマパラメータの均一性の達成</p>	<p>を作製。 上記のプラズマ可視化装置において大気圧下で電界強度計測を行い、位相変調時にプラズマ生成領域全体に渡って均一な電界強度となることを確認。シミュレーション予測値と同じ $\pm 3.6\%$の電界強度分布率を得た。 プラズマ可視化装置で H 方向のプラズマパラメータ計測を行い、$\pm 9.6\%$の電子密度分布および $\pm 3.8\%$の電子温度分布を達成し、H 方向は理論通り均一なプラズマ分布が得られることを確認。</p>		<p>高圧力下で均一なプラズマ生成をできるような導波管の改良およびプロセス条件の調整。 均一なプラズマを生成可能なプロセス条件範囲の把握。</p>
<p>b-1-3. 超高周波を用いた大面積製膜技術の開発（三菱重工業株式会社） （平成 24 年度末中間目標） 100~120MHz の超高周波を G5 サイズのマルチロッド電極方式 CVD 装置に導入し、反射電力比率 20%以下とする。</p>	<p>マルチロッド型電極方式の CVD 装置にて高周波電源周波数 60MHz での反射電力確認を実施し、幅広い製膜条件下となることを確認した。 現在は 100MHz の高周波電源の導入に向けて装置の設計・製作を実施中。</p>	△	<p>高周波電源周波数に対する CVD 装置の電気特性の把握</p>
<p>b-2. VHF プラズマを用いたシリコン合金系薄膜高速大面積製膜技術の開発（平成 24 年度末中間目標） G5 サイズ VHF プラズマ CVD 装置における 10%以下の膜厚分布の達成のもと、μc-Si 或いは a-SiGe</p>	<p>G5 サイズ VHF プラズマ CVD 装置による a-SiGe を活性層に用いた単接合太陽電池セルにおいて、短絡電流分布 5.5%を達成。</p>	○	<p>24 年度中間目標は達成済み。ただし、現時点でも良好な膜質が得られているものの、更なる高品質化に向け、G5 装置での最適化、トライオード型 CVD や新たな原料ガスの適用等の製膜処方面、a-SiGe 膜質に最適な TCO 形状、及び外部機関等の</p>

<p>を活性層に用いたセルにおいて10%以下の短絡電流分布の達成。</p>			<p>優れた知見を用いた膜物性分析を加速させる。</p>
<p>b-3. VHF プラズマを用いた微結晶シリコン高速大面積製膜技術の開発 (平成 24 年度末中間目標) μc-Si 膜のプラズマ CVD 製膜プロセスにおいて水素原子濃度を実測しこれをシミュレーションで再現するとともに、G5 サイズでの実製膜速度を 10% の誤差で予測する。また、μc-Si 膜のプラズマ CVD 製膜プロセスにおいて、電極-基板間距離 10mm 以上で製膜速度 1nm/sec 以上を得る。</p>	<p>原子状水素の実測システムを構築し、独自の高压 SiH_4/H_2 プラズマシミュレータを用いて微結晶 Si 製膜プラズマ中の H 原子密度の実測値をほぼ再現することに成功した。 高压 SiH_4/H_2 プラズマシミュレータを用いた微結晶 Si 製膜速度予測システムを構築、基板/電極 (E/S) 間距離 10 mm 以上で製膜速度 1.0 nm/sec 以上を実現する製膜条件を検討し、予測値 1.4 nm/sec に対して実測値が 1.3 nm/sec を大面積製膜 (G5) において確認した。製膜速度予測誤差は約+3 %となり、H24 年度末中間目標である製膜速度予測誤差 10% を達成するとともに、電極-基板間距離 10mm 以上で製膜速度 1nm/sec 以上を達成した。</p>	<p>○</p>	<p>プラズマ反応、表面反応の詳細を検討し、プロセス依存性を考慮した製膜速度予測精度の更なる向上を図る。</p>
<p>b-4. バンドプロファイル評価技術の開発とプラズマ励起周波数効果の解明 (平成 24 年度末中間目標) 界面層の最適化により μc-Si 太陽電池の開放電圧で 550mV 以上を得る。また、G5 サイズにおける</p>	<p>5 月下旬に G5 基板サイズ GZO 付き TCO 基板を導入し、μc-Si 太陽電池セルの試作開始。現在、開放電圧 424mV。 中央部と端部で位相変調やガス流量を分割することにより p 層は膜厚分布 $\pm 8.5\%$、n 層は $\pm 10.6\%$ を得た。</p>	<p>△ ○</p>	<p>各層の高品質に向けた条件出しと G5 基板でのセル作製を加速させ、開放電圧 550mV を目指す。 上記の検討の合間に n 層均一化の試験を入れ、膜厚分布を $\pm 10\%$ 以内にする。</p>

60MHz 放電での微結晶シリコン p, n 層製膜において、膜厚 30nm 以下にて、結晶化度 30%以上、膜厚分布±10%以下を得る。			
b-5. 大面積薄膜シリコン太陽電池の欠陥評価手法に関する研究開発（平成 24 年度末中間目標） a-Si、 μc -Si、 μc -SiGe などの様々な材料に光熱変換分光法を適用し、セル特性との相関を明らかにする。	接触マルチカンチレバー方式光熱変換分光法および非接触式光熱輻射分光法を用いた欠陥評価技術の開発に取り組み、欠陥密度評価に関連するサブバンドギャップ領域の光吸収係数が 10^1cm^{-1} まで測定可能となった。	△	光吸収係数と ESR 等により評価した欠陥密度との相関係数決定のための測定感度向上
b-6. 膜質・接合界面特性の評価と制御技術開発（平成 24 年度末中間目標） 膜質の評価および接合界面特性の評価を踏まえて薄膜シリコン系太陽電池の高効率化に資する具体的かつ実用的な制御技術を提案。	新しいプラズマプロセス制御技術を開発し、高速製膜条件で作製された微結晶 Si 単接合太陽電池で、変換効率 9.34%を達成した。さらに、実際の太陽電池において様々な膜質や界面特性を評価解析する手法を提案し、さらなる変換効率向上のための膜質や接合界面制御策確立への支援ができることを示した。	○	微結晶 Si だけではなく、アモルファス Si 系、特にアモルファス SiGe を用いた太陽電池における膜質や接合界面特性を評価解析し、高品質・高効率化に向けたプラズマプロセス制御法を提案する。

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

表Ⅲ-2-（ロ）-B-1(2) 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

	H22	H23	H24	計
特許出願（うち外国出願）	0	5（3）	0	5件
論文（査読付き）	7	5	3	15件
研究発表・講演（うち国際会議）	9（5）	17（9）	2（2）	28件
新聞・雑誌等への掲載	0	0	0	0件
受賞実績	0	0	0	0件
展示会への出展	0	0	0	0件

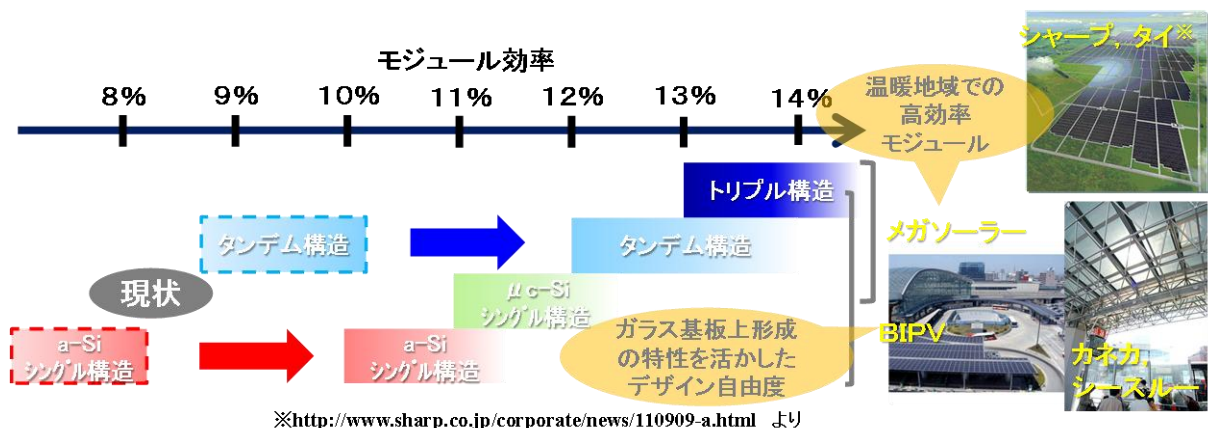
2. 実用化・事業化見通し

本プロジェクト成果の実用化は、本コンソーシアム企業が2017年度において、G5サイズで変換効率～14%（出力200W以上）でかつコスト競争力のある生産プロセスで事業化するための装置・技術を提供することを指すが、薄膜シリコンの大面積高生産性製膜技術の開発においては、低コスト化を実現する実生産スケールの装置およびプロセス技術を確立することが課題である。

これを達成するためには、高周波を用いることによりG5サイズにおいて既に世界最高水準の製膜速度を有し、今回高い面内膜厚均一性をも達成した、マルチロッド電極方式CVD装置の処理面積速度を更に向上させ、G5基板サイズを基本とした実機検証によるCVD装置技術を確立することが必要である。また、処理面積速度向上に伴い必要となるシングルチャンバーもしくはより少ないチャンバーによるデバイス形成プロセスを確立することが必要である。更には競争的開発として進めた新規大面積プラズマ源として共振電極対アレイ方式を採択し、本方式のCVD装置におけるデバイス性能検証を実施した後、G8.5以上の基板サイズでの実機検証によるCVD装置最適化を図ることにより、BIPVといった大面積基板を必要とする市場への対応準備も進めておく必要がある。

これら装置・プロセス技術開発に関しては、現行のマルチロッド電極方式CVD装置を含め実用化検討を早い段階で開始し、新規CVD装置の事業化とコンソ内企業への導入展開を進めていく。

また、これらの技術開発による2017年度における事業化イメージとしては、高効率モジュールによる温暖地域におけるメガソーラー展開や、またBIPV（建材一体型太陽電池モジュール）に対して、高効率モジュールだけでなく、微結晶シリコンやアモルファスシリコンといった単接合モジュールによる展開も進むことが考えられる。

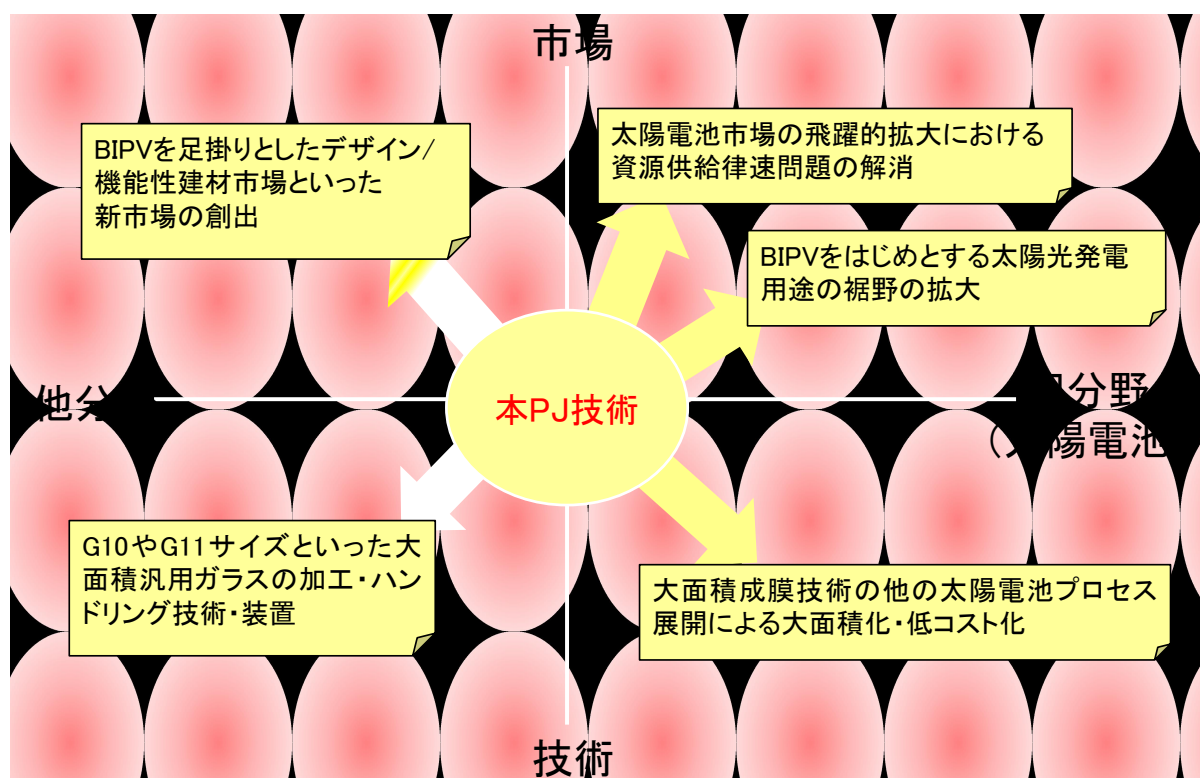


図Ⅲ-2-（ロ）-B-2(1) 2017年度の事業化イメージ

3. 波及効果

本プロジェクトの開発技術により、特に薄膜シリコン太陽電池が得意とする BIPV 市場拡大による太陽光発電用途の裾野を拡大、および、それに伴うデザイン／機能性建材市場といった新たな市場の創出が期待される。また大面積化要求から、G10、G11 といった大面積ガラス基板の加工やハンドリング、施工技術等の装置・技術開発への波及が期待できる。

さらに、設備コストの低減によるコスト競争力向上により、太陽電池市場の飛躍的拡大において懸念されている、結晶シリコンや薄膜化合物系太陽電池で顕在化してくると予測されている資源供給律速問題の解消に大きく貢献することができる。



図Ⅲ-2- (ロ) -B-3(1) 薄膜シリコン太陽電池プロジェクト薄膜シリコンの大面積高生産性製膜技術の開発の波及効果

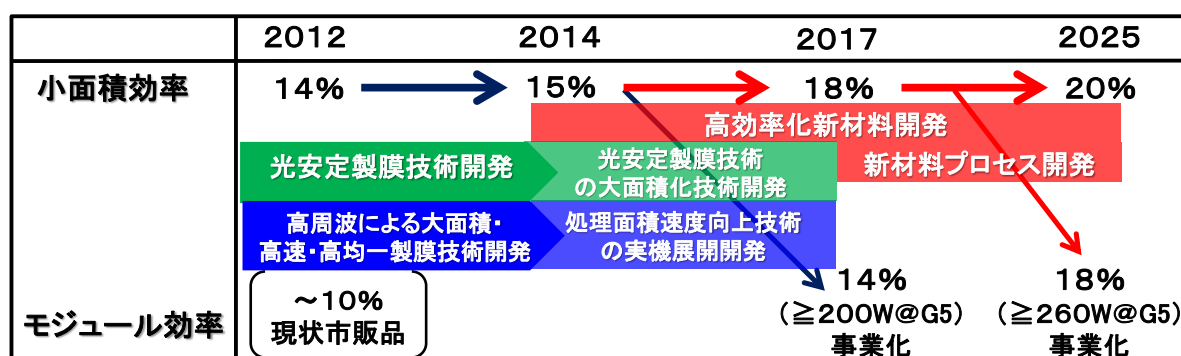
4. 今後の展開

今後の太陽電池市場においては、メガソーラーといった用途のみでなく、CO₂排出ゼロ政策やゼロ消費エネルギービル推進といった理由による、ビルをはじめとした幅広い建築物の部材用途として展開が進み、2016年には127億ドルの市場が予測されている^{Ⅲ-2-(ロ)-B-34(1)}。ガラス基板上形成とそのモジュール形成プロセスから、薄膜シリコン太陽電池は、デザイン自由度の高さやシースルー型構造の形成等、他のタイプの太陽電池では作製困難なデザイン・機能を有する太陽電池製造が可能である。このため、大面積化により製品サイズの自由度を広げられる可能性も含め、この分野での急速なシェア拡大が期待される。

また、これまでの太陽電池市場は7割以上を占めるヨーロッパが主であったが、今後は新興国を中心とした他の地域市場も拡大し、2016年にはヨーロッパ以外が7割程度を占めると予測されている。その中で、中国や中東・アフリカ地域、環太平洋地域の市場は、政策主導シナリオでは2016年に29GW規模、市場全体の1/3程度を占めると予測されている。^{Ⅲ-2-(ロ)-B-4(2)} さらに、これら地域に相当するいわゆるSunbelt地域の累積導入量は、加速成長シナリオにおいて2030年に403GWが予測されている。^{Ⅲ-2-(ロ)-B-4(3)}

これら低緯度・中緯度地域においては、結晶シリコン太陽電池に比べて低い負の温度特性や短波長側の高い感度といった薄膜シリコン太陽電池の特性により、年間総発電量としては結晶シリコン太陽電池を上回る発電量も期待される。また、豊富な資源量と薄膜といった少ない材料使用量から、このような大きな太陽電池導入量の伸びに対しても、高い資源供給安定性の確保が見込める。このため、薄膜シリコン太陽電池のCVD装置・プロセス開発によるモジュールコスト低減を図ることにより、今後伸長していくこれら低緯度・中緯度地域市場を中心とした展開が期待される。

これら市場の機会と期待に応えるべく、PV2030+の技術ロードマップを基本として、2017年にはモジュール効率14%での事業化を計画しているが、この事業化に対しては、現行プロジェクトで開発した高スループット化や大面積化による低コスト装置・プロセス技術を実機展開して実用化し、市場競争力のあるコストを同時に目指す。



図Ⅲ-2-(ロ)-B-4(1) 薄膜シリコン太陽電池プロジェクトの今後の展開

参考文献

Ⅲ-2- (口) -B-4(1) MarketsandMarkets, Global BIPV Market (2011-2016),
report description article

Ⅲ-2- (口) -B-4(2) EPIA, Global market outlook 2012

Ⅲ-2- (口) -B-4(3) EPIA, Unlocking the Sunbelt Potential of Photovoltaics

5. 特許論文リスト

表Ⅲ-2-(ロ) -B-5(1) 特許リスト

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 東北大学	PCT/JP201 2/ 001072	PCT	2012/2/17	出願	プラズマ処理装置お よびプラズマ処理方 法	平山昌樹
2	国立大学法人 東北大学	PCT/JP201 2/ 001252	PCT	2012/2/23	出願	プラズマ処理装置お よびプラズマ処理方 法	平山昌樹
3	国立大学法人 東北大学	PCT/JP201 2/ 001304	PCT	2012/2/24	出願	プラズマ処理装置お よびプラズマ処理方 法	平山昌樹
4	三菱重工業株 式会社	特願 2011-2396 23	国内	2011/10/31	出願	真空処理装置	大坪 栄一郎 他
5	三菱重工業株 式会社	特願 2011-2396 46	国内	2011/10/31	出願	真空処理装置	中尾 禎子 他

表Ⅲ-2-(ロ) -B-5(2) 論文リスト

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
1	Norimitsu Yoshida, Sho Terazawa, Atsuteru Takeuchi, Nobutaka Yoneyama, Tomo-o Morino, Zhao Jun, Hironori Natsuhara and Shuichi Nonomura	岐阜 大学	Preparations of P- and N-doped hydrogenated microcrystalline cubic silicon carbide films by VHF plasma enhanced chemical vapor deposition method for Si thin film solar cells	Physica Status Solidi (c), Vol.7, No.3-4, pp.790-792	有	2010
2	H. Natsuhara, T. Tatsuyama, M. Ushiro, M. Furuhashi, T. Fujii, F. Ohashi, N. Yoshida, S. Nonomura	岐阜 大学	Preparation of SnO ₂ thin films at low temperatures with H ₂ gas by the hot-wire CVD method	Thin Solid Films, Vol.519, No.14, pp.4538-4541	有	2011

3	H. Natsuhara, S. Miura, K. Hori, T. Kumasawa, Y. Noda, Z. Xiang qu, F. Ohashi, N. Yoshida and S. Nonomura	岐阜 大学	Preparation of p-type NiO film for a-Si solar cells	J. Non-Cryst. Solids, in press	有	2012
4	Norimitsu Yoshida, Sho Terazawa, Kotaro Hayashi, Tomonari Hamaguchi, Hironori Natsuhara and Shuichi Nonomura	岐阜 大学	A narrow process window for the preparation of polytypes of microcrystalline silicon carbide thin films by hot-wire CVD method	J. Non-Cryst. Solids, in press	有	2012
5	Yasushi Sobajima, Shirou Kamanaru, Hirotaka Muto, Jakapan Chantana, Chitose Sada, Akihisa Matsuda, Hiroaki Okamoto	大阪 大学	Effect of thermal annealing and hydrogen-plasma treatment in boron-doped microcrystalline silicon	J. Non-Cryst. Solids (2012) in print	有	2012
6	Jakapan Chantana, Yanqiu Yang, Yasushi Sobajima, Chitose Sada, Akihisa Matsuda, Hiroaki Okamoto	大阪 大学	Localized Surface Plasmon Enhanced Microcrystalline-Silicon Solar Cells	J. Non-Cryst. Solids (2012) in print	有	2012
7	Jakapan Chantana, Yanqiu Yang, Yasushi Sobajima, Chitose Sada, Akihisa Matsuda, Hiroaki Okamoto	大阪 大学	Importance of Starting Procedure for Film Growth in Substrate-Type Microcrystalline-Silicon Solar Cells	Jpn. J. Appl. Phys. 50(2011)45806	有	2011
8	Yasushi Sobajima, Chitose Sada, Akihisa Matsuda,	大阪 大学	Control of Materials and Interfaces in $\mu\text{c-Si:H}$ -based Solar Cells Grown at High	MRS Proc. 1321(2011) 1321-a02-01	有	2011

	Hiroaki Okamoto		Rate			
9	Hiroaki Okamoto, Yasushi Sobajima, Toshihiko Toyama, Akihisa Matsuda	大阪 大学	Laplace Meyer–Neldel relation	Physica Status Solidi (a) 207 (2010) 566	有	2010
10	Toshihiko Toyama, Masanori Kurihara, Yasushi Sobajima, Hiroaki Okamoto, Satoshi Takahashi, Naoki Misaka, Yasuo Tsutsumi	大阪 大学	Photoacoustic spectroscopy and electron spin resonance studies of defects in microcrystalline silicon thin films grown on rough surfaces	Physica Status Solidi (c) 7 (2010) 696	有	2010
11	Yasushi Sobajima, Takuya Higuchi, Jakapan Chantana, Toshihiko Toyama, Chitose Sada, Akihisa Matsuda, Hiroaki Okamoto	大阪 大学	Gas- temperature control in VHF-PECVD process for high-rate (>5 nm/s) growth of microcrystalline silicon thin films	Physica Status Solidi (c) 7 (2010) 521	有	2010
12	Jakapan Chantana, Takuya Higuchi, Tomoyuki Nagai, Shota Sasaki, Yasushi Sobajima, Toshihiko Toyama, Chitose Sada, Akihisa Matsuda, Hiroaki Okamoto	大阪 大学	The relationship between $I_{Ha} = (I_{SiH^*})^2$ and crystalline volume fraction in microcrystalline silicon growth	Physica Status Solidi (a) 207 (2010) 587	有	2010
13	Toshihiko Toyama, Yasushi Sobajima, Hiroaki Okamoto	大阪 大学	Fractal Study of Surface Nanostructures of Microcrystalline Silicon Films: From Growth Kinetics to Electronic Transport	Philos. Mag. 89 (2009) 2491	有	2009
14	Yasushi Sobajima, Mitsutoshi Nishino, Taiga Fukumori, Takuya Higuchi, Shinya Nakano,	大阪 大学	6.3% Efficiency Solar Cell Employing High Deposition Rate (8 nm/s) Microcrystalline Silicon Photovoltaic Layer	Sol. Energy Mater. & Sol. Cells 93 (2009) 980	有	2009

	Toshihiko Toyama, Hiroaki Okamoto					
--	--------------------------------------	--	--	--	--	--

C 高度構造制御薄膜シリコン太陽電池の研究開発

1. 成果詳細

表III-2-(ロ)-C-1 [1] 研究開発項目ごとの成果・達成度

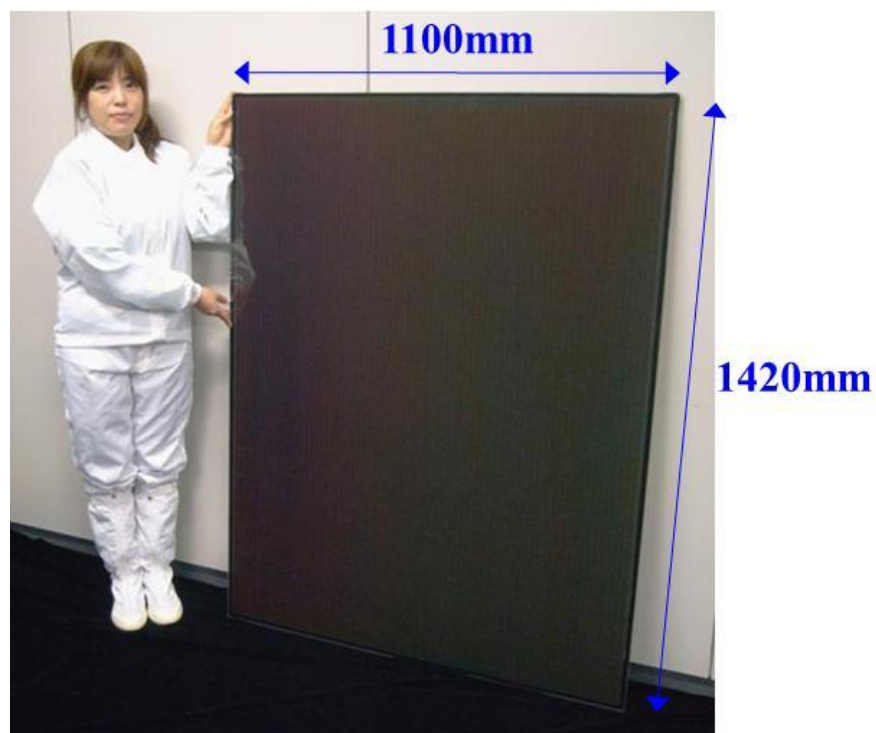
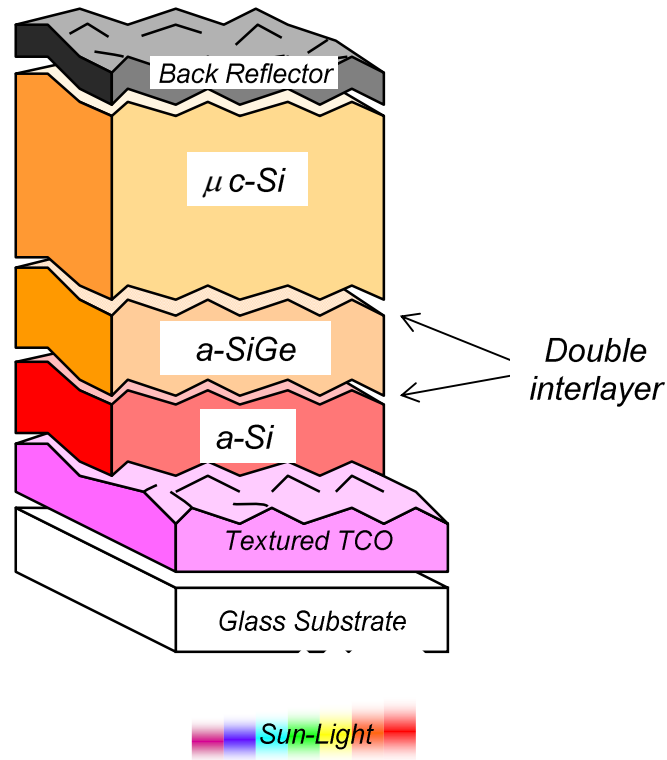
中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
サブモジュール (モジュールサイズ 20cm×20cm) にて安 定化効率 15%	<p><u>◎開発項目①の成果として</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・透明電極の光散乱方向の角度依存性を明確化し、ミドル層およびボトム層感度が向上する散乱角を明確化した。 ・2 接合セルにて、ボトム膜厚 1 μ m ながら Voc 1.47V、効率 13.2%を得た。(従来基板 7%up) <p><u>◎開発項目②の成果として</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・新規欠陥低減処理により、3 接合セルの光安定化後の保持率が 97%に向上。(処理無し 93%) 	△	<ul style="list-style-type: none"> ・透明電極凹凸形状制御技術の 3 接合への適用。 ・ミドル層の高品質化 ・今後は大面積化に注力
実機サイズモジュール (モジュールサイズ 980×950mm) にて 120W	<p><u>◎開発項目②の成果として</u></p> <p>世界で初めて中間層を有する大面積 3 接合モジュール(a-Si/中間層/a-SiGe/中間層/μc-Si)を作成した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・980×950mm：115W相当 ・1420×1100mm：作製 ・500mm□内での均一インプリント技術確立の目処がついた。 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・透明電極凹凸形状制御技術ならびに新規欠陥低減処理技術の大面積化

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

研究開発項目としては、①新規低空間指向性光閉じ込め技術の開発および②サブサーフェス制御製膜法による新規バンドギャップ制御シリコン系材料の開発について取り組んだ。①に関しては、ナノインプリント技術を用いてガラス基板表面へ凹凸構造を形成する技術を開発し、ガラス上に凹凸サイズを制御した透明電極の形成を行い光散乱の制御を行った。特に周期的に配列した凹凸構造により散乱方向に指向性を持たせることにより、各発電層に最適な光閉じ込めを行う。また凹凸層の光学パラメーター（屈折率、吸収ロス抑制）

の最適化検討も行い、光閉じ込めに最適な光散乱層を形成する。一方②に関しては、薄膜シリコン太陽電池の事業競争力の強化を目指し、目的を 3 接合構造(a-Si/中間層/a-SiGe/中間層/ μ c-Si)のミドル層である a-SiGe の高性能化と、量産化サイズである大面積 3 接合モジュールの高効率化に絞った検討を実施した。

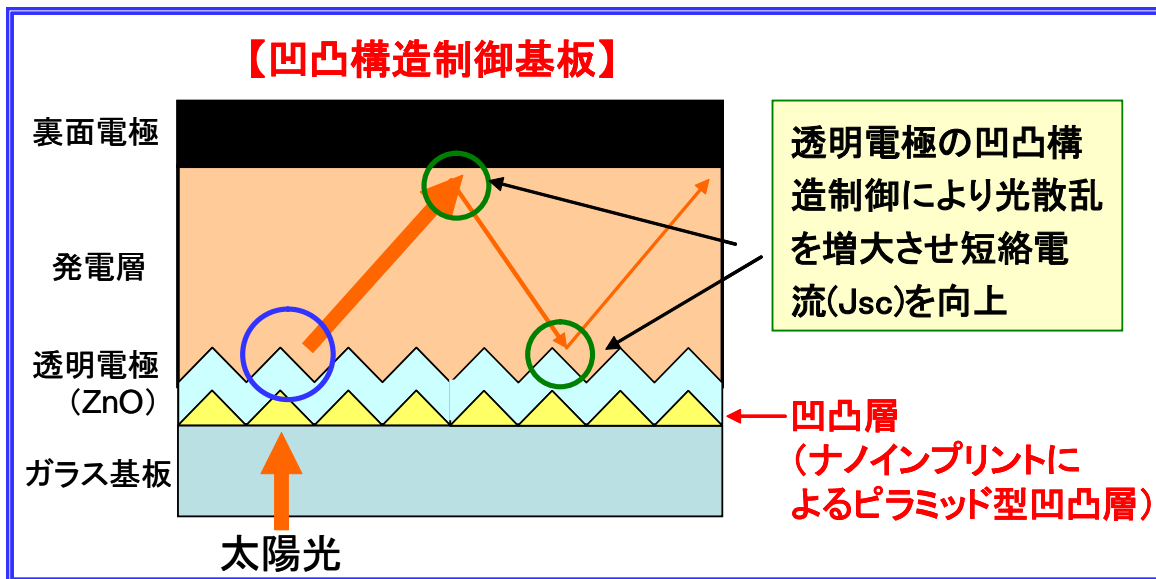
図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [1]に 3 接合薄膜シリコン太陽電池の構造とモジュールの外観写真を示す。世界で始めて量産サイズでの中間層を有する大面積 3 接合モジュールの作成に成功した。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [1] 3 接合薄膜シリコン太陽電池の概念図とモジュール外観写真

① 規低空間指向性光閉じ込め技術の開発

新規低空間指向性光閉じ込め基板として凹凸構造制御基板の開発を行った。以下図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [2]に本基板の開発概念を示す。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [2]. 凹凸構造制御基板の概念

ガラス基板上にナノインプリントの手法によりピラミッド型の凹凸層を形成する事で、引き続き形成される透明電極層の凹凸形状も制御する事で、これにより透明電極/Si 界面の光散乱が増大し短絡電流が向上する。

特に本プロジェクトにおいては、周期的に配列した凹凸構造を用いる事で、光の散乱方向制御（指向性化）を目指した。すなわち 3 接合型の太陽電池 (a-Si/a-SiGe/ μ c-Si) のミドル a-SiGe 層ならびにボトム μ c-Si 層の吸収波長にマッチした選択的な光閉じ込めの実現を目指した。

次に本プロジェクトで開発した凹凸構造制御基板を用い、a-Si/ μ c-Si セルで、その有効性を確認する検討を実施した。表Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [2]に各基板の特性を示す。

比較対象としては、従来基板としてインプリントによる凹凸層が形成されていない ZnO のみの基板、さらに市販の SnO₂ 基板を用いた。その結果ボトム μ c-Si 層の膜厚が 1.0 μ m ながら、電流の大幅な向上に加えて Voc 1.47V の達成により、ZnO 基板と比較して Eff が 7% 向上し、初期 Eff.にて 13.2%を達成した。電流だけでなく Voc が向上したのは TCO の表面形状を制御する事で光散乱だけでなく、線欠陥等の形成が抑制され、結果的には膜質が向上した事によるものと考えられる。

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [2]. 凹凸構造制御基板のセル特性

基板	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	F.F.(%)	Eff.(%)
ZnO(内製)	1.42	11.3	76.5	12.3
SnO ₂ (市販)	1.44	11.2	77.7	12.5
凹凸構造制御基板	1.47	12.6	71.4	13.2

② ブサーフェス制御製膜法による新規バンドギャップ制御シリコン系材料の開発
次に、本プロジェクトにて開発した高性能 a-SiGe 製膜条件を、実機サイズ (980×950mm) での 3 接合構造 a-Si/a-SiGe/ μ c-Si モジュールに適用した。その結果を表Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [3] に示す。

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [3]. 基板サイズ 980×950mm の 3 接合モジュール特性

980×950mm		Pmax(W)
	初期	115W相当

980×950mm□基板に関しては、本基板の製膜が可能な装置における初期特性として、115W 相当が得られている。また厳しい市場環境の中、競争力強化のためには量産レベルで高い出力を実証する事が重要である事から、実用化サイズである 1420×1100mm でのモジュール化検討も実施した。図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [7]に本サイズのモジュールの外観写真を示す。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [7]. 1420×1100mm サイズの 3 接合モジュール外観写真 (屋外暴露中)

次に 3 接合構造のミドル層である a-SiGe において課題となっている膜中欠陥、光劣化を抑制するためにサブサーフェス制御製膜法の検討を実施した。より具体的には、従来のプラズマ CVD 法では膜形成時に水素化することにより未結合手を終端させ、欠陥密度増加を抑制していたが、サブサーフェス制御製膜法では従来法と異なり、敢えてサブサーフェス (断続的な界面) において欠陥低減処理を行うことで、却って処理効果の増大、膜中閉じ込めを行い、活性層全体的大幅な品質向上を図るものである。

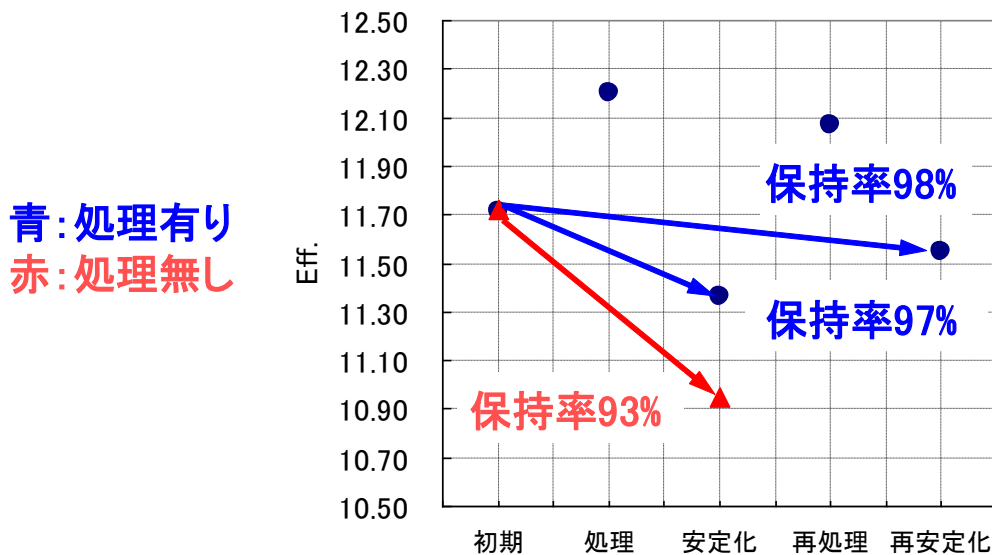
我々は、まず 3 段タンデムセルに対し新規欠陥低減処理を製膜後に実施することで初期および安定化後特性に対する改善効果を確認した。表Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [5]に 3 段タンデムセルの処理前後の特性を示す。全てのパラメーターが向上し、Eff.としては 4%の向上がみられた。

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [5]. 新規欠陥低減処理前後のセル特性

	Voc(V)	Isc(mA)	F.F.(%)	Eff.(%)
処理前	2.09	7.58	73.9	11.7
処理後	2.11	7.79	74.3	12.2

4%向上

次に光安定化特性について検討した。照射強度 5sun による 550 時間相当の加速劣化試験を実施した結果を図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [8]に示す。安定化後特性に関しても処理無しの場合の保持率が 93%であるのに対し、処理を行う事で 97%まで向上した。さらに光安定化後のサンプルを再度、処理を行い光安定化試験を行ったところ、保持率が向上する傾向にあった。以上の結果より、セルに対する新規欠陥低減処理の有効性が確認された。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [8]. 新規欠陥低減処理の光安定性への影響

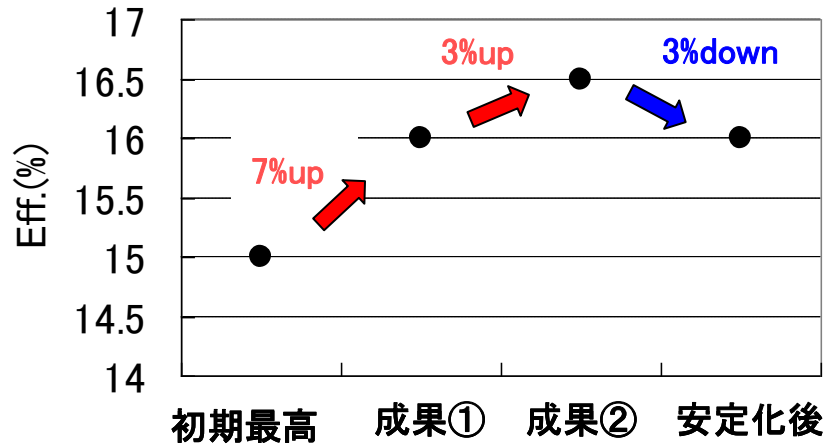
最後に最終目標の達成可能性だが、表Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [6]に 2 接合(a-Si/ μ c-Si)ならびに 3 接合(a-Si/a-SiGe/ μ c-Si)セルのカネカにおける最高性能を示す。

表Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [6]. 小面積セルのトップデータ

	Voc(V)	Jsc(mA/cm ²)	F.F.(%)	Eff.(%)	備考
2段タンデム安定化(従来基板)	1.365	12.44	69.4	12.3	2011AIST認証 世界最高
3段タンデム初期(従来基板)	2.28	8.93	73.5	15.0	

これらの基板としては従来基板を用いた 1cm²セルの結果である。2 接合セルに関しては 2011 年に AIST 認証値で世界最高値である 12.3%を達成しており、薄膜シリコン太陽電池

分野において依然世界トップクラスの開発力を有している事を示している。また3 接合セルに関して初期値ではあるが15%を達成している。この3 接合セルの特性を元に、本プロジェクトにおける成果によるゲインを見込んだ性能の想定達成値を図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [9]に示す。



図Ⅲ-2-(ロ)-C-1 [9]. 各要素技術と性能の達成想定値

まず一つ目の成果として本プロジェクトで開発した凹凸構造制御基板にて7%の性能向上を見込んでいる。(成果①)次に二つ目の成果として新規欠陥低減処理にて初期性能が最大4%向上すると共に、保持率97%(3%の低下)に抑制される。これによりセルにて初期16.5%、安定化後16%の達成は可能である。本性能を有するセルから量産サイズである実用化サイズモジュール(モジュールサイズ1420×1100mm)に大面積化する場合の特性低下を考慮する必要はあるものの、同サイズでの安定化後200W(13.6%)の達成は十分可能である。

2. 実用化・事業化見通し

太陽電池市場の厳しい市況環境を鑑み、薄膜シリコン太陽電池に求められているのは、他の太陽電池と同様に高性能化と低コスト化である。よって2接合よりも高性能化が見込める3接合構造による大面積化検討を行う。弊社においては単接合ならびに2接合の生産、販売を既に実施しており、a-SiGe層が追加されるだけの3接合構造は既設の生産設備をベースとした展開が可能であり、実用化・事業化に対する障害は無く、実現可能である。

3. 波及効果

本事業は、2020年に発電コスト14円/kwh（モジュール製造コスト換算75円）の実現に資する技術の確立を目標としており、確実に高性能化が望める研究開発を行うものとする。まず本事業の太陽電池分野での波及効果として、開発に注力している3接合セルのミドル層である高性能 a-SiGe 層は他の薄膜系太陽電池（化合物、有機）などとのタンデム化が可能である。同じくインプリント技術による凹凸構造制御基板についても、同様に他の薄膜系太陽電池への展開が可能である。一方、太陽電池以外の波及効果としては、インプリントによる微細構造形成技術の展開として、オプトエレクトロニクス分野、ディスプレイ分野等への適用可能性が考えられる。

なお、本事業により、日本の技術優位性の維持による技術基盤強化・産業競争力向上が見込める。

4. 今後の展開

研究開発に関しては、一部社内資源も活用した取り組みを行い、中間および最終目標を確実に達成する。また事業化、実用化に関しては、3 接合構造の早期事業化を目標に本プロジェクトの研究計画と密接にリンクした事業開発を行う。短期的には、本プロジェクトで開発した成果は随時適用し事業競争力の強化を図る。長期的には 2014 年度末の達成目標である出力 200W(13.6%)の 3 接合モジュールでの事業化、実用化が重要であり、目標達成後の短期間での生産開始を目指して全社内資源を投入して取り組む。最終的にはモジュール性能を 14%まで高める必要があるが、上記 200W モジュール技術をベースに、Si 層の高性能化と更なる光閉じ込めの強化により 2017 年での実用化ならびに 2020 年での事業化を実現する。

5. 特許論文リスト

以下、表Ⅲ-2-(ロ)-C-5[1]に知的財産、成果の普及結果を、表Ⅲ-2-(ロ)-C-5[2]ならびに表Ⅲ-2-(ロ)-C-5[3]に特許、論文リストを示す。成果については、着実に権利化を進めると共に、研究発表およびプレスリリースを通じて成果のアピールも適切に実施している。

表Ⅲ-2-(ロ)-C-5 [1]. 知的財産、成果の普及

	H22	H23	H24	計
特許出願	2(0)	3(0)	0	5件
論文(査読付き)	0	1	1	2件
研究発表・講演 (うち国際会議)	1(1)	2(2)	1(0)	4件
受賞実績	0	1	1	2件
新聞・雑誌等への掲載	1	2	0	3件
展示会への出展	3	2	0	5件

・プレスリリースを実施(H22年1件、H23年2件)

* 平成24年7月25日現在

表Ⅲ-2-(ロ)-C-5 [2]. 特許リスト

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 2011-021908	国内	2011/2/3	公開待 ち	多接合型 薄膜太陽電池	口山 崇
2	株式会社 カネカ	特願 2011-032510	国内	2011/2/17	公開待 ち	薄膜太陽電池	口山 崇
3	株式会社 カネカ	特願 2011-146316	国内	2011/6/30	公開待 ち	薄膜太陽電池	稲木 修
4	株式会社 カネカ	特願 2011-178060	国内	2011/8/16	公開待 ち	薄膜光電変換 装置	末崎 恭
5	株式会社 カネカ	特願 2011-199902	国内	2011/9/13	公開待 ち	光電変換装置	目黒 智巳

表Ⅲ-2-(ロ)-C-5 [3]. 論文リスト

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
1	Andrea Feltrin, Tomomi Meguro	Kaneka Corporation	Light scattering and parasitic absorption in thin film silicon solar cells containing metal nanoparticles	Journal of Photonics for Energy, Vol.1, 2011, P017003-1	有り	2011
2	Tomomi Meguro	Kaneka Corporation	Advanced Light Trapping of High-Efficiency Thin Film Silicon Solar Cells	Japanese Journal of Applied Physics, in press	有り	2012

D 薄膜シリコンフィルム太陽電池の高速製膜技術の研究開発

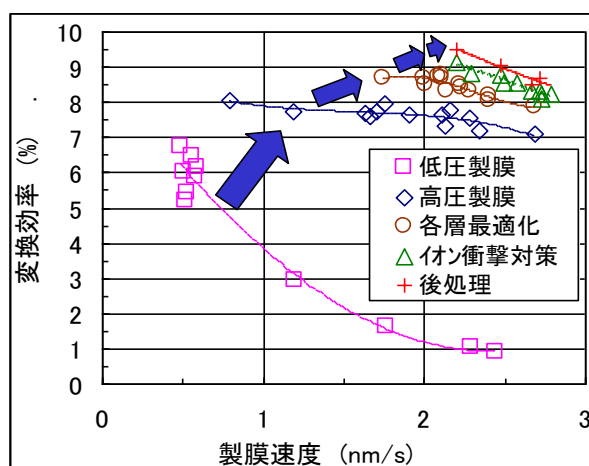
1. 成果詳細

フレキシブル太陽電池の高出力化のために、薄膜シリコン (Si) 太陽電池の効率を向上させると共に薄膜 Si を高速で製膜する必要がある。この研究では、高効率の薄膜 Si 太陽電池を高速で製膜する技術、この薄膜 Si 太陽電池を用いて多接合太陽電池を製膜する技術、そして、この太陽電池からモジュールを作製する技術を開発する。

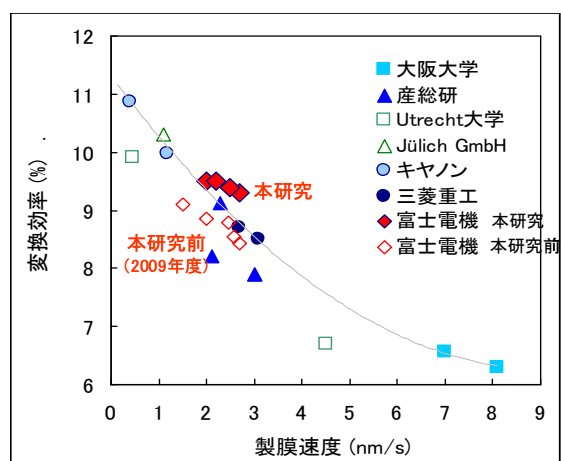
Ⅲ-2-(ロ)-D-1-1 薄膜シリコン太陽電池の高速製膜技術

薄膜 Si 太陽電池の高速製膜技術として、非晶質シリコン (a-Si:H) 薄膜や微結晶シリコン (μc -Si:H) 薄膜について検討している。その目標 (中間目標) は、フィルム基板上の μc -Si:H 太陽電池において製膜速度が 2.0 nm/s 以上で変換効率を 9.5%以上とすることである。

μc -Si:H 太陽電池の高速製膜については、放電パワーを上げて製膜速度を速くすると太陽電池の変換効率が小さくなる傾向がある (図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(1))。これまで、製膜圧力の高圧化やイオン衝撃対策などによって高速製膜領域における変換効率を向上させてきたⅢ-2-(ロ)-D-1(1)。また、ITO 透明電極と p/i 界面層の最適化、後処理 (熱処理) などによって、太陽電池の特性が向上した。イオン衝撃対策としては、高周波プラズマ CVD においてカソードに直流バイアス電圧を印加することによってイオン衝撃のエネルギーを制御する方法を開発したⅢ-2-(ロ)-D-1(2)。この結果、本研究の実施前において製膜速度 1.5nm/s で変換効率 9.1%であったものが、本研究によって製膜速度 2.2nm/s で変換効率 9.5%までに特性が向上した。これは中間目標を達成するものである。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(2)には、世界の他の研究機関で発表されている太陽電池の効率と製膜速度を載せたⅢ-2-(ロ)-D-1(1)。他の研究機関と比較して同等の特性が得られており、フィルム基板においても高い特性が得られることがわかった。



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(1) μc -Si:H太陽電池の製膜速度と変換効率の関係



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(2) μc -Si:H太陽電池の高速高効率に関する研究機関との比較



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(3)
2 接合太陽電池の構造

表Ⅲ-2-(ロ)-D-1(1) 多接合太陽電池の製膜速度と変換効率

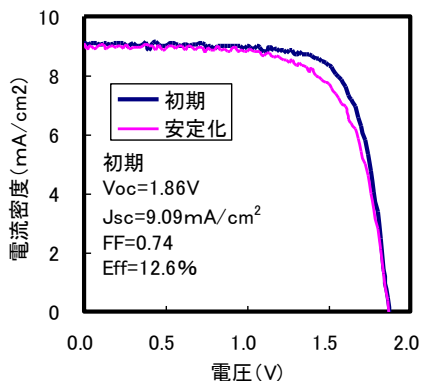
年度	多接合数	製膜速度(nm/s)		変換効率(%)	
		μ c-Si:H	a-Si:H	初期	安定化
2009	2接合	1.1	0.3	12.5	10.2
2010	2接合	2.0	0.3	12.3	10.4
2010	3接合	2.0	0.3	12.4	11.7
2012	3接合	2.2	0.83	12.6	11.6
目標		≥ 2.0	≥ 0.67	≥ 14	≥ 13

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-2 多接合太陽電池の製膜技術

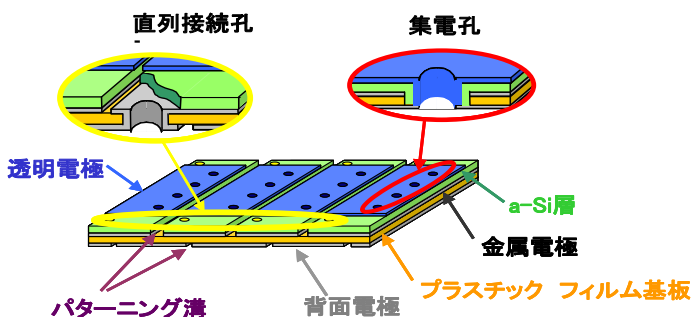
多接合太陽電池の製膜技術において、Ⅲ-2-(ロ)-D-1-1 項で開発した μ c-Si:H 太陽電池と a-Si:H 太陽電池を用いて多接合太陽電池を作製している。中間目標はフィルム基板の上の多接合太陽電池において初期効率を 14%以上または安定化効率を 13%以上とすることである。ここで、その製膜速度は μ c-Si:H 薄膜で 2.0 nm/s 以上、a-Si:H 薄膜で 0.67nm/s 以上である。

多接合太陽電池としては2接合と3接合について検討した。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(3)に2接合太陽電池の構造を示す。3接合太陽電池は μ c-Si:H 太陽電池が2層となる。多接合太陽電池の検討としては主に各構成セルの電流マッチングであり、シミュレーションなども利用した。トンネル接合層は μ c-Si:H:n 層を用い、その製膜条件を検討した。透明電極としてITO膜の製膜条件やITO以外の材料などについても検討している。

これまでの多接合太陽電池の開発の経緯を表Ⅲ-2-(ロ)-D-1(1)に示す。本研究の開始以前は2接合太陽電池において初期効率12.5%、安定化効率10.2%を得ていたが、製膜速度が両者とも目標値より遅かった。次に、高速の μ c-Si:H 太陽電池 (2nm/s) が作製できるよ



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(4) 3 接合太陽電池のIV特性 (a-Si:H 0.8 nm/s、μ c-Si:H 2.2nm/s)



図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(5) SCAF直列接続構造

うになり、同程度の変換効率を持つ2接合太陽電池が得られた。3接合太陽電池とすると安定化効率が11.7%に向上した。現在、高速のa-Si:H太陽電池が作製(0.8nm/s)できるようになり、3接合太陽電池で初期効率12.6%、安定化効率11.6%を得ている。そのときの電流電圧曲線を図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(4)に示す。

Ⅲ-2-(ロ)-D-1-3 太陽電池モジュール作製技術

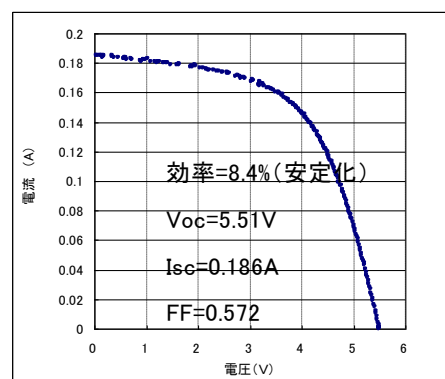
太陽電池モジュール作製技術では、Ⅲ-2-(ロ)-D-1-2項で開発した多接合太陽電池に直列接続構造を形成し、さらに封止することで太陽電池モジュールを作製している。その目標(最終目標)はフィルム基板上に形成した薄膜Si多接合太陽電池を用いて作製したサブモジュール(面積100cm²以上)において安定化効率を12%以上とすることである。2012年度までの内部目標として、直列接続構造による出力低下を15%以下とした。

直列接続構造としては、図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(5)に示した富士電機独自の構造であるSCAF構造(Series-Connection through Apertures Formed on Film Substrate構造)を採用した。その特徴は、区画に区切られたユニット太陽電池をフィルムの反対面に形成された背面電極を通して直列に接続している。ユニットの両端に配置された2個の直列ホールを通して裏面電極と背面電極が接続され、多数の集電ホールを通して透明電極と背面電極が接続される。使用する多接合太陽電池は現行製品に比べて発電層が厚いため、レーザーによる細線加工の条件などを検討し、SCAF構造太陽電池を試作した。2接合太陽電池(μ c-Si:H/a-Si:H)を用いて4個のユニット太陽電池(面積17.5cm²)を直列に接続した。その特性を表Ⅲ-2-(ロ)-D-1(2)に示す。直列接続にともなう出力低下は、当初が26%であったものが20%程度に下がったが、内部目標(15%以下)には至っていない。SCAF構造太陽電池の安定化効率も8.4%(Voc=5.51V、Isc=0.186A、FF=0.572)で最終目標とはまだ差がある。図Ⅲ-2-(ロ)-D-1(6)にその電流電圧曲線を示す。

研究開発項目ごとの成果・達成度を表Ⅲ-2-(ロ)-D-1(4)に、特許、論文、外部発表等の件数を表Ⅲ-2-(ロ)-D-1(5)に示す。

表Ⅲ-2-(ロ)-D-1(2) SCAF構造形成による太陽電池の出力低下率

年度	a-Si:H/ μ c-Si:H 膜厚(nm)	効率(%)			出力低下率
			小面積	直列接続	
2009	700/2500	初期	12.5	9.3	26%
2011	500/2400	安定化	10.1	7.8	23%
2011	700/2400	安定化	10.1	7.9	21%
2011	300/1800	安定化	—	8.4	—



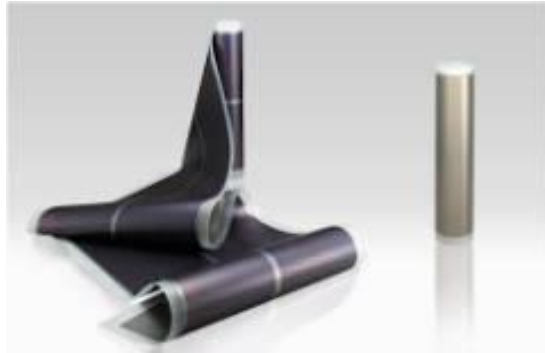
表Ⅲ-2-(ロ)-D-1(4) 研究開発項目ごとの成果・達成度

中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
①フィルム基板上にシリコン系薄膜を積層した多接合太陽電池において、変換効率が14%以上(初期)または13%以上(安定化)とする。このときの製膜速度を結晶シリコン系薄膜で0.67nm/s以上とする。	①フィルム基板上にアモルファスシリコン(a-Si:H)と微結晶シリコン(μ c-Si:H)のセルを積層した多接合太陽電池において、3接合太陽電池で初期効率12.6%、安定化効率11.6%を得た。このときのa-Si:Hの製膜速度は0.83nm/s、 μ c-Si:Hは2.0nm/s以上、非晶質シリコン系薄膜で2.0nm/sである。	△	a-Si:Hセルの高効率化、トンネル接合層の低抵抗化、透明電極の低抵抗化/透明化、電流マッチング
②このために、結晶シリコン系単接合太陽電池において、その発電層の製膜速度が2.0nm/s以上で変換効率を9.5%以上とする。	②フィルム基板上の μ c-Si:H単接合太陽電池において、製膜速度を2.2nm/sとして変換効率9.5%を得た。	○	

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

表Ⅲ-2-(ロ)-D-1(5) 特許、論文、外部発表等の件数(内訳)

	H22	H23	H24	計
特許出願(うち外国出願)	0(0)	4(1)	0(0)	4件
論文(査読付き)	0	0	0	0件
研究発表・講演(うち国際会議)	6(3)	0	0	6件
新聞・雑誌等への掲載	1	0	0	1件
受賞実績	0	0	0	0件
展示会への出展	0	0	0	0件



図Ⅲ-2-(ロ)-D-2(1) フレキシブル薄膜Si太陽電池

2. 実用化・事業化見通し

本研究の実用化については、2015年度までにフレキシブル薄膜Si太陽電池に高出力化/高速化に関する要素技術を提供することを目指す。本研究で得られた成果で実用化・事業化の可能性あるのは、①a-Si:H太陽電池の高速化/高効率化技術と②改良型のSCAF直列接続構造による高出力化技術である。これらは現行製品(フレキシブル薄膜Si太陽電池)に適用可能な技術である(図Ⅲ-2-(ロ)-D-2(1))。実用化に向けた技術的な課題と対策を以下に整理した。

