

戦略的創造研究推進事業
－CREST タイプ－

研究領域
「太陽光を利用した独創的クリーン
エネルギー生成技術の創出」

研究領域中間評価用資料

平成 26 年 3 月 3 日

目次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	3
(3) 研究総括	4
(4) 採択課題・研究費.....	5
2. 研究総括のねらい.....	5
3. 研究課題の選考について.....	7
4. 領域アドバイザーについて.....	8
5. 研究領域の運営について.....	9
6. 研究の経過と所見.....	10
7. 総合所見	20

1. 研究領域の概要

(1) 戦略目標

「異分野融合による自然光エネルギー変換材料及び利用基盤技術の創出」

1) 本戦略目標の意義

2008 年 5 月に総合科学技術会議が取りまとめた「革新的技術戦略」において、「高効率な太陽光発電技術」の開発は国を挙げて取り組むべき課題に選定された。また、「環境エネルギー技術革新計画」においても、『新しい技術の芽を実用化するには、多くの技術的課題を乗り越える必要がある。これら課題のブレークスルーを実現するため、新しい触媒や材料などを開発する基礎・基盤的な技術の研究を推進する。』と言及されており、既存の太陽電池が抱える課題を解決するための基盤的な技術の研究が極めて重要と認識している。しかしながら、既存の太陽光発電の僅かな効率性の向上のための研究は企業を中心に実施されているが、次世代の社会を支える発電システムを構築するには到底至っていない。また、政府の「低炭素社会づくり行動計画」（平成 20 年 7 月閣議決定）において、①太陽光発電の導入量を 2020 年に 10 倍（1400 万 kW）、2030 年に 40 倍（5300 万 kW）にすること、②3～5 年後に太陽光発電システムの価格を現在の半額程度にすること等を目標とするとともに、「安心実現のための緊急総合対策」（平成 20 年 8 月政府・与党とりまとめ）においても、低炭素社会の実現に向けた新エネ技術の抜本的導入のための具体的施策として、家庭・企業・公共施設等への太陽光発電の導入拡大が位置付けられている。さらに、本年 11 月に国土交通省、経済産業省、文部科学省、環境省の連携による「太陽光発電の導入拡大のためのアクションプラン」が公表され、関係省庁との連携を強化し、本アクションプランの取り組みの更なる深化・具体化が図られることとなった。

革新的技術戦略を具体化すべく文部科学省が検討会を設置して取りまとめた報告書では「今後のナノテクノ用研究に牽引された現在の環境技術の研究開発体制を反省し、大学等の優れた人材を政策的に環境技術開発に誘導することによって、10～15 年先を見据えたブレークスルーのための研究開発の必要性が強調されている。また、この報告書では、環境技術の実用化のためには、オールジャパン体制によるプロジェクトを構築するとともに、ファンドの特長を活かした組み合わせによる立体的な研究支援を行う必要性が併せて強く指摘されている。

自然光の中でも太陽光利用技術は、自然エネルギーからエネルギーを取り出す最も有力な手段であり、将来のエネルギー供給源としての期待が大きい。このような認識の下、米国も基礎研究からの強力な研究開発体制（HELIOs プロジェクトなど）で推進しており、太陽電池の世界シェアではドイツが世界首位の座を占めている中、太陽光利用技術は我が国の国益の観点でも、政府を挙げて最優先に取り組むべき環境技術である。

2) 具体的な研究開発課題

太陽光利用技術の構築の最大の目的は、化石燃料の利用によって生成する炭酸ガスの量を減らし地球温暖化の進行を止めることである。したがって、太陽電池を作るために必要な全エネルギーよりも、できた太陽電池が発電するエネルギーの方が十分大きい太陽電池製造技術を創出することが必要である。この技術を実現することにより、将来は化石燃料をまったく使わずに全世界の電力を太陽光発電で供給できる。

太陽電池では、シリコン(結晶とアモルファス)や化合物半導体を用いたものは既に実用化段階にあり、産業界ならびに経済産業省やNEDOのプロジェクトによってシステムの高効率化・低コスト化が推進されている。しかしながら、効率を維持しながら希少元素であるインジウムを使わない系の探索が求められるなど、挑戦的な課題も多い。一方、有機薄膜太陽電池、色素増感型太陽電池、量子ドット太陽電池等の新型高効率太陽電池ならびに太陽光利用水素生成については、その将来性が大いに期待されているものの、実用化のためには原理解明と新構造の提案、効率の大幅改善のための新材料探索、低温・大面積化可能な新規プロセスの開拓などが必須である。このため、触媒材料・色素材料の開拓、バンド設計、表面・界面制御、理論的な最大効率の検証など、基礎的研究レベルの課題を解決した上で、デバイス化さらにはシステム化へと道筋をつける必要がある。

シリコン系太陽電池・化合物半導体太陽電池と比べて、それ以外の太陽電池や水素生成技術は研究の進捗に大きな隔たりがあるというものの、太陽光を利用するという見地からは相互補完性を有しており、将来の発展性をより広く確保するためにも複線的な研究開発の推進が必要である。しかし現状においては、先行しているシリコン(結晶・アモルファス薄膜)太陽電池と化合物半導体太陽電池は、市場における普及拡大を目指したコスト低減に力点をおいた研究開発が専ら推進され、界面制御、薄膜・結晶成長、新材料開拓といった基盤的研究要素に対する支援が十分為されていない傾向にある。一方、有機薄膜・色素増感型太陽電池、量子ドット・新型高効率太陽電池や太陽光利用水素生成については、いまだ市場での普及を考える段階には至っておらず、少なくともエネルギー変換効率の抜本的な向上に資する材料・プロセス・構造の開拓が不可欠である。

さらに、地球の歴史を振り返れば明らかなように、時々火山の大噴火によって地表が火山灰で覆われ太陽光が地上に届かなくなることが起る。太陽電池がまったく働かない事態が発生する。したがって、その時のために化学電池による大電力発電システムも同時に創り出しておく必要がある。

そこで本戦略目標では、先行しているシリコン太陽電池と化合物半導体太陽電池の科学的な知見や技術的経験を、有機薄膜・色素増感型太陽電池、量子ドット太陽電池等の新型高効率太陽電池や太陽光利用水素生成・化学電池の飛躍的な効率改善に活用することを基本指針とし、併せてシリコン太陽電池や化合物半導体太陽電池との共通技術要素である表面・界面制御、新概念・新構造の提案などに関する研究を推進する。

このように、本戦略目標の目的とするところは、個別の要素技術をバラバラに研究開発

することではなく、上記の様な研究分野間でのインタラクションを意図的かつ強力にはかり、成熟した研究領域に新たな活力を与えると共に、いまだ未成熟な領域には飛躍に向けた明確な指針を提供することにあり、その具体例として以下のものが挙げられる。

[シリコン・化合物薄膜型]

- ・基礎基盤に立ち戻った界面・薄膜成長技術の開発
- ・効率以外の数値(欠陥密度等)の設定による新材料開拓
- ・インジウム等の希少金属を使わない系の探索
- ・高品質・低コスト量産技術

[色素増感・有機薄膜型]

- ・原理解明と新構造の提案
- ・PN 活性層における伝導輸送現象の解明
- ・効率の大幅改善のための新材料探索
- ・低温・大面積化可能な新規プロセスの開拓
- ・ルテニウム等の希少金属を使わない系の探索

[量子ドット系]

- ・超高効率に向けた理論的研究
- ・太陽電池としてのデバイス動作の検証
- ・集積化・システム化

[太陽光利用水素生成]

- ・効率の大幅改善を目指した新規ナノ触媒材料の開拓
- ・化学電池による発電/水素生成技術
- ・耐久性向上のための材料・構造設計
- ・デバイス化ならびにシステム化

これらの研究領域は材料化学とデバイス物理が融合した分野である。しかし、太陽光利用技術に取り組む国内の研究者数は非常に少ない現状にある。したがって、物理学、化学、電子工学等の異分野の研究者の英知を結集し、太陽光の利用という共通の課題のもとで共同研究を推進してインタラクティブイノベーションを引き出すことが本研究事業の重要なポイントである。

(2) 研究領域

「太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー生成技術の創出」(平成 21 年度発足)

本研究領域は、太陽光エネルギーを電気エネルギーに直接変換する太陽光発電技術を対象とし、さらには太陽光エネルギーにより 水素等を生成する化学燃料生成技術、電気エネルギーと化学燃料を同時に生成する技術等も含め、将来の独創的クリーンエネルギー生成に 資する研究開発を行う。

具体的には、太陽光発電技術として、シリコン系、化合物薄膜型、色素増感型、有機薄膜型、新型超高効率系の太陽電池開発、太陽光利用による有用物質・エネルギー生成技術として、水素などの有用物質生成、有用物質とエネルギーの同時生成等に関する研究開発を対象とする。

また本研究領域は、従来技術の延長線上の単なる高効率化、長寿命化を追うのではなく、材料探索、基礎物性解析等、光吸収、電荷分離、材料劣化等の 基本に立ち返り、場合によっては全く新しい原理により動作する材料、デバイスを目指す等、独創的かつ将来的な波及効果が大きな研究開発を目指すものである。そのため、対象となる研究分野は、物質科学とデバイス物理が融合した分野であり、この領域でのブレークスルー技術を創出するため、物理学、化学、電子工学等の異分野の研究者の英知を結集し最先端のナノテクノロジーも駆使しつつ異分野融合による研究開発を促進する。

(3) 研究総括

山口真史(豊田工業大学 特任教授)

(4) 採択課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	中間評価時所属・役職	研究課題	研究費*
平成 21 年度	入江寛	山梨大学・教授	高感度な可視光水分解光触媒の創製	137
	岡本博明	大阪大学・教授	アモルファスシリコンの光劣化抑止プロセスの開発	337
	佐藤真一	兵庫県立大学・教授	界面局所制御による光・キャリアの完全利用	348
	韓礼元	(独)物質・材料研究機構・ユニット長	色素増感太陽電池におけるデバイス物性に関する研究	361
	平本昌宏	自然科学研究機構・教授	有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス	415
	堀越佳治	早稲田大学・教授	励起子吸収による増感を利用した高効率太陽電池の研究	230
	安武潔	大阪大学・教授	大気圧プラズマ科学に基づく新たな Si 材料創成プロセスの開発	178
平成 22 年度	片桐裕則	長岡工業高等専門学校・教授	Next 次世代を目指す化合物薄膜太陽電池の高性能化	298
	重川直輝	大阪市立大学・教授	シリコン基板上窒化物等異種材料タンデム太陽電池の研究開発	253
	末益崇	筑波大学・教授	シリサイド半導体 pn 接合による Si ベース薄膜結晶太陽電池	301
	松村英樹	北陸先端科学技術大学院大学・教授	Cat-CVD など新手法による太陽電池高効率化	257
	山田容子	奈良先端科学技術大学院大学・教授	革新的塗布型材料による有機薄膜太陽電池の構築	148
平成 23 年度	金光義彦	京都大学・教授	集光型ヘテロ構造太陽電池における非輻射再結合損失の評価と制御	302
	野田進	京都大学・教授	フォトニック・ナノ構造を活用した新しい光マネジメント技術の開発	348
	本間敬之	早稲田大学・教授	固液界面反応設計による新規高純度シリコン材料創製プロセスの構築	246
総研究費				4,159

* 研究費：平成 25 年度上期までの実績額に平成 25 年度下期以降の計画額を加算した金額(直接経費)とした。

* 重点配分した理由：研究費の配分は、申請内容を精査した上で決定したが、新たな展開の可能性や研究遂行上大きな効果を発揮すると考えられる申請については配慮することとした。

2. 研究総括のねらい

顕在化した地球環境問題やエネルギー問題の解決のためには、無尽蔵な太陽エネルギーを利用したクリーンなエネルギー技術の創製が最重要である。本研究領域では、太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する太陽電池等太陽光発電技術、太陽光エネルギーにより化学燃料を生成する水素生成技術、電気エネルギーと化学燃料を同時に生成する技術等を対象としている。発明以来 55 年が経過した太陽電池技術にしても、実用化が進んではいないが、変換効率、コスト、寿命など多くの課題があり、独創的な研究開発の推進が望まれ

ている。

従来、太陽電池を例にすると、経済産業省や NEDO 等の受託研究開発を中心に技術開発が進められてきた。変換効率やコスト等の具体的目標設定があり、技術開発の視点は、短期的なものにならざるを得なかったように思う。また、技術開発の基盤も、半導体工学・電子工学を主としたものであり、独創的な研究開発の推進の点でも限界があったように思う。また、将来の関連分野の飛躍的拡大のためには、人材育成も大きな課題の一つである。

太陽エネルギーを利用したクリーンエネルギーの飛躍的拡大のためには、独創的クリーンエネルギー生成技術の創製が極めて重要である。創造的研究開発推進のため、従来、半導体工学・電子工学が主であった研究開発基盤も、物理学、化学、電子工学、半導体工学、物質科学等異分野の融合を目指す。多くの視点から研究することが、創造的研究開発の推進に有効と考える。本研究領域では、経産省や NEDO で推進されている技術開発との補完的協力も担う必要がある。

期待する異分野融合の例を以下にあげる。

- ①発電効率の飛躍的向上のためには、表面・界面や欠陥・不純物など不完全性の物理の理解と制御が重要で、半導体工学に加え、物理学、化学、結晶物理、表面科学、物質科学、材料工学、薄膜工学、デバイス物理などの研究者の参画を期待する。こうした融合研究は、シリコン薄膜で課題となっている光劣化現象の理解と課題解決にも有効と考える。
- ②量子ドットなどの量子ナノ構造も魅力的研究テーマだが、原理検証もままならない状況と考えられ、新概念や新型デバイスの創製のためには、光吸収、キャリア生成や再結合過程等の理解と制御が課題と考えられ、量子物理を中心に基礎研究者の参画も期待する。また、集光や光閉じ込め制御も高効率化に有効で、フォトニック結晶などによる光制御など光学の研究者の参画も期待する。
- ③低コストが期待される色素増感、有機太陽電池については、変換効率、寿命が課題と考えられる。従来、化学者を中心に研究開発が進められてきたが、試行錯誤の域を出ていない印象で、光吸収、キャリア生成、電荷分離、電荷輸送、界面現象などのサイエンスやデバイス物理の理解が必要と考える。化学、物質科学に加え、物理学、半導体工学・電子工学などの分野の研究者の参画が有効と考える。また、有機 EL ディスプレイや光触媒など関連分野の研究者の参画も期待する。
- ④太陽光利用による有用物質・エネルギー生成技術として、水素などの有用物質精製、有用物質とエネルギーの同時生成なども太陽光エネルギーの有効利用に有用と考える。光水分解による水素生成などに関しては、その科学とデバイス物理などが課題と考えられ、化学、電気化学と物理学や電子工学等の融合を期待する。また、上記色素増感太陽電池と光水分解による水素生成は、共通の基本原則を共有しており、これらの融合も期待される。

3. 研究課題の選考について

(1) 選考方針

本研究領域では、太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する太陽電池等太陽光発電技術、太陽光エネルギーにより水素等を生成する化学燃料生成技術、電気エネルギーと化学燃料を同時に生成する技術等を対象とした。但し、バイオマス技術については本研究領域の対象には含まないこととした。太陽エネルギーを利用したクリーンエネルギーの飛躍的拡大のためには、独創的クリーンエネルギー生成技術の創製が極めて重要であり、創造的研究開発の推進のため、異分野の融合を目指すこととした。多くの視点から研究することが、創造的研究開発の推進に有効と考えた。ブレークスルーにつながり得るような発想の転換も期待し、太陽光利用クリーンエネルギー生成技術の実用化に貢献すべきものを期待することとした。また本研究領域では、経済産業省、NEDO などで推進されている技術開発との補完的協力も担う必要があり、選考に当たっては、NEDO 等の現行プロジェクトとの重複は避け、将来の補完の可能性を考慮した。

評価の視点は、①研究の必要性、インパクト、②提案内容の新規性、ブレークスルーの可能性、③研究課題設定や研究計画の明確性、④研究成果および波及効果の見通し、⑤研究チームの構成の有効性および実績、⑥太陽光利用分野での実績、⑦NEDO 等、他プロジェクトの補完が期待できるか、但し、重複は避けたい、とした。

(2) 選考結果

平成 21 年度は、51 件の応募があり、研究総括と領域アドバイザー7 名で書類選考を行い、11 件の提案について面接選考を行った。最終的には、7 件の提案を採択した。採択テーマは、シリコン材料創成プロセスの開発、超薄型化に向けた結晶シリコンの表面・界面パッシベーション、アモルファスシリコン太陽電池の光劣化機構の解明と完全抑制、励起子吸収の有効利用の研究、色素増感型太陽電池の統合的研究、有機太陽電池の統合的研究、太陽光利用による水素生成の 7 件である。特に、ブレークスルーに繋がると予想される太陽電池の劣化現象や変換効率の壁の打破に向けて、統合的研究を採択した。加えて、新材料 BaSrSi の研究 1 件を特定課題調査テーマとした。

平成 22 年度は、33 件の応募があった。研究総括と領域アドバイザー7 名で書類選考を行い、10 件の提案について面接選考を行った。最終的には、5 件の提案を採択した。採択テーマは、結晶シリコンの新規表面パッシベーションと低温接合形成に関する研究、CIGS に代わる化合物薄膜太陽電池の研究、窒化物半導体・オン・シリコン太陽電池の研究、有機系の新規成膜と物性評価解析の研究、バンドギャップ 1.5eV の新規 BaSi 材料の研究の 5 件である。特に、ブレークスルーに繋がると予想される新規表面パッシベーション、低温接合形成および異種接合形成技術、新規材料の研究および統合的研究を採択した。

平成 23 年度は 33 件の応募があり、研究総括と領域アドバイザー7 名で書類選考を行い、7 件の提案について面接選考を行った。最終的には、3 件の提案を採択した。採択テーマは、

太陽電池の高効率化に向けた非輻射再結合損失の評価解析と制御に関する研究、フォトリソ・ナノ構造を利用した新規光マネジメント技術の研究、シリコンの還元プロセスの高速化と新規シリカ製造の研究の 3 件である。特に、ブレークスルーに繋がると予想される基礎物理の理解と物性の制御、新規光マネジメント技術、新規シリコンおよびシリカ製造の研究など、太陽電池の高効率化や低コスト化の飛躍的改善につながり得る基盤研究を採択した。

15 件のテーマを概観すると、シリコン分野 4 件（シリコン材料創成プロセスの研究開発 2 件、超薄型化に向けた結晶シリコンの表面・界面パッシベーションの研究 1 件、結晶シリコンの新規表面パッシベーションと低温接合形成に関する研究 1 件）、アモルファスシリコン太陽電池の光劣化機構の解明と完全抑制 1 件、化合物分野 4 件（励起子吸収の有効利用の研究 1 件、CIGS に代わる新規化合物薄膜太陽電池の研究 1 件、窒化物半導体・オン・シリコン太陽電池の研究 1 件、バンドギャップ 1.5eV の新規 BaSi 材料の研究 1 件）、色素・有機系 3 件（色素増感型太陽電池の統合的研究、有機太陽電池の統合的研究、有機系の新規成膜と物性評価解析、各 1 件）、基礎分野 2 件（超高速光物性評価解析、新型光マネジメント、各 1 件）、水素生成分野 1 件（太陽光利用による水素生成）から成り、バランスを取った構成となっている。

ブレークスルーに繋がると予想される太陽電池の劣化現象の研究、新規表面パッシベーション、低温接合形成および異種接合形成技術の研究、新規材料の研究、非輻射再結合過程の評価解析やフォトリソ結晶の研究、および変換効率の壁の打破に向けた統合的研究を採択している。

半導体 LSI、半導体レーザ、LED、量子効果など異分野からの提案も多くあった。特に、量子効果に関する提案も多くあったが、NEDO のプロジェクトの重複が見られ、不採択とした。また、研究構想のみで具体性に欠けるもの、目標達成の見通しが不明確なもの、チーム構成の不十分なもの、実用化への貢献が述べられていない構想、他助成との切り分けが不明確な提案は、不採択とした。

以上、半導体 LSI、半導体レーザ、LED、量子効果、など異分野からの採択があり、また半導体薄膜成長、基礎物性評価解析、光マネジメントなど、基盤技術に関わる専門家の参画もあり、有為な人材の参加がなされた。

4. 領域アドバイザーについて

氏名	現在の所属	役職	任期
勝本信吾	東京大学	教授	平成 21 年 5 月～平成 28 年 3 月
田中誠	パナソニック（株）	太陽電池担当参事	平成 21 年 5 月～平成 28 年 3 月
錦谷禎範	JX 日鉱日石エネルギー	エグゼクティブリサーチャー	平成 21 年 5 月～平成 28 年 3 月
長谷川美貴	青山学院大学	教授	平成 21 年 5 月～平成 28 年 3 月

林豊	産業技術総合研究所	テクニカル・スタッフ	平成 21 年 5 月～平成 28 年 3 月
元廣友美	豊田中央研究所	シニア・フェロー	平成 21 年 5 月～平成 28 年 3 月

本領域が扱う分野は多岐にわたるため、専門分野や所属機関のバランスを考慮し、材料的にも専門分野的にもカバーできる研究実績のある方々をお願いした。

専門分野のバランス(1)：半導体および無機系 3 名、有機および化学系 3 名

専門分野のバランス(2)：材料および物性専門家 2 名、デバイス専門家 2 名

化学系専門家 2 名

所属機関のバランス：大学 2 名、研究所 2 名、企業 2 名

5. 研究領域の運営について

本来、研究テーマは、研究代表者の独創性や意志に基づくものなので、研究体制や研究推進に関しても研究代表者の自主性を尊重するように努めた。しかし、異分野から参画されたチームで、設定目標、マイルストーンからのかい離が見られる場合、進捗がおもわしくないチーム、研究チーム内の管理で問題が発生した場合などについては、必要に応じて、意見交換やサイトビジットを行い、研究テーマの重点化等の指導や研究体制の連携強化に向けた調整を行った。

研究課題の指導については、研究開始年度に開催したキックオフミーティング、毎年一回開催の研究報告会、研究総括によるサイトビジット等、これまでに 17 回実施して、研究進捗状況を把握し、研究進捗のための助言を行った。

キックオフミーティングは、非公開で開催し、研究総括、領域アドバイザー、研究代表者、研究チームメンバーが参加し、研究開始にあたり、研究チームの全体計画、初年度の研究計画、中間目標とマイルストーン、最終目標と具体的成果のイメージについて説明してもらった。特に、CREST の方針は、基礎研究であり、科学技術イノベーションを念頭におき、世の中に役立つ実用的な科学技術の創製につとめるよう指導すると共に、研究総括と領域アドバイザーは、研究チームの速やかな研究の立ち上げと推進のための助言を行った。

研究報告会も、非公開で開催し、研究総括、領域アドバイザー、研究代表者、研究チームメンバーが参加し、研究代表者による研究の経過、成果、今後の研究計画の報告の後議論を行い、研究総括と領域アドバイザーが各研究チームに効率的な研究推進の助言を行った。報告会等で明らかになった課題の解決に向けて、研究予算の追加等の措置を行った。また、研究チームから、他機関との研究協力や連携、資料提供の要請があった場合は、研究総括等が仲介につとめ研究の効率的な推進を支援した。

サイトビジットは、日程調整上の難しさから研究総括のみで実施し、研究設備の準備状況や研究進捗状況の把握につとめた。研究代表者や研究メンバーによる研究報告、研究総括との討論を行い、効率的な研究の推進に向けた指導を行った。また、研究推進上の課題について、素直な意見交換を行い、問題の解消につとめた。

公開シンポジウムを平成 25 年 1 月 23 日と平成 26 年 2 月 24 日と、二回開催し、各チームに、それまでの研究成果を報告してもらった。また、毎年開催される日本学術振興会 175 委員会「次世代太陽光発電システム」研究会で、平成 22 年の研究会以来、研究総括が本領域の総合報告を行い、各チームが口頭講演、ポスター発表による成果報告を行うと共に、チーム間の情報交換につとめている。さらに、研究総括は、解説記事（山口真史、“太陽光を利用した独創的クリーンエネルギー技術の創出”、未来材料、11 巻 3 号、頁 52-56、2011）を通して本研究領域の PR につとめた。

採択後 3 年が経過した時点で、研究総括、領域アドバイザー、研究代表者、研究分担グループリーダーが参加する非公開の中間評価報告会を開催した。ここでは忌憚のない議論を行い、下記チームに対して、以下のような指導と予算追加等の対応を行った。

① 韓チーム

世界最高効率の変換効率 11.4%を達成しており、また、①長波長色素の開発、②TBP 添加効果、③デバイスシミュレーションなどにおいて着実な成果創出がなされ、高く評価できる。今後も、原子レベルの解析、TiO₂、色素、電解質溶液の第一原理シミュレーションに基づく新規材料開発を、効率 15%達成に結びつけるように指導した。ペロブスカイト系新材料についても効率 7%を得ており、その可能性を見出すために、グローブボックス一体型蒸着装置の予算追加を行った。

② 片桐チーム

研究代表者の先駆的研究により、脱希少金属系薄膜太陽電池実現に有望な CZTS(Se)系材料が注目されている意義は大きい。成膜法、物性評価もゼロからのスタートで手探りの状態から、地道に研究を推進し着実に成果を上げている。目標実現には課題が山積しており、競合が多く参入する中、共同研究者との連携を含め、特徴のある研究の方向性も検討するよう指導した。大手大学に比べて、設備機器が十分とは言えず、高周波グロー放電発光表面分析装置の予算追加を行った。

6. 研究の経過と所見

(1) 入江チーム「高感度な可視光水分解光触媒の創製」

〔研究の概要〕太陽光に多く含まれる可視光照射のもと、水を完全分解できる光触媒材料を設計・創製し、水素を獲得することを通じて独創的クリーンエネルギー生成技術の創出に貢献することを目的としている。具体的には、既存の材料設計・探索指針の延長ではなく、新規戦略に基づく材料設計および新規機構に基づく水分解方法を提案し、可視光応答型水分解材料を創製することを狙いとしている。さらに、高効率化のため、材料の形態(ナノチューブ、ナノ中空体など)をナノレベルで制御することによって反応サイトを空間的に分離する方法やヘテロ接続構造の最適化によって電荷分離効率を向上する方法などの検討を行っている。

[研究進捗状況] 効率的には十分とは言えないが、可視光による水分解の実現を実現している他、①1 光子励起系における材料開発、②2 光子励起系における新規 Z スキーム系、③2 光子励起構築のための半分解光触媒の探索など、新しいアイデアへの挑戦がなされ、また、興味深い実験データが得られている。少ないメンバーながら、代表者のリーダーシップのもと、有機的に研究が進められていると評価される。しかし、可視光による水分解の感度は、量子効率 1.2%と紫外光による効率に比べて低く、エネルギー変換効率は 0.12%と低く、実用化への道のりは極めて遠い。

[今後への期待] 本研究のような電気化学的太陽光エネルギー変換は、大きな注目を浴びてはいるが、実用化への道のりは極めて遠いと言わざるを得ない。太陽光スペクトル全体に対するエネルギー変換効率で評価すべきであり、エネルギー変換効率 30%実現への道のりは極めて遠い。ブレークスルーにつながるような大胆な発想が必要である。また、代替技術、例えば、太陽電池の発生電力を用いた水の電気分解による水素生成技術等との効率、コストや特徴の比較も必要である。他のグループに比べて優れている点などを明示し、そこを伸ばす努力、研究テーマの重点化、研究員の増強なども必要と考えられる。さらに、現状では当該分野における水素生成の物理、化学が十分に理解されているとは言えず、今後の飛躍的な効率向上や革新的な研究の展開に向けメカニズム解明にも注力して欲しい。

(2) 岡本チーム「アモルファスシリコンの光劣化抑止プロセスの開発」

[研究の概要] 光劣化の無いアモルファスシリコンを創成し、高効率・高安定な実用化薄膜系太陽電池を実現するための科学技術を構築することを目的として、異なる分野で培われてきた叡知と経験を集結した総括的な研究開発を推進する。これは、次世代太陽光発電技術の発展に寄与するのみならず、薄膜シリコン系材料の物性・プロセス技術やデバイス物理等の基礎科学分野の革新的進展に貢献するものと期待される。

[研究進捗状況] ①高温成膜での a-Si の低光劣化技術、②a-SiO の高品質化技術、③超臨界流体によるポスト成膜処理技術など着実な成果創出がなされている。また、ポスト成膜処理により、単接合 a-Si セルで光劣化後効率 9.35%を達成しており、単接合セルの光劣化後効率目標 10%にはあと一息である。難しい研究テーマに正面から取り組めるのは、代表者のリーダーシップと研究協力者の貢献によるものと評価される。しかし、高温成膜で a-Si 中の SiH₂ 密度を低減できるが、シリコンネットワークの乱れが増大するネガティブな現象も出てきており、高温成膜、ポスト成膜処理の最適化で上記現象を制御できるか不明確である。さらに、本研究で主眼とする材料技術のみならず、デバイス技術がより重要なタンデムセルにおける光劣化後効率目標 15%の達成の道のりは近いとは言えない。

[今後への期待] 薄膜シリコン太陽電池分野が低迷している昨今、a-Si の光劣化の完全抑制は極めて重要な研究テーマであり、期待は大きい。当面、高温成膜、ポスト成膜処理

の最適化で、 SiH_2 密度の低減、シリコンネットワークの乱れの抑制の両立をはかることが必要である。薄膜シリコン太陽電池のさらなる進展のためには、光劣化の抑制のみならず初期効率の向上も必要であり、タンデムセルのデバイス構造、デバイス作製技術の高度化も必要である。メーカーとの共同研究開発ということで、「非平衡光加熱処理」、「超臨界流体処理」など抽象的な説明が多く、学術的意義を判断できないケースがあり改善を要する。また、超臨界流体処理効果のメカニズムを明らかにしつつ、生産技術としての適用性も明らかにする必要がある。

(3) 佐藤チーム「界面局所制御による光・キャリアの完全利用」

[研究の概要] 太陽電池が持つ潜在能力を極限まで引き出すためには、入射する「光」と、光により発生する「キャリア」の完全利用を目指す必要がある。本研究では「光」と「キャリア」の損失が起こる太陽電池と表面膜との界面に着目し、「界面特性の物理モデル」を構築する。さらにコンビナトリアル手法を駆使して「新しい表面膜材料」を探索し、モデルと組み合わせて太陽電池の高効率化を推進する。

[研究進捗状況] ①コンビナトリアル製法による界面パッシベーション膜の材料設計、② AlOx 膜パッシベーションにおける界面ダイポール・モデルの提案など新規な成果を含む有用な成果が得られており、高く評価できる。しかし、中間目標の界面再結合速度 500cm/s を大きく改善した低界面再結合速度 3cm/s が AlOx/SiO_2 で得られているが、低界面再結合速度のパッシベーション膜を太陽電池に適用した場合の効果はそれほど大きくはなく課題である。研究代表者リーダーシップ、兵庫県立大、明治大学や研究協力グループの連携に加え、リソースを上手に活用し、プロジェクト全体のベクトルを集中させることができおり、評価できる。

[今後への期待] 実験データに基づいた界面パッシベーションの物理モデルの構築を期待したい。特に、 AlOx 膜パッシベーションにおける界面ダイポール・モデルの実証に向けて、電荷発生機構などを明らかにして欲しい。今後、新しい材料が出現した時にも十分対応できる材料パラメータと界面再結合速度等に関わる普遍的な理論的モデルの構築を期待したい。トランジスタ等では、ネガティブと考えられていた固定電荷の活用は新たな視点ではあるが、太陽電池特性の不安定性につながる可能性もあり検討課題である。現状では、界面再結合速度の低いパッシベーション膜を太陽電池に適用した場合の効果はそれほど大きくはなく、NEDO「太陽光発電次世代高性能技術開発」プロジェクトの“結晶 Si 太陽電池コンソーシアム”との協力による太陽電池試作を進め、本研究の成果実証が必要である。

(4) 韓チーム「色素増感太陽電池におけるデバイス物性に関する研究」

[研究の概要] 低炭素化社会に貢献する低コストの色素増感太陽電池の高変換効率化研究を行う。色素増感太陽電池のセル構造や色素、酸化物半導体、電解質などの構成材料を

変えながら、半導体物理、電子工学の分野を基盤にして、表面科学、分子化学や計算科学的アプローチを加えた異分野融合研究により、「分子の電子状態・配列」から「半導体物性などのデバイス物理」までの動作原理を解明し、新たな高効率化アプローチを明らかにする。

[研究進捗状況] 色素増感型分野では、世界最高効率の変換効率 11.4%を達成しており、また、①長波長色素の開発、②TBP 添加効果、③デバイスシミュレーション、などにおいて着実な成果創出がなされ、高く評価できる。代表者は、リーダーシップを発揮し、またリソースを活用し、STM による色素の吸着状態のマイクロ解析など、興味深い成果を得ている。また、大阪府立大との連携により、シミュレーション分野でも成果が得られつつある。しかし、等価回路モデルで推察される課題が解決されているとは言えず、目標効率 15%実現の道筋は、必ずしも明らかにはなっていない。

[今後への期待] 色素増感型太陽電池の実用化のためには、太陽電池効率 15%以上の実現、高信頼度化、などが必要である。色素増感型太陽電池のさらなる高効率化への方策が不明確である。例えば、等価回路モデルで出された課題が解決されているとは言えず、目標効率 15%達成の道筋を明らかにしつつ進めるべきである。TBP 添加により電圧増加は認められるものの、収集電流は減少し、TBP 添加による表面吸着面積低減の可能性もある。また、光閉じ込め効果など、定量的に評価されていないケースもある。従って、実験データの蓄積と理論的シミュレーションとの比較による現象およびデバイス特性の理解を進めつつ、原子レベルの解析、TiO₂、色素、電解質溶液の第一原理シミュレーションに基づく新規材料開発を進め、効率 15%達成に結びつけて欲しい。

(5) 平本チーム「有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」

[研究の概要] 有機半導体のバンドギャップサイエンスを確立、すなわち、イレブンナイン超高純度化、ドーピングによる pn 制御、内蔵電界形成、オーミック接合形成、半導体パラメータ精密評価等のサイエンスを、シリコン無機半導体のレベルまで引き上げ、さらに、励起子、無機/有機ヘテロ界面のサイエンスを確立して、シングルセルで効率 15%の有機太陽電池を目指す。

[研究進捗状況] 無機系での類似アプローチを展開し、①ドーピング制御困難と思われてきた有機半導体における pn 制御、②バンドギャップサイエンスの概念、③イレブンナインの高純度技術、④ケルビンプローブ法等の解析技術など新規性のある有用な成果が得られており、高く評価できる。これらの成果は広く有機半導体の材料科学やデバイスフィジックスへ貢献することが期待される。しかし、目標効率 15%に対して、シングルセル効率 3.6%、タンデムセル 2.4%と本プロジェクト以前の効率 5.3%より低く、当初の方策が太陽電池の高効率化につながっていないのが現状である。代表者のリーダーシップも発揮されているが、有機/無機太陽電池チームとの関連性は密とは言えない。

[今後への期待] 有機太陽電池の実用化のためには、太陽電池効率 15%以上の実現、高信

頼度化などが必要である。目標効率 15%の達成に向け、研究テーマの重点化、研究グループ協力の密なる連携が必要である。当初の方策が、太陽電池の高効率化につながってはいないのが現状である。変換効率 15%達成の道筋を明らかにする必要がある。例えば、電流向上の道筋が不明確であり、光吸収係数から光収集電流を算出する手法など、もっと無機系に学ぶべきである。予算を活用し、研究員を増員し、特に、デバイス作製の専門家を採用し、有機太陽電池の高効率化を通じて、本研究のアプローチの有効性を実証すべきである。

(6) 堀越チーム「励起子吸収による増感を利用した高効率太陽電池の研究」

[研究の概要] 低コスト高効率の太陽電池を実現するためには薄膜化と吸収係数の増大が不可欠である。これを同時に実現するため、通常バンド端吸収に加え、励起子の励起に伴う光吸収も利用する。室温における十分な励起子吸収は、励起子束縛エネルギーの高い ZnO や GaN を含む半導体材料を用いること、および半導体超格子を利用することによって実現する。欠陥の少ない大面積ヘテロ接合薄膜の製作技術、および太陽電池としての最適なドーピング技術を確立し高効率化を達成する。

[研究進捗状況] 励起子吸収を太陽電池特性として確認している。従来構造の GaAs セルの効率 19.6% ($V_{oc}=1.00V$) に対して、AlGaAs/GaAs 超格子セルで、効率 20.5% ($V_{oc}=1.08V$) と改善されている。一般的に、超格子、量子井戸、量子ドットなどは、非輻射再結合による課題があり、飛躍的な効率改善の道が示されていない。また、研究グループの研究員が少ない中で、AlGaAs/GaAs 超格子、カルコパイライト系、InGaN 系等、幅広い材料が検討され、研究勢力が分散され、十分な成果が得られていない。研究グループ内の連携も密にする必要がある。研究テーマの重点化が必要である。

[今後への期待] 超格子、量子井戸、量子ドットなど高効率新型構造としてトピックスとなっているが、一般的に非輻射再結合による課題があり、飛躍的な効率改善の道が示されていない。飛躍的な効率改善の道を示して欲しい。当初計画に比べて研究進捗は遅れていると言わざるを得ない。代表者のリーダーシップの発揮と研究グループ内の密なる連携も必要である。研究テーマの重点化、研究員の採用、特に、デバイスの専門家の採用による研究の加速化を期待したい。

(7) 安武チーム「大気圧プラズマ科学に基づく新たな Si 材料創成プロセスの開発」

[研究の概要] 大気圧近傍の高圧力プラズマを用いて、廉価な低純度シリコン(Si) 原料から太陽電池用 Si を製造するプロセスを開発する。プラズマ内部や材料表面で生じる現象を原子レベルで解明し、高度に制御する手法を確立することにより、低純度 Si 原料からのシラン生成反応を超高速化する。これにより新しい高純度 Si 材料創成プロセスを開発し、太陽電池用 Si 材料不足の解消と太陽電池製造コストの大幅な低減に貢献する。

[研究進捗状況] ①SiH₄ 生成速度は、中間目標値 1cc/min を超えた 3.3cc/min が得られ、

②熱 CVD による Si 中の不純物濃度は、ソーラークレード・シリコン(SOG-Si)の不純物濃度より桁違いに低い、③Siのエッチレートを従来法より二桁上げられるなど、中間目標を全て達成しており、着実な成果創出がなされている。研究人員は6名と少ないが、代表者のリーダーシップの努力が認められる。本技術の実用化のためには、Siの回収率やエネルギー収支の向上、低コスト化に加え、企業との共同研究開発が必要と考えられる。

[今後への期待] SiH₄の生成速度を、最終目標10cc/minを大幅に超える技術開発が必要と考える。基礎的には、SiH₄生成の素過程の理解、金属SiのHエッチングの反応機構解明など科学的解明も必要であり、C濃度は高い状況で一桁程度の低減が必要である。中国企業の乱立により、SOG-Siの価格低減の状況で本技術の実用化のためには、コスト目標10,000円/kgをもう一桁、1,000円/kg以下に下げなければならない厳しい状況にある。本技術の完成度を上げるには、製造規模を上げる等、企業との共同開発が必要である。NEDO「太陽光発電次世代高性能技術開発」プロジェクトの「結晶Si太陽電池コンソーシアム」との協力による太陽電池試作も本技術の有用性を実証する上で必要と考えられる。

(8) 片桐チーム「Next 次世代を目指す化合物薄膜太陽電池の高性能化」

[研究の概要] 次世代の先を見据えて、脱希少金属系薄膜太陽電池の高性能化を行う。地球温暖化を止め、低炭素社会に向け太陽電池を普及させるには、変換効率と共に、使用する原材料の安定供給を考慮する必要がある。本研究では、希少金属であるインジウムを使用しないCZTS系光吸収層の高品質化、新規太陽電池材料、新規界面層の探索および新しいナノ構造を太陽電池に取り込むことで、産業として持続可能な新規太陽電池を開発する。

[研究進捗状況] 導入した設備を有効活用し、CZTS太陽電池の作成で必要な硫化プロセスの詳細な解析がなされており、高効率化に向けた基礎的知見が得られている。また、太陽電池の効率の再現性が得られるようになっている。課題も多いが太陽電池としての評価に耐えうる素子を作成するところまで至った点は評価できる。一方、変換効率については改善が低く、効率6.77%のままで、効率目標15%に対して十分とは言えない。注目されている材料であるがゆえ、強力な競合相手が参入する中、目標達成のため具体的開発課題とその解決手段を明確にしつつ、特徴ある研究の方向性を熟慮すべき時期に来ている。製膜技術、膜質評価技術については引き続き完成度を高めると共に、膜中の欠陥の評価解析、バンドオフセットなど、物性をしっかり押さえる必要がある。Seを加えないCZTS光吸収層を徹底的に研究するなどの特徴を出し、変換効率改善ができれば大きな成果につながると期待する。

[今後への期待] 研究代表者の先駆的研究により、脱希少金属系薄膜太陽電池実現に有望なCZTS(Se)系材料が注目されている意義は大きい。第一原理計算の論文発表も広く引用され注目されている。成膜法、物性評価もゼロからのスタートで手探りの状態から、地

道に研究を推進し着実に成果を上げている。目標実現には課題が山積しており、何が重要か明確にすることを望む。新規バッファ層材料の提案や欠陥の物性評価と理解に基づく高品質化など、イノベーションを期待したい。競合が多く参入する中、共同研究者との連携を含め、特徴のある研究の方向性も検討する必要がある。

(9) 重川チーム「シリコン基板上窒化物等異種材料タンデム太陽電池の研究開発」

[研究の概要] 本研究では、低発電コスト、高効率、省資源の太陽電池の実現に向けて、集光型太陽光発電システムと親和性が高い、シリコン／窒化物半導体ハイブリッド多接合タンデム太陽電池を実現する。そのために、可視～赤外光バンドギャップ窒化物半導体のシリコン基板上作成技術、太陽電池設計・作成技術、ハイブリッド化技術を開発するとともに、InN系窒化物半導体の結晶成長、材料物性及びデバイス化に係る学問・技術の進展を図る。

[研究進捗状況] InGaP系のハイブリッドデバイスについては、表面活性化ボンディング法により、つい最近、InGaP/GaAs/Siセルで、効率24.42% ($J_{sc}=10.88\text{mA/cm}^2$ 、 $V_{oc}=2.664\text{V}$ 、 $FF=84.23\%$) が得られ、また、常温によるトンネル接合形成など進展が見られるが、変換効率についてはまだ改善する必要がある。InGaN/Si二接合タンデム太陽電池については、InGaNの厚膜エピ成長、n型キャリアの濃度制御に進展がみられるが、動作確認に遅れがある。導入した常温接合装置を有効活用した貼り合わせによるトンネル接合形成は意義のある技術であり、接合形成そのものは成功している。ただしタンデム太陽電池は集光型太陽光発電への応用を想定しており、一～二桁のさらなる直列抵抗の削減が必要である。目標性能を得るための課題は多々あり、研究チーム間での連携が重要である。また、表面活性化ボンディングの物理も不明確である。

[今後への期待] 代表者の異動や共同研究者の研究活動制限によると思われる研究の遅れはあるものの、InGaP系ハイブリッドデバイスは一定の成果を出しており、今後変換効率の改善に期待したい。ただし、世界には強力なライバルがおり、課題や高効率化のシナリオの明確化および共同研究体制の強化が必須である。常温接合形成は一応成功しているものの、集光型太陽光発電システムへの応用が可能なレベルに持っていくには、大幅な直列抵抗の改善が必要である。イノベーションの視点では、接合界面の構造に関する原子レベルでの評価解析など物性評価解析を期待したい。InGaNについては、非常に難しいテーマではあるが、結晶成長でのブレイクスルー、転位や結晶欠陥の評価解析を含む基礎物性評価解析を期待したい。

(10) 末益チーム「シリサイド半導体pn接合によるSiベース薄膜結晶太陽電池」

[研究の概要] 本研究では、資源の豊富なSiとBaで構成される BaSi_2 という新しい材料を用いて、pn接合型の薄膜結晶太陽電池を開発する。この材料を用いると、 $1\mu\text{m}$ 程度の厚さでエネルギー変換効率が25%を超える太陽電池の形成が原理的に可能となる。太陽電池

の性能を左右する pn 接合について、高品質な pn 接合形成のための製膜技術の開発に注力し、この新しい材料の薄膜太陽電池用材料としてのポテンシャルを示すことを目標とする。

[研究進捗状況] 光電変換材料としては全く新しい材料である BaSi₂ による太陽光発電に挑戦している課題である。導入した装置やチーム内のネットワークを有効に活用し、少数キャリアの拡散長やライフタイム、結晶粒界ポテンシャル分布などの基礎物性評価が順調に進展していることは高く評価できる。とくに粒径より大きい少数キャリア拡散長が得られていることは興味深く、高効率実現を期待したい。価電子制御不純物ドーピング、拡散制御、pn 接合形成までは順調に進展しているが、デバイス構造の制約もあり、太陽電池特性評価までには至っていない。

[今後への期待] BaSi₂ の基礎物性に対する多くの知見が得られており、研究は順調に進行している。複雑な結晶形をもつ材料が実用化に至る例は少なく、pn 接合の整流性まで検証できたことは高く評価したい。Ba、Si とともに豊富で入手しやすい材料であり、実用化されればそのインパクトは大変大きく太陽電池技術の一分野を新たに切り開く可能性がある。しかし、実用化までの課題は多く、研究課題の明確化、研究計画や研究の方向性の再考が必要である。転位や積層欠陥の評価解析、キャリアの散乱機構や再結合過程の解析など、科学的アプローチや理解にも心がけるべきである。

(11) 松村チーム「Cat-CVD など新手法による太陽電池高効率化」

[研究の概要] 本研究では、Cat-CVD（触媒化学気相堆積）法による高性能界面を持つ薄膜形成、触媒生成されたラジカルを用いた 200℃での低温不純物拡散と pn 接合形成、窒素、インジウムなど深い準位を持つ不純物導入による長波長光吸収の増大（不純物光電効果）、溶液塗布で作られる表面サブ波長構造による光反射の抑制など、代表者らが開発した新手法を全て駆使し、エネルギー変換効率 25%以上の結晶シリコン太陽電池の実現を目指す。

[研究進捗状況] SiN_x を用いて世界トップレベルの表面再結合速度の低い良好なパッシベーション膜を実現し、順調に研究が進展している。とくに結晶 Si 側に発生するミクロな構造欠陥とパッシベーション効果との関係などについて解析を行っており、類似研究には無い観点からの追求がされている。また低温不純物拡散という興味深い現象も見いだされ、大きな発見となる可能性があり、上手く発展させれば大きな成果が期待される。課題は、デバイス実証とメカニズム解明である。

[今後への期待] パッシベーション膜の開発に関しては随分進展しており、研究は順調に進捗している。ここまで進んできたので、実際の Si 太陽電池の試作を至急実施してもらいたい。NEDO「太陽光発電次世代高性能技術開発」プロジェクトの「結晶 Si 太陽電池コンソーシアム」との協力による太陽電池試作を進め、PN 接合の逆飽和電流密度の目標値は 100pA/cm² であるが、高効率セルの現状値は、50fA/cm² であり、目標は、数 10fA/cm²

以下であって欲しい。一方、低温ドーピングは現象としては興味深い、メカニズムの理論的な解析は十分行われていない。今後は実験に加え理論計算を有効活用し、より詳細な解明を期待したい。

(12) 山田チーム「革新的塗布型材料による有機薄膜太陽電池の構築」

[研究の概要] 本研究では、「溶液塗布が可能であり、光照射により低分子有機半導体へと変換可能な光変換型前駆体」を用いて、有機薄膜太陽電池にブレークスルーをもたらすpn 接合ナノ構造を創出する。塗布型太陽電池作製の方法論に新機軸を打ち出し、これまで不可能であった「電荷分離界面の増大」と「キャリア取り出し経路の確保」の両立を実現し、革新的なデバイス作製技術を確立し、次世代太陽電池の飛躍的な発展を目指す。

[研究進捗状況] 薄膜構造制御および超分子材料のいずれも、順調に研究が進展している。特に超分子系に関してバルクヘテロ接合段階でこれ程の効率が得られるというのは想定以上である。新規合成法により多くの化合物を合成し、各種太陽電池の作製を行っている。基礎科学として興味深い結果を得ており、有機系がこれ程まで設計制御可能であることを示した点は非常に意義がある。しかし、変換効率は約3%と低く、本研究の実用的なインパクトを示すには、10%に近い効率の実現が必要である。化学的アプローチに加え、評価解析を含む物理的アプローチが必要である。

[今後への期待] 有機材料の多様性の提示から、本質の解明／変換効率の向上へとつながるかが、重要なポイントである。電荷分離効率の低さにどのような解決策を講じるのかが一つの焦点であると考えている。基礎科学として十分な成果がでており、材料的な多様性からも、メカニズムの解析力からも、大きな進展を期待したい。有機太陽電池は次世代低コスト太陽電池の可能性を有してはいるが、高効率化の鍵を握るのは新材料開発である。本課題は新有機材料合成に関するものであり、成功すればインパクトは非常に大きい。

(13) 金光チーム「集光型ヘテロ構造太陽電池における非輻射再結合損失の評価と制御」

[研究の概要] 時空間分解レーザ分光を駆使して、多接合・ヘテロ構造・ナノ構造を有する集光型太陽電池のバルク再結合、界面・表面再結合、オージェ再結合など非輻射再結合損失の評価と制御を行い、光エネルギー変換の高効率化の道筋をつける。さらに、ナノ構造太陽電池内で競合するマルチエキシトン生成速度、オージェ再結合速度、取り出し効率を評価し、1光子多電子変換過程が有効に利用できるかという長年の課題を実験的に検証する。

[研究進捗状況] これまでに構築してきた空間分解および時間分解レーザ分光システムに加え、電流測定と発光・透過の光学測定ができる高速分光システムを開発し、時間分解発光・過渡吸収・光電流の三つの異なる測定手法を組み合わせることで、新しい太陽電池材料である $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) やペロブスカイト $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ のバンドギャップエネルギー

を決定することに成功した。さらに、顕微発光・光電流評価システムの開発・改良を進め、様々なヘテロ構造における非輻射再結合速度を計測できる時間分解レーザ分光評価システムの構築を行った。また、独自の光学測定系やソフトウェアを構築・改良することにより、高繰り返しで高感度に測定できる時間分解分光計測システムの開発・改良を行った。それらの測定システムを用いて、多接合太陽電池の基本要素となるサブセル半導体の基礎光学特性評価を行った。

[今後への期待] 太陽電池の高効率化に及ぼす非輻射再結合過程を明らかにして欲しい。特に、太陽電池の集光動作下での非輻射再結合過程は、集光型太陽電池のさらなる発展に有効と考えられ、さらなる高効率化の指針を期待したい。また、世の中で期待され、多くの研究者が参画しているナノ構造半導体におけるマルチエキシトン生成による電流増幅過程および中間バンド太陽電池構造におけるキャリア緩和過程・アップコンバージョン過程については、むしろ否定的な見解もあり、これらの物理や効率限界を明らかにできれば、大きな成果と考えられる。

(14) 野田チーム「フォトニック・ナノ構造を活用した新しい光マネジメント技術の開発」

[研究の概要] 本研究は、太陽光発電効率の飛躍的な向上を目指し、フォトニック結晶を核とするフォトニック・ナノ構造の活用により、新しい光マネジメント技術の開発を目指す。具体的には、フォトニック結晶のバンド端効果に基づく大面積共振作用を用いて、薄膜シリコン(マイクロクリスタルシリコン・アモルファスシリコン等)の光吸収の減少が顕著となる波長域(600–1000nm)において、効果的な光閉じ込めを可能とする新しい光マネジメント技術の開発を行っていく。

[研究進捗状況] 太陽光発電効率の飛躍的な向上を目指し、フォトニック結晶を核とするフォトニック・ナノ構造の活用により、新しい光マネジメント技術の開発を目指している。具体的には、研究代表者独自の「フォトニック結晶のバンド端効果に基づく大面積共振作用」(①各種バンド端における共鳴効果と光トラップ効果の検証、②複数のバンド端モードの形成と光トラップ効果の広帯域化、光電変換効率増大)を用いて、薄膜シリコン(微結晶シリコン(nc-Si)、あるいはアモルファスシリコン(a-Si)等)の光吸収の減少が顕著となる波長域(600–1000nm)において、効果的な光閉じ込めを可能とする新しい光マネジメント技術の開発を行っている。これまで、理論検討により、ステップ①、②の検討を進め、フォトニック結晶構造の導入による吸収増大効果を示すとともに、光吸収層の厚さ方向の複数モードの利用、フォトニック超格子構造の導入による密な共振モードの形成によって、広帯域での光吸収増大が可能となることを明らかにした。また、実験的な評価に向けて、フォトニック結晶をもつ nc-Si 太陽電池の成膜条件を探索し、欠陥・クラックの発生を抑制しつつ、nc-Si の成膜が可能となる条件を見出した。この結果をもとに、太陽電池構造の試作を行った結果、500nm 厚の nc-Si セルで、効率 9.5% を達成し、光吸収の増大ならびに短絡電流密度の増大効果の実証に成功している。

[今後への期待] 異分野からの参画で大きな期待を持っている。フォトニック結晶はレーザ等の分野では効果があり、実績のある概念ではあるが、太陽電池のようなボリュームを必要とするデバイスでは限界が予想される。しかし、nc-Si 太陽電池で、効率 9.5% を達成するなど、a-Si や nc-Si など、薄膜太陽電池への適用が期待される。実験、理論の両面から、フォトニック結晶による太陽電池の高効率化を可能性と限界を明らかにして欲しい。

(15) 本間チーム「固液界面反応設計による新規高純度シリコン材料創製プロセスの構築」

[研究の概要] 高純度 Si の製造には長時間にわたる超高温反応を必要とし、生産面・コスト面の大きな課題となっている。本研究は、固相や液相などの界面で起こる電解反応系に着目し、その原子レベルからの解明と精密な反応設計を実現し、低エネルギーかつ高速に高純度 Si を生成するクリーンなプロセスを開発する。また国内にも豊富に存在する珪藻土を原料とする新しい製造プロセスを開発し、高純度 Si の安定供給という資源確保戦略にも貢献することを目指す。

[研究進捗状況] 太陽電池用高純度シリコン材料を創製するために、珪藻土を原料とした高純度化シリカの生成プロセスを検討している。溶媒抽出によるシリカからの軽元素不純物除去プロセスの高度化に関しては、軽元素不純物のうちホウ素に関しては 6N レベルの高純度化を達成した。また、マイクロリアクターによる連続高純度化プロセスの構築に向け、液-液界面を水平方向に形成する形の流路系を開発した。各プロセスにおける界面反応の理論的・実験的解析を行い、プロセス最適化と微細構造形成制御のための検討を行っている。シリカ原料から太陽電池用高純度シリコン材料を創製するために、熔融塩電解還元および化学還元を用いた新規な方法を検討している

[今後への期待] マイクロリアクターなど、ユニークなアイデアが提案されている。安武チームと同様、Si の純度、生成速度、製造コストなど課題は多い。基礎的には、シリカ生成プロセスの解析と制御、電解反応プロセス系の解析、電気炉内の炭素熱還元反応解析など科学的解明も必要である。本技術の完成度を上げるには、製造規模を上げる等企業との共同開発が必要である。NEDO「太陽光発電次世代高性能技術開発」プロジェクトの「結晶 Si 太陽電池コンソーシアム」との協力による太陽電池試作も、本技術の有用性を実証する上で必要と考えられる。

7. 総合所見

(1) 研究領域としての研究成果の見通し

採択した 15 件の研究テーマは独創性に優れたものである。挑戦的であるため一部のチームでは進展が遅いものもあるが、多くは順調に進んでいる。その中で、特筆すべき成果として下記のものがある。

韓チームは、色素増感型分野では、世界最高効率の変換効率 11.4% を達成しており、ま

た、①長波長色素の開発、②TBP 添加効果、③デバイスシミュレーション、などにおいて成果創出がなされている。STM による色素の吸着状態のミクロ解析など、興味深い成果を得ているし、大阪府立大との連携により、シミュレーション分野でも成果が得られつつある。効率 15%超を達成することにより、低コスト太陽電池としての道が切り開かれることが期待される。これまで 56 件の学術論文、13 件の特許出願等に成果がまとめられている。また、国際会議で 2 件の Paper Award を受賞するなど外部からも高く評価されている。

片桐チームは、CZTS 太陽電池の変換効率 6.77%で、効率目標 15%に対して十分とは言えないが、研究代表者の先駆的研究により、脱希少金属系薄膜太陽電池実現に有望な CZTS (Se) 系材料が注目されている意義は大きい。これまで 10 件の学術論文、1 件の特許出願等に成果がまとめられている。また、第一原理計算の論文発表も、JJAP Most Cited Articles となっていることで、広く引用されていることがわかる。

山田チームでは、「電荷分離界面の増大」と「キャリア取り出し経路の確保」の両立を実現し、革新的なデバイス作製技術の確立を目指している。現状では、変換効率は約 3%と低く、実用的なインパクトを示せていないが、基礎科学として興味深い結果を得ており、有機系が設計制御可能であることを示した点は非常に意義がある。これまで 45 件の学術論文、3 件の特許出願等に成果がまとめられている。また、文部科学大臣表彰若手科学者賞、日本化学会進歩賞など 7 件の受賞をするなど、外部からも高く評価されている。

松村チームでは、Cat-CVD (触媒化学気相堆積) 法による SiNx を用いて世界トップレベルの表面再結合速度の低い良好なパッシベーション膜を実現している。特に、結晶 Si 側に発生するミクロな構造欠陥とパッシベーション効果との関係などについて解析を行っており、類似研究には無い観点からの追求がされている。また低温不純物拡散という興味深い現象も見いだされ、上手く発展させれば産業応用としても大きな成果になる可能性がある。これまで 31 件の学術論文、1 件の特許出願等に成果がまとめられている。

(2) 研究領域のマネジメントについて

研究領域のマネジメントについては、これまでの経験や知識に加え、関連分野の研究開発動向や産業動向を調査しつつ、また領域アドバイザーや事務局の協力もあり、十分配慮してきたつもりである。ただ、研究推進の効率化、課題の明確化と密なる支援のためには、年 1 回の報告会、公開シンポジウム、学会や研究会での議論だけでは少ないと思っており、サイトビジットを含めもう少し研究代表者や研究メンバーと議論する機会を持つように努力したい。

(3) 本研究領域を設定したことの意義

本研究領域の設定により、NEDO の技術開発プロジェクトでは推進できない基礎研究テーマや長期的研究テーマを採択でき、統合的研究も推進でき、また異分野で活躍する研究者を支援できるなど新たな試みも推進でき、優れた成果をあげつつある。このような活動は、

我が国のこの分野における国際貢献や国際競争力の向上に役立つものと確信している。前述したように、いくつかのテーマは、今後産業応用が期待できる状況となっているし、国内外で高く評価されている。

(4) 今後への期待や展望

研究成果については、当初予想した以上に多くの成果をあげたものもある。特に、コンビナトリアル製法による界面パッシベーション膜、低温不純物ドーピングや Cat-CVD によるパッシベーション膜などのように産業応用の可能性がある技術も創製されている。今後、また引き続き、アモルファス Si の光劣化現象の解明と完全抑制には、ブレークスルー創製に向けて大きな期待を持っている。これにより、アモルファス Si 系のみでタンデム太陽電池が構成でき、広範な産業応用も夢ではないと考える。色素や有機太陽電池も、効率 15% を超えれば、低コスト太陽電池の道も見えてこよう。

界面パッシベーション機構や低温不純物拡散機構の解明、有機薄膜系の評価解析、非輻射再結合過程の評価解析やフォトニクス結晶の研究などは、今後の科学技術イノベーションに寄与する成果の創出を期待している。

(5) 感想、その他

本研究領域の設定により、産業応用の芽が出ているものもある。産業応用を目指すには、さらなる研究開発の継続が必要である。アモルファス Si の光劣化現象の解明と完全抑制や各種太陽電池の超高効率化は永遠の研究課題であり、継続的な研究開発の推進が必要である。また、CZTS(Se)や BaSi_2 などの新材料は、CREST の 5 年間の研究期間では、産業応用の可能性の見通しを得るには難しい研究テーマもある。従って、いくつかの研究テーマについては、CREST の 5 年間の後、3~5 年間の研究開発継続、あるいは、後継プロジェクトの発足をお願いしたい。

以上