

**戦略的創造研究推進事業
－チーム型研究(CREST)－**

**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」**

研究領域事後評価用資料

研究総括：山口 真史

2017 年1月

目次

1. 研究領域の概要	1
(1) 戦略目標	1
(2) 研究領域	9
(3) 研究総括	9
(4) 採択研究課題・研究費.....	10
2. 研究領域および研究総括の設定について.....	12
3. 研究総括のねらい.....	13
4. 研究課題の選考について.....	15
5. 領域アドバイザーについて.....	17
6. 研究領域の運営について.....	18
7. 研究を実施した結果と所見.....	27
8. 総合所見	39

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」（2008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」（2008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、2008年11月に国土交通省、経済産業省（経産省）、文部科学省（文科省）、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組の更なる深化・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科省が検討会を設置して取りまとめた「今後のナノテクノロジーを活用した環境技術の研究開発の進め方について」（2008年7月）において、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は、地球温暖化を止めることが最大の目的である。したがって、たとえば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、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、産業界ならびに経産省や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(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度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より、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。

③政策上の位置付け

2007 年 6 月の G8 ハイリゲンダム・サミットにおいて我が国は「2050 年に温室効果ガス(GHG)排出量の半減を目指す」との声明を先導する役割を果たした。

第 3 期科学技術基本計画の中では、『理念 2 国力の源泉を創る～国際競争力があり持続的発展ができる国の実現に向けて～』を実現するための政策目標として、『目標 3 環境と経済の両立 — 環境と経済を両立し持続可能な発展を実現』と、その下の『(4) 地球温暖化・エ

エネルギー問題の克服』が設定されている。

また戦略重点科学技術として、ナノテクノロジー・材料分野において『True Nano や革新的材料で困難な社会的課題を解決する科学技術』の『クリーンなエネルギーの飛躍的なコスト削減を可能とする革新的材料技術』、エネルギー分野では『運輸部門を中心とした石油依存からの脱却』の『太陽光発電を世界に普及するための革新的高効率化・低コスト化技術』としてそれぞれ挙げられている。

総合科学技術会議は「地球温暖化対策技術研究開発の推進について」（2003 年 4 月）において、地球温暖化対策にインパクトの大きい研究開発課題に積極的かつ重点的に取り組むことの重要性を指摘している。さらに、「革新的技術戦略」（2008 年 5 月）では「地球温暖化対策技術」の中の「高効率な太陽光発電技術」が選出されており、開発のために必要とされる組織・体制として、産学官連携・府省連携の推進、異業種・異分野融合の促進等が指摘されている。また「環境エネルギー技術革新計画」（2008 年 5 月）において、本戦略目標と関連するものとして、「太陽光発電」と「水素生成」が選ばれている。そのうち、太陽光発電の中にある「第三世代：多接合化や量子ナノ構造等、新材料・新構造を活用することにより、飛躍的な効率の向上とコストの低減を図る太陽電池」との記述は、本戦略目標の具体的な課題と密接に関連している。水素生成については、ロードマップ中に飛躍的な低価格化を可能とする革新的水素製造技術の一つとして光触媒が記載されている。

また、文科省が取りまとめた「今後のナノテクノロジーを活用した環境技術の研究開発の進め方について」（2008 年 7 月）の中では、太陽電池をエネルギー創出の代表的環境技術と位置づけ、太陽光を利用し循環する未来型エネルギーフローシステムを提案している。さらに、前述したように 4 省連携による「太陽光発電の導入拡大のためのアクションプラン」が出されており、文科省から太陽光発電に特化した政策を打ち出す重要な時期であるといえる。

④本研究事業の位置付け、他の関連施策との切り分け、政策効果の違い

本研究事業は、太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換する太陽光発電技術と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等を対象とする。

国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センターは 2007 年 12 月にワークショップを開催し、従来、経産省・NEDO、文科省・JST がカバーしてきた領域を整理し、どこまでわかっているかを示した。

このうち、太陽光発電については、デバイスの効率向上・コスト低減等の具体的数値目標を伴う課題については経産省・NEDO を通じた公的な技術開発資金が投入されているが、将来の高効率・低コスト太陽電池技術を実現するためには、デバイス物理・材料化学や挑戦的な新規材料探索を含む基礎・基盤研究をさらに加速する必要がある。例えば、NEDO プロジェクト「革新的太陽光発電技術研究開発」は、革新型太陽電池国際拠点整備事業に基づき 2050 年を目指した長期的視点で開発目標をたて、それに向けたはじめの 7 年計画事業を推進しているが、これらの基礎・基盤研究を大学・独法を中心に開発することが望まれている。経

産省・NEDO による基礎・基盤研究が望まれる領域における具体的研究課題を整理したものが、1. (1)②具体的な研究開発課題で列記した具体的課題案であり、相互に重なった分野が存在するが、本戦略目標においては、異分野間の融合による革新技術の創出を目的としており、施策の目的が異なる。

科学技術政策担当大臣・総合科学技術会議有識者議員による、2008 年度概算要求における科学技術関係施策の優先度判定等(2007 年 10 月 29 日)の中で、NEDO の新エネルギー技術研究開発(太陽光・風力)について、「次世代技術の課題、特に材料開発などの基礎・基盤研究の推進にあたっては、積極的に文科省や大学と連携をとり、普及促進への制度整備や標準化等も検討しながら、今後も我が国が世界をリードし続けるためにも、国際研究拠点を整備することが重要である。」と文科省・JST と経産省・NEDO との連携の必要性ならびにその意義を指摘している。

なお、戦略目標で太陽光利用を一部に含むものとして、「環境負荷を最大限に低減する環境保全・エネルギー高度利用の実現のためのナノ材料・システムの創製」がある。しかしながら、これに基づいてできた JST の CREST「エネルギーの高度利用に向けたナノ構造材料・システムの創製」は全ての研究課題を 2007 年内に既に終了している。また、この後に設置された戦略目標「持続可能な社会に向けた温暖化抑制に関する革新的技術の創出」を受けて、2008 年度からスタートした CREST「二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出」は、二酸化炭素排出抑制に資する革新的技術の創出を目標とするもので、二酸化炭素削減の手段の一つとして太陽光利用を含みうるものである。この研究領域の中で、2008 年度には軽量・安価なプラスチック太陽電池を開発目標とした「有機薄膜太陽電池の高効率化に関する研究」が採択されているが、あくまで炭素削減の手段という広範な課題の一環としての太陽電池研究であり、しかも有機薄膜太陽電池の高効率化に焦点を絞った研究課題となっており、太陽電池の基盤技術創成に十分とはいえない。リソースの有効配分の観点からも、2009 年度から本提案の戦略目標に太陽電池に関する課題を集め、費用対効果を最大限に高めることが望まれる。