①a-Si:H太陽電池の高速化/高効率化技術の課題

- ・ a-Si:H:i 層の高品質化・・・対策は高次シラン低減、イオン衝撃低減
- ・ a-Si:H:i 層以外の層の最適化・・・対策はp層やn層の改良(界面層、組成)
- ・ 大面積製膜・・・対策は工場の製膜装置の利用

②改良型のSCAF直列接続構造による高出力化技術の課題

- ・ 選択加工の実用化検証・・・対策は加工の歩留り、信頼性試験
- ・ 直列・集電ホールの小径化・・・対策は短パルス、短波長レーザー加工
- ・ 大面積高速加工・・・対策は設備メーカーと工場設備の利用

本研究の成果によりフレキシブル太陽電池の販売拡大が期待される。デザイン屋根や壁を利用した発電の普及、遊休地の利用による発電の普及、非常用電源の普及、非電化地区への電気の供給などが期待される。そのための製品イメージとしては、図Ⅲ-2-(ロ)-D-2(2)に示すように鋼板一体型太陽電池、シート発電装置、モバイル電源などである。フレキシブル太陽電池市場は薄膜Si太陽電池においても20%前後の成長率が期待され、2015年で400MWの市場規模が予想される^{Ⅲ-2-(ロ)-D-2(1)}。上記の実用化により製造コストが10%程度削減でき、販売拡大が期待される。



鋼板一体型太陽電池



シート発電装置



モバイル電源

図Ⅲ-2-(ロ)-D-2(2) フレキシブル太陽電池の製品イメージ

3. 波及効果

特に、なし。

4. 今後の展開

中間目標の達成に向けて、a-Si:Hセルの高効率化、トンネル接合層の低抵抗化、透明電極の低抵抗化/透明化など各構成要素の改善を行い、さらに電流マッチングによって多接合太陽電池の中間目標（初期効率 14%以上または安定化効率 13%以上）を達成することを目指す。また、SCAF 直列接続構造の改良を進め、直列化による損失を 15%以下（内部目標）とする。そして、この技術を現行製品の出力向上につなげる。

参考文献

- Ⅲ-2-(ロ)-D-1(1) Tsuji Taketo et. al. : LARGE-AREA, LIGHT-WEIGHT FLEXIBLE SOLAR CELLS USING PLASTIC FILM SUBSTRATES, 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 3B0.12.5.
- Ⅲ-2-(ロ)-D-1(2) 松山秀昭：直流電圧を印加した高周波プラズマ CVD による薄膜 Si 太陽電池の形成、第 71 回秋季応用物理学会学術講演会、14p-ZB-12。
- Ⅲ-2-(ロ)-D-2(1) 大阪マーケティング本部第三事業部編集：2011 年度太陽電池関連技術・市場の現状と将来展望（上巻）、株式会社富士経済、(2011)、64。

5. 特許論文リスト

【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	富士電機	特願2011-276609	国内	H23-12-19	公開前	薄膜太陽電池の製造方法	澤柳悟
2	富士電機	特願2011-175744	国内	H23-8-11	公開前	薄膜太陽電池およびその製造方法	松山秀昭
3	富士電機	特願2011-158631	国内	H23-7-20	公開前	薄膜太陽電池及び薄膜太陽電池の製造方法	松山秀昭
4	富士電機	特願2012-037301	PCT 日、米、独中	H24-2-23	公開前 外国移行前	薄膜太陽電池	松山秀昭

【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
1	高野章弘	富士電機	Large-Area and Light-Weight Film Solar Modules	IMID/IDMC/ASIA DISPLAY 2010 T14-1153	なし	2010年
2	大瀬直之	富士電機	フィルム基板上への微結晶シリコン太陽電池の高速製膜技術	第71回秋季応用物理学会学術講演会, 14p-ZB-11	なし	2010年
3	松山秀昭	富士電機	直流電圧を印加した高周波プラズマCVDによる薄膜Si太陽電池の形成	第71回秋季応用物理学会学術講演会, 14p-ZB-12	なし	2010年
4	大瀬直之	富士電機	プラスチックフィルム基板上の大面積微結晶シリコン太陽電池	第71回秋季応用物理学会学術講演会, 14p-ZB-10	なし	2010年
5	辻剛人	富士電機	LARGE-AREA, LIGHT-WEIGHT FLEXIBLE SOLAR CELLS USING PLASTIC FILM SUBSTRATES	5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion 3B0.12.5	なし	2010年
6	和田雄人	富士電機	Large-Area, Light-weight Flexible Solar Cells Fabricated on Plastic Film Substrates	Third International Workshop on Thin Film Silicon Solar Cells Oral Session 4	なし	2010年

(ハ) CIS・化合物系太陽電池

A CIS系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発

1. 成果詳細

①「CIS系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発（大面積モジュールの研究開発）」

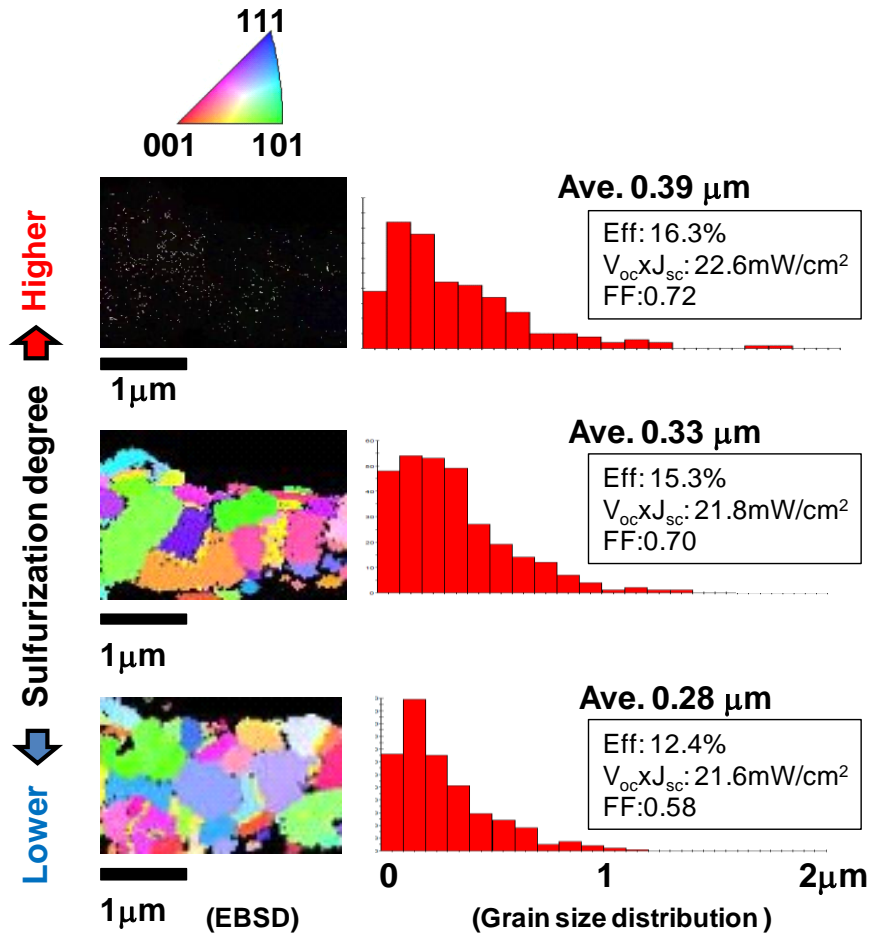
1) $V_{oc} \times J_{sc}$ 向上のための p 型 CIS 系光吸収層の高品質化技術開発

昭和シェル石油(株)独自の p 型 CIS 系光吸収層作製技術である「セレン化後の硫化法 (SAS 法)」により、CIS 系光吸収層の高品質化 ($V_{oc} \times J_{sc}$ 向上) を目的に SAS プロセスを検討した。一般的に CIS 系光吸収層は Ga (及び/又は S) を導入することによりバンドギャップを調整することが可能である。小面積で高効率が達成されているバンドギャップは $E_g = 1.15-1.20\text{eV}$ 程度の範囲であり、理論的な最適バンドギャップである $E_g = 1.4-1.5\text{eV}$ とは乖離している。その主な原因はバンドギャップ増加に応じた V_{oc} 向上が達成できていないことである。このような現実のもと、 V_{oc} 、 J_{sc} という個別の数値目標を立てることは、変換効率向上に対しマイナスの効果を生じさせていると判断している。そこで当社では CIS 系光吸収層の品質を表す「 $V_{oc} \times J_{sc}$ 」という独自の指標を導入している。「 $V_{oc} \times J_{sc}$ 」は CIS 系光吸収層の持つ変換効率向上能力、即ち、「ポテンシャル」を表すものとして適用し、バンドギャップや V_{oc} 、 J_{sc} といった値に拘らず、「 $V_{oc} \times J_{sc}$ 」を最大化することで変換効率の向上を目指している。

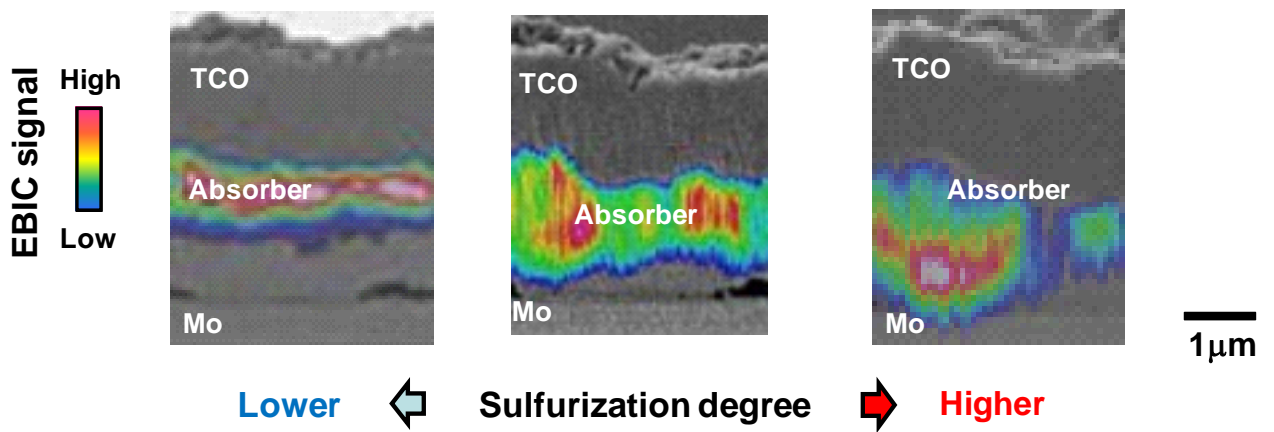
この $V_{oc} \times J_{sc}$ を向上させるべく、CIS 系光吸収層の膜厚増加を検討した。従来の SAS プロセスに対して光吸収層の膜厚を増加することで、 J_{sc} 向上は確認できたが、 V_{oc} 低下により $V_{oc} \times J_{sc}$ は、ほとんど変化しなかった。一方、FF が急激に低下し、変換効率は低下してしまった。そこで、厚い光吸収層に対しても V_{oc} 、FF を維持すべく SAS プロセスの検討を行った。具体的には硫化度を上げる検討を行った。硫化度とは硫化プロセスにおける温度、時間、ガス濃度からなる指標で、値が大きくなるほど「強い」硫化となる。厚い光吸収層に対して硫化度を上げることにより、結晶粒径の増大 (図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-1)、空乏層の増加 (図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-2) が確認され、これにより V_{oc} 、FF を改善することができた。

さらに、光吸収層内の Ga および S の膜厚方向プロファイルを最適化した。前述したように小面積で高効率が達成されているバンドギャップは $E_g = 1.15-1.20\text{eV}$ 程度の範囲であったが、Ga および S の膜厚方向プロファイルを最適化することで従来最適と言われていたバンドギャップより小さい $E_g = 1.07\text{eV}$ において $V_{oc} \times J_{sc}$ の極大値が得られた (図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-3, 4)。

以上の結晶品質向上技術およびバンドギャップ制御技術により $V_{oc} \times J_{sc} = 24\text{mW/cm}^2$ が得られる技術を確立した。



図III-2- (ノ) -A-1-1 EBSD 像



図III-2- (ノ) -A-1-2 EBIC 像

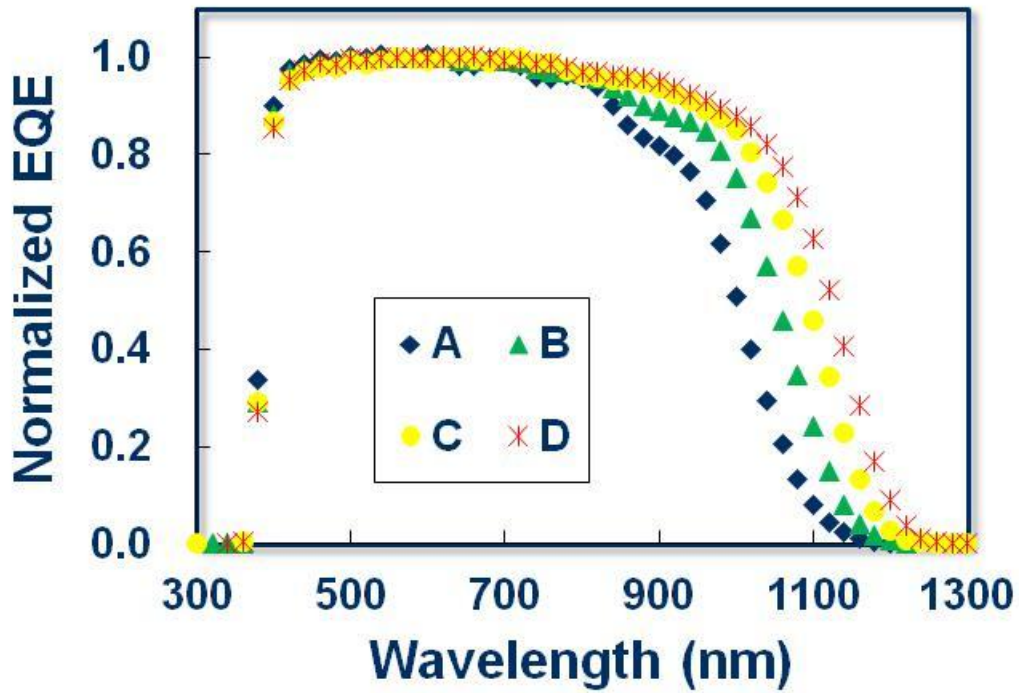


図 III-2- (ハ) -A-1-3 Ga および S の膜厚方向プロファイルを変化させた際の EQE

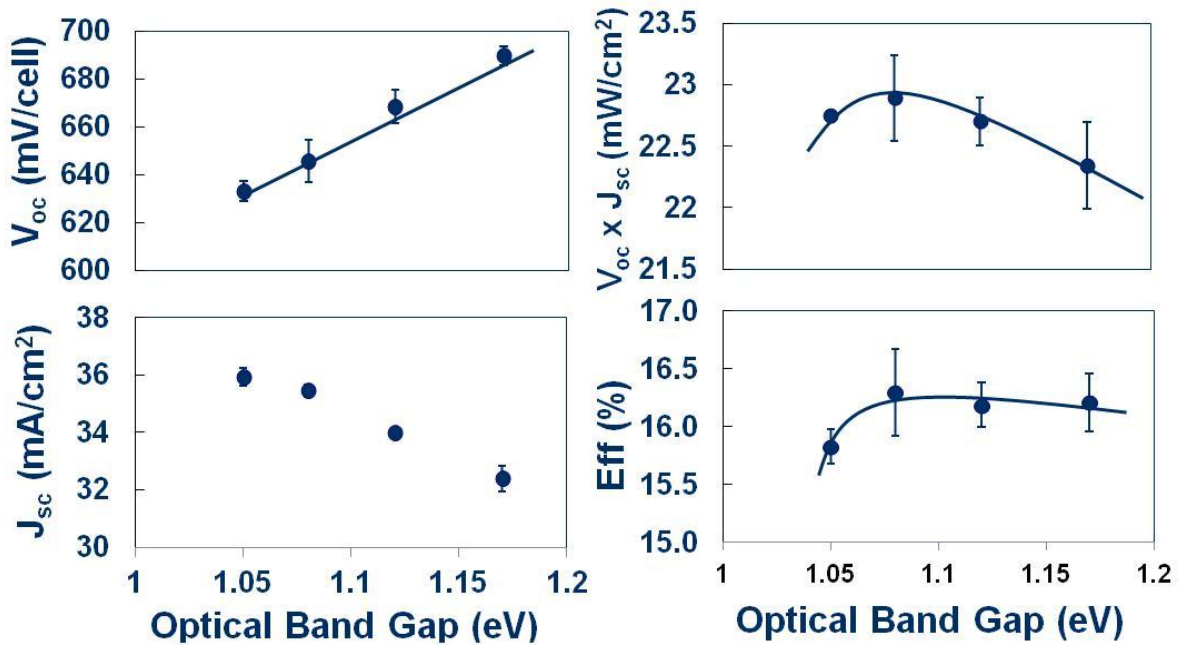


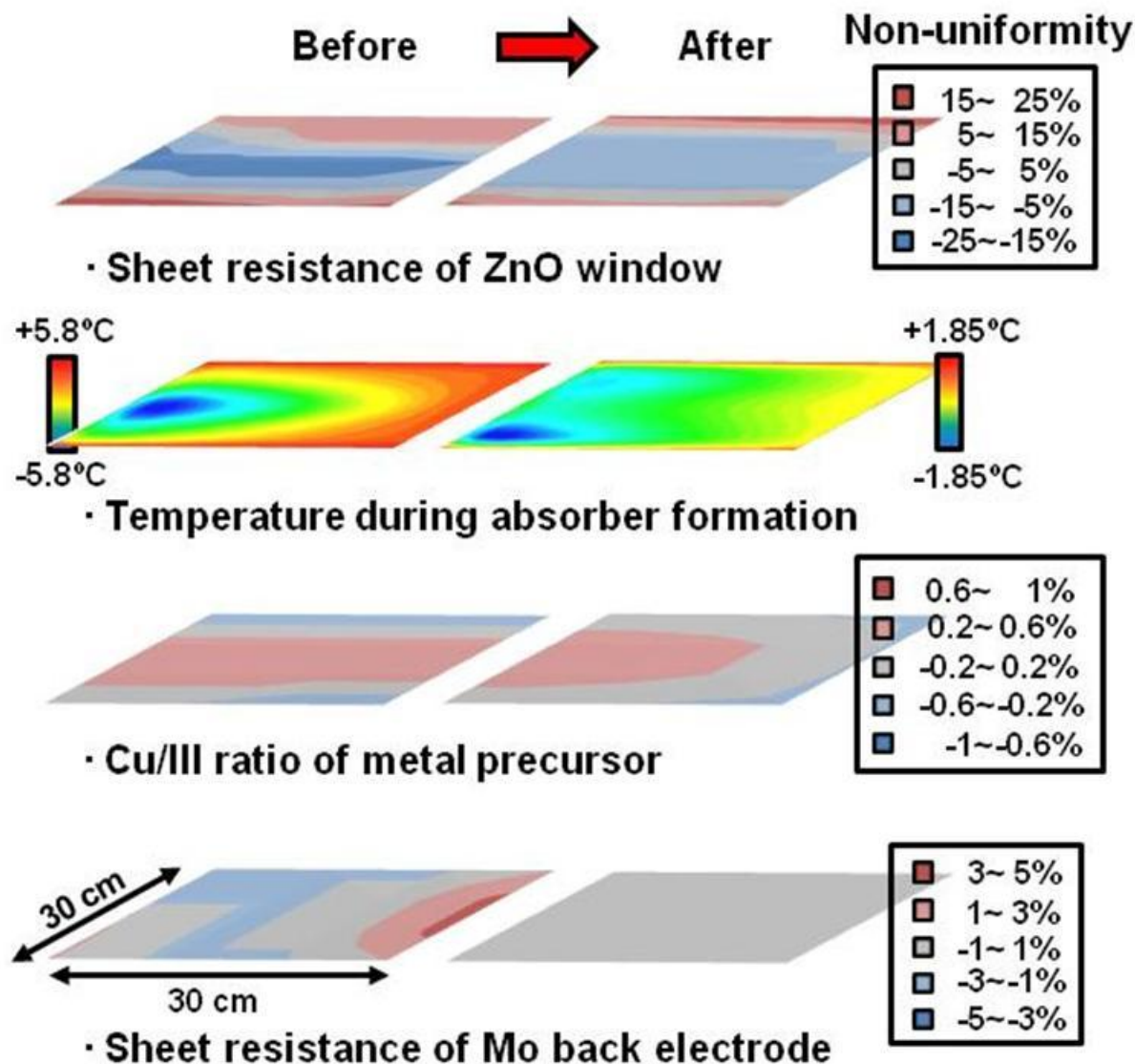
図 III-2- (ハ) -A-1-4 Ga および S の膜厚方向プロファイルを変化させた際の電池パラメータ (AR 無し)

2) 高品質接合界面形成技術開発

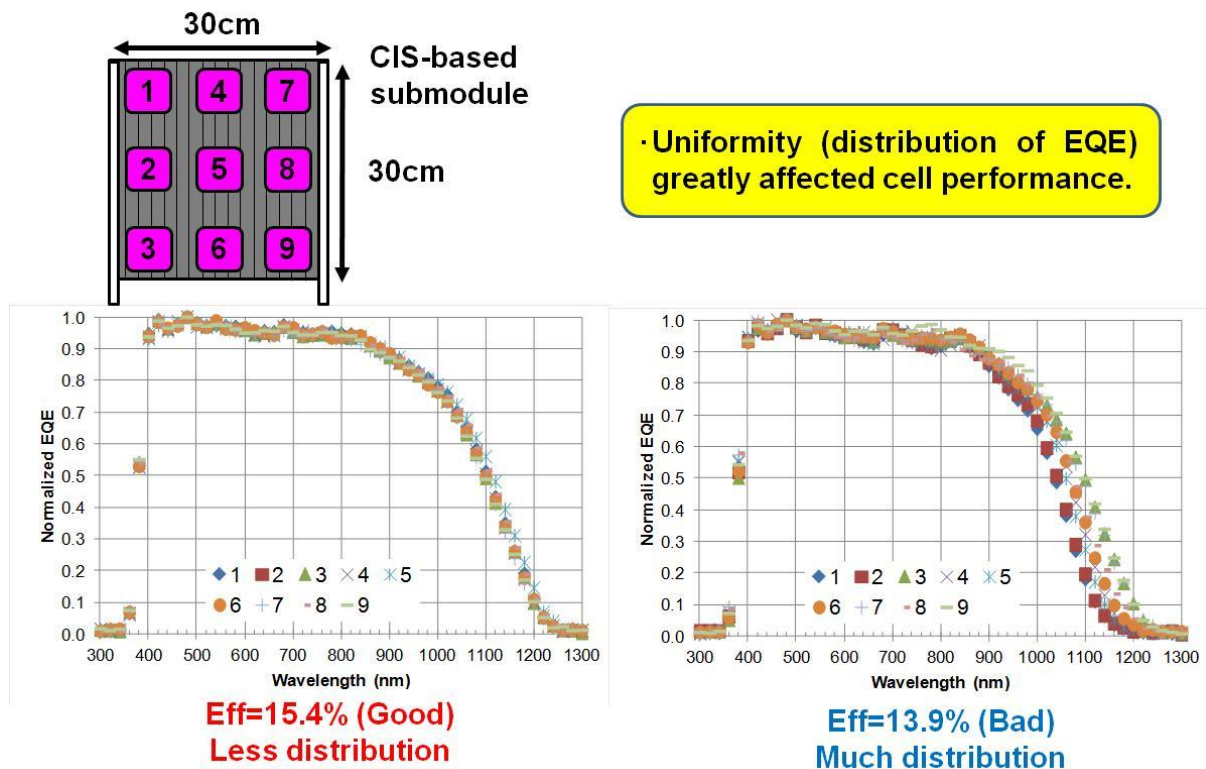
FFを向上させるには光吸収層とバッファ層、窓層の接合界面品質向上が重要である。特に光吸収層とバッファ層との伝導帯オフセットは最重要課題である。本研究では1)で開発した高品質光吸収層にマッチングするバンド構造をもつ新たなバッファ層の可能性探索を行った。

3) 基板面内分布の改善技術開発

基板面内分布改善に関しては製膜工程の主であるスパッタプロセス（裏面電極層、プリカーサー膜）、SAS プロセス、MOCVD プロセスにおける分布改善を図った（図Ⅲ-2-（ハ）-A-1-5）。スパッタプロセスでは、真空製膜室内における Ar ガス圧力分布を改善することにより膜厚の均一性を向上させることができ、裏面電極層ではシート抵抗の均一化、プリカーサー膜では Cu/Ⅲ比の均一化を実現した。SAS プロセスでは反応ガス流を制御することにより基板温度の均一化を図り、特に基板端部における不均一反応を抑制することができた。また、MOCVD プロセスでは製膜圧力分布、製膜温度分布を改善することで膜厚および膜質の均一性が向上し、基板面内でのシート抵抗分布が低減した。以上の分布改善により基板面内での分光感度特性の均一化を実現し（図Ⅲ-2-（ハ）-A-1-6）、電圧／電流のミスマッチ低減、および抵抗分布改善により FF が向上した。



図Ⅲ-2-（ハ）-A-1-5 製膜プロセスにおける面内分布の改善



図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-6 分光感度の面内分布

4) デバイス設計の改善技術開発

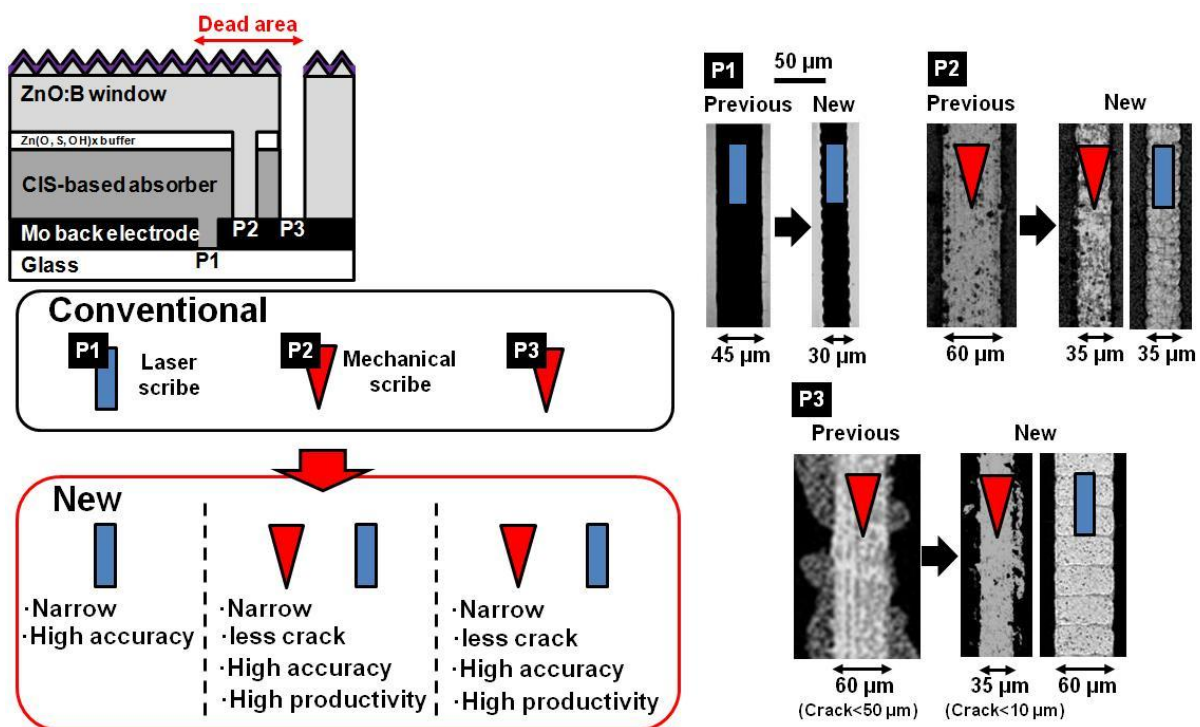
集積型のサブモジュールの高効率化にはパターニングに起因するリーク (FF 低下)、デッドエリア (J_{sc} 低下) の抑制が重要である。また、セル幅についても横方向の直列抵抗とデッドエリアとのトレードオフの関係があるため、パターニングの技術レベルに応じた最適設計が必要となる。

本研究開発で新たに導入したレーザーパターニング装置 (P1、P2、P3)、メカニカルパターニング装置 (P2、P3) によるリーク低減、デッドエリア低減を試みた。

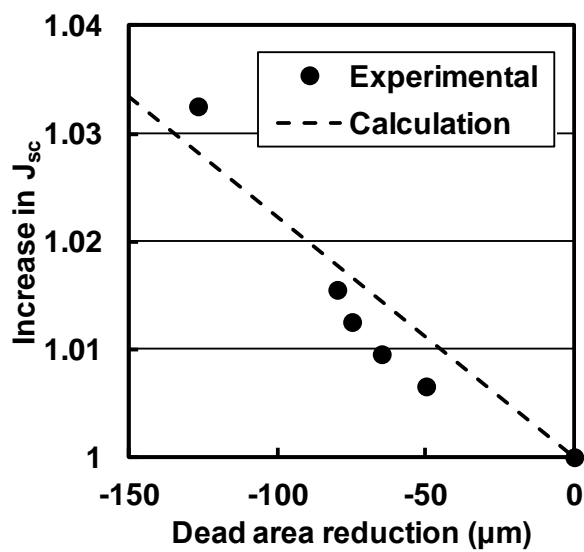
まずメカニカルパターニングであるが、従来より P2 および P3 に適用してきたが、加工幅を低減させようとする膜にクラックが発生するなどしてリーク抑制と両立することが困難であった。新規メカニカルパターニング装置においては新型加工ツールの適用と加工条件の制御により、従来ではリーク抑制が実現できなかった領域のデッドエリアでもリークなく加工することが可能であることが実証できた (図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-7)。

また、レーザーパターニングにおいても、従来より細線化した P1 の実現に加えて、レーザー加工による P2、P3 も可能となった。P3 についてはまだ細線化に課題が残っている。

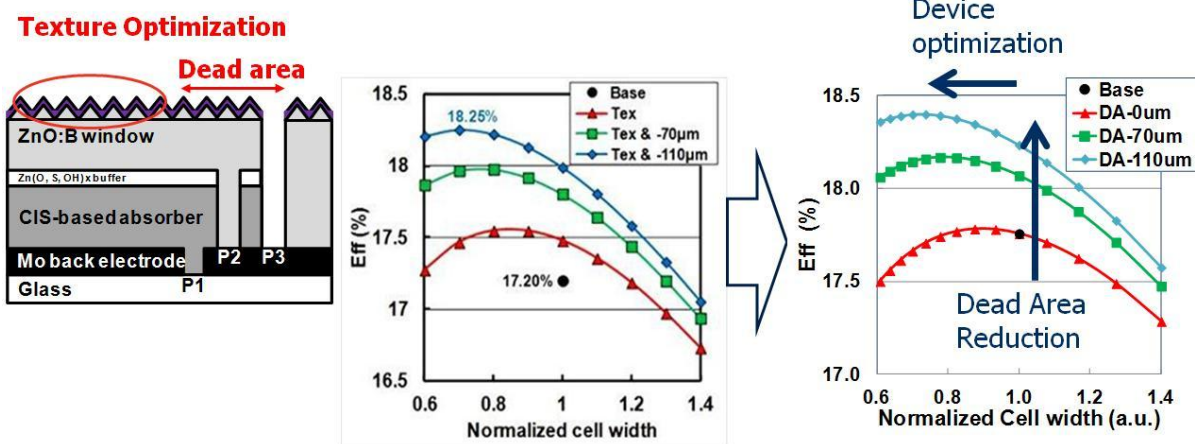
上述した、デッドエリア低減の効果を実験的に確認した (図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-8)。シミュレーションと実測はよく一致している。このデッドエリア低減に合わせたセル幅の最適設計を現状の最高効率と組み合わせることで、18%を超える変換効率が期待できることが分かる (図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-9)。この場合の FF は 0.73 を超えるものであり、中間目標は達成できたと言える。



図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-7 パターニングデッドエリア低減効果



図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-8 パターニングデッドエリア低減に対する J_{sc} 向上効果



図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-9 セル幅最適化による変換効率の試算

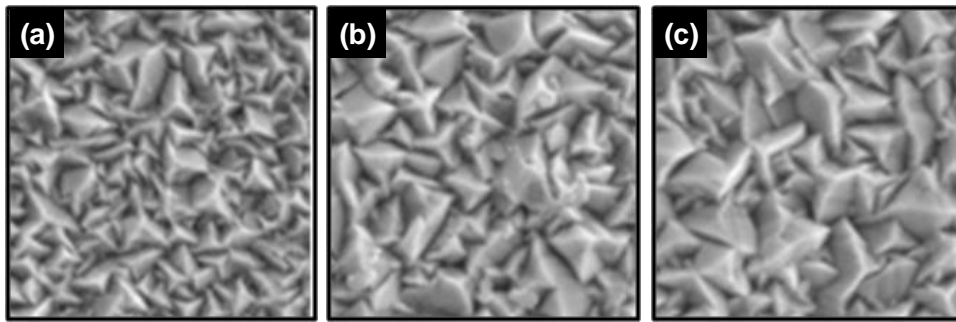
5) 光学設計の改善技術開発

表面反射率の低減は CIS 系太陽電池に限らず太陽電池に共通の解決すべき課題である。当社ではサブモジュール最表面での反射率低減を目指し、透明導電膜窓層のテクスチャ形状の最適化および反射防止膜の検討を行った。

まず、透明導電膜窓層であるが、透明導電膜のシート抵抗を維持した状態で、テクスチャ構造のサイズ、アスペクト比の検討を行った。透明導電膜の改良による J_{sc} 向上のためには言うまでもなく、透過率向上と反射率低減の両立が不可欠であるが、これまではガラス基板上での単膜評価結果を指針として開発を進めてきた。しかしながら CIS 太陽電池への適用に際し、単膜評価結果だけでは見間違ふことがあることが明らかとなり、CIS 上での透明導電膜の最適化を進めた。この結果、単膜評価では透過率が低い状態でも CIS へ適用した場合に J_{sc} が向上する条件を見出し、 J_{sc} を 1%強向上することに成功した。(図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-10)

また、反射防止膜についてもシミュレーションを併用して最適設計を行った。シミュレーションからはダブル AR 膜およびトリプル AR 膜を用いても、シングル AR 膜に比べ優位な向上が期待されなかった。実験的にもシングル AR 膜とダブル AR 膜での J_{sc} 向上率は共に 4% であり優位差は確認されなかった(図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-11)。このため、以降の実験についてはシングル AR 膜を適用することとした。

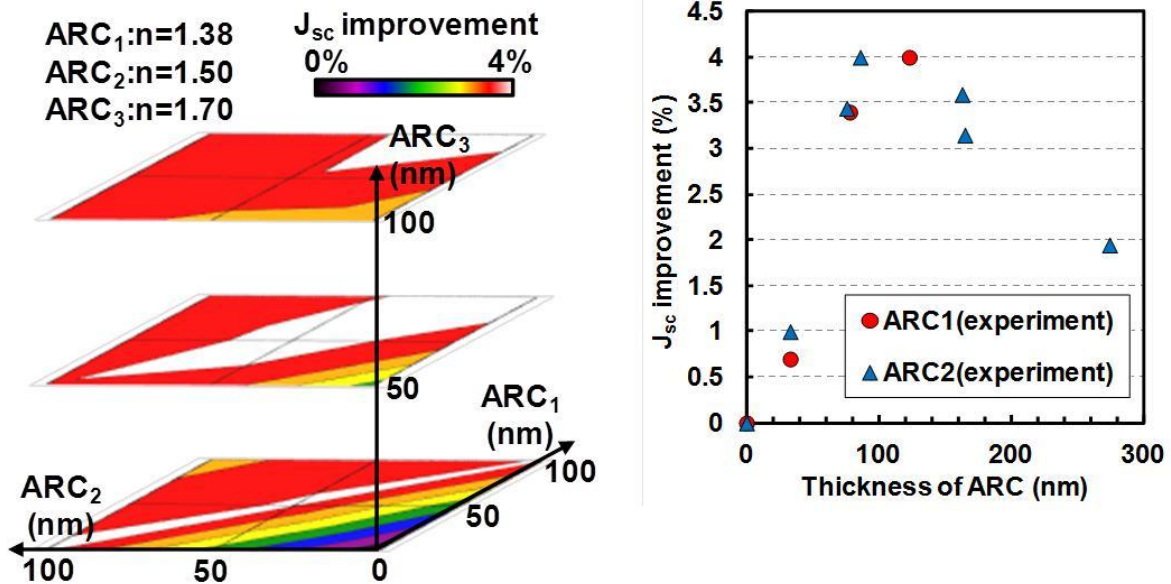
SEM image of textured ZnO surface 1 μm



Normalized light transmittance (ZnO on glass)		
1	0.938	0.888
Normalized J_{sc} (Submodules)		
1	1.015	1.004
Light trapping ratio		
1	1.082	1.131

Trapping > Transmittance loss

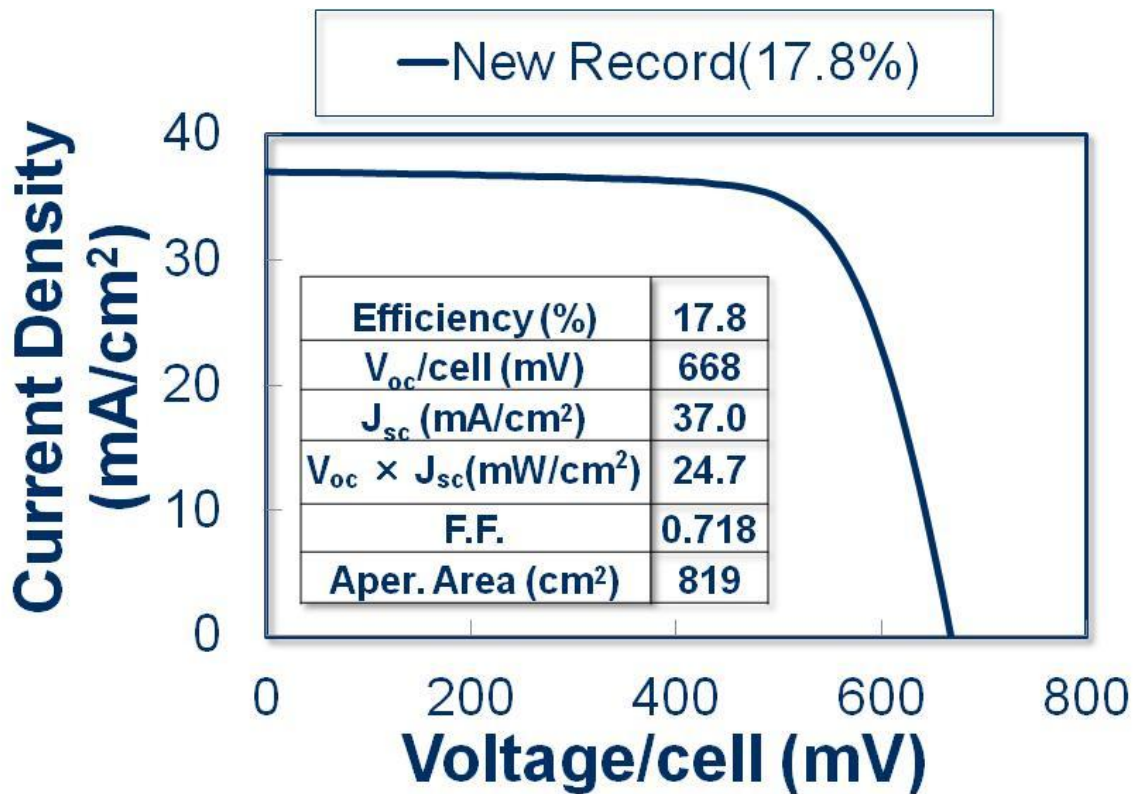
図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-10 透明導電膜表面形状と透過率、 J_{sc} の関係



図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-11 AR 効果

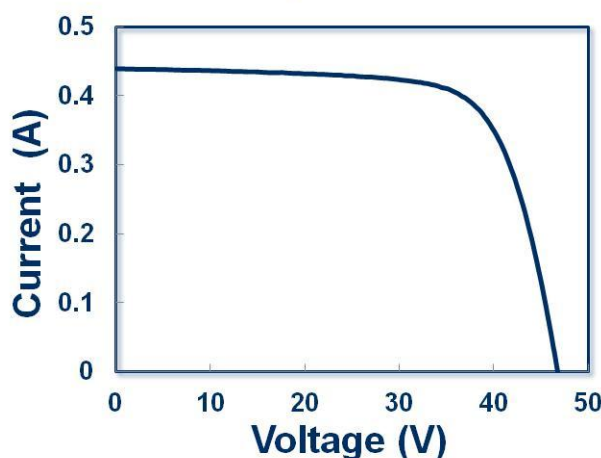
以上の 1) から 5) の開発項目の成果を組み合わせることで、30cm 角サイズのサブモジュールにおいて 17.8% (自社測定、819cm²) を達成した (図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-12)。これは中間目標である 17% を大きく上回り、最終目標である 18% にあと一歩と迫るものである。

この 17.8%と同様のレシピで作製したサンプルを外部認証機関であるドイツの TUV Rheinland で測定し、17.5% (837cm²) の認定データを得た (図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-13)。17.8%の内訳としては $J_{sc} \times V_{oc}$ が 24.7mW/cm² と最終目標である 24mW/cm² を大きく上回る一方、FF は最高値 (別サンプル) でも 0.73 台であり接合界面形成技術をもう一步進めることができれば、最終目標の達成は確実なものとなる。



図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-12 17.8%の I-V 特性 (自社測定)

We sent a 30x30cm²-sized module prepared with the same recipe as our champion module to TÜV in Cologne, Germany.



TÜVRheinland[®]
Precisely Right.

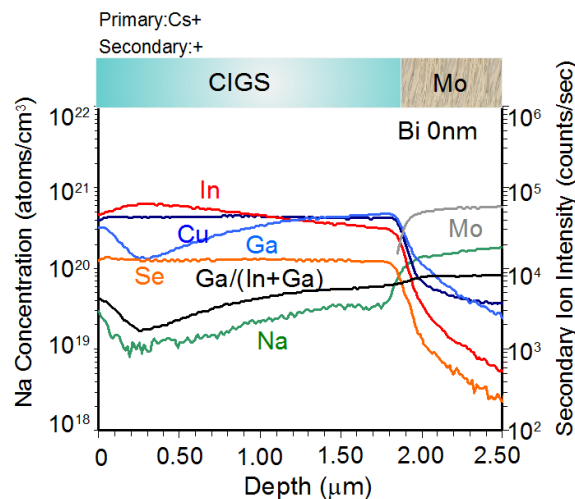
P_{mpp} (W)	14.7	±3.2%
V_{oc} (V)	46.76	±1.0%
I_{sc} (A)	0.44	±2.3%
FF (%)	71.4	
Efficiency (%)	17.53	±0.6%
Aperture Area (cm²)	837.3	±0.8%

図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-13 外部認証機関 (TUV) による I-V 測定結果

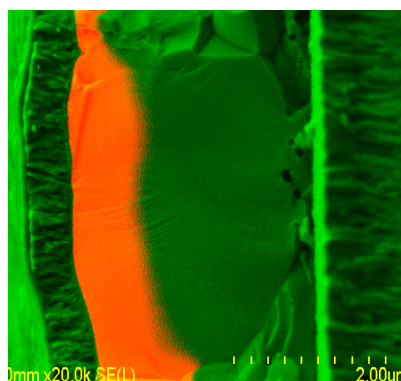
② 「C I S系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発（小面積セルの研究開発）」

1) 禁制帯プロファイル制御技術開発

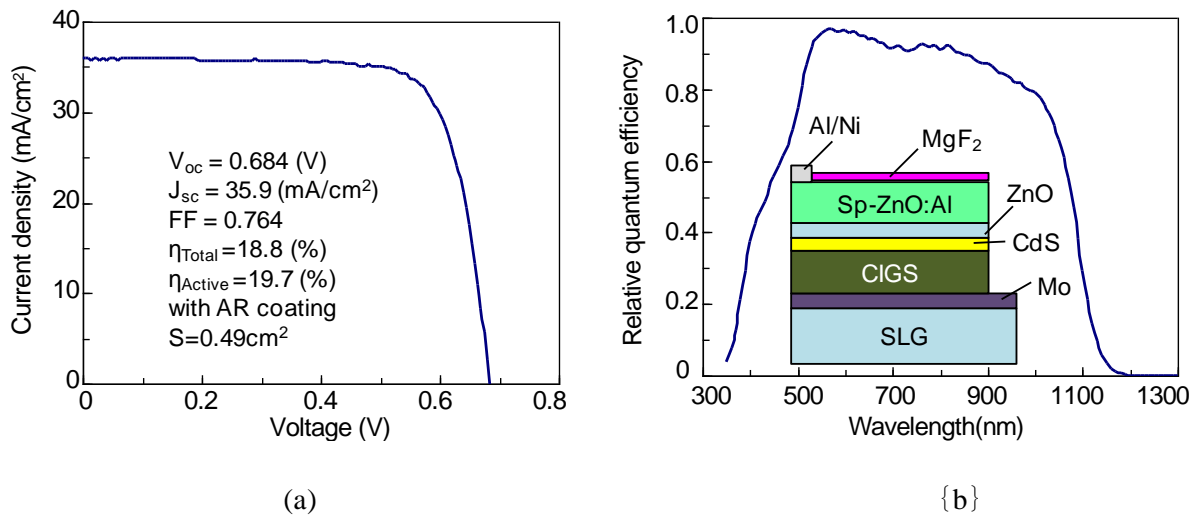
AMPS-1D デバイスシミュレーション・ソフトを用い、2重禁制帯プロファイルを有する CIGS 太陽電池の最適デバイス設計を行なった。その結果、高効率の得られる $Ga/(In+Ga)=0.3$ の CIGS 太陽電池では、禁制帯幅が最小となるノッチ位置が空乏層幅の中央付近で「 $V_{oc} \times J_{sc}$ 」および変換効率が最大となること、また、ノッチ位置が裏面側に行くに従い、 V_{oc} は上昇するが、 J_{sc} は逆に低下することがわかった。図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-14 はこのシミュレーション結果に基づき、実際に3段階法で作製した CIGS 薄膜の SIMS 分析の結果を示す。また、この CIGS 光吸収層を用いて作製した $ZnO:Al/CdS/CIGS/Mo$ 構造セルの EBIC（電子線誘起電流）像を図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-15 に示す。これらの図から、ノッチ位置が空乏層の中央付近にあることが分かり、高い変換効率が期待できる。実際、図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-16 の J-V 特性に示すように、変換効率 18.8%（真性変換効率 19.7%）が得られ、シミュレーション結果の妥当性を実証した。



図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-14 CIGS 薄膜の SIMS 分析結果



図Ⅲ-2- (ハ) -A-1-15 $ZnO:Al/CdS/CIGS/Mo$ 構造セルの EBIC 像



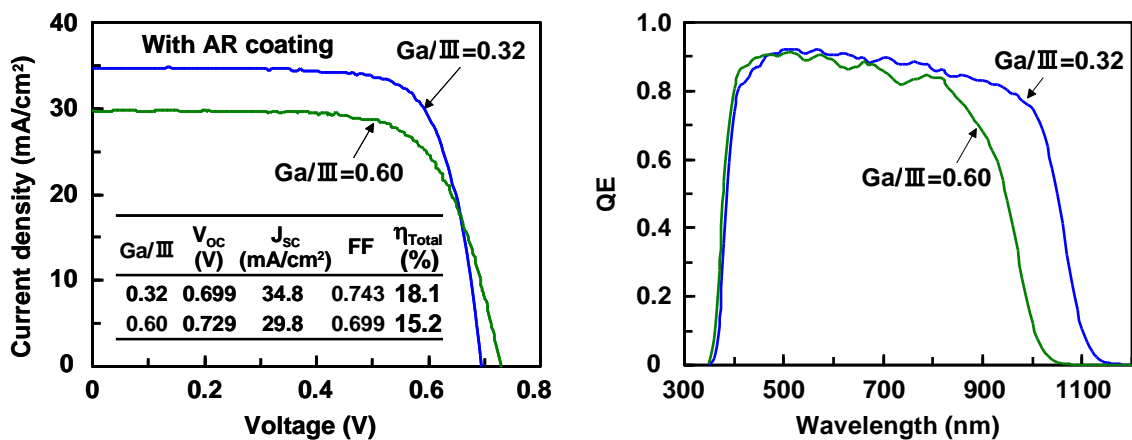
図III-2- (ハ) -A-1-16 (a) 電流-電圧(J-V)特性と(b)スペクトル感度特性

2) 新規界面制御技術開発

① ALD-Zn(O, S)バッファ層を用いたCIGS太陽電池

原子層堆積法(ALD)法はZn(O, S)バッファ層中のO/S比を制御性良く制御できるため、高効率化に必要なバッファ層と光吸収層の伝導帯オフセットの最適化が容易である。ここでは、ALD-Zn(O, S)バッファ層およびMOCVD法によるZnO:B透明導電膜を用いたCdフリーCIGS太陽電池の試作を試みた。各層を最適化した結果、Ga/(In+Ga)=0.32および0.60で各々、変換効率18.1%および15.2%を得た。ZnO:B/ZnO/Zn(S, O)/CIGS/Mo構造太陽電池のJ-V特性およびスペクトル感度特性を図III-2-(ハ) -A-1-17に示す。

一方、Zn(O, S)バッファ層をスパッタ法で堆積した用いた場合、スパッタダメージにより変換効率は大きく低下し、13.2%となった。これらの結果から、バッファ層の形成にはスパッタダメージのないALD法やMOCVD法の採用が重要であることが実証された。



図III-2- (ハ) -A-1-17 ZnO:B/ZnO/Zn(S, O)/CIGS/Mo構造太陽電池のJ-V特性およびスペクトル感度特性

② CBD-ZnS(0, OH)バッファを用いた CIGS 太陽電池

MOCVD-ZnO:B/CBD-ZnS(0, OH)/CIGS 太陽電池に関して、熱処理 (130°C) と光照射 (AM1.5, 100mW/cm²) を組み合わせた熱・光照射処理 (HLS: Heat Light-Soaking) により、変換効率を 8.5% から 17.5% へと大幅に改善出来ることを見出し (表 III-2- (ハ) -A-1-1)、本手法が高効率化のために有効であることがわかった。さらに熱・光照射効果が、熱によるものか光なのかを明らかにするため、加熱単独、光照射単独、および熱・光照射の前後でのセル特性を調べた。その結果、図 III-2- (ハ) -A-1-18 に示すように、熱、光単独でなく、高温での光照射が高効率化に重要であること確認した。また、このメカニズムを調べるため、各処理前後の CBD-ZnS(0, OH) バッファ層の組成を XPS により調べた。その結果、図 III-2- (ハ) -A-1-19 に示すように、HLS 後に S/(S+O) 比が膜表面側で減少することから、禁制帯幅が減少し、光生成キャリアの障壁となる ZnS(0, OH)/CIGS 間の伝導帯オフセットの変化が主因であることがわかった。図 III-2- (ハ) -A-1-20 はこの手法により作製した CIGS 太陽電池の J-V 特性とスペクトル感度特性である。

表 III-2- (ハ) -A-1-1 LS および HLS 前後の MOCVD-ZnO:B/CBD-ZnS(0, OH)/CIGS 太陽電池のセル特性

	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF	η (%)
Initial	0.665	31.4	0.408	8.5
LS 10min	0.678	31.8	0.525	11.3
HLS 40min	0.686	34.0	0.715	16.7
HLS 120min	0.686	33.8	0.756	17.5

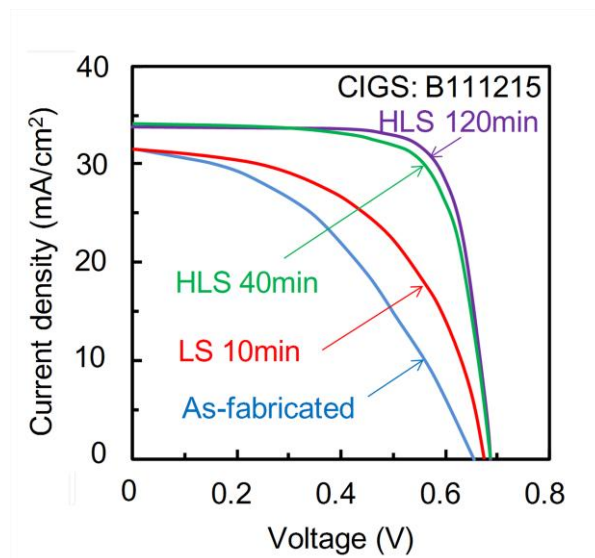
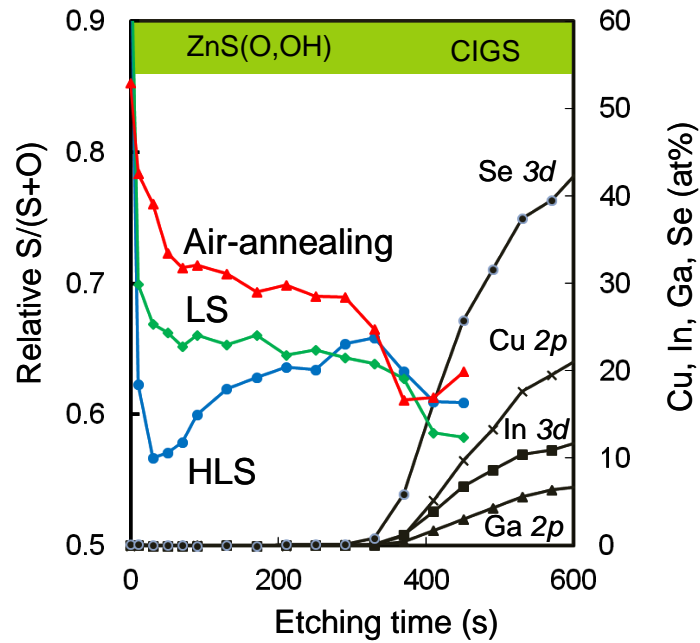
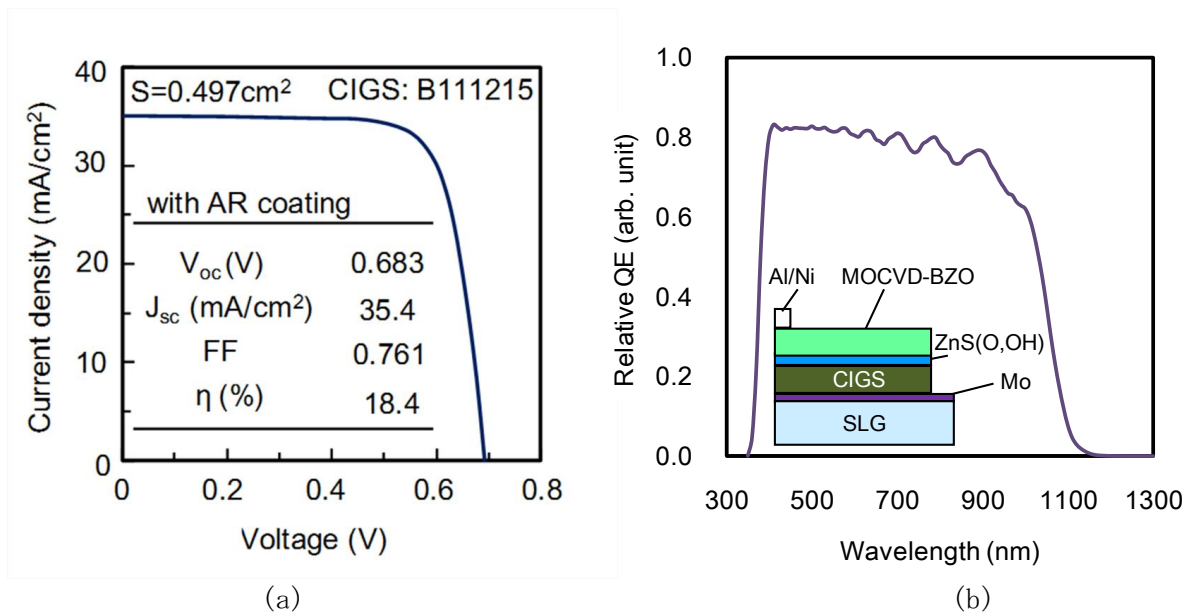


図 III-2- (ハ) -A-1-18 加熱単独、光照射単独、および熱・光照射によるセル特性の変化



図III-2- (ハ) -A-1-19 熱・光照射処理の前後における ZnS(O,OH)バッファ層の S/(S+O)に関する XPS デプスプロファイル。



図III-2- (ハ) -A-1-20 MOCVD-ZnO:B/CBD-ZnS(O,OH)/CIGS 太陽電池の (a) J-V 特性と (b) スペクトル感度特性

表Ⅲ-2- (ハ) -A-1-2 研究開発項目ごとの成果・達成度

中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
①「C I S系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発（大面積モジュールの研究開発）」 1) $V_{oc} \times J_{sc}$ 向上のための p 型 CIS 系光吸収層の高品質化技術開発	最終目標である $24.0\text{mA}/\text{cm}^2$ を上回る $24.7\text{mW}/\text{cm}^2$ を達成した。	◎	
2) 高品質接合界面形成技術開発	高品質光吸収層にマッチングするバンド構造をもつ新たなバッファ層の可能性探索を行った。	△	伝導帯オフセットの制御技術開発
3) 基板面内分布の改善技術開発	基板面内での分光感度特性の均一化を実現し、電圧／電流のミスマッチ低減、および抵抗分布改善により FF が向上した。	○	
4) デバイス設計の改善技術開発	デッドリア低減に合わせたセル幅の最適設計を現状の最高効率と組み合わせることで、18%を超える変換効率が期待できる状態になった。	○	
5) 光学設計の改善技術開発	テクスチャ形状の最適化により J_{sc} で1%の向上が期待できる。	○	
②「C I S系薄膜太陽電池の高効率化技術の研究開発（小面積セルの研究開発）」 1) 禁制帯プロファイル制御技術	計算シミュレーションにより最適2重禁制帯プロファイルを求め、 $\text{ZnO}:\text{Al}/\text{CdS}/\text{CIGS}$ 構造セルで18.8%（真性変換効率19.7%）を達成した。	△	シミュレーション結果に基づく最適禁制帯プロファイル（ダブル・グレデッドバンドギャップ）を有するCIGS光吸収層の試作とセル化。
2) 新規界面制御技術	(1) 光MOCVD-ZnO:B窓層とMOCVD-ZnO/CBD-ZnS(0,0H)ダブルバッファ層を開発。 (2) 熱・光照射処理による	△	(1) 高Ga-CIGSエピ膜の適用による粒界再結合の低減、 (2) アルカリ金属添加技術

	<p>大幅な高効率化を見出すと共に、メカニズムを解明。変換効率 18.4%（真性変換効率 19.3%）を達成。</p>	<p>の開発 (3) CIGS 光吸収層の表面硫化による界面再結合の低減。 (4) バッファ層の最適化による界面再結合の低減。以上による $V_{oc} \times J_{sc}$ の改善。</p>
--	---	---

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

2. 実用化・事業化見通し

昭和シェル石油（株）／ソーラーフロンティア（株）は、過去に NEDO 委託事業で得られた技術開発成果を移転して、宮崎県に第 1 工場（公称生産能力 20MW／年）を建設・稼働させたのを皮切りに、現在では単一工場として世界最大の生産能力（公称生産能力 900MW／年）を誇る第 3 工場がフル生産に移行し、3 工場合わせた生産能力は約 1GW である。昨年 2011 年の生産実績は Photon International 紙（2012 年 3 月号）によれば薄膜分野では米国 First Solar 社に次ぐ 2 番手、結晶 Si を含めた総合でも上位 20 社に名を連ねるにまで至っている。この実績より、本 NEDO 共同研究事業で得られた技術開発成果を、生産技術開発を含めた実用化へ繋げる技術力を有することは十分に実証されていると言える。

当社のみならず太陽電池メーカーは、今まさに競争の真ただ中におり、開発成果を遅滞なく生産現場に落とし込むことができるかが生き残りのカギであり、その意味でも、本開発成果は量産化技術開発を経て、早いものでは 2013 年中には稼働中の生産工場に移転される見込みである。サブモジュール 18%（当社のモジュール出力で 200W）の技術が実用化されるのは 2015 年、事業化されるのは 2016 年を見込んでいる。

3. 波及効果

昨年3月に発生した東日本大震災は現在も日本国経済に甚大な影響を及ぼしており、エネルギーセキュリティの確保が国をあげての緊急の課題である。今後、不足すると予想されている電気エネルギー確保の為、様々な再生可能エネルギーの導入が検討・実施される中、まさに太陽光発電システムは普及拡大の即効性と電力需要のピークカットを可能とする有望な再生可能エネルギーと言える。これまで発電コストが高くとされてきた太陽光発電システムも、今年7月に本格スタートする再生可能エネルギーの全量買取り制度に後押しされ、メガソーラーをはじめ公共機関や企業、及び個人住宅など様々な形で導入され、エネルギー源として普及拡大に大きく貢献することができる。

4. 今後の展開

太陽電池をめぐる国際的な競争は淘汰の時代に入っており、数年前には世界 No1 であったメーカーですら生き残れない程の過酷な戦いになっている。特に直近 1-2 年から長くとも 5 年が勝負の年である。この勝負に「結晶」や「薄膜」といった垣根はなく低コスト化、高効率化を突き詰めることが必須である。CIS の敵も薄膜の First Solar のみならず、中国をはじめとする低コスト結晶 Si である。この競争に勝ち残るためには、低コスト化を進めると同時に、CIS の特徴である「高効率化が目指せる」ところを追求していくことが絶対条件であり、今後とも高効率化技術開発は最重要との位置付けである。

5. 特許論文リスト

表Ⅲ-2- (ハ) -A-5-1

	H22	H23	H24	計
特許出願(うち外国出願)	0(0)	5(0)	0(0)	5件
論文(査読付き)	1	0	5	6件
研究発表・講演(うち国際会議)	3(1)	24(14)	5(4)	32件
新聞・雑誌等への掲載	1	1	0	2件
受賞実績	3	0	0	3件
展示会への出展	—	—	—	一件

※：平成24年度6月25日現在

新聞・雑誌等への掲載、展示会への出展については、本成果単独のものはゼロであるが、本成果を含めた形では昭和シェル石油株およびソーラーフロンティア株として実施しており、その数の把握は困難である。このため、新聞・雑誌等への掲載についてはプレスリリースの2件の件数とする。

受賞実績

- 1) PVSEC-21において CIS 技術、世界最大級の国富工場、エネルギー企業としての社会的責任を評価され「PVSEC 特別賞」を受賞
- 2) PVSEC-21 において「Best Paper Award」を受賞(発表タイトル: EFFECTS OF GRAIN STRUCTURE ON Cu(InGa)(SeS)₂ THIN FILM SUBMODULE)
- 3) PVSEC-21 において「Student Paper Award」を受賞(発表タイトル: Wide-gap CIGS solar cells with ALD-Zn(O,S) buffer layers)

表Ⅲ-2- (ハ) -A-5-2 特許出願リスト

番号	出願日	出願番号	発明の名称	出願人
1	2011年9月2日	特願 2011-191451	薄膜太陽電池およびその製造方法	昭和シェル石油(株)
2	2011年10月24日	特願 2011-233445	太陽電池及びその製造方法、太陽電池モジュール	昭和シェル石油(株)
3	2011年11月25日	特願 2011-257927	薄膜太陽電池モジュール及びその製造方法	昭和シェル石油(株)
4	2011年12月1日	特願 2011-264011	C I S系薄膜太陽電池、及びその製造方法	昭和シェル石油(株)
5	2012年3月27日	特願 2012-070521	集積型薄膜太陽電池モジュールにおける分離溝の形成方法	昭和シェル石油(株)

表Ⅲ-2- (ハ) -A-5-3 論文 (査読付き) リスト

番号	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010年	Progress in Photovoltaics 18(6) (2010) 411-433	Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ based thin film photovoltaics: present status and current developments	N. Naghavi, D. Abou-Ras, N. Allsop, N. Barreau, S. Bücheler, A. Ennaoui, C.-H. Fischer, C. Guillen, D. Hariskos, J. Herrero, R. Klenk, K. Kushiya, D. Lincot, R. Menner, T. Nakada, C. Platzer-Björkman, S. Spiering, A.N. Tiwari, T. Törndahl
2	2012年	Electronic Materials Letters Volume 8, Number 2 (2012), 179-185	CIGS-based thin film solar cells and modules-Unique material properties	T. Nakada
3	2012年	Jpn. J. Appl. Phys., (2012) in press	Effects of antimony doping on Cu(In _{1-x} Ga _x)Se ₂ thin films and solar cells	Y. Yatsushiro, H. Nakakoba, T. Mise, T. Nakada
4	2012年	Jpn. J. Appl. Phys., (2012) in press	Effects of Bi incorporation on Cu(In _{1-x} Ga _x)Se ₂ thin films and solar cells	H. Nakakoba, Y. Yatsushiro, T. Mise, T. Nakada
5	2012年	Jpn. J. Appl. Phys., (2012) in press	Wide-gap Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells with Zn(O,S) Buffer layers Prepared by Atomic Layer Deposition	K. Nakashima, T. Kumazawa, T. Kobayashi, T. Mise, T. Nakada
6	2012年	Jpn. J. Appl. Phys., (2012) in press	Transparent Conducting ZnO:B Thin Films Grown by Ultraviolet Light Assisted Metal Organic Chemical Vapor Deposition Using	T. Kobayashi, K. Yamauchi, T. Mise, T. Nakada

			Triethylboron for Cu(In,Ga)Se ₂ Solar Cells	
--	--	--	--	--

表Ⅲ-2- (ハ) -A-5-4 研究発表・講演（国際会議）リスト

番号	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2010年9月6-10日	25th EU-PVSEC	PROGRESS TOWARD 17% EFFICIENCY IN LARGE AREA CIS-BASED THIN-FILM SUBMODULES	H. Sugimoto, Y. Chiba, Y. Kawaguchi, T. Morimoto, T. Yagioka, M. Nagahashi, T. Miyano, S. Kijima, T. Aramoto, Y. Tanaka, H. Hakuma, S. Kuriyagawa and K. Kushiya
2	2011年6月19~24日	37th IEEE -PVSC	Achievement of Over 17% Efficiency with 30x30cm ² -Sized Cu(InGa)(SeS) ₂ Submodules	H. Sugimoto, T. Yagioka, M. Nagahashi, Y. Yasaki, Y. Kawaguchi, T. Morimoto, Y. Chiba, T. Aramoto, Y. Tanaka, H. Hakuma, S. Kuriyagawa and K. Kushiya
3	2011年9月5~8日	26th EU-PVSEC	Challenge to 18% Efficiency with 30x30cm ² -sized Cu(InGa)(SeS) ₂ Submodules in Solar Frontier	H. Sugimoto, Y. Kawaguchi, Y. Yasaki, T. Aramoto, Y. Tanaka, H. Hakuma, S. Kuriyagawa and K. Kushiya
4	2011年11月28日~12月2日	PVSEC-21	EFFECTS OF GRAIN STRUCTURE ON Cu(InGa)(SeS) ₂ THIN FILM SUBMODULE	S. Kijima, T. Morimoto, T. Yagioka, M. Nagahashi, H. Sugimoto, Y. Chiba and H. Hakuma
5	2012年6月4日~8日	38th IEEE -PVSC	ACHIEVEMENT OF 17.5% EFFICIENCY WITH 30 × 30cm ² -SIZED Cu(In, Ga)(Se, S) ₂ SUBMODULES	M. Nakamura, Y. Chiba, S. Kijima, K. Horiguchi, Y. Yanagisawa, Y. Sawai, K. Ishikawa and H. Hakuma
6	2011年6	37th IEEE	Impacts of Sb and Bi Inco	T. Nakada, Y. Honishi, Y.

	月19～24日	-PVSC	Corporations on CIGS Thin Films and Solar Cells	Yatsushiro, and H. Nakakoba
7	2011年9月29日	The 6th Korea-China-Japan Intern. Symp. on Photovoltaics	Current R&D of Chalcopyrite-Based Thin Film Solar Cells at AGU	T. Nakada
8	2011年11月10日	International Symposium on Chalcogenide Materials and Devices	CIGS-based Thin Film Solar Cells and modules- Unique material properties of CIGS-	T. Nakada
9	2011年11月28日～12月2日	PVSEC-21	Buffer Layers and Transparent Conducting Oxides for CIGS-based Thin Film Solar Cells	T. Nakada
10	2011年11月28日～12月2日	PVSEC-21	Growth of ZnO:B Thin Films by Photo-Assisted MOCVD Method and Its Application to CIGS Solar Cells	T. Kobayashi, K. Yamauchi, T. Mise and T. Nakada
11	2011年11月28日～12月2日	PVSEC-21	Wide Gap CIGS Solar Cells with Sputtered-Zn (O,S) Buffer Layers	T. Kumazawa, K. Nakashima, T. Mise and T. Nakada
12	2011年11月28日～12月2日	PVSEC-21	ZnO-Based Window Layers by MOCVD Process for CIGS Solar Cells	K. Yamauchi, T. Kobayashi, T. Mise and T. Nakada
13	2011年11月28日～12月2日	PVSEC-21	Wide Gap CIGS Solar Cells with ALD-Zn (O,S) Buffer Layers	K. Nakashima, K. Toyokazu, T. Mise and T. Nakada
14	2011年11月28日～12月2日	PVSEC-21	Effects of Sb Incorporation on CIGS Thin Films and Solar Cells	Y. Yatsushiro, H. Nakakoba, T. Mise and T. Nakada
15	2011年11月28日～12月2日	PVSEC-21	Effects of Bi Incorporation on CIGS Thin Films and Solar Cells	H. Nakakoba, Y. Yatsushiro, T. Mise and T. Nakada

16	2012年2月28日	KIER workshop	Current R&D for CIGS thin film solar cells at AGU	T. Nakada
17	2012年5月	EMRS	Revised Conduction Band Offset of High Efficiency CBD-ZnS(O, OH)/CIGS Thin Film Solar Cells	T. Nakada, T. Kobayashi, K. Yamauchi, and H. Yamaguchi
18	2012年6月4日～8日	38th IEEE -PVSC	Comparison of cell performance of ZnS(O, OH)/CIGS solar cells with MOCVD-ZnO:B and sputter-deposited ZnO:Al window layers	T. Kobayashi, K. Yamauchi and T. Nakada
19	2012年6月4日～8日	38th IEEE -PVSC	Impacts of Post-treatments on Cell Performance of CIGS Solar Cells with Zn-Compound Buffer Layers	T. Nakada, T. Kobayashi, T. Kumazawa, H. Yamaguchi

表Ⅲ-2- (ハ) -A-5-5 研究発表・講演（国際会議以外）リスト

1	2011年6月30日～7月1日	日本学術振興会 第175委員会 第8回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	30 cm角CISサブモジュールにおける17%達成	森本卓也, 八木岡剛, 長橋正典, 河口由佳, 千葉善之, 杉本広紀, 田中良明, 白間英樹
2	2010年11月29日	日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第2回セミナー	CIGS系太陽電池の高効率化	中田時夫
3	2010年12月2日	日本表面科学会 第31回表面科学セミナー	化合物系太陽電池開発と評価解析	中田時夫
4	2011年4月21日	日本学術振興会 第154委員会 第76回研究会	化合物系太陽電池開発と評価解析	中田時夫
5	2011年6月30日～7月1日	日本学術振興会 第175委員会 第8回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	MOCVD法によるCIGS太陽電池用ZnO系窓層の開発	堀口恭平, 山内浩太郎, 小林大造, 三瀬貴寛, 中田時夫
6	2011年6月30日～7月	日本学術振興会 第175委員会 第8	スパッタ法によるZn(O, S)バッファ層	高橋・中島・熊澤・小林・三瀬・中田

	1日	回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	を用いたワイドギャップCIGS太陽電池の試作	
7	2011年8月30日	第72回応用物理学関係連合講演会	光MOCVD法によるZnO:B透明導電膜の作製とCIGS太陽電池への応用	小林大造, 山内浩太郎, 三瀬貴寛, 中田時夫
8	2011年12月9日	多元系機能材料研究会 年末講演会	ギガワット時代のCIGS太陽電池ー期待と課題	中田時夫
9	2012年3月17日	第59回応用物理学関係連合講演会	ALD-Zn(O, S)バッファ層を用いた高効率CdフリーCIGS太陽電池	熊澤豊和, 中島一哉, 小林大造, 三瀬貴寛, 中田時夫
10	2012年3月17日	第59回応用物理学関係連合講演会	MOCVD-ZnO:B及びスパッタ-ZnO:Al窓層を用いたCIGS太陽電池の特性比較	小林大造, 山内浩太郎, 成田有希, 山上由里子, 中田時夫
11	2012年3月17日	第59回応用物理学関係連合講演会	CIGS薄膜及びセル特性に及ぼすビスマス添加効果	中木場祐也, 八ッ代雄太, 三瀬貴寛, 中田時夫
12	2012年3月17日	第59回応用物理学関係連合講演会	ステンレス箔基板を用いたフレキシブルCIGS太陽電池	小川達也, 三瀬貴寛, 中田時夫
13	2012年5月31日~6月1日	日本学術振興会 第175委員会 第9回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム	UVアシストMOCVD法によるZnO:B窓層を用いた高効率CdフリーCIGS太陽電池	小林大造, 熊澤豊和, 山口博, 中田時夫

表III-2- (ハ) -A-5-6 新聞・雑誌等への掲載（プレスリリース）リスト

番号	発表年月日	内容
1	2011年3月29日	「ソーラーフロンティア厚木リサーチセンターにおいて世界最高の変換効率を達成 30cm角のCIS薄膜太陽電池サブモジュールの開口部面積でエネルギー変換効率 17.2%を実現」
2	2012年2月28日	「ソーラーフロンティア、変換効率の世界記録を更新 サブモジュールのエネルギー変換効率で 17.8%を実現、商業生産化を視野に」

B フレキシブル CIGS 太陽電池モジュールの高効率化研究

1. 成果詳細

本プロジェクトは、従来にない高効率、軽量（フレキシブル）、低コストな CIGS 太陽電池の実現を目的とし、富士フイルム、アルバック、鹿児島大学、筑波大学、豊橋技術科学大学、産業技術総合研究所（富士フイルムからの再委託）が共同で進めている。

具体的には次の 2 課題に取り組んでいる。

課題 1：フレキシブル基板上的 CIGS 集積型モジュール作製技術の開発

10×10cm 基板で達成した性能を大面積（30×30cm）、高生産性条件（高速成膜、ロール・トゥ・ロールプロセス）にて実現することを目的とする。

課題 2：CIGS 高効率化技術の開発

禁制帯幅 1.4～1.5eV のワイドギャップ CIGS 太陽電池の高効率化を狙う。

粒界・欠陥・界面・表面を徹底的に評価し、損失要因を解明することで技術的指針を明確にする。

このうち課題 1 を富士フイルム、アルバック、産業技術総合研究所が、課題 2 を鹿児島大学、筑波大学、豊橋技術科学大学、産業技術総合研究所が担当する。最終的に両者の技術を統合し、最終年度の目標を達成する計画である。（図 III-2-3-B(1)）

課題 2 における研究分担は図 III-2-3-B(2)に示すようになっている。図 III-2-3-B(3)は単接合太陽電池の変換効率と禁制帯幅との関係を示したものであるが、禁制帯幅 1.4eV 付近で変換効率がピークになると理論予測されている。ところが CIGS 太陽電池では禁制帯幅が 1.2eV を超えると逆に効率が低下してしまっている。この問題を解決することが更なる変換効率向上に繋がるものと考え、我々はワイドギャップ CIGS 太陽電池の粒界・欠陥・界面・表面を徹底的に評価し損失要因を解明することで高効率化を実現する。

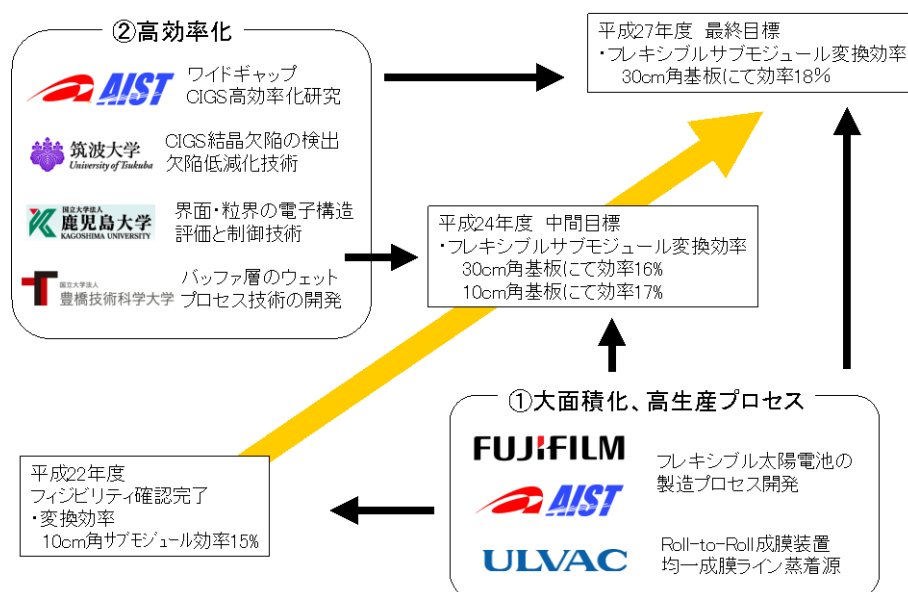
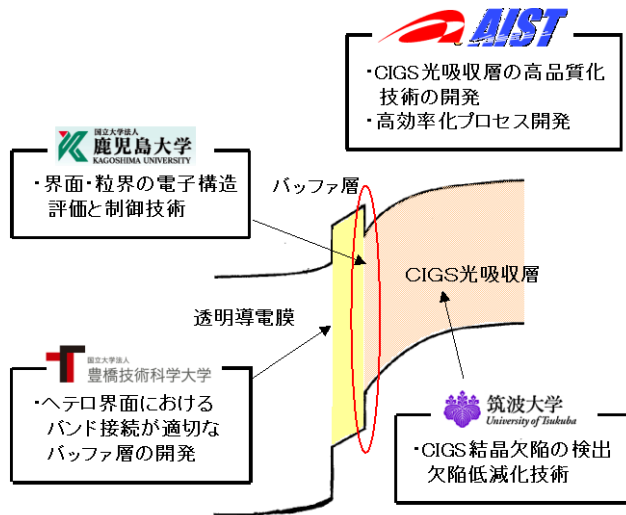
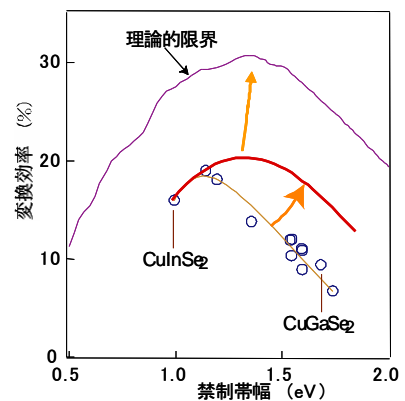


図 III-2-3-B(1) 「フレキシブル CIGS 太陽電池モジュールの高効率化研究」の開発体制



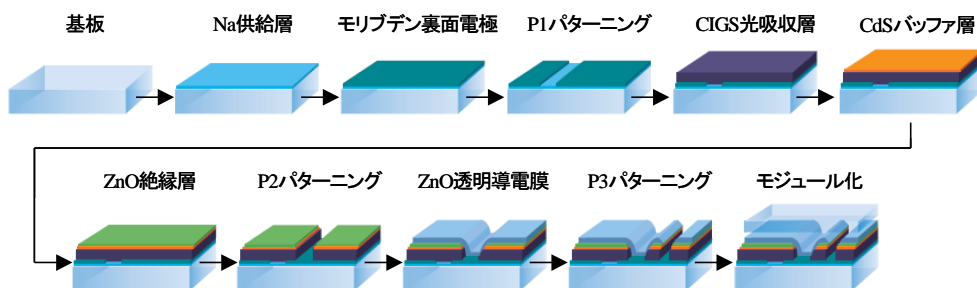
図III-2-3-B(2) 課題 2 に対する各研究機関の役割



図III-2-3-B(3) 変換効率と禁制帯幅の関係

1-1. フレキシブル基板上の集積化モジュール作製技術の開発 (富士フィルム・産業技術総合研究所)

富士フィルムは金属基板上に絶縁層を形成し、高い耐熱性と絶縁性を両立したフレキシブル金属基板を開発した。本研究は、この金属基板を用いて高効率な集積型フレキシブル CIGS 太陽電池を開発することを目的としている。従来の蒸着法による CIGS 太陽電池のプロセスは基板が青板ガラスであることを前提として開発されてきたため、金属基板に対してそのまま適用することはできない。そこで金属基板に適した集積型 CIGS 太陽電池プロセスの開発を行った。



図III-2-3-B(4) フレキシブル CIGS 太陽電池のプロセスフロー

(a) CIGS 光吸収層へのナトリウム添加

CIGS 光吸収層へナトリウムをドーピングするため、基板とモリブデン裏面電極との間にナトリウム供給層を設けている。図III-2-3-B(5)はその効果を示したものであるが、ナトリウム供給層の成膜条件を最適化することで開放電圧が 0.08V 上昇し、変換効率が 3.5% 増大している。

(b) フレキシブル基板上へのレーザーパターニング

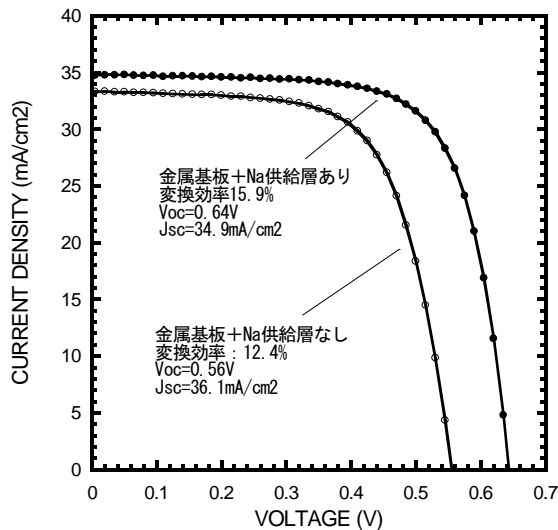
我々が使用する基板は非透明であるため、ガラス基板向けの条件ではモリブデ

ン裏面電極をレーザパターニングする際に基板（特に、表面に形成された絶縁層）にダメージが生じていた（図Ⅲ-2-3-B(6)）。これに対し、パターニングに使用するレーザ光のパルス幅、照射方法を工夫することで基板へのダメージを大幅に抑制できた。プロセス改良前後にてレーザパターニング部の絶縁特性を測定したところ、改良前では変換効率に影響が生じるレベルである 10^{-6}A/cm^2 以上のリーク電流が発生していたが、改良後ではそれを大幅に下回るレベルに抑えられている。

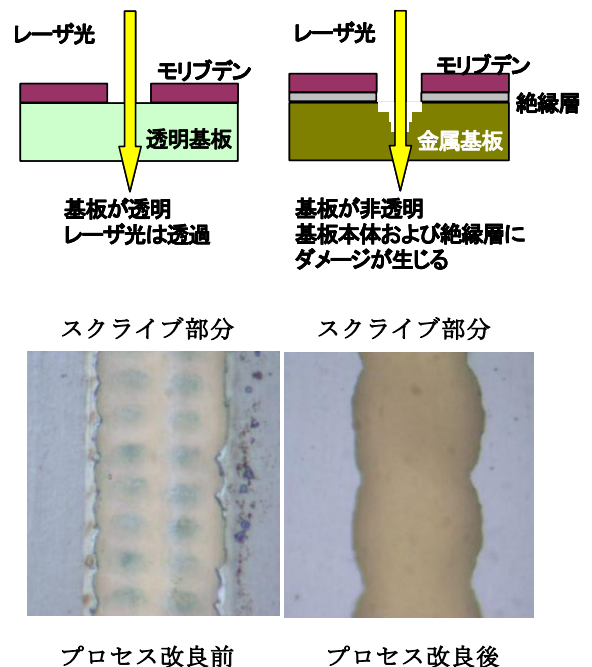
(c) フレキシブル基板上へのバッファ層成膜技術

バッファ層の成膜法として CBD（化学析出）法を採用しているが、アルカリ溶液を用いるため金属基板（が剥き出しの部分）を保護する必要がある。しかし保護の方法によっては面内膜厚が不均一になる。我々は基板を保護しつつ、(1)CBD 溶液が不均一に基板に接するのを抑制する、(2)基板面内に生じる温度分布を解消する、成膜技術を新たに開発した。その結果 $10 \times 10 \text{cm}$ 基板表面に成膜したバッファ層の膜厚バラツキを従来に比べて 1/3 に抑制することができた。

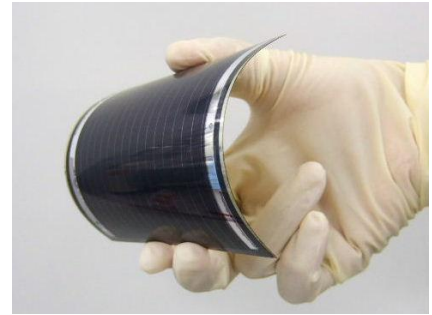
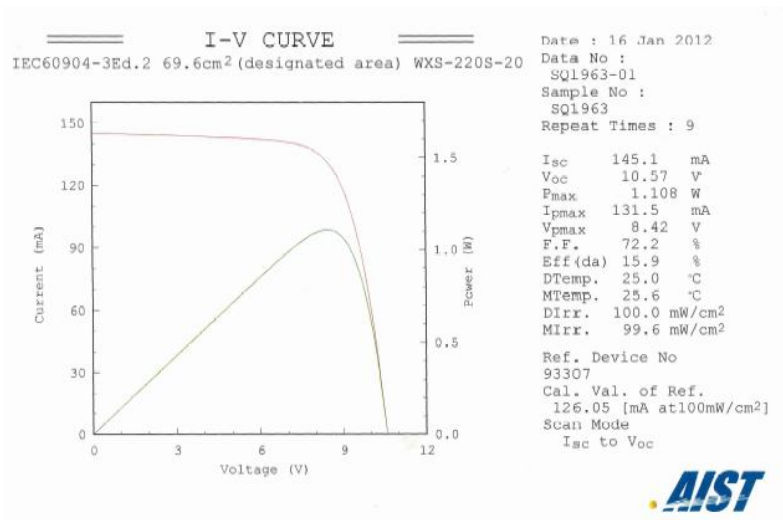
これらの技術をベースに、 $10 \times 10 \text{cm}$ サイズの金属フレキシブル基板上に CIGS 太陽電池サブモジュールを試作した。その結果、図Ⅲ-2-3-B(7)に示すように変換効率 15.9%（開放電圧 10.57V、短絡電流 33.85mA/cm^2 、フィル・ファクタ 0.722、開口面積 69.6cm^2 ）が得られた。この値は産業技術総合研究所 評価・標準チームによる公式測定値である。



図Ⅲ-2-3-B(5) ナトリウム添加の効果



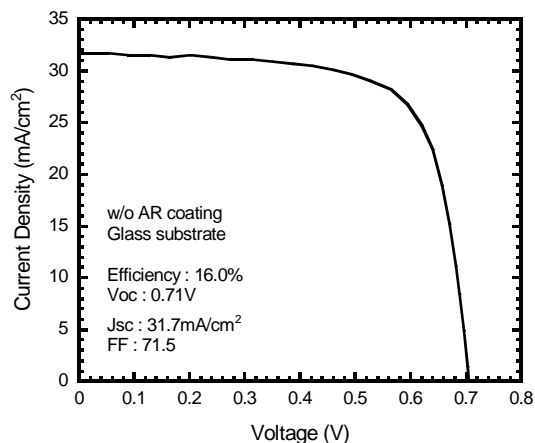
図Ⅲ-2-3-B(6) レーザパターニング形状



図III-2-3-B(7) 10×10cm サブモジュールの変換効率とその外観

1-2. CIGS 光吸収層の高速成膜技術開発 (富士フイルム)

太陽電池を低コスト化するには変換効率を向上させるだけでなく、製造スループットをあげる必要がある。とりわけ CIGS 光吸収層の高速成膜は低コストの鍵となる。検討により CIGS 層の高速化にともない電流リークが発生し、例えば 0.04 $\mu\text{m}/\text{min}$ から 0.13 $\mu\text{m}/\text{min}$ へと速度を変えた場合、変換効率が約 1% 低下することが分かった。我々は CIGS 光吸収層のプロセスを改良することで、この電流リークを抑制することに成功した。図III-2-3-B(8)は新プロセスにて高速成膜した際の電流-電圧特性を示したものであるが、変換効率 16% (AR コーティングなし) と高速成膜前と同等の高い効率が得られた。



図III-2-3-B(8) 高速成膜した CIGS 光吸収層の IV 特性

1-3. CIGS 層、Na 供給層・裏面電極層のロール・トゥ・ロール成膜技術と装置開発 (アルバック)

(1) CIGS 層成膜装置、Na 供給層・裏面電極層成膜装置の開発

CIGS 光吸収層の蒸着装置 (図III-2-3-B(9)) のチャンバー及びチャンバー内の巻取機構、脱ガス機構、基材加熱機構、冷却機構を開発した。真空性能において、

目標値である到達圧力 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 以下、圧力上昇値 $5 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下を達成することを確認した。また巻出軸から搬送されて巻取軸に巻き取られた際に起きる巻きズレが目標値である $\pm 2.5 \text{mm}$ 以下を満たした（高温加熱時、搬送長 16m、巻出軸から巻取軸までの長さ 13m において）。また搬送速度 $0.6 \text{m}/\text{min}$ 、張力 100N、150N の条件下において、基材にかかる張力変動が目標値である $\pm 5\%$ 以下を満たした。また加熱性能としても 500°C 以上の加熱が可能であることが、熱電対を取り付けた基材の加熱テストにより確認できた。

また Na 供給層と裏面電極層の成膜装置（図 III-2-3-B(10)）のチャンバー及びチャンパー内の巻取機構、脱ガス機構の開発を行った。真空性能において、目標値である到達圧力 $2.5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 以下、圧力上昇値 $6.5 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{sec}$ 以下を達成した。また、基材の巻きズレが $\pm 2.5 \text{mm}$ 以下、張力安定性が、張力 100N、150N、200N で張力変動が $\pm 5\%$ 以下と、いずれも目標性能を達成した。これにより、ロール基材に CIGS 層、Na 供給層、裏面電極層を成膜することが可能となった。

(2) CIGS 層成膜用ラインセルの開発

Ga、In を蒸発させ、幅 300mm の基材にそれらを着膜させる蒸発源（図 III-2-3-B(11)）を開発した。InGaSe 膜の成膜テストの結果、幅方向 250mm 範囲内の膜厚分布が $\pm 5\%$ 以内であることが確認できた。

(3) Na 供給層・裏面電極層成膜用のカソードの開発

Na 供給層と裏面電極層を成膜するためのカソード（図 III-2-3-B(12)）を開発した。成膜テストの結果、裏面電極層は幅方向 250mm 範囲内で膜厚分布 $\pm 5\%$ 以内に到達できた。一方、Na 供給層は膜厚分布 $\pm 5\%$ 以内に到達することができず、今後の課題である。



CIGS層成膜装置



Na供給層・裏面電極層成膜装置



ULVAC, Inc.
Industrial Equipment Division



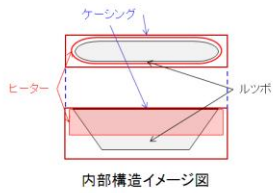
ULVAC, Inc.
Industrial Equipment Division

図 III-2-3-B(9) CIGS 層成膜装置

図 III-2-3-B(10) Na 供給層・裏面電極層の成膜装置

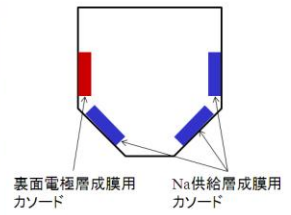


実物写真



▼ラインセル
 ・Ga、Inを成膜
 ・ルツボの内径は422mm
 ・ルツボの開口に蒸発物ができるだけ着かないように、開口周辺にヒーターを集中。

ULVAC Inc.
Industrial Equipment Division



▼カソード
 ・Na供給層成膜用カソード×3 (RF電源カソード)
 ・裏面電極層成膜用カソード×1 (DC電源カソード)

ULVAC Inc.
Industrial Equipment Division

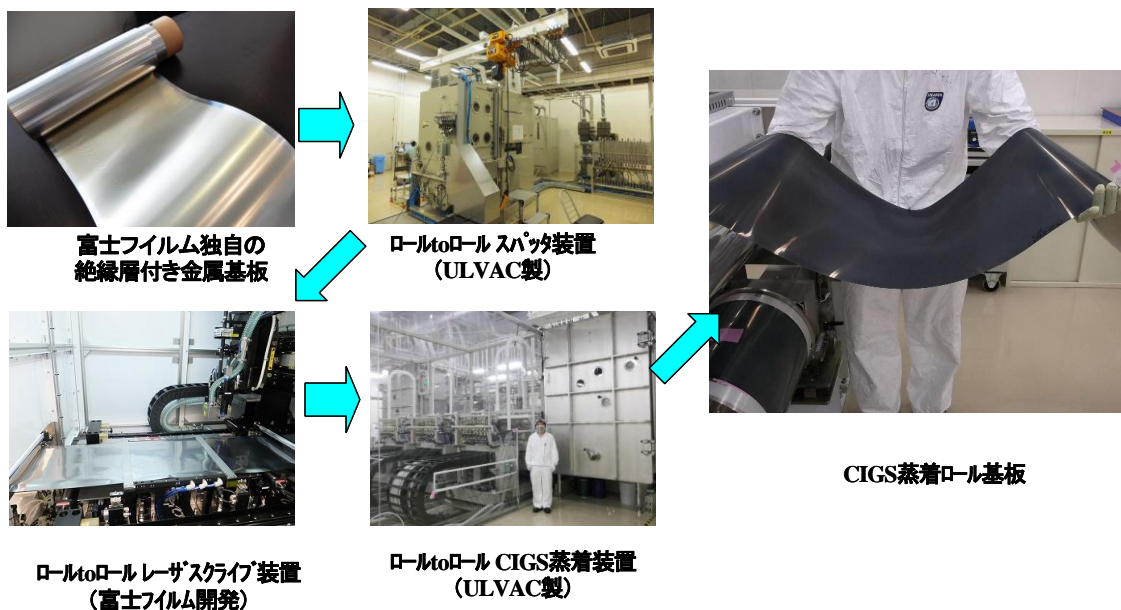
図III-2-3-B(11) 成膜用ラインセル

図III-2-3-B(12) 成膜用カソード

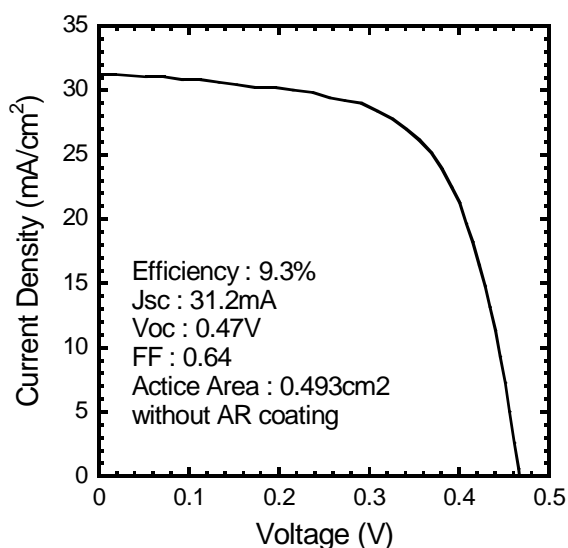
1-4. ロール・トゥ・ロールプロセス開発 (富士フィルム)

CIGS 光吸収層までの前半工程をロール・トゥ・ロールプロセス化した。図III-2-3-B(13)は、各ロール・トゥ・ロールプロセスの流れを示したものである。CIGS 光吸収層以降の後工程は基板を 30×30cm で切り離し、バッチ処理を行っている。

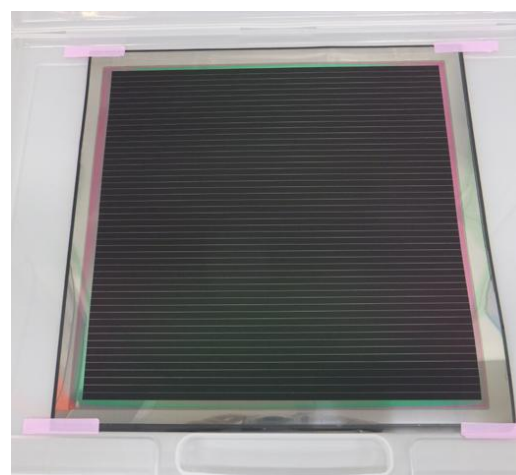
図III-2-3-B(14)は、ロール・トゥ・ロール CIGS 蒸着装置にて成膜した基板を小面積セルとして太陽電池特性を評価したものであるが、現時点で、変換効率 9.3% (開放電圧 0.47V、短絡電流 31.2mA/cm²、フィル・ファクタ 0.64、開口面積 0.493cm²) が得られている。また図III-2-3-B(15)は 30×30cm 基板を用いた作製したサブモジュールの外観を示したものである。サブモジュールの作製にあたり、CIGS 成膜より後工程はバッチプロセスにて行った。



図III-2-3-B(13) ロール・トゥ・ロールプロセス



図Ⅲ-2-3-B(14) 小面積セルの IV 特性



図Ⅲ-2-3-B(15) 30×30cm 基板上に作製した
フレキシブルサブモジュールの外観

1-5. ワイドギャップ CIGS 太陽電池の高効率化技術の開発 (産業技術総合研究所)

フレキシブル CIGS サブモジュールおよびワイドギャップ CIGS 太陽電池の高性能化を目的に小面積セルの高効率化技術開発、モジュール化工程の最適化、ナトリウム添加制御技術の開発を行った。また、CIGS 太陽電池のデバイスシミュレーション技術の開発も行った。

ワイドギャップ CIGS 太陽電池の高性能化の開発については三段階法による CIGS 製膜中の Se 供給量を最適化することによって CIGS 薄膜特性および太陽電池特性が向上することを見出した。またワイドギャップ化を目指して CIGS 薄膜中の Ga 組成を従来よりも高くすることにより、開放電圧 750mV 以上の小面積セルの作製を可能とし大幅な特性向上に成功した。最適 Se 供給量と高 Ga 組成条件を用いた高品質 CIGS 層の製膜技術を適用することによって、青板ガラス (SLG) 基板上的小面積セル (active area = 0.514cm²) において世界最高水準の変換効率 19.8% (反射防止膜あり) を実現した (図Ⅲ-2-3-B(16))。現状では CIGS 膜厚 (~2.2μm) と製膜温度 (~570°C) に特性向上の余地がまだ残されており、これらの最適化によって CIGS 太陽電池の更なる高効率化が可能と考えられる。

集積型サブモジュールの高性能化においては、スクライブ技術の高度化および透明導電膜 (TCO) の最適化の検討を行った。TCO の最適化では同一製膜条件下の CIGS 層を用いた評価が行えるように小面積サブモジュール (面積=4cm²) を作製し、そのデバイス特性によって TCO の評価を行った。CIGS 光吸収層の形成には高効率小面積セルを実現した新しい CIGS 製膜条件を用いた。その結果、現在までに最適膜厚の TCO を RPD 法によって CdS バッファ層上に堆積することで SLG 基板上的サブモジュール効率としては世界最高水準の 17.1% (反射防止膜あり) を達成した (図Ⅲ-2-3-B(17))。今後は、小面積セル同様、CIGS 膜厚および製膜温度の最適化により現状の世界最高効率 (17.4%) を超えるサブモジュールの実現が可能であると考えられる。

また、フレキシブル CIGS サブモジュールの低コスト化を目指して、フレキシブル基板と Mo 裏面電極の薄型化を図った。H22 年度では、フレキシブルセラミクスを基板にした CIGS サブモジュールにおいて、効率はこれまでの最高値と同じ 15.9%ながら、フレキシブル基板材料の薄型化 (300 μm →200 μm)、および Mo の薄膜化 (800nm→400nm) に成功した (図 III-2-3-B(18))。

SLG 基板以外のフレキシブル基板を用いる際に不可欠なナトリウム添加制御技術の開発については、従来法である ASTL 法に加え、CIGS 製膜中にナトリウムを添加するナトリウム化合物の同時蒸着法の開発に取り組んだ。この手法を用いて作製した小面積セルにおいて反射防止膜なしで 16%を超える変換効率が得られており、今後新しい CIGS 製膜条件に対するナトリウム添加条件の最適化を行うことにより基板の種類に依らず高効率太陽電池の実現が可能であると考えられる。

CIGS 太陽電池のデバイスシミュレーション技術の開発においては、CIGS 太陽電池のデバイスモデルを構築し、各薄膜層の物性値がデバイス特性に及ぼす影響について定量的な評価が可能な計算機シミュレーション技術を確立した。また、このデバイスモデルを使って CIGS 光吸収層の伝導帯のバンドオフセットと開放電圧の間の相関を検討し、高い開放電圧を得るために必要なデバイス作製条件を明らかにする事が出来た。

これまでの経験によると、SLG 基板上的小面積セルの変換効率とフレキシブル・サブモジュールの変換効率の間には、およそ 3%弱の差異がある。その内訳は、SLG 基板上的小面積セルと SLG 基板上的サブモジュールとの間の差異がおよそ 2%であり、SLG 基板上的サブモジュールとフレキシブル・サブモジュールの間の差異がおよそ 1%弱である。従って、フレキシブル・サブモジュールにおいて 17%以上の変換効率を達成するという中間目標を達成するためには、SLG 基板上的小面積セルにおいて 20%弱の変換効率を達成すれば良いことが分かる。上記のように、この必要条件は 19.8%という変換効率によって既に達成されている。従って、中間目標であるフレキシブル CIGS サブモジュール (10 \times 10cm) で 17%以上の目標変換効率が達成できる見込みである。

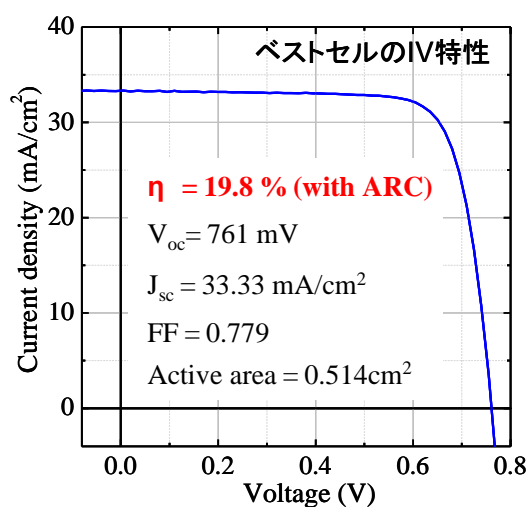


図 III-2-3-B(16) 小面積セルの IV 特性

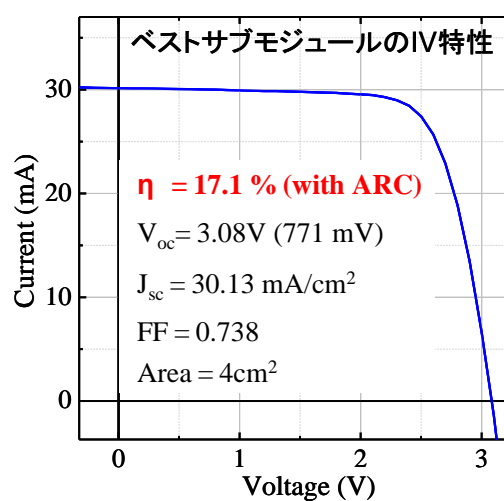
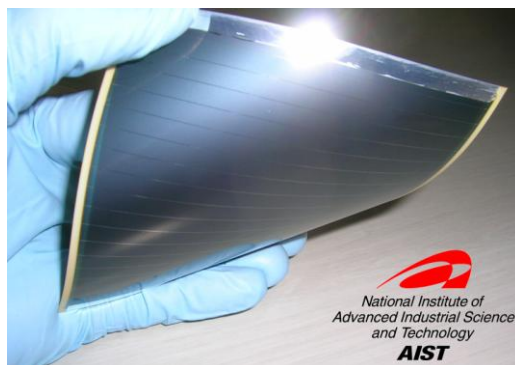


図 III-2-3-B(17) 小面積サブモジュールの IV 特性



図Ⅲ-2-3-B(18) 基板厚 200 μ m のフレキシブル CIGS サブモジュール

1-6. 新規バッファ層材料のウエットプロセスによる形成技術の開発 (豊橋技術科学大学)

豊橋技術科学大学はワイドギャップ (1.4eV 程度) CIGS に適合する新規バッファ層の材料とその成形技術、およびバンドギャップチューニング技術の開発を行い、ワイドギャップ CIGS 太陽電池の高効率化を図る。

(事業内容)

① CBD 法によるバンドギャップ制御 酸化物系バッファ層形成技術の開発

アルカリ性アンモニア錯体水溶液から CBD 法により作成した ZnO 系バッファ層材料の局所ならびに微細組織を検討しバンドギャップとの相関を明らかにすると共に、CIGS 太陽電池の太陽電池特性との相関を明らかにし高効率化への設計指針を明らかにする。

② CBD 法における溶液化学的制御技術の開発

アンモニア錯体水溶液について化学熱力学的に溶液中錯体種ならびに電位-pH 図をシミュレーションし、CBD 析出制御パラメータを予測し実験的に実証すると共に、酸化物系バッファ層の膜厚制御ならびに溶液の安定性向上のための溶液化学的設計指針を明確にする。

(進捗状況と成果)

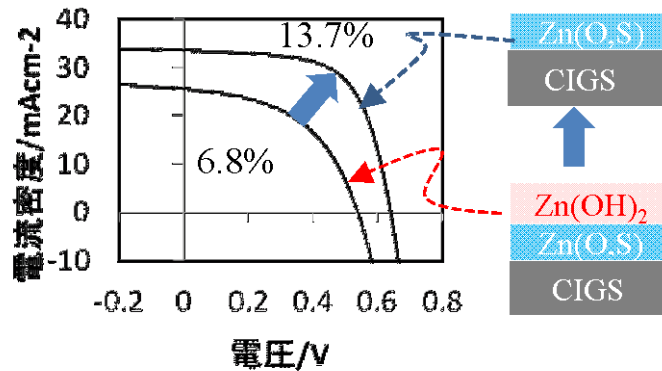
① CBD 法によるバンドギャップ制御酸化物系バッファ層形成技術の開発

溶液中のチオ尿素濃度と関係して Zn(O,S,OH)層の O/S 比が変化し、バンドギャップも 2.7-3.7eV で変化した。CBD 製膜後にアンモニア水浸漬を行うことによって、CIGS 太陽電池の変換効率が 6.8%から 13.7%に倍増した。(図Ⅲ-2-3-B(19)) そこで XAFS 測定から求めた動径分布関数(RDF)より、CBD 製膜により形成された Zn(O,S,OH)層は、結晶性の良い Zn(O,S)下層と結晶性の低い Zn(OH)₂ 上層からなる積層構造を有し、アンモニア水溶液浸漬により上層の Zn(OH)₂ 層が選択的に溶解し、結晶性の良い Zn(O,S)層が残存し膜厚も小さくなることを明らかにした。鹿児島大学での電子分光測定によって、太陽電池変換効率ならびにヘテロ界面バンドアライメントに及ぼす表面 Zn(OH)₂ 層の効果を初めて明らかにした。また、積層構造形成ならびにアンモニア水中での Zn(OH)₂ 溶解機構

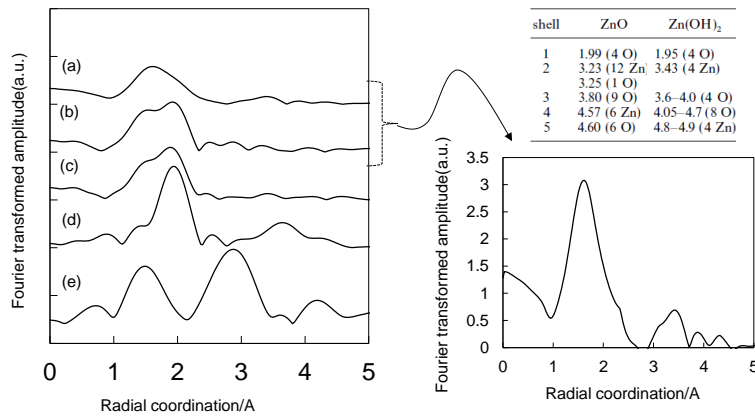
を熱力学的観点から明らかにした。

② CBD 法における溶液化学的制御技術の開発

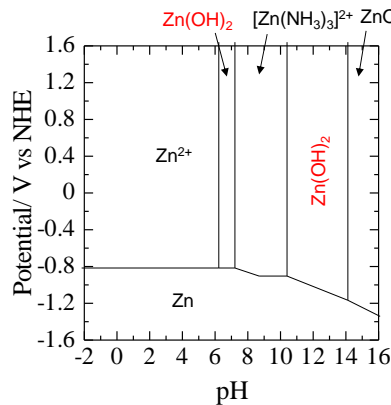
NH₃ 塩としてアンモニア水と硝酸アンモニウムを用いることによって全 NH₃ 濃度と pH を独立に変化させた。pH ならびに全 NH₃ 濃度が高いほど、亜鉛アンモニア錯体の存在率が多くなり安定性が向上することが予測でき、この領域では CBD 反応による Zn(O,S,OH)膜形成は生じるが、溶液の沈殿生成は抑制されることを実験的に確認し、熱力学計算が有効な手法となることを実証した。



図III-2-3-B(19) Zn(OH)₂層除去による変換効率の向上



図III-2-3-B(20) 膜厚 100nm(a),50nm(b),20nm(c)-Zn(O,S)層ならびに ZnS(d),ZnO(e)標準試料の Zn 原子周囲の動径分布関数(RDF)と 50,100nm-Zn(O,S)層の差分 RDF



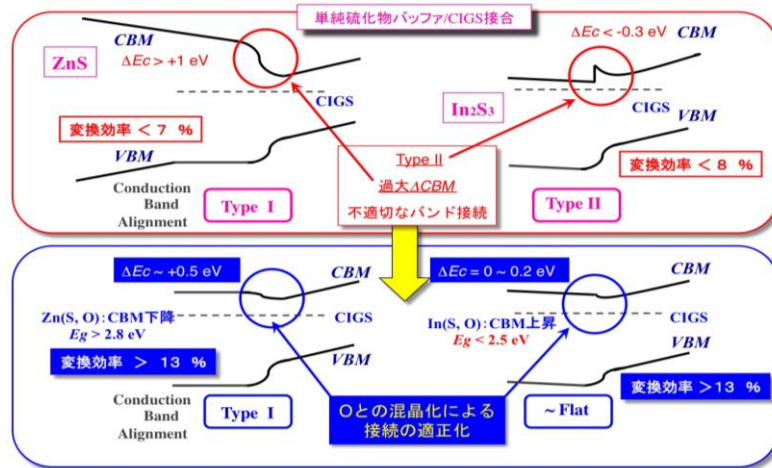
図III-2-3-B(21) Zn-NH₃-水系電位-pH 図 (298K)

1-7. 界面・粒界・縦貫断面電子構造評価・制御技術の開発
(鹿児島大学)

CIGS系太陽電池における一層の高効率化の鍵の一つである禁制帯幅1.4~1.5eVのワイドギャップCIGSに適する非Cd系バッファ材料を電子構造の観点から明らかにすること、バッファ/CIGS界面のバンド接続のバッファ層の作製条件との関連を正・逆光電子分光を用いた直接法により評価し、高効率化に有利なバンド接続状態が得られる組成・条件を明らかにすること、フレキシブル基板上の大面積モジュールで同様な評価を行うための技術を開発することを目的として研究開発を実施した。

1) 非Cd系バッファ材料として有望と考えられたChemical Bath Deposition (CBD)法によるZn系、In系酸硫化物バッファの電子構造、及び、バッファ/CIGS界面におけるバンド接続状態の適正化に関して、以下を明らかにした。

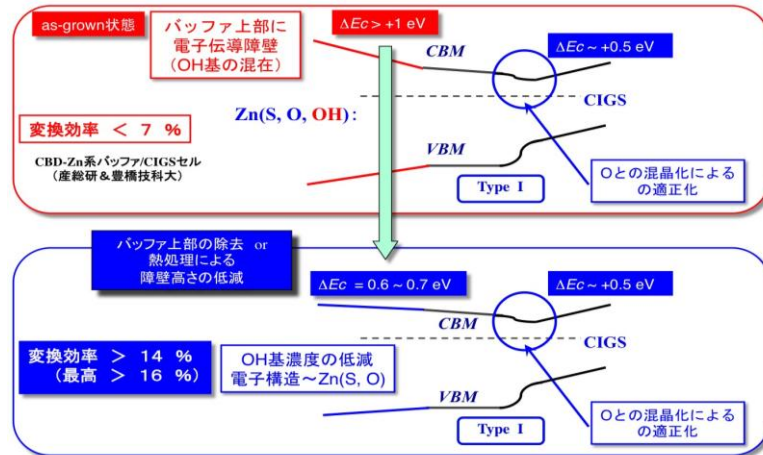
- ・単純硫化物であるZnSは伝導帯下端CBMが+1 eV以上と過高で界面に電子伝導障壁を形成し、In₂S₃はCBMがCIGSより低く、バンドオフセット ΔE_c が負の再結合を促進するバンド接続となり、両系とも単純硫化物は高効率化に適當でない電子構造を持つ。
- ・S-O混晶化により、CBMがZn系では下降、In系では上昇が発現し、S/(S+O)比 = 0.6 ~ 0.9の領域で $\Delta E_c = 0 \sim +0.3$ の高効率化に有利なオフセットを持つバンド接続が実現される。図III-2-3-B(22)にS-O混晶化による伝導バンド接続改善に関する概略図を示す。



図III-2-3-B(22) CBD-Zn(S, O, OH)、In(S, O, OH)バッファのS-O混晶化によるバッファ/CIGS界面における高変換効率に適するバンド接続の実現

- ・両系ともOH基濃度の上昇によりバンドギャップが拡張・CBMが上昇した領域が混在し[Zn(S, O, OH)系の場合、OH/(O+OH) > 0.4のとき、CBM > 1.0 eV]、電子伝導障壁が形成される。CIGS上に形成されたS/(S+O) = 0.6~0.7のCBD-Zn(S, O, OH)層 [CIGS; 産業技術総合研究所グループ作製、Zn(S, O, OH); 豊橋技術科学大学グループ作製]の電子構造・酸素化学種の深さ方向プロファイルを評価により、この主に水酸化物からなる障壁領域がCIGSとの界面から離れたバッファ層表面に偏在すること、一方、CIGS

との界面近傍では低OH基濃度、 $CBM \sim 0.6 \text{ eV}$ の望ましい電子状態を持つことを明らかにした。更に、CBD堆積後の、 NH_3 溶液を用いた化学エッチング乃至 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 、数十分程度の熱処理が伝導障壁領域の除去のための優れた手法であることを見出した。図III-2-3-B(23)に後処理によるバッファ上層部分の電子構造改善の概略を示す。



図III-2-3-B(23) 堆積後処理効果の概略：高 CBM CBD-Zn(S, O, OH)上層部の除去、再結晶化による電子伝導障壁の厚さ・高さの低減→高変換効率の実現。

- CBD堆積後熱処理を施した試料では、加えて、 $CIGS$ 側へのSの拡散促進による $CIGS$ の価電子帯上端 VBM の下降が誘起され、電子・ホール間のエネルギー離間の大きい再結合が一層抑制される電子接続となることが明らかとなった。

以上のように、非Cd系酸硫化物バッファ/ $CIGS$ 接合における電子構造の最適化にはS-O混晶比、OH濃度抑制、S拡散等のアニオン濃度・プロファイル制御が重要であること、CBD条件に加えて堆積後処理が、そのための有力な手法であることを明らかにした。電池特性は未処理試料で8%未満であった変換効率が14%以上（最高 > 16%）へと顕著に向上することを確認した。以上のように、界面領域の電子構造評価から導出された界面～バッファ領域の電子構造の適正化指針に基づくプロセス制御が電池特性向上に有効な手法・技術であることを実証した。

2) $CIGS$ 及び $Zn(S, O, OH)$ バッファ内粒界の電子状態の空間プロファイルの光-アシストケルビンプローブ顕微鏡（光-KFM）による評価を行い、Ga置換率20~100%の全領域で $CIGS$ の CBM が平坦且つ VBM が選択的に下降したキャリア再結合抑制に有利な電子構造を持つこと、その構造起源が粒界におけるCu欠損相の局所形成にあること、Zn系バッファがCdSと同様、一次粒子間のバンド接続が平坦なキャリア散乱の少ない電子構造を持ち、両者とも高効率化に有利であることを明らかにした。なお、後者の二次粒子は層厚程度の寸法を持ち、電池特性に影響する積層方向では二次粒子粒界の影響は小さいが、面内方向に散乱に寄与する約200 mVのポテンシャル差が存在するため、面内伝導を利用する電池構造においては留意が必要と考えられる。

3) フレキシブル基板対応 電子構造評価技術の開発

ガラス基板上の電池と電気的アイソレーション、機械的特性が異なるフレキシブル基板上のモジュールの評価のための測定面調整手法をフレキシブル基板～Mo 構造[富士フイルム作製]を用いて検討し、高剛性金クランプによる接地が電子分光・KFM 測定時の帯電効果の十分な補償のための、セルを導電性機材に接着後に機械研磨する手法が凹凸が数 nm 以下の超平坦断面形成の優れた手法であることを見出した。これらにより Na 添加法が異なることからガラス基板上と異なることが予想される CIGS 層内バンドギャップ傾斜、粒界の伝導活性度等のモジュール特有の電子構造の評価手法を確立した。

1-8. 結晶欠陥の検出、同定と欠陥低減化技術の開発

(筑波大学)

本開発はデバイス特性に影響を与えている欠陥の検出と構造の同定を行ない、欠陥低減化技術開発の支援を行うことを目的とする。

禁制帯幅 1.4-1.5eV のワイドギャップ CIGS を用いることで太陽電池の高効率化を目指している。CIGS 太陽電池においてはバンドギャップエネルギーが 1.1-1.2 eV (Ga 濃度 30%程度) で最高効率 20.3%が実現されているが、Ga 組成を増加しバンドギャップエネルギーを大きくすると変換効率は低下する。この原因の一つとして欠陥の形成が考えられ、これらの欠陥の検出と同定を通じて欠陥低減化をはかり、セルの高効率化を実現する計画である。特に Ga 組成の増加と共に増加する欠陥に着目しその原因と低減化法を検討した。

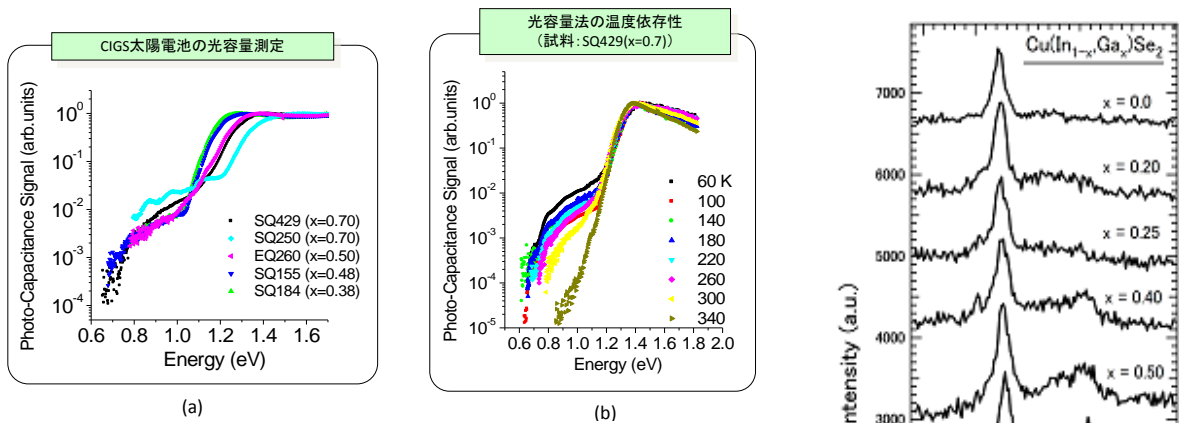
CIGS 中の欠陥として、価電子帯上 800meV の準位を光容量法で検出しこれらの信号強度とデバイス特性との対応からデバイス特性に影響を与えている欠陥であることを明らかにした。図 III-2-3-B(24)-(a)に示すように Ga 組成増加とともに 800meV 欠陥濃度が増加することが分かった。また、図 III-2-3-B(24)-(b)に示す温度依存性や 2 波長照射光容量法により、800meV 欠陥が室温で再結合中心として働いていることを明らかにした。この知見は世界初である。一般に、再結合中心の存在は開放電圧を低下させることが知られており、Ga 組成増加と共に素子特性が劣化する一つの原因となっている欠陥である可能性がある。図 III-2-3-B(25)に示すように陽電子消滅法による実験から、空孔型欠陥濃度は Ga 組成により変化せずほぼ一定であることが分かった。すなわち、800meV 欠陥は空孔型欠陥ではなく、アンチサイト欠陥である可能性を示唆しており、欠陥低減化には化学量論組成制御が重要であることを提案した。

図 III-2-3-B(26)に CIGS のラマンスペクトルを示す。170 cm^{-1} 、および 260 cm^{-1} はそれぞれ CIGS 母体、 Cu_2Se からの信号である。CIGS 中に Cu_2Se が形成されることを見出した。 Cu_2Se の形成は Ga 組成依存性があり、組成 0.4 近傍から形成されやすくなることが分かった。また、 Cu_2Se の形成は、CIS では極めて Cu リッチ条件で成長した試料でのみ観察され、これらは KCN 処理で消失することから表面だけに形成されることが分かった。一方、CGS では Cu 不足の成長条件で作成した試料においても Cu_2Se が検出された。KCN 処理で信号が消失しないことからバルク中にも形成されていることが分かった。 Cu_2Se は Cu 空孔が形成されやすく、抵抗率は $10^{-3}\Omega\text{cm}$ 程度、キャリア濃度 10^{20}cm^{-3} 、バンド

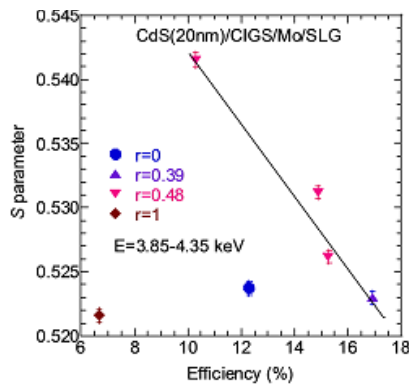
ギャップエネルギー1.2~1.4 eV程度とされており、Ga組成が高いCIGS中に存在すれば、エネルギー井戸が形成されたと同様の効果を持ち、再結合中心として働く可能性がある。図III-2-3-B(27)に示すようにCu₂Seの信号強度とデバイス特性に相関がみられ、デバイス特性に影響を与えていることが分かった。

図III-2-3-B(28)に示すようにCIGSを大気中で加熱し酸化するとCu₂Seの信号強度が増加し、KCN処理で減少することから、Cu₂Se形成の一つの原因として酸化であることを明らかにした。

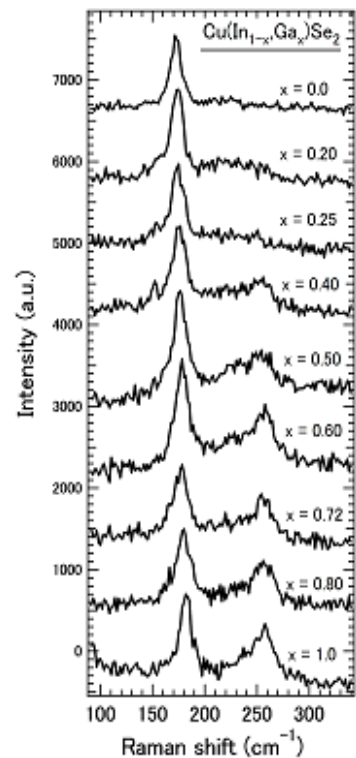
これらの結果よりCIGS成膜中あるいはプロセス中に酸化を防ぐ必要があることを提案した。



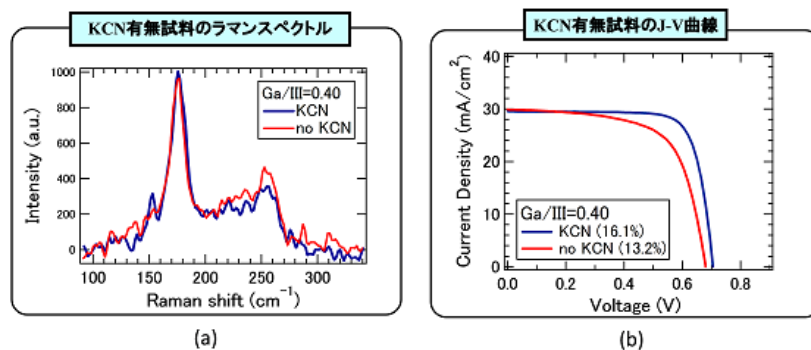
図III-2-3-B(24) 光容量法で検出した800meV欠陥のGa組成依存性(a)と温度依存性(b)



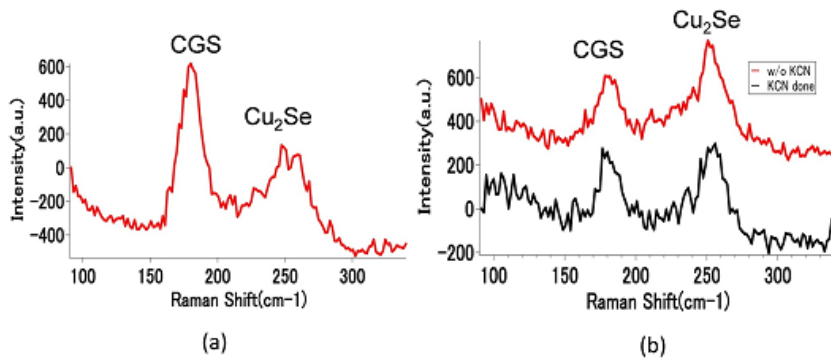
図III-2-3-B(25) 陽電子消滅法による欠陥濃度とデバイス変換効率との関係



図III-2-3-B(26) ラマンスペクトルのGa組成依存性



図III-2-3-B(27) KCN処理前後のラマンスペクトル(a)と対応するデバイス特性(b)



図III-2-3-B(27) CGSの酸化前(a)と酸化後(b)におけるラマンスペクトル

表III-2-3-B(1) 研究開発項目ごとの成果・達成度

中間目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
<p>B-1. フレキシブル基板上の集積化モジュール作製技術の開発 (富士フイルム・産業技術総合研究所)</p> <p>(1)フレキシブル金属基板向けのプロセス開発</p> <p>(2)・10×10cm サブモジュール効率 17% ・30×30cm サブモジュール効率 16%</p>	<p>(1)フレキシブル金属基板向けのプロセスを開発し、10×10cm 角の集積型サブモジュールにて変換効率 15.9%(公式測定)を達成した。フレキシブル基板向け集積プロセス技術の構築を完了した。</p> <p>(2)・ガラス基板上の小面積サブモジュールにて効率 17.1% ・10×10cm フレキシブル・サブモジュール効率 15.9%</p>	<p>○</p> <p>△</p>	<p>(1)バッチプロセスにて構築した技術をロール・トゥ・ロールプロセスへ導入するとともに大面積化フレキシブル基板での技術構築を進める。</p> <p>(2)小面積セル、小面積サブモジュールで構築した高効率化技術を大面積プロセスへと導入するほか、大面積均一成膜技術の構築により更なる高効率化を行う。</p>
<p>B-2. CIGS 光吸収層の高速成膜技術開発 (富士フイルム)</p> <p>(1) CIGS 光吸収層の高速成膜時に生じる効率劣化要因把握とその対策</p>	<p>(1) CIGS 光吸収層を高速成膜した際に生じる電流リークの原因を突き止め、プロセス改良により効率低下を抑制することに成功した。</p>	<p>◎</p>	<p>・今後、ロール・トゥ・ロールプロセスへ本プロセスを導入し、更なる高速成膜検討を進める。</p>
<p>B-3. ロール・トゥ・</p>	<p>(1)①基材 SUS430 を用いて成</p>	<p>○</p>	<p>(1)②蒸発源の構造の見直し</p>

<p>ロール成膜装置開発 (アルバック)</p> <p>(1)CIGS 層成膜装置にて ①基板を 500 °C以上に加熱 ②膜厚分布±5 %</p> <p>(2) Na 供給層、裏面電極層の成膜装置にて ・膜厚分布±5 %</p>	<p>膜室での加熱試験の結果、540°Cまで加熱されたことを確認した。</p> <p>②InGaSe 成膜にて幅 250mm 以内で膜厚分布が最大で約 4%を確認。±5 %以内を達成。有効幅 270mm の膜厚分布は未測定であり、今後評価を行う。</p> <p>(2)Na 供給層 (SLG)、裏面電極層である Mo の成膜にて幅 250 mm 以内での膜厚分布が SLG にて約±21 %、Mo にて約±4 %を確認。Mo 膜は±5 %以内を達成したが、SLG が未達成。また、有効幅 270mm の膜厚分布は未測定であり、今後評価を行う。</p>		<p>△ (2)膜厚分布に関する放電の安定性をとり、膜厚を補正するためにカソードの構造を変える。</p>
<p>B-4. ロール・トゥ・ロールプロセス開発 (富士フイルム)</p> <p>(1) CIGS 光吸収層までの工程をロール・トゥ・ロール化</p>	<p>(1) CIGS 光吸収層までの前半工程を計画通り、ロール・トゥ・ロールプロセス化した。本プロセスにて成膜した CIGS 光吸収層を小面積セル化（後工程はバッチプロセス）した結果、変換効率 9.3%が得られた。</p>	<p>△</p>	<p>・CIGS 光吸収層の成膜条件の最適化。</p>
<p>B-5. ワイドギャップ CIGS 太陽電池の高効率化技術の開発（産業技術総合研究所）</p>	<p>CIGS 製膜時の原料供給量や Ga 組成の最適化により大幅な開放電圧の向上およびそれに伴う変換効率の向上を実現した。具体的には、SLG 基板上の小面積セル（active area = 0.514 cm²、反射防止膜あり）で 19.8%を達成し、また aperture area = 4 cm²であるが、SLG 基板上のサブモジュールで 17.1%（反射防止膜あり）を</p>	<p>△</p>	<p>CIGS 膜厚と製膜温度の最適化による CIGS 太陽電池の更なる高効率化。 高品質 CIGS 製膜法に適したナトリウム添加技術の開発。 フレキシブル基板のハンドリング技術の向上。 上記課題をクリアすることにより、2012 年度中に中間目標効率の達成見込みがある。</p>

	達成した。		
<p>B-6. 新規バッファ層材料のウエットプロセスによる形成技術の開発 (豊橋技術科学大学)</p> <p>(1) CBD 法によるバンドギャップ制御酸化物系バッファ層形成技術の開発</p> <p>(2) CBD 法における溶液化学的制御技術の開発</p>	<p>(1)チオ尿素濃度調整による Zn(O,S)の 2.7 - 3.7eV バンドギャップ制御, Zn(O,S)層へのアンモニア水処理による CIGS 高効率化と構造変化の相関の明確化による表面水酸化物層効果の明確化</p> <p>(2) 化学熱力学により計算した, 化学種, 電位-pH 図からの予測を実験的に実証すると共に。溶液安定性向上指針を明確にし, 化学熱力学シミュレーション技術の有効性を実証。</p>	<p>◎</p> <p>◎</p>	<p>(1) Zn(O,S)層の局所構造とバンドギャップは基板となる CIGS 層の拘束を受けており, CIGS 直上の Zn(O,S)層の構造並びにバンドギャップを制限する可能性を示唆したことから, 不純物導入や加熱処理の併用などのバンドギャップならびにイオン化エネルギー制御技術の開発が必要。また, CIGS 直上に FE-TEM により観測されたエピタキシャル層を同定する必要がある。</p> <p>(2)現在利用している化学種や電位-pH 図から溶解度曲線や速度論に対応できるように化学熱力学シミュレーション技術を高度化すると共に, 実験結果との対応により検証する必要がある。</p>
<p>B-7. 界面・粒界・縦貫断面電子構造評価・制御技術の開発 (鹿児島大学)</p> <p>(1) ワイドギャップ CIGS に適合する新規バッファ層の電子構造およびバッファ層/CIGS 界面の伝導帯・価電子帯の適正な接続条件を明らかにし、デバイス作成技術にフィードバックする。</p>	<p>(1)ワイドギャップ CIGS 用バッファの候補である Zn 系、In 系酸硫化物、CIGS との界面電子接続の支配因子がバッファのアニオン濃度・プロファイルにあることを解明</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CBD-Zn(S,O,OH)、In(S,O,OH)系の電子構造 (バンドギャップポーピング、伝導帯下端等)の S-O 混晶比依存性を解明 ・CIGS との界面での電子構造整合に必要な S-O 混晶比領域 S/(S+O)=0.6~0.9 を決定 ・電子伝導障壁となる高 OH 領域が CBD 堆積後期部分に偏 	<p>◎</p>	<p>(1)・伝導帯オフセットの最終チューニング;最終目標の効率に最適な S/(S+O)比、OH 濃度の決定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・S の CIGS 側への界面拡散の作製条件 (CBD 堆積後熱処理を含む) 依存性の解明 ・セル特性の対する光照射効果の解明;光照射による非 Cd 系バッファの電子構造変成の評価

<p>(2) 作成されたセルの縦貫断面電子構造評価を行い、デバイス作成技術にフィードバックする。</p> <p>(3)粒界の電気的活性度および薄膜層内のバンドギャップと光起電力の不均一性を評価し、デバイス作成技術にフィードバックする。</p>	<p>在すること及びその除去手法（堆積儀熱処理等）を提案 上記の電子構造評価結果に基づくアニオン制御が変換効率向上（最高 > 16 %）に有効であることを実証</p> <p>(2)・積層方向電位プロファイル評価用の超平坦断面（凹凸 < 10 nm）作製技術を開発 ・ガラス基板上セルの電位プロファイルの可視化に成功</p> <p>(3)・CIGS 内粒界がキャリア分離を促進する、電子特性向上に有利なバンド湾曲を持つことを光-KFM により解明 ・CdS, Zn(S,O,OH)内粒界が電気的に不活性であり電池特性に影響しないことを解明</p>	<p>○</p> <p>◎</p>	<p>(2)・伝導帯下端の CIGS 層内深さ方向プロファイルの評価（ガラス基板、フレキシブル基板とも被測定断面作製技術開発済み）現在進行中。</p> <p>(3)・フレキシブルモジュール内粒界の評価（被評価面作成手法開発済み、Na 添加条件依存性の解明）</p>
<p>B-8. 結晶欠陥の検出、同定と欠陥低減化技術の開発（筑波大学） デバイス特性に影響を与えている欠陥の検出と構造の同定を行い、欠陥低減化技術開発の支援を行う。</p>	<p>・価電子帯上 800meV の欠陥準位を光容量法で検出した。Ga 組成依存性があり、デバイス特性に影響を与えていることを明らかにした。温度依存性および 2 波長照射光容量法により、800meV 欠陥が室温で再結合中心として働いていることを明らかにした。また、陽電子消滅法による実験から、空孔型欠陥濃度は Ga 組成によらないことから、800meV 欠陥が空孔型欠陥ではないことを明らかにした。アンチサイト欠陥であると予想され、欠陥低減化には化学量論組成制御が重要であることを提案し</p>	<p>○</p>	<p>・化学量論的組成制御の精度と効果の確認。</p>

	<p>た。</p> <p>・ラマン分光法により CIGS 中に Cu_2Se を検出した。Ga 組成 0.4 以上で形成されやすく濃度も増加することを明らかにした。Cu_2Se の形成とデバイス特性に相関がみられ、デバイス特性に影響を与えていることが分かった。Cu_2Se の形成原因の一つとして酸化であることを見出した。CIGS 成膜中あるいはプロセス中に酸化を防ぐ必要があることを提案した。</p>	○	<p>・ Cu_2Se の形成が酸化以外にないかの確認。</p>

達成度→ 大幅達成：◎、 達成：○、 達成見込み：△、 達成不可：×

表Ⅲ-2-3-B(2) 特許、論文、外部発表等の件数（内訳）

	H22	H23	H24	計
特許出願(うち外国出願)	0	3	0	3件
論文(査読付き)	8	12	0	20件
研究発表・講演(うち国際会議)	38(14)	28(16)	4(2)	70件
新聞・雑誌等への掲載	1	2	1	4件
受賞実績	1	1	0	2件
展示会への出展	0	0	0	0件

2. 実用化・事業化見通し

2-1. 実用化・事業化のスケジュール

軽量・割れないという特徴が必要とされる太陽電池市場を創造しつつ、高効率化技術、生産技術（タクト、歩留り含む）、高信頼性なモジュールの作製技術を構築していく。NEDO プロジェクト（2010～2014 年度）終了後、生産歩留まり、タクト向上のための開発を行い、実用化、事業化につなげる。

2-2. 本研究成果物の価値

軽量・割れないという特徴を有しながら高効率な太陽電池が欲しいというニーズが強いことが分かってきている。この様な特徴を持ちながら耐久性に優れる製品を実現することに本研究の価値がある。

2-3. 具体的な顧客との検討状況

新たな市場を創造するというフェーズにある顧客候補先と、特徴を生かした工法により協業で試験設置をすることを狙い議論を進めている。現状、競合製品を使って設置を検討している先が多いが、本開発物が高変換効率である点、意匠性に厳しい壁面設置に対しては黒色色調が優れる点、また信頼性に勝る構造である点など、期待を寄せられている。

2-4. 今後の技術課題

高効率の独自のモジュールを実用化するための課題は、以下の2つに区分される。

- ・技術課題 1：大面積・高生産プロセス開発(富士フイルム／アルバック／産総研)
- ・技術課題 2：高効率化技術開発(産総研／筑波大／豊橋技科大／鹿児島大)

課題 2 で達成された成果は、課題 1 で進めているプロセスに反映させていく。なお図 III-2-3-B(28)に今後の効率目標値とこれまでの実績効率値をまとめた。

技術課題 1：フレキシブル CIGS 太陽電池のプロセス開発

作製プロセス	現状	課題と方針
Na供給層	<u>RtR化の装置化完了</u>	製膜レートの高速化
Mo電極	装置改良&性能作り込み中	スクライブ ラッチュードの拡大 歩留まり/タクトの向上
P1スクライブ		
CIGS層	30cm角で効率目標=16% (H24)	<ul style="list-style-type: none"> ・高効率化/高速成膜化 ・ライン蒸発源の安定化(均一化)
バッファ層	<u>30cm角の装置化完了</u>	<ul style="list-style-type: none"> ・Cdフリー化技術確立(H24) ・高生産プロセス確立
P2/P3スクライブ		<ul style="list-style-type: none"> ・デットゾーン減少(変換効率up)と生産性/歩留まり両立プロセス確立
透明電極	性能作り込み中	<ul style="list-style-type: none"> ・変換効率と生産性両立プロセス確立

技術課題 2：高効率化技術開発

変換効率22%超の高効率を実現できるポテンシャルをもつ、禁制帯幅1.4~1.5eV(高Ga組成)のワイドギャップCIGS太陽電池に開発のターゲットを絞る。

最大の課題: 高Ga組成から期待される、高い開放電圧が得られない。

- 原因: ① 高Ga組成時におけるキャリア再結合確率の増大
 ② 高Ga組成時におけるバッファ層/CIGS層ヘテロ界面におけるバンド接続状態の変化

対策① CIGS光吸収層をはじめとする各層の高品質化によるバルク再結合の低減

- ← Se供給量等に着目したCIGS光吸収層の高品質化技術の推進 (産総研)
- ← 高Ga組成時における再結合機構の解明と解決手段の開発 (筑波大学)

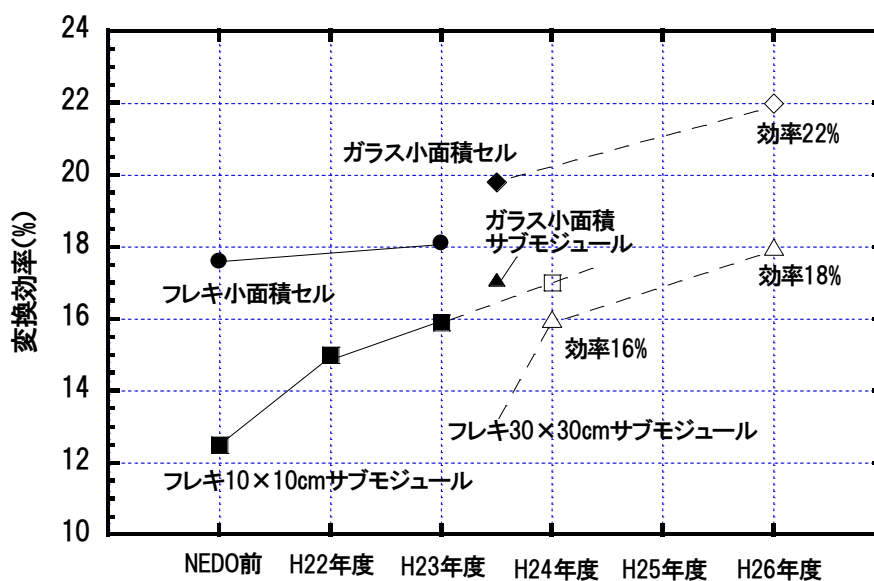
対策② ワイドギャップCIGSに最適な新規バッファ層の開発

- ← ヘテロ界面におけるバンド接続が最適な新バッファ層の開発 (豊橋技科大)
- ← バンド接続状態の可視化技術によるバッファ層評価技術の確立 (鹿児島大)

対策③ まだ残されている改良の余地に着手

- ← Na添加効果の解明とNa供給量の最適化および新規Na供給手法の開発
- ← 高Ga組成時におけるGa/In組成プロファイルの最適化

・困難(低い開放電圧)の原因は解明されており、対策手段①~③も解明されて進捗している。
 ・既に変換効率19.8%を達成しており、更に対策①~③により22%超の高変換効率を実現できる見通しがある。



図III-2-3-B(28) 本プロジェクトにおける変換効率の推移(黒塗り)と目標(白塗り)

3. 波及効果

3-1. 技術の製品への応用可能性

軽量・割れないという特徴を生かした太陽電池用途、さらには海上、宇宙等の特殊用途へも展開出来る可能性がある。

3-2. 開発者、研究者の育成の観点

基礎研究として高効率化に取り組んでいる産総研、筑波大学、豊橋技術科学大学、鹿児島大学における研究者育成への貢献は大きい。

また本開発は、ハロゲン化銀による写真、BaFBr:EuによるX線の輝尽性蛍光蓄積、CCD撮像素子、アモルファスSeによるX線センサー等、富士フィルムのコア技術である光電変換技術を深耕するテーマであり、企業内の技術者の育成に大きく寄与している。このような技術蓄積が、たとえば別途、国家プロジェクトで進められる光による水素発生等、日本独自の技術発展に寄与出来るものと考えている。ロール・トゥ・ロールの装置開発を得意とするアルバック社においても、このような新たな視点での装置開発は社内の技術者育成、技術蓄積に重要である。

4. 今後の展開

4-1. 事業化までのシナリオ

市場を創造しつつ高効率化技術、生産技術(タクト、歩留含む)、モジュールの耐久信頼性技術を構築し、市場を大きくしていくシナリオのもとに進めている。現状の大勢を占める結晶シリコン型の太陽電池とは違った市場ニーズを満たす製品として、日本経済に貢献していく。また、独自の高度な部材とのすり合わせによる製品であり、容易には物まねの出来ない日本の技術が生きる応用製品であると考えている。

アルバックが担当しているロール・トゥ・ロール成膜装置は、今後、成膜再現性および生産効率に優れた量産機の実現を目指した開発を進めていく。本装置にて製造されるフレキシブル太陽電池は土台なしで、かつ曲率のある壁面でも設置することができることが特徴である。そのため従来の太陽電池市場とは異なる新たな市場が見込めるため、装置の販売台数の増加を期待できる。

4-2. 事業化された場合の効果

本太陽電池は、従来の太陽電池では設置が難しかった用途に適用出来るため、新たな市場を創出する技術であると考えている。仮定に基づき計算すると、公共施設／産業施設の壁面にだけ限定しても2GW程度の総需要が予測される。補強が必要な工場屋根等、用途の広がりが見込まれる。また本太陽電池は、独自の高度な部材技術と高度な生産技術のすり合わせによる商品であり、日本の産業競争力に大きく貢献すると考えている。これらの技術を使った商品を海外市場へ展開することでさらなる市場効果を創出することが期待出来る。

5. 特許論文リスト

表Ⅲ-2-3-B(3)【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	富士フイルム	2011-192896	国内	2011年 9月5日	出願	化学浴折装置	河野哲夫 新井洋
2	富士フイルム	2011-192897	国内	2011年 9月5日	出願	バッファ層の製造 方法および光電変換 素子の製造方法	河野哲夫 新井洋
3	富士フイルム	2011-158142	国内	2011年 7月19 日	出願	薄膜太陽電池および その製造方法	矢後栄郎 浅野武史

表Ⅲ-2-3-B(4)【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
1	村上直樹、森脇健一、南宮麻紀、大郷毅、祐谷重徳、石塚尚吾、仁木栄	富士フイルム、産業技術総合研究所	Monolithically integrated CIGS sub-modules fabricated on new structured flexible substrates	37 th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	有	2011
2	野本麻紀、大郷毅、森脇健一、村上直樹、祐谷重徳、石塚尚吾、仁木栄	富士フイルム、産業技術総合研究所	Monolithically integrated CIGS sub-modules on stainless steel substrate with insulating layers	第21回太陽光発電国際会議	有	2011
3	T. Fukae, H. Ichiki, H. Kashiwabara, T. Shiota, A. Yamada, S. Ishizuka, K. Matsubara, S. Niki, Y. Yoshimura and N. Terada	Kagoshima Univ., Kagoshima Perf. Inst. Indust. Technol., AIST	CHARACTERIZATION OF ELECTRONIC STRUCTURE OF GRAIN BOUNDARIES IN CIGS ABSORBER LAYERS BY KELVIN PROBE FORCE MICROSCOPY	25th European PVSEC and 5th WCPEC, pp.3349-3352	有	2010
4	S. Niki, S. Ishizuka, H. Komaki, Y. Kamikawa-Shimizu, S. Furue, S.W.	AIST, Tokyo Univ. Sci., Kagoshima Univ, Tsukuba	DEVELOPMENT OF HIGH-EFFICIENCY CIGS SOLAR CELLS AND	Proc. 25th European PVSEC and 5th WCPEC, pp.2846-2848	有	2010

	Choi, K. Matsubara, H. Shibata, A. Yamada, H. Nakanishi, N.Terada, T. Sakurai and K. Akimoto	Univ.	SUBMODULES BY MULTI-STAGE EVAPORATIO N			
5	N. Terada	Kagoshima Univ.	Characterization of Electronic Structure at Interfaces and Grain Boundaries in CIGS-based Solar Cells	OPTRONICS, No.342. pp.126-130	無	2010
6	S. Niki, S.Ishizuka, H. Komaki, Y.Kamikawa-Sh imizu, S. Furue, S.W. Choi, K.Matsubara, H. Shibata, A. Yamada, H. Nakanishi, N. Terada, T. Sakurai and K. Akimoto	AIST, Tokyo Univ. Sci., Kagoshima Univ, Tsukuba Univ.	Critical issues for high-efficiency low-cost CIGS solar cells and modules	Proc. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE, pp.863-865	有	2010
7	寺田 教男	鹿児島大 学	CIGS 太陽電池 の電子構造評 価	「CIGS 薄膜太陽電池 の最新技術」監修 中 田時夫（シーエムシー 出版）, pp.227-240	無	2010
8	寺田 教男	鹿児島大 学	バンドオフセ ット評価	「太陽電池の基礎と 応用」小長井 誠、山 口 真史、近藤 道雄 編著（培風館）, pp.166-168	無	2010
9	Y. Tanaka, A. Iyo, K. Tokiwa, T. Watanabe, A. Crisan, A. Sundaresan, and N. Terada	Kagoshima Univ., Tokyo Univ. Sci., AIST, Univ. Birmingham, JNCAS R	Topological Structure of the interband phase difference soliton in two band superconductivity	Physica C vol.470, pp.1010-1012	有	2011
10	N. Terada, A. Kirihara, T. Takahae, Y. Shiota, S. Niki, S. Ishizuka, H. Shibata, A.	Kagoshima Univ., AIST	CHARACTERI ZATION OF BAND ALIGNMENT AT BUFFER/ABSO	Technical Digest of 21 st International Photovoltaic Science and Engineering Conference, p.3B-3I-01	有	2011

	Yamada and K. Matsubara		RBER INTERFACES AND GRAIN BOUNDARIES IN CIGS-BASED SOLAR CELLS			
11	M. M. Islam, A. Uedono, S. Ishibashi, K. Tenjinbayashi, T. Sakurai, A. Yamada, S. Ishizuka, K. Matsubara, S. Niki, K. Akimoto	University of Tsukuba, AIST	Impact of Cu/III ratio on the near-surface defects in polycrystalline CuGaSe ₂ thin films	Appl. Phys. Lett.	有	2011
12	T. Sakurai, K. Taguchi, M. M. Islam, S. Ishizuka, A. Yamada, K. Matsubara, S. Niki, K. Akimoto	University of Tsukuba, AIST	Time-Resolved Microphotoluminescence Study of Cu(In,Ga)Se ₂	Jpn. J. Appl. Phys.	有	2011
13	T. Sakurai, M.M.Islam, H. Uehigashi, A. Yamada, S. Ishizuka, K. Matsubara, S. Niki, K. Akimoto	University of Tsukuba, AIST	Dependence of Se beam pressure on defect states in CIGS solar cells	Solar Energy Materials and Solar Cells	有	2011
14	M.M.Islam, T. Sakurai, S. Otagiri, S. Ishizuka, A. Yamada, K. Sakurai, K. Matsubara, S. Niki, K. Akimoto	University of Tsukuba, AIST	Determination of Cu(In,Ga) ₃ Se ₅ defect phase in CIGS material by Rietveld analysis	Solar Energy Materials and Solar Cells	有	2011
15	M. M. Islam, A. Yamada, T. Sakurai, M. Kubota, S. Ishizuka, K. Matsubara, S. Niki, and K. Akimoto	University of Tsukuba, AIST	Cu-dependent phase transition in polycrystalline CuGaSe ₂ thin films grown by three-stage process	J. Appl. Phys.	有	2011
16	M.M. Islam, A. Yamada, T. Sakurai, S. Ishizuka, K.	University of Tsukuba, AIST	Effect of Ga/Cu Ratio on Polycrystalline CuGaSe ₂ Thin	Appl. OptoElectronics	有	2011

	Matsubara, S. Niki, and K. Akimoto		Film Solar Cell			
17	M.M.Islam, S. Ishizuka, A. Yamada, K. Matsubara, S. Niki, T. Sakurai, K. Akimoto	University of Tsukuba, AIST	Thickness study of Al:ZnO film for application as a window layer in Cu(In _{1-x} Gax)Se ₂ thin film solar cell	Appl. Surface Sci.	有	2011
18	Masanobu Izaki, Yusuke Yamane, Junji Sasano, Tsutomu Shinagawa, Mitsuteru Inoue	豊橋技術科学大学 大阪市立工業研究所	Direct Preparation of 1.35-eV-Bandgap CuO:S Film by Chemical Bath Deposition	Electrochem. Solid State Lett.	有	2011
19	伊崎昌伸, 笹野順司, 太田貴之, 斎藤尊正, 杉山真也, 本村賢次郎	豊橋技術科学大学	Cu(InGa)Se ₂ 層上に形成した半導体バッファ層の局所構造に関する研究	平成23年度SPring8重点産業利用報告書 (2011A)	無	2011
20	伊崎昌伸, 笹野順司, 草野雄也, 大畑達也, 太田貴之, 斎藤尊正, 杉山真也, 本村賢次郎, 牧剛志	豊橋技術科学大学	CIGS 太陽電池用バンドギャップ制御酸化半導体バッファ層の局所構造に関する研究	平成22年度SPring8重点産業利用報告書 (2010A)	無	2010
21	伊崎昌伸, 品川勉, 笹野順司, 草野雄也, 大畑達也	豊橋技術科学大学 大阪市立工業研究所	太陽電池用 0.95-2.1eV バンドギャップ酸化半導体光吸収薄膜の局所構造に関する研究	平成22年度SPring8重点産業利用報告書 (2010B)	無	2010
22	石塚尚吾 仁木栄	産業技術総合研究所	Challenges for Highly Efficient Flexible CIGS Submodules	Proceedings of the 25th EUPVSEC/5th WCPEC	有	2010
23	石塚尚吾 山田昭政 仁木栄	産業技術総合研究所	Monolithically integrated CIGS submodules fabricated on flexible substrates	Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference	有	2010
24	石塚尚吾 山田昭政 仁木栄	産業技術総合研究所	Monolithically integrated flexible Cu(In,Ga)Se ₂ solar	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS 94	有	2010

			cellsubmodules			
25	石塚尚吾 山田昭政 仁木 栄 他	産業技術 総合研究 所	Texture and morphology variations in (In,Ga) ₂ Se ₃ and Cu(In,Ga)Se ₂ thin films grown with various Se source conditions	Progress in Photovoltaics DOI: 10.1002/pip.1227	有	2010

C 反射式集光型太陽光発電システムの研究開発

1. 成果詳細

中間目標と達成状況を下表に示す。達成度は、耐久試験が達成見込みであるが、他の開発項目は全て達成することができた。

表 III-2-(ハ)-C-1 (1) 中間目標と達成状況

開発項目		平成24年度の中間目標	達成度／今後の課題
集光性能	■幾何学的集光倍率 ■集光効率	■ 約500倍以上 ■ 約70%以上	■ 約800倍 ◎ ■ 約80% ◎
発電コスト	■設備コスト ■発電コスト	■ 約4億円/MW ■ 約23円/kWh	■ 約4億円/MW ○ 集光モジュール:2.2億円/MW (内CPVモジュール:0.15億円/MW) 構造体等:1.1億円/MW ハワコン:0.2億円/MW 現地工事:0.5億円/MW ■ 約23円/kWh ○
耐久性	■国内実証試験	■ 半年間連続運転	■ 0.5ヶ月間連続運転 △ ／残り期間の連続運転

◎:大幅達成、○:達成、△:達成見込み、×:未達

各開発項目の開発結果を、下記に述べる。

(1) 集光性能

ミラーを使った反射による集光の光学設計は、Light Prescription Innovation (LPI) 及び長岡技術科学大学が担当した。幾何学的集光倍率500倍以上、集光効率70%以上、集光の許容角度±1度以上を条件として開発を進め、幾何学的集光倍率800倍、集光効率80%、許容角度±1.3度を達成した。

LPIの一次集光器(POE)と二次集光器(SOE)の形状を下図に示す。

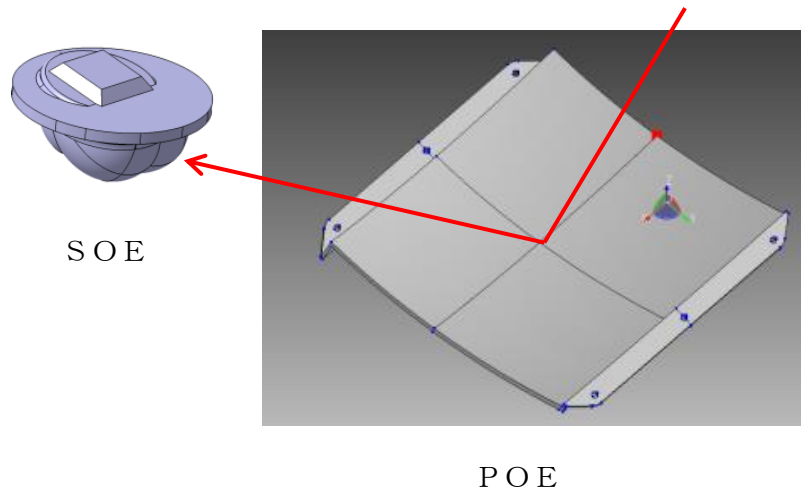


図 III-2-(ハ)-C-1 (1) POEとSOEの形状

屋外試験の様子を下図に示す。

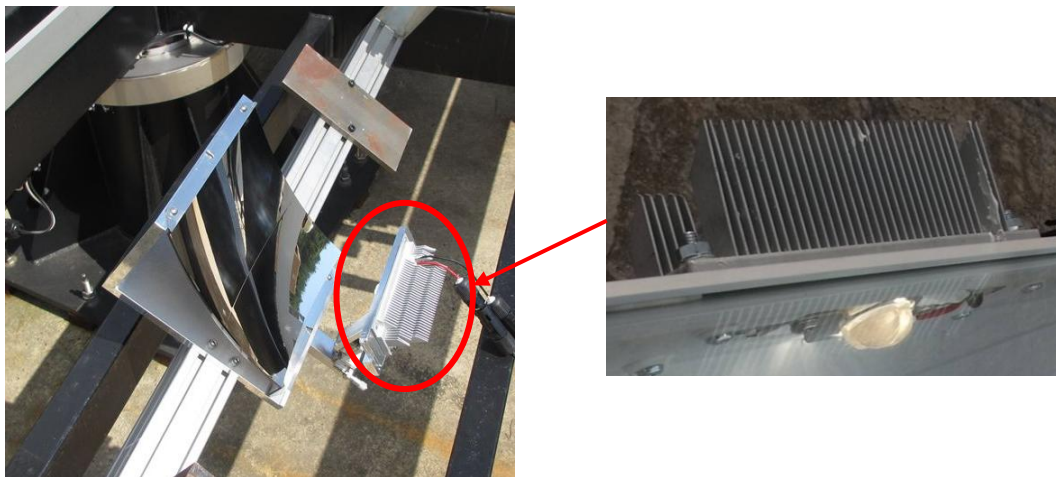


図 III-2-(ハ)-C-1 (2) 屋外試験

(2) 放熱性能

コンピュータ解析と実験により基礎データを求めて、屋外試験によりC P V裏面温度を計測した結果、外気温40℃換算で96℃を達成した。

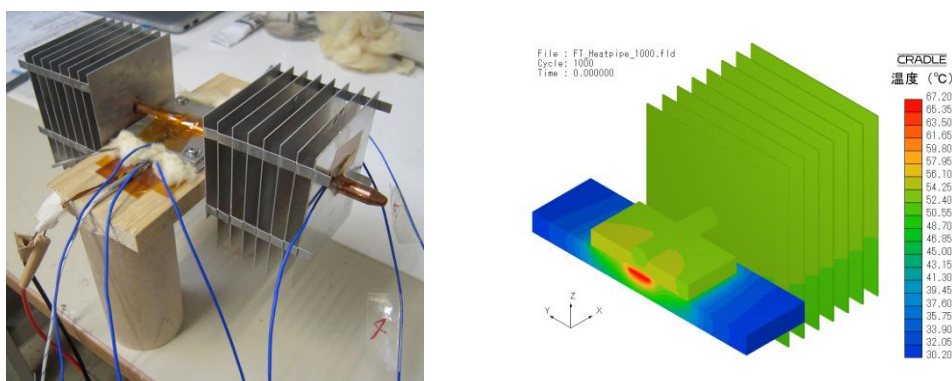


図 III-2-(ハ)-C-1 (3) コンピュータ解析と基礎実験

(3) 発電コスト

1) 設備コスト

構造体、駆動機構、電気・制御、現場工事を三井造船が担当し、ハウジング、一次集光器、C P Vモジュールの集光モジュールを自動車部品メーカーが担当し、二次集光器を岡本硝子が担当して、製造コストを積算した結果、中間目標の設備コスト約4億円/MWを達成できた。

最終目標の設備コスト約3.3億円/MWは、米国での実証試験（定格出力合計100kW）向けに、定格出力10kW機を10台生産する過程において、量産効果を確認し、正確な製造コストを把握することにより、達成することができると考えている。

2) 発電コスト

米国アリゾナ州フェニックス（DNI：2,500kWh/m²/年）に設置すると、年間の発電量は、シミュレーション結果1,757MWh/年と推定され、設備コスト4億円/MWの場合の発電コストは23円/kWhに、設備コスト3.3億円/MWの場合の発電コストは19円/kWhになり、中間目標及び最終目標を達成できた。

(4) 耐久性

岡山県玉野市に実証試験機を設置し、7月中から実証試験を開始し、現在も実験を継続している。実証試験機を下図に示す。当初は、実験担当者が立ち会っていたが、現在は無人運転を行っており、部品が太陽熱で変形する等の不具合の発生もなく、変換効率も安定しており、順調に実証試験が進んでいる。来年1月ごろには、中間目標値である半年間の連続運転を達成できる見込みである。



図 III-2-(ハ)-C-1 (4) 実証試験機

2. 実用化・事業化見通し

成果の最終目標の達成可能性を下表に示す。

表 III-2-(ハ)-C-2 (1) 成果の最終目標の達成可能性

研究課題	最終目標	達成見通し
平成26(2014)年度末 ①設備コスト ②発電コスト ③安定稼働	<ul style="list-style-type: none"> ■3.3億円/MW 集光モジュール:1.8 (内CPVモジュール0.12) 構造体:0.9 パワコン:0.2 現地工事:0.4 ■19円/kWh ■平均発電効率30% を1年間程度連続して 継続 	<ul style="list-style-type: none"> ■自動車部品メーカー(自動車のヘッドライトの製造技術の応用)と組むことにより下記を適用し、4億円/MWの目途が立った。 <ul style="list-style-type: none"> ①樹脂製ハウジングの採用 ②既存設備利用による新規投資の抑制 ③組立ロボットの採用 等 ■米国向け実証試験機の製作を通して、量産効果等を検証することにより、3.3億円/MWが達成可能 ■米国フェニックス(DNI 2,500 kWh/m²/年)での年間発電量1,757MWh/年、設備コスト3.3億円/MWで、19円/kWh達成可能 ■今年度中に集光状態を最適化する手法を確立し、発電効率を向上し、米国での実証試験で実証
平成29(2017)年度末 ①設備コスト ②発電コスト	<ul style="list-style-type: none"> ■2.7億円/MW ■14円/kWh 	<ul style="list-style-type: none"> ■事業化後の量産効果 ■NEDO目標の変換効率45%のセルの採用

現時点の設備コスト4億円/MWは、世界の先頭集団(AMONIX, SolFocus, Soitec等)の現時点の設備コスト3.3億円/MW程度(コンサルタントの調査結果)より高いが、米国での実証試験(定格出力合計100kW)向けに、定格出力10kW機を10台生産する過程において、量産効果を確認し、正確な製造コストを把握することにより、最終目標の3.3億円/MWを達成できると考えている。

世界の先頭集団は、ペDESTALタイプの構造を採用しているが、本事業は、カルーセルタイプの構造を採用した。カルーセルタイプの特長の一つに、強風が吹いても揺れが小さく集光効率が落ち難いことがある。集光型太陽光発電の最も有望市場である米国サンベルト地帯は、強風の日が多くあると聞いている。従って、カルーセルタイプは、ペDESTALタイプよりも、発電時間が多くなり、同じ設備コストならば、発電コストが安くなるはず

である。

しかし、PVの設備コストは今年になって大幅に下落し、世界の先頭集団は、懸命なコストダウンを行っている。本事業が、最終目標の設備コスト3.3億円/MW、発電コスト19円/MWh（米国アリゾナ州フェニックス）を達成しても、PVに対抗できないが、次の目標である設備コスト2.7億円/MW、発電コスト14円/MWh（米国アリゾナ州フェニックス）を達成すれば、PVは高温地帯では発電効率が下がること、土地の使用面積が多いことにより、PVと棲み分けができると考えている。

3. 波及効果

(1) 産業分野

1) 関連産業に新たなビジネス提供

自動車部品、射出成型、金属蒸着、駆動機器メーカー等が、再生可能エネルギー分野へ進出することができる。

2) 集光型太陽光セルメーカー

現在よりもっと集光倍率の高い（約1800倍）集光型太陽光セルの開発を促す可能性がある。

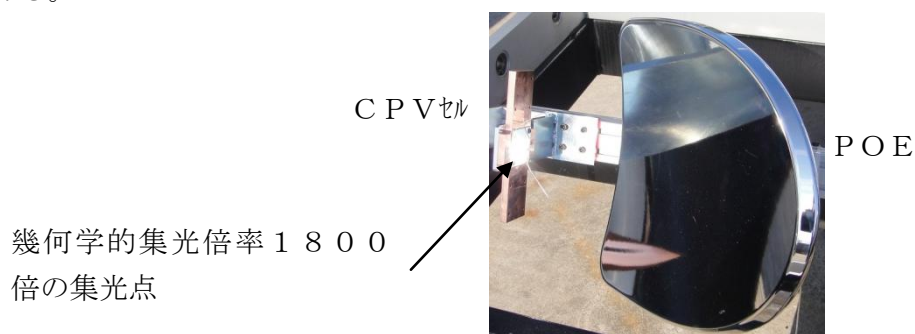


図 III-2-(ハ)-C-3 (1) 幾何学的集光倍率1800倍の集光

3) 省エネ推進

集光型太陽光発電装置の設置できないビルの屋上、駐車場の屋上等に設置し、省エネを推進し、日陰を提供する。

(2) 研究開発や人材育成

長岡技術科学大学機械系山田准教授の研究室は、

- ①世界トップレベルのL P I社の設計に匹敵/凌駕する最適化手法を構築中であり、
- ②光学設計分野の優れた人材を育成している。

4. 今後の展開

(1) ビジネスモデル

最初の市場は、米国サンベルト地帯、特にカリフォルニア州を想定している。カリフォルニアで事業展開するためのビジネスモデルを下図に示す。

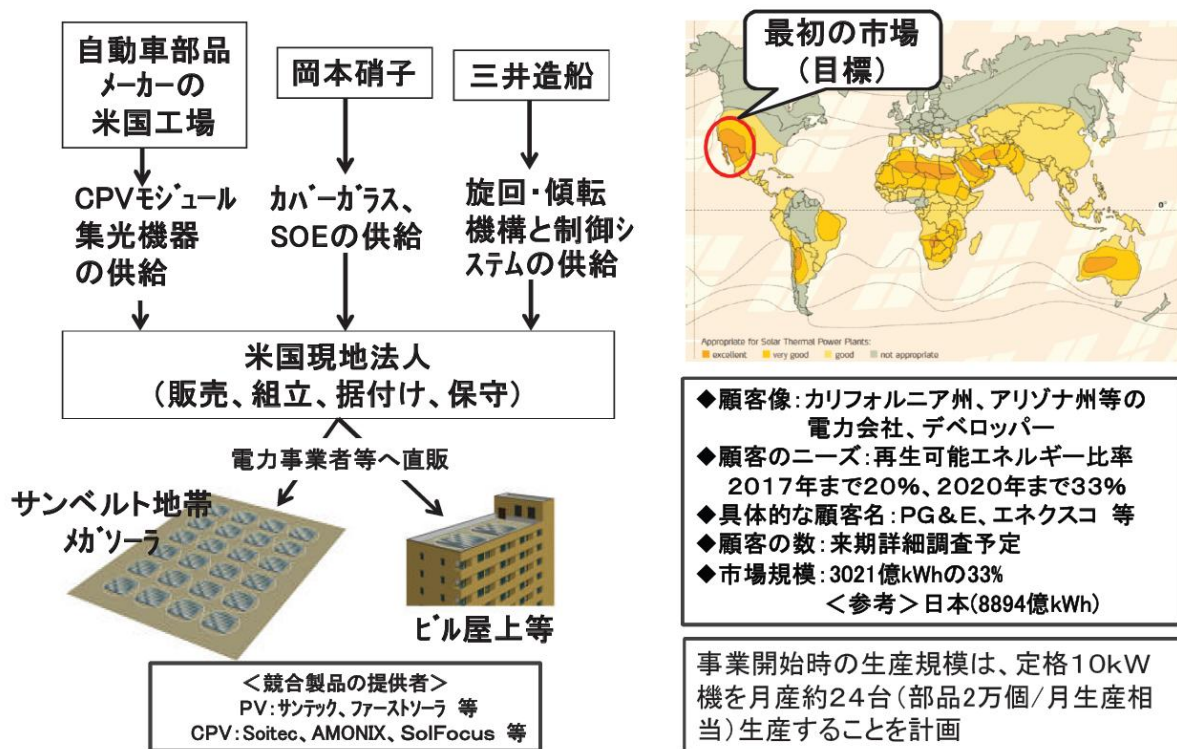


図 III-2-(ハ)-C-4 (1) カリフォルニアでのビジネスモデル

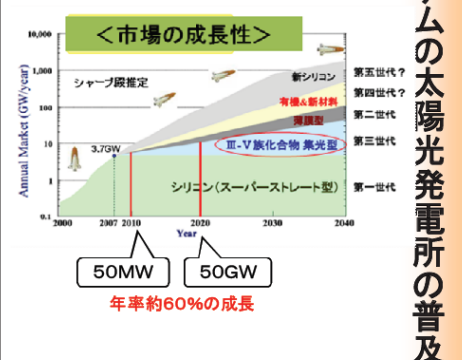
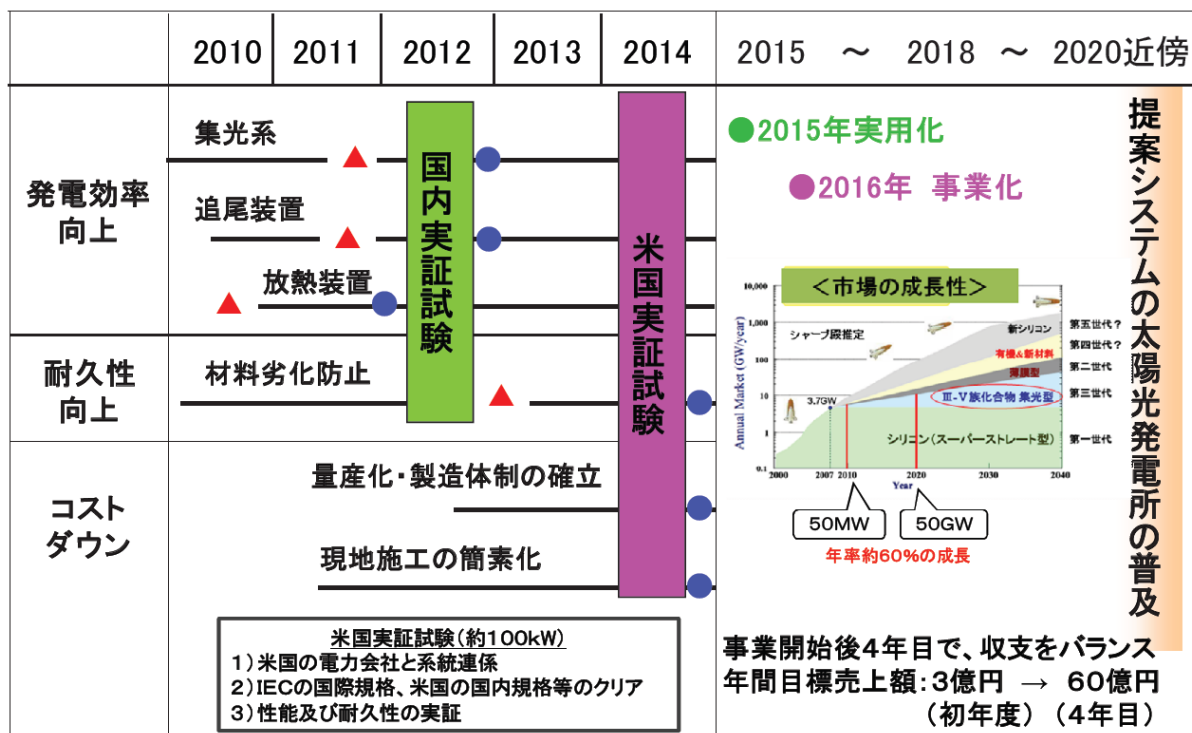
カリフォルニア州、再生可能エネルギーの比率を、2017年までに20%、2020年までに33%まで引き上げることを決定し、カリフォルニア州の需要電力量は、3021億kWhで、日本の8894億kWhと比べて、十分な市場規模である。

カリフォルニア州の市場に参入するために、米国に現地法人を設立する。事業開始時の生産規模は、既存の生産設備を使って量産効果が出せる最小の生産量である部品生産量2万個/月、つまり、定格10kW機を月産24台とする。

(2) 今後の展開

2015年に実用化し、2016年に事業化するために、今年度の国内実証試験に続いて、2014年に米国カリフォルニア州で定格出力100kW程度の実証試験を行うことを計画している。

米国の実証試験で、性能及び耐久性を実証し、更に米国の電力会社と系統連係を行い、国際規格及び米国規格をクリアする。今後の展開を下図に示す。



提案システムの太陽光発電所の普及

事業開始後4年目で、収支をバランス
年間目標売上額: 3億円 → 60億円
(初年度) (4年目)

▲ : 基本原理確認 ● : 基本技術確立

図 III-2-(ハ)-C-4 (2) 今後の展開

5. 特許論文リスト

採択されて以降、特許の出願、論文の発表は行っていないが、現時点でも特許の出願、論文のテーマは持っている。

特許の出願については、POEを精度良く組み立てる方法や、その精度を効率的に検査する方法等、ノウハウの属する事項が多いので、権利化の方法を検討している。

論文の発表については、実証試験結果がまとまり次第、数件の論文を発表する予定である。知的財産権、成果の普及を下表に示す。

表 III-2-(ハ)-C-5 (1) 知的財産権、成果の普及

	H21 (2009)	H22 (2010)	H23 (2011)	H24 (2012)	H25 (2013)	H26 (2014)	計
特許出願(うち外国出願)							0件
論文(査読付き)	ノウハウに属する部分が多く、権利化の範囲について検討中、下記が主な候補 ・SOEへのARコート ・POE組付け方法 ・POE組付け精度検査方法						0件
研究発表・講演							0件
受賞実績							実証試験結果が出てから、積極的に論文や新聞・雑誌等へ発表する予定
新聞・雑誌等への掲載		2	2				4件
展示会への出展							0件

以上