また、物質・材料研究機構で進められている「低コスト次世代太陽電池の高効率化基礎研究」についても、色素増感型太陽電池に特化した研究課題であり、異分野融合による革新的技術の創出の観点からは十分な体制であるとはいえない。さらに、2009 年度向けに内局から提案された「ナノテクノロジーを活用した環境技術開発」は、安井 CREST と同様に二酸化炭素削減を目標とし、太陽電池を課題として含むものの、課題解決型の研究拠点の構築が主目的となっており、本提案内容とは施策の目的が異なる。

次世代太陽電池の研究開発は、欧米との競争も激化しており、革新的技術戦略を着実に実行し、我が国の国際競争力を維持・向上する観点からも、政府を挙げて重点的に研究開発を実施することが重要な状況下において、どのタイプの太陽電池が世界市場を席巻するに最適な型式であるのか不明な段階では、次世代の太陽光電池の地位を占めるに相応しいと有望視される複数の型式の動作原理を、科学的に徹底的に解明することが極めて重要な課題

となる。ドイツの施策などにより、Q-Cells AG 社が日本のシャープ社を抜き太陽電池生産量で首位となった。基幹技術として位置づけられる太陽電池技術について、国の施策として普及を促進するための基礎・基盤技術を創出することが重要である。

⑤将来実現しうる成果等のイメージ

エレクトロニクス分野の急成長を背景に、電力消費量も世界的に増大していることは周知の通りである。現状として、世界の年間電力消費量 17 兆 kWh に対して、日本ではその 5% 強にあたる年間 9,000 億 kWh の電力を消費しており、年間 4 億トンもの二酸化炭素を排出している。今後さらに電力消費量は増大し、2020 年には世界の年間電力消費量は 25 兆 kWh となることが予想されている。前述した政府の「低炭素社会づくり行動計画」は国内での到達目標をうたったものであり、世界規模での温暖化抑制策を文科省として実施すべきである。

この観点から、たとえば発電効率 20%の太陽電池を用いた場合、25 兆 kWh を供給するためには日本の国土の 30%以上の面積(120,000km²)が必要となる。このように、全世界の電力を供給しようとすると比較的広い面積の太陽光発電所を世界に分散配置することになる。したがって、太陽電池に使用するすべての資材・資源が安定に確保できることが絶対必要条件となる。結果として、可能な限り厚さの薄い太陽電池で、かつ変換効率の大きい太陽電池であることが不可欠の要件となる。しかし、シリコンでも単結晶シリコンだと 30%近い変換効率は得られるが光の吸収係数が小さいために、厚さが 100 μ m 程度必要となってしまう、全世界に電力を送電するために 80,000km²の太陽電池を作ると 1,800 万トンを越えるシリコンが必要となってしまう、全く現実的でない。現在シリコン集積回路が世界的に大量に使用されているが、毎年生産されるシリコン結晶は数万トンである。アモルファスシリコンは光の吸収係数が大きく、0.5 μ m 程度の厚さでよいことになり資源的には圧倒的に有利である。しかし、現状のアモルファスシリコンの太陽電池の変換効率は 10%に満たない状況にある。製造されているアモルファスシリコンに欠陥が多すぎるために、太陽光により励起された電子・ホールが発電に寄与する前に欠陥で失活してしまうためである。欠陥の無い超高品質のアモルファスシリコン太陽電池を極めて高い生産性のもとで製造するために、新しい製造装置・新しい製造プロセスと新しい素材・材料の創出が必須である。

報告されている理論的検討に基づけば、欠陥の無い超高品質のアモルファスシリコンの太陽電池ができれば、変換効率は 20%を越えるはずである。そうすると、全世界に電力を送電するために必要な太陽電池を製造するために必要なシリコン量は 14 万トンに減少し、きわめて現実的である。その電力を活用した海水の淡水化が実現すれば、世界の砂漠の緑化が行える。さらにこの電力で充電して走る電気自動車を普及させれば、CO₂をまったく発生することがなく、世界のすべての大都市はクリーンできわめて静かな都市になる。

我が国が世界に先駆けて太陽光エネルギーから二次エネルギー・燃料へ低コストで転換する技術を開発することは、2050 年での温室効果ガスの排出量の半減(G8 ハイリゲンドラム・

サミット)に大きく寄与するのみならず、地球温暖化対策と経済成長を同時に実現する低炭素社会への転換を推し進めることにつながる。

ひいては、我が国の新エネルギー関連産業の国際競争力が強化され、海外からの輸入に依存せず、持続可能で、環境にも配慮したエネルギー・システムが確立することにより、日本の経済の発展ならびに環境、安全保障および生活水準の維持に寄与できる。

⑥科学的裏付け

太陽電池については、結晶シリコン系などを中心に世界中で実用化が進んでいる。我が国は技術レベル、普及率共に世界トップであったが、近年はドイツの先導的な振興策によって普及率は逆転された状況である。高効率低コストの太陽電池技術の開発のためには、山積する基礎的研究課題を解決する必要がある。すでにシステム化が進みつつあるシリコン系および化合物系太陽電池においても、さらなる効率改善には基礎基盤に立ち戻って界面制御・薄膜成長に関する研究や光劣化機構の解明に関する研究を進めることが求められているし、効率以外の数値目標による新材料開拓やインジウム等の希少元素を用いない系の開拓も強く求められている。有機薄膜型太陽電池では、原理解明と新構造の提案による大幅な発電効率の向上と色素材料の長寿命化とともに、それらを低温・大面積で作製可能とする新規なプロセスの開拓、また有機 PN 活性層の高機能化(N 型分子探索、PN 層作製に向けた自己組織化プロセスの開発など)や PN 活性層における伝導輸送現象の解明などの課題がある。また、薄膜型シリコン太陽電池における光劣化機構の解明や単結晶シリコン型太陽電池でのシリコン節減化の検討などにも取り組む必要がある。

太陽光による水素生成についても日本は世界のトップレベルにあるが、現在の光エネルギー変換効率は1%程度であり、この変換効率の大幅な向上が大きな課題である。新規ナノ触媒の設計と生成の詳細解明などが必須検討項目になる。

JST 研究開発戦略センターが取りまとめた「科学技術・研究開発の国際比較 2008 年版(ナノ材料)」において、2.2.3 エネルギー・環境分野の 2.2.3.2 中綱目ごとの比較の(1)太陽電池および(3)太陽光による水素発生において、それぞれの国内および国外における研究開発動向が記述されている。なお、前掲の同研究開発センターのワークショップ(2007 年 12 月)において、色素増感型太陽電池と太陽光水分解による水素生成の両分野は、よって立つ基本原理(正負キャリア励起・電荷分離・有機/無機界面など)を共有し、両分野の研究者が共同で課題に取り組めば共に進展が期待されるにもかかわらず、我が国ではこれまで両分野の融合の場が殆どないことが明らかになった。本研究事業では、この両分野に共通する課題を積極的に採用し、ナノテクノロジー・材料分野を中心とする、化学、物理学、電子工学など広い分野の研究の潜在能力を結集することでインタラクティブイノベーションを引き出す。

ここで、本研究事業の中心的研究課題のひとつである有機薄膜太陽電池の日本国内の研究者人口は現時点で欧米よりかなり少ないが、有機 EL ディスプレイ、電界効果デバイスといった関連デバイス基礎分野には産業界を含め多数の研究者が存在する。本戦略目標の設

定により、これら他分野に偏在している関連研究者からの提案をエネルギー分野に戦略的に誘導できる可能性が高い。

⑦留意点

本戦略目標の真の目的とはインタラクティブイノベーションの創出にあり、何よりも研究総括の先見性あるリーダーシップと柔軟な領域運営が強く求められる。

④に記した総合科学技術会議の指摘も踏まえ、本研究事業の推進にあたっては、経産省・NEDO、文科省・JST を含んだオールジャパン体制による一体的な取り組みが望まれる。また、研究プロジェクトとしては、シーズを様々な応用に発展させるという形ではなく、バックキャスト的な視点から課題解決をはかるものを重視する。新材料を戦略的な探索により見だし、新材料・新構造を用いたデバイスの動作メカニズムを検証するところまでを対象とする。

全体を俯瞰できる領域統括の強力なイニシアチブのもと、互いのグループ間の連携を密にし、共通インフラも使いながら、グループ内での明確な役割分担、理論と実験の融合、人材の交流等の研究投資を有効に成果につなげるための具体的システムが必要となる。日本では共同で研究を進める施設の整備が十分には整っていないことから、本戦略目標に関わるプロジェクトは、ナノテクノロジーネットワークプロジェクトと有効に結び付いて推進されることが望まれる。

(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」(2009 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

氏名 山口 真史 (所属：豊田工業大学 役職：シニア研究スカラ)

(4) 採択研究課題・研究費

(百万円)

採択年度	研究代表者	研究終了時の 所属・役職	研究課題	研究費*
2009 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	136
	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	344
	佐藤真一	兵庫県立大学・特任教授	界面局所制御による光・キャリアの完全利用	347
	韓 礼元	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	359
	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	285
	堀越佳治	早稲田大学・名誉教授	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	243
	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	177
2010 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	328
	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	268
	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	299
	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	265
	山田容子	奈良先端科学	革新的塗布型材料による有	185

		技術大学院大学・教授	機薄膜太陽電池の構築	
2011 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	311
	野田 進	京都大学・教授	フォトリソ・ナノ構造を活用した新しい光マネジメント技術の開発	352
	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	247
			総研究費	4, 274

*各研究課題とも 5 年間の見込み総額(直接経費)

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。

特に材料等の絞り込みフェーズからデバイス検証に移りつつある課題については、デバイス検証のための研究費に配慮した反面、材料物性検証の段階のある課題はある程度低く抑え、その後の運営で増額する対応とした。具体的な対応については後述する。

2. 研究領域および研究総括の設定について

山口真史氏は、日本電信電話株式会社(NTT)在籍時代から長年にわたり太陽電池の研究開発に携わり、シリコン(Si)結晶系、薄膜 Si 系、化合物系、有機系において多くの研究開発の功績を残している世界的に著名な研究者である。研究分野は幅広く、半導体材料、光電物性、発光素子、二次電池、エピタキシャル成長など多岐に渡っており、幅広い分野で先見性及び洞察力を有している。

特に、超高効率の多接合構造太陽電池で当時の変換効率の世界記録(屋外測定で 28%)を実現したことで、2008 年に太陽電池の技術開発で大きな貢献があった研究者に贈られる、米国電気電子学会(IEEE)の「Cherry Award」を受賞している。これは太陽電池関係の賞としては最も権威のあるものの一つであり、1980 年創設以来、20 名しか受賞しておらず、日本人受賞者としては濱川圭弘氏(大阪大学名誉教授)について 2 人目の受賞である。

学会活動等においては、国際科学会議・再生エネルギー国際専門家会議委員や国際太陽エネルギー学会・太陽電池部門長などを歴任し、国際会議のチェアマンの経験も豊富で、内外の学会で高い評価を得ていることから、関連分野の研究者からの信頼も厚いと見られる。

また、企業での研究開発マネジメント経験を有していることに加え、人材育成にも極めて熱心で、この分野で多くの研究者を育てており、研究領域をまとめていくマネジメント能力、リーダーシップも有している。さらに、所属してきた組織も産業界、大学、研究開発型の独立行政法人と多岐に渡っており、各セクターの実状を把握していることから、バランス感覚も十分あり、公平性の高い評価を行いうると判断できるため、CREST 研究総括には適任と思われる。

これらを総合すると、本研究領域について先見性および洞察力を有すると同時に、適切なマネジメントを行う経験、能力を有し、あわせて関連分野の研究者から信頼され、公平な評価を行いうる人物と見られる。

(JST 記載)

3. 研究総括のねらい

(1) 戦略目標に対する研究領域の位置づけを受けて、研究総括はどのようにねらいを定めたか

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(本 CREST 研究領域発足時)が経過した太陽電池技術にしても、実用化が進んではいるが、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。

(2) 研究領域で実現をねらったこと、研究成果として目指したこと

従来、太陽電池を例にすると、経産省や 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。

(3) 科学技術の進歩への貢献や、科学技術イノベーション創出に向けて目指したこと、等

異分野融合により科学技術への貢献やイノベーション創出において目指すべきであり、その例を以下にあげる。

- ・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。

- ・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であり、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。

・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。

・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。

4. 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する。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る。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にした。また、本研究領域では、経産省、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、ただし重複は避けたいとした。

(2) 選考結果

2009 年度は、51 件の応募があり、本研究領域の研究総括と領域アドバイザー7 名で、書類選考を行い、11 件の提案を選択し、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。

2010 年度は、33 件の応募があった。本研究領域の研究総括と領域アドバイザー7 名で、書類選考を行い、10 件の提案を選択し、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 BaSi₂ 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。

2011 年度は 33 件の応募があり、本研究領域の研究総括と領域アドバイザー7 名で、書類

選考を行い、7件の提案を選択し、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、フォトニック・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る得る基盤研究を採択した。

採択年度毎の特徴を振り返ると、初年度である2009年度は結果的に、主に実績のあるチームの採択となった。一方、2年目の2010年度は新規材料を太陽光発電に展開する課題の採択ができた。また最終年度の2011年度は異分野からの提案を採択することができた。

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BaSi₂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ニクス結晶の研究、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のプロジェクトとの重複が見られ、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。

5. 領域アドバイザーについて

領域アドバイザー名 (専門分野)	終了時の所属	役職	任期
勝本 信吾 (物性物理、 光電変換素子)	東京大学	教授	2009年5月～2017年3月
田中 誠 (太陽電池 デバイス)	パナソニック(株)	主幹	2009年5月～2017年3月
錦谷 禎範 (量子化学、 光電気化学)	早稲田大学	教授	2009年5月～2017年3月
長谷川 美貴 (光化学)	青山学院大学	教授	2009年5月～2017年3月
林 豊 (太陽電池、 半導体デバイス)	豊田工業大学	招聘 研究員	2009年5月～2017年3月
元廣 友美 (薄膜太陽電池、 薄膜形成プロセス)	(株)豊田中央研究所	リサー チ・アド バイザー	2009年5月～2017年3月
柳田 祥三 (色素増感太陽電池 有機系太陽電池)	大阪大学	名誉教授	2009年5月～2011年8月

本研究領域が扱う分野は、多岐にわたり、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にお願いした。

勝本アドバイザーは量子物性含め物理全般に明るく、新原理の提案についてその可能性や実現性についてアドバイスいただいている。

田中アドバイザーは結晶シリコンやアモルファスシリコン太陽電池の研究開発に多くの知見があり、民間企業の立場として、特に出口展開についてアドバイスいただいている。

錦谷アドバイザーは有機材料による太陽電池研究に多くの実績を有し、現在は早稲田大学の所属だが、領域発足時は新日本石油株式会社の研究部門の副所長を勤めており、民間企業経験者として参画いただいている。

長谷川アドバイザーは光化学が専門であり、金属錯体の発光のほか、化学材料に知見を有

する。

林アドバイザーはシリコン系太陽電池研究に実績があるほか、シリコン半導体プロセス技術にも造詣が深い。

元廣アドバイザーは薄膜太陽電池が専門であり、薄膜形成などプロセス技術についても広範囲な知見を有する。

柳田アドバイザーは、色素や有機系太陽電池の専門であり、化学、解析の分野で、多くの実績を有する。

専門分野のバランスとして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 3 名となった。なお無機系・有機系といった括りでは、各々、4 名、3 名となっている。

また所属機関は大学等 4 名、企業等 3 名となっており、大変バランスのとれた体制を敷くことができた。

6. 研究領域の運営について

(1) 研究総括の研究領域運営方針

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つとめた。しかし、進捗がおもわしくないチームあるいは研究チーム内の管理で問題が発生した場合や、特に異分野から参画したチームで設定目標・マイルストーンからの乖離が見られる場合は、必要に応じ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うことを基本方針とした。

(2) チーム型のバーチャル・ネットワーク型研究所としての研究領域のマネジメント(研究課題間等の連携も含めて)

研究課題の指導については、研究開始年度に開催するキックオフミーティング、毎年一回開催の研究進捗報告会、研究総括によるサイトビジット等で、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採択年度である 2009 年度から 2011 年度の 3 年間にわたり開催した。非公開とし研究総括、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、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、戦略的創造研究推進事業(CREST)は目的基礎研究を推進する事業であり、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。

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、試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。

一方、領域中間評価(2013 年度)までの研究進捗報告会は JST の会議室での開催であったが、各チームからの発表に対し総括およびアドバイザーと質疑に終始する形となる傾向があり、バーチャル・ネットワーク型研究所として課題間の連携が進んでいる状況とは言えなかった。これを打開するため研究進捗報告会を仕切り直し領域会議とすることで研究チーム間の連携の動機付けを行った。開催場所も研究チームのサイトとすることでラボツアーも行い、チーム間連携の機会を創出した。また、領域会議終了後は意見交換会も開催しさらなる連携の強化を狙った。これと連携しサイトビジットも強化し、領域アドバイザーにも参加頂くようにした。その結果、新規材料についてのデバイスチームと理論チームの議論の活性化や、ラボツアーでは変換効率や物性値の評価手法、成膜装置についてのノウハウの共有が進み、研究進展に効果があった。また研究チームとアドバイザーの議論の機会を拡大することで、先端 LSI プロセスについて詳しいアドバイザーや太陽電池デバイスを専門とするアドバイザーの助言は、研究展開に有効に機能した。

(3) 研究課題の進捗状況の把握と評価、それに基づく指導(研究の把握と評価、研究課題の指導・助言・支援、研究計画の修正等が必要とされた研究課題、研究チームへの対応等の方針、およびその結果)

採択後のキックオフミーティングに始まり、課題中間評価会、領域会議により進捗確認と指導を行った。また各課題について、中間評価会前後、および事後評価前を中心にサイトビジットも実施した。特に課題評価では書類や評価会の発表に加えサイトビジットをすることでより深い評価が可能となった。主なものを列挙すると次のようになる。

・韓チーム

元々は色素増感太陽電池の課題であったが、ペロブスカイト太陽電池の検証を研究スコープに入れるよう指導した。そのための実験装置追加導入を許可した。

・片桐チーム

CZTS の変換効率向上には結晶欠陥の 2 次元分布が重要で有り、2 次元ラマン分析装置の導入を許可した。

・重川チーム

表面活性化ボンディング法はタンデム太陽電池実現に有効な手法で有り、接合界面の徹底した解析を指導した。

・山田チーム

有望な材料への絞り込み指導と等価回路的アプローチの指導を行った。

・金光チーム

対象材料の絞り込みと量子ドット太陽電池の効率限界の明確化、CZTS、ペロブスカイトへの注力を指導した。

・野田チーム

代替技術とのベンチマークを指導した。また厚膜化における有効性も検討のスコープに入れるよう指示した。

以下、採択年度ごとに時系列で進捗確認の場を列挙すると同時に指導内容を記す。

2009 年度採択 7 課題

- ・キックオフミーティング(2009 年 11 月 30 日)

総括方針を周知すると同時に、各研究チームの研究方針と計画を確認した。

- ・第 1 回研究進捗報告会(2010 年 7 月 16 日)
- ・第 2 回研究進捗報告会(2011 年 3 月 30 日)
- ・第 4 回研究進捗報告会(2012 年 3 月 09 日)
- ・課題中間評価会(2012 年 11 月 30 日)

3 回の研究進捗報告会と中間評価会において以下の指摘・指導を行った。

入江チームは可視光水分解光触媒を目指すものであり、注目を浴びている研究であるが、実用化に向けては飛躍的な変換効率改善が必要でメカニズム解明に注力するよう指導した。

岡本チームはアモルファスシリコン太陽電池の光劣化抑止に真っ向から取り組むものである。中間評価時点で劣化後効率 9.35%は評価できるものの、初期効率の向上とメカニズム解明を指示した。

佐藤チームはパッシベーション膜の最適設計でキャリアの有効利用を狙うもので、界面パッシベーションの物理モデルの構築を指示した。

韓チームは色素増感太陽電池に関するもので、中間評価時点で世界最高の変換効率 11.4%を達成した。目標効率である 15%達成の道筋を明確にするよう指導した。

平本チームは有機太陽電池に関するもので、こちらも目標 15%達成に向けた道筋、特に短絡電流向上の検討を指示した。

堀越チームの報告では励起子による吸収が 100℃という高温でも劣化せず、バルク太陽電池に比較して温度特性が改善されたことを確認した。

安武チームはプラズマ反応を利用し、メタルグレード・シリコンよりソーラーグレード・シリコン材料を創成するものだが、反応機構解明などを指示した。

- ・第 7 回研究進捗報告会(2013 年 10 月 9 日)

中間評価から 1 年後の進捗確認となる。

入江チームは中間評価でのエネルギー変換効率 0.12%があまり改善できていない。分光感度特性を確認し、プロセス設計を進めるよう指導した。

岡本チームは超臨界ポスト処理を施すと変換効率が改善するのでそのメカニズム解明を依頼した。

佐藤チームは新規材料導入により多層構造となるので製造上の簡便さの検討を依頼した。

韓チームにはペロブスカイト太陽電池が注目されているので追試を依頼した。そのための新規装置の導入も許可した。

平本チームはドーピング濃度に対しキャリア濃度が低いので改善を指示した。

堀越チームは高温での特性が良くないので、光学設計含めた検討を依頼した。

安武チームは採択時からの状況の変化でコストが厳しくなっている。プラズマプロセス解明でスループットの改善を指示した。

- ・第2回領域会議(2014年7月1日)兵庫県立大学・書写キャンパス

研究期間の最終年度であり、各課題の目標を踏まえ「現状成果(学術的、実用的視点、人材育成、など)と課題達成のための方針」を報告頂き、今後の展開を議論した。

- ・サイトビジット(2014年10月1日～10月9日)課題事後評価事前

課題事後評価を前に、事前確認との位置づけでアドバイザーにも同行頂き、実施した。

- ・課題事後評価会(2014年12月15日)

岡本チームは薄膜太陽電池研究で重要なアモルファスシリコンに関するもので1年延長の処置をした。

- ・サイトビジット(2015年4月7日)延長課題フォローアップ

- ・サイトビジット(2015年10月9日)延長課題事後評価事前

1年延長課題の進捗確認のためサイトビジットを実施した。

2010年度採択5課題

- ・キックオフミーティング(2010年10月15日)

総括方針を周知すると同時に、新規材料を導入する課題が多く、デバイスレベルの検証を加速するよう指示した。

- ・第3回研究進捗報告会(2011年11月11日)

- ・第5回研究進捗報告会(2011年10月31日)

- ・サイトビジット(2013年8月20日～9月11日)中間評価事前

中間評価にむけ事前のサイトビジットを実施した。

- ・課題中間評価会(2013年11月18日)

2回の研究進捗報告会、サイトビジット、および中間評価会において以下の指摘・指導を行った。

片桐チームは稀少材料フリーな CZTS 太陽電池の高性能化を目指すもので、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材料として注目されている意義は大きい。ただし変換効率 6.77%と低く、改善が必要で、膜中の欠陥の評価解析、バンドオフセットなど、物性を押さえることを指示した。

重川チームはタンデム太陽電池を目指すもので、とくに表面活性化ボンディング法は興味深い手法である。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を指示した。

末益チームは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。基礎物性評価が進展していることは評価するが、デバイス化を強力に推進することを指示した。

松村チームはプラズマ損傷フリーである触媒反応を利用した Cat-CVD 法によりパッシベ

ーション膜を形成するものである。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おり、デバイスでの早期検証を指示した。

山田チームは塗布型材料による有機太陽電池の構築を目指している。基礎科学として興味深い結果を得ているが、変換効率は約 3%と低い。化学的アプローチに加え物理的解析を指示した。

- ・サイトビジット(2014 年 3 月 11 日～4 月 22 日)中間評価フォローアップ

中間評価から半年経過後の進捗確認である。アドバイザーにも同行頂き、実施した。

重川チームは変換効率に大きな進展が有り、接合界面解析の重要性が、さらにクローズアップされた。解析のため微小領域の評価が可能な分光測定装置の導入を許可した。

山田チームからは熱変換系材料が有望であることが提案され、そのための設備・材料の導入を許可した。

- ・第 3 回領域会議(2015 年 3 月 9 日)北陸先端科学技術大学院大学

最終年度を前にした研究進捗確認の場である。

片桐チームは成膜プロセスや添加物の挙動がシステマティックに整理されていないので、高効率化の指針を示すことで整理するよう指示した。

重川チームは変換効率が改善し 26%まで進捗したが、先行する研究グループの 30%から引き離されている。界面のミクロな解析とボトム・セルの改善を指示した。

末益チームは BaSi₂ を受光材料としており、物性値ポテンシャルは高い。ショットキー接合でも良いのでデバイス検証を急ぐよう指示した。

松村チームはプラズマ CVD のプラズマダメージを回避可能な Cat-CVD によるパッシベーション形成で既に様々な実績を積み上げてきている。ただし現状のライフタイムの 10msec はまだ改善すべきであることと、デバイスでの実証を急ぐよう指示した。

山田チームは有機材料による塗布型太陽電池を目指している。電流をとるために i 層を厚くすると抵抗が大きくなるなどトレードオフの関係にあるが、有機材料の本質的な課題ととらえ、その解決を推進するよう指示した。山田チームは多くの有機材料を設計してきたが、有望な材料については湿度管理下での実験が有効で有り、そのための設備改造を許可した。

- ・第 4 回領域会議(2015 年 8 月 11 日)長岡工業高等専門学校

最終年度であり、各課題の目標を踏まえ「現状成果(学術的、実用的視点、人材育成、など)と課題達成のための方針」を報告頂き、今後の展開を議論した。

デバイス実証のデータも揃いつつあるが、全体的に、等価回路的アプローチが弱いので改善を指導した。

- ・サイトビジット(2015 年 10 月 6 日～11 月 6 日)事後評価事前

事後評価を前に、事前確認との位置づけでアドバイザーにも同行頂き、実施した。

- ・課題事後評価会(2015 年 12 月 25 日)

片桐チームは設計指針がまとまりつつあり、また山田チームは超分子系で発生キャリア

の収集に有効な構造の提案が有り、2 課題を 1 年延長支援することとした。

- ・ サイトビジット (2016 年 5 月 18 日、5 月 27 日) 延長 2 課題フォローアップ
- ・ サイトビジット (2016 年 9 月 27 日、10 月 7 日) 延長 2 課題事後評価事前
1 年延長課題の進捗確認のためサイトビジットを実施した。

2011 年度採択 3 課題

- ・ キックオフミーティング (2011 年 10 月 6 日)

総括方針を周知すると同時に、異分野からの提案については領域内外の連携を検討するように指示した。

- ・ 第 6 回研究進捗報告会 (2013 年 3 月 15 日)
- ・ 第 8 回研究進捗報告会 (2013 年 12 月 24 日)
- ・ 第 1 回領域会議 (2014 年 5 月 27 日) 京都大学 (宇治キャンパス) 化学研究所

2 回の研究進捗報告会、および領域会議にて以下の指示を行った。

金光チームは光物性の専門性を生かし評価と設計指針を提案することを目標にしているが、実デバイスでの検証を進めるため宇宙航空研究開発機構 (JAXA) との連携展開を指示、仲介した。

野田チームはフォトリソグラフィ結晶の優位性をアモルファスシリコンや微結晶シリコン薄膜太陽電池にて検討しているが国立研究開発法人産業技術総合研究所 (産総研) がトップレベルのアモルファスシリコンや微結晶シリコン薄膜太陽電池技術を有しており、その連携を指示、仲介した。

本間チームは珪藻土からシリカ抽出、そのシリカから還元法で低コストのシリコン材料を提供するのが目的であるが、採択時の予測から市場動向が異なり既存シリコン材料とコスト競争となりつつあった。新たな展開も検討する必要があるが、スケールアップによりどこまで低コスト化可能か検討することを指示した。

- ・ サイトビジット (2014 年 9 月 10 日～9 月 30 日) 中間評価事前

中間評価を前に、事前確認との位置づけでアドバイザーにも同行頂き、実施した。

- ・ 課題中間評価会 (2014 年 11 月 11 日)

金光チームは量子ナノ構造太陽電池に関し光キャリア生成、キャリア緩和過程やマルチエキソン生成過程を明らかにしつつある。多接合太陽電池の非輻射再結合損失の解析を進め、高効率太陽電池の構造設計の指針を得つつある。ただし検討対象材料が網羅的であり、重点化が必要である。量子ドット太陽電池の効率限界の明確化、新しい太陽電池材料である CZTS やペロブスカイトに注力するよう指示した。そのための評価設備導入も許可した。

野田チームはフォトリソグラフィ結晶のバンド端効果に基づく大面積共振作用を用いて、薄膜シリコン系において、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が開発されている。今後はテクスチャなどの代替技術との利害得失を明らかにするよう指示した。

本間チームは珪藻土からのシリカ抽出とシリカ還元によるシリコン精製の連続化プロセスを改善して、結晶成長させたシリコンの品質で有効性を実証するよう指示した。

- ・ サイトビジット (2015 年 4 月 10 日～4 月 23 日) 中間評価フォローアップ
中間評価から半年経過後の進捗確認である。アドバイザーにも同行頂き、実施した。
- ・ 第 5 回領域会議 (2016 年 3 月 16 日) 早稲田大学ナノテクノロジー研究所
金光チームは評価解析が順調に進んでいるが、他機関との連携を加速し設計指針を実デバイスで検証するよう指示した。
野田チームは産総研との連携を活用し薄膜シリコン太陽電池で世界トップレベルの変換効率が実証されつつある。代替技術とも比較しフォトニック結晶の優位性も示した。今後は実用を考え 50～100 μm 厚の結晶シリコン太陽電池の検討もスコープに入れるよう指示した。
本間チームには原料シリコンの低価格化が進むなか、スケールアップでの低コスト化の検討を指示した。
- ・ 第 6 回領域会議 (2016 年 7 月 28 日) 京都大学桂キャンパス
最終年度であり、各課題の目標を踏まえ「現状成果(学術的、実用的視点、人材育成、など)と課題達成のための方針」を報告頂き、今後の展開を議論した。
- ・ サイトビジット (2016 年 9 月 23 日～9 月 30 日) 事後評価事前
事後評価を前に、事前確認との位置づけでアドバイザーにも同行頂き、実施した。
- ・ 課題事後評価会 (2016 年 10 月 18 日)

(4) 研究費配分上の工夫(拡大、縮小等も含めて、研究領域運営上の立場から)

研究の進展を考慮し、材料費などの研究費追加支援を適宜実施した。

主なものは以下の通りである。

- ・ 韓チーム
ペロブスカイト系新材料が注目されるなか、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。
- ・ 片桐チーム
結晶性の 2 次元評価のため、2 次元ラマン分析装置の予算追加を実施した。またプロセス最適化のため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。
- ・ 重川チーム
表面活性化ボンディング法はタンデム太陽電池実現に有効な手法で有り、接合界面の徹底した解析をするため微小領域分光測定装置の予算追加を行った。
- ・ 山田チーム
熱変換系材料への特化、PIN 構造検証のため、実験装置の予算追加を行った。
- ・ 金光チーム
CZTS やペロブスカイト材料の評価のため、光源や分析装置の予算追加を行った。
- ・ 野田チーム
50～100 μm 厚の結晶シリコン太陽電池の検討もスコープに入れるため材料費の予算追加

を行った。

(5) 研究領域中間評価結果への対応

領域中間評価の指摘事項に対し以下のように対応した。

指摘 1) 中間評価の時点で、研究総括が領域アドバイザーを交え、個々の研究者との徹底した議論を基に、それぞれの課題におけるコアコンピタンス(独創性、優位性)と、科学技術に寄与できそうな部分を明確にする。

領域会議、サイトビジットを活性化しアドバイザーと研究チームが議論する機会を大幅に改善した。領域会議は都合6回開催した。またサイトビジットに領域アドバイザーが参加することは、課題評価という意味でも深く正確に、あるいは今後の展開について具体的な助言が可能となった。

たとえば野田チームのコアコンピタンスはフォトニック結晶そのものにある。これに Si プロセス技術に精通したアドバイザーからの助言もあり、500nm 厚の微結晶シリコン薄膜太陽電池では産総研との連携により、世界トップレベルの変換効率を実現した。またデバイス技術に強いアドバイザーの助言で実用化を考え光吸収層のより厚いデバイスでの検証を加速した。

片桐チームは確かに IBM 及びソーラーフロンティアの CZTS/Se に水をあけられているが、アドバイザーを交えた議論の中で硫化や Se 添加のメカニズム解明に集中し、設計指針の構築に注力した。

山田チームは印刷法のために材料設計が限定されると指摘があるが、だからこそ達成したときのインパクトは大きく印刷法にこだわった。有機材料については熱変換系材料で変換効率5%を達成したことから、研究を注力するようリソース対応した。

平本チームでは pn 制御そのものをコアコンピタンスにとらえ先駆的な成果を追求した。指摘 2) それぞれの研究者は、自らの課題におけるコアコンピタンス(独創性、優位性)を認識し、国際的ベンチマークを設定する。

国際ベンチマークをした中で自らの強みを確認することの重要性は領域内に展開できている。都度 IEEE 太陽光発電専門家会議(IEEE PVSC)や太陽光発電欧州会議(EU-PVSEC)の情報も領域内に展開し再確認をお願いした。最終年度の領域会議、サイトビジット(ともに総括に加え領域アドバイザーにも参加いただく)を活性化しベンチマーク設定を確認し、結果については課題事後評価会で確認するよう運営した。

指摘 3) 研究遂行に際しては、目標設定の根拠を明らかにし、目標値と理論値の対比、理論値と現実データの対比を明確にする。

本項こそ領域内のデバイスチームと理論研究チームの連携が重要な指摘と認識している。

たとえば金光チームでは CZTS や注目度の高いペロブスカイト材料について物性的なアプローチを展開した。領域内では、CZTS は片桐チームが先駆者であり、韓チーム(物資・材料研究機構)ではペロブスカイト材料の検討もスコープに入れた。デバイスチームとの連携の

中で現実的な限界値を世界に先駆けて発信した。

松村チームは世界トップの低表面再結合を実現しているが、やはり実際のデバイスでの効率が確認されないとトップ・データとは認知されない。これもプロセスチームとデバイスチームの連携を具体化した。

(6) その他(人材育成等)

5 回にわたり研究領域の主導による公開シンポジウムを開催し、各チームに研究成果を報告してもらおうと同時に産業界の参加者からの意見を真摯に受け止め、研究活動に生かす機会を設けた。

研究チームは多くの大学が参画しており、CREST 研究を通しイノベーション創出の重要性を指導した。

また 15 課題に 33 の研究機関が参加し、多くの研究代表者、主たる共同研究者は教授クラスであったが、7 名の准教授クラスの内 6 名が教授に昇格したことも付け加えておく。

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、2010 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)や国際会議での講演(第 31 回 EU-PVSEC、ハンブルグ、ドイツ、2015. 9. 14-18. 第 7 回 Si Workshop、釜山、韓国、2016. 11. 24-25)を通して、本研究領域の PR につとめた。

7. 研究を実施した結果と所見

(1) 研究総括のねらいに対する研究成果の達成度(研究領域中間評価時点からの進捗状況なども含めて)

採択方針にもあるが NEDO プロジェクトでは対応できていない基礎研究についての課題を採択し、次期 NEDO プロジェクトへの展開を達成目標とし運営してきた。

具体的には 2015 年より開始された NEDO「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」に 15 課題の内、以下の 4 研究チームの基礎研究成果が採択された。

- ・先端複合技術シリコン太陽電池プロセス共通基盤に関する研究開発
佐藤チーム
- ・Cat-CVD など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発
松村チーム
- ・超高効率・低コストⅢ－Ⅴ化合物太陽電池モジュールの研究開発
重川チーム
- ・ペロブスカイト系革新的低製造コスト太陽電池の研究開発
韓チーム

基礎研究からの貢献が叫ばれているなか、1/4 以上の研究チームが NEDO プロジェクトで実用化に向け一歩進んだ段階に展開できた意義は大きい。

(2) 研究領域全体として見た場合の特筆すべき研究成果

特筆すべき研究成果については事項の(3)および(4)にて述べるが、これらの研究成果で以下のことも達成されたことを付け加える。

2009 年度の領域発足から 2016 年度までの 7 年半の研究活動において、605 件の学術論文発表(国際 602 件、国内 3 件)、1790 件の学会発表(国際学会 631 件、国内学会 1159 件)は本件研究分野に確実な足跡を残すことができた。学会発表の内 586 件が招待講演(国際学会 294 件、国内学会 292 件)であることも本研究領域のレベルの高さを示している。

その結果、受賞という形でも多方面から評価されている。5 件の論文賞に加え、口頭発表に対する受賞が 35 件、ポスター発表受賞が 24 件となっている。

加えて研究代表者である京都大学・野田進教授は長年に渡るフォトニック結晶に関する研究成果で 2014 年秋に紫綬褒章を受賞された。野田教授は翌年も応用物理学会より業績賞を受賞されている。また長岡高専の片桐裕則教授は CZTS 太陽電池に関する先駆的な研究が認められ、2014 年の WCPEC-6 にて HAMAKAWA AWARD を受賞された。研究代表者である京都大学・金光義彦教授はいち早くペロブスカイト太陽電池材料の物性解析を進め、応用物理学会より解説論文賞を受賞された。山田チームからは研究代表者の奈良先端大学院大学・山田容子教授が光化学協会賞を、主たる共同研究者の千葉大学・矢貝史樹准教授が日本化学会進歩賞をそれぞれ受賞された。

(3) 科学技術の進歩への貢献という視点から見た研究成果(国内外の類似研究と比較して国際的にどのような水準にあるか、科学技術的に大きなインパクトが期待できるか、等について、論文および学会・会議における発表状況、論文の被引用状況、等を踏まえて)

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。

〔研究成果〕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 CZTS (L. Q. Phuong, M. Okano, Y. Yamada, A. Nagaoka, K. Yoshino, Y. Kanemitsu, "Photocarrier localization and recombination dynamics in $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ single crystals", Appl. Phys. Lett. 103, 191902, 2013、引用数 30) やペロブスカイト (図 1、Y. Yamada, T. Nakamura, M. Endo, A. Wakamiya, Y. Kanemitsu, "Near-band-edge optical responses of solution-processed organic-inorganic hybrid perovskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ on mesoporous TiO_2 electrodes", Appl. Phys. Express 7, 032302, 2014、引用数 115) 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。特にペロブスカイト材料は注目されているなか、物性物理解析として世界をリードしている。

またナノ構造太陽電池でもナノ粒子のオージェ再結合・マルチエキシトン生成効率の計測の成功 (Y. Kanemitsu, "Multiple exciton generation and recombination in carbon nanotubes and nanocrystals", Acc. Chem. Res. 46, 1358-1366, 2013、引用数 28) や InAs 量子構造中間バンド型アップコンバージョン過程の解明 (D. M. Tex, I. Kamiya, Y. Kanemitsu, "Control of hot-carrier relaxation for realizing ideal quantum-dot intermediate-band solar cells", Sci. Rep. 4, 4125, 2014、引用数 15) といった成果も特質に値する。

加えて Shockley-Queisser 理論と光物理を融合し、結晶品質の効果を組み込んだ多接合太陽電池効率の拡張詳細平衡理論の定式化と数値解析 (L. Zhu, C. Kim, M. Yoshita, S. Chen, S. Sato, T. Mochizuki, H. Akiyama, Y. Kanemitsu, "Impact of sub-cell internal luminescence yields on energy conversion efficiencies of tandem solar cells: A design principle", Appl. Phys. Lett. 104, 031118, 2014、引用数 17) における成果も注目される。

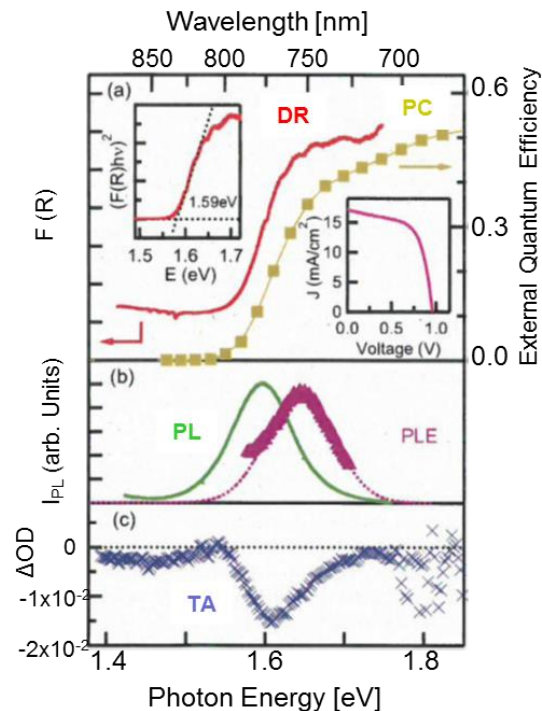


図1 ペロブスカイトのバンドギャップエネルギーの決定
 拡散反射(DR)、発光(PL)、過渡吸収(TA)、光電流(PC)から直接遷
 移型であり、 E_g は 1.61eV である。

また研究で得られた評価手法に関する知見を知財化し、評価システムとして市販が開始されるなど、実用化も達成している。

これまでの光物性のアプローチから実デバイスへの展開としては2015年度発足CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの中核技術」研究領域に2016年度の課題「ハロゲン化金属ペロブスカイトを基盤としたフレキシブルフォトニクス技術の開発」として採択されており、新たな展開が期待される。

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。

〔研究成果〕無機系との類似アプローチを展開し、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、フラーレンの高純度技術、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いる。

特にp型化は困難とされていたフラーレンを、 MoO_3 ドーピングによって世界で初めてp型

化することに成功し(M. Kubo, M. Hiramoto et al., “Conduction-type control of fullerene films from n-type to p-type by molybdenum oxide doping”, Appl. Phys. Lett. 98, 073311, 2011、引用数 51)、さらに、pn ホモ接合フラーレンの作製にも成功した。これを契機として、ほぼすべての有機半導体のドーピングによる pn 制御が可能であることが実証された。

また有機太陽電池においては、励起子解離のために 2 種の有機半導体が混合された共蒸着膜が用いられることから、共蒸着膜そのものに対する pn 制御が不可欠である。そこで 3 元蒸着により共蒸着膜を pn 制御する技術を世界で初めて開発し、ドーピングのみによるセル作製にも成功した(N. Ishiyama, M. Hiramoto et al., “Tandem Organic Solar Cells Formed in Co-deposited Films by Doping”, Org. Electron. 14, 1793-1796, 2013、引用数 13)。

有機半導体のドーピング効率を 100%にできる「ドーピング増感効果」を発見したことも大きな成果である(Y. Shinmura, Y. Yamashina, T. Kaji, M. Hiramoto, “Ionization Sensitization of Doping in Co-deposited Organic Semiconductor Films”, Appl. Phys. Lett. 105, 183306, 2014)。フラーレン、フタロシアニン単膜では、イオン化率は 10%程度だが、共蒸着膜ではイオン化によって生じた電子がフタロシアニンからフラーレンに移動するため(図 2 左)、フタロシアニン層中の平衡がずれて最終的にはすべてのドナーがイオン化して、生じた電子はすべてフラーレン側に移動する(図 2 右)。キャリア供給層であるフタロシアニンの割合が増えると、イオン化率が増大し、フタロシアニン比 99%ではイオン化率が 97%に達する。

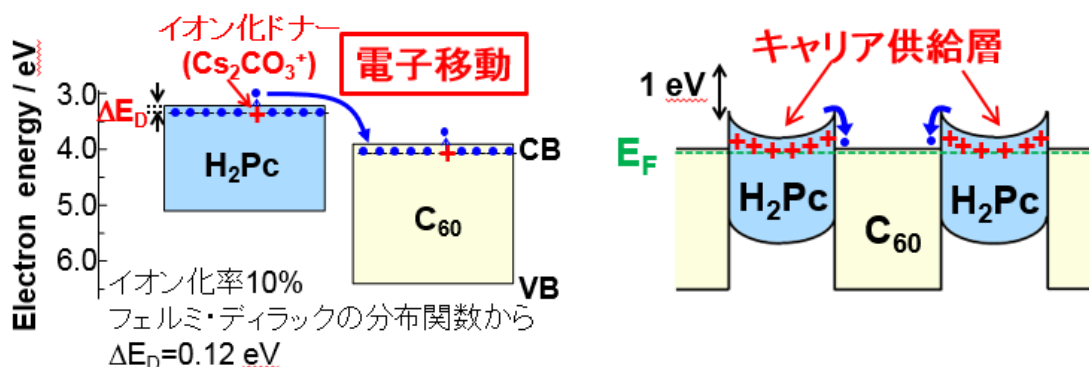


図 2 フラーレン(C60)：フタロシアニン(H2Pc)共蒸着膜における電荷分離超格子モデル

これらの成果は、広く、有機半導体の材料科学やデバイス物理へ貢献することが期待されるが、変換効率は 3.6%と低い。低移動度が原因で有り、改善にはまだ時間がかかる。

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。

〔研究成果〕塗布型低分子有機薄膜太陽電池の有機半導体材料として、新しい光変換前駆体 (図 3) 及び、熱変換前駆体を開発し、骨格や置換基の構造により、溶解度や相溶性、半導体材料の結晶性をコントロールし、積層可能な低分子材料や、p 層とバルクヘテロ層のそれぞれに適した p 型材料を開発し、塗布積層 p-i-n 型太陽電池を実現した (Y. Yamaguchi, M. Suzuki, T. Motoyama, S. Sugii, C. Katagiri, K. Takahira, S. Ikeda, H. Yamada, K. Nakayama, “Photoprecursor approach as an effective means for preparing multilayer organic semiconducting thin films by solution processes”, Sci. Rep. 4, 7151/1-8, 2014、引用数 10)。熱変換材料においても、既存のベンゾポルフィリンの光吸収能を大幅に改良した新しい材料の開発に成功した。その結果光変換系で 5.9%、熱変換系で 5.2%の変換効率を達成した。

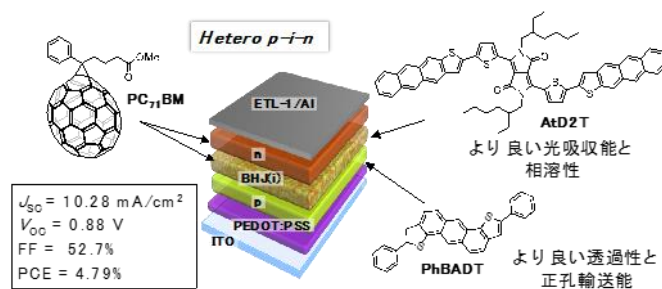


図 3 ヘテロ p-i-n 積層太陽電池の結果

一方、超分子ナノ材料においては、光吸収→励起子拡散・電荷分離→電荷取り出し、という一連のプロセスが極めて効率良く起きる構造を提案し (図 4)、共役長が太陽電池の効率に与える影響を調査した (S. Yagai, M. Suzuki, X. Lin, M. Gushiken, T. Noguchi, T. Karatsu, A. Kitamura, A. Saeki, S. Seki, Y. Kikkawa, Y. Tani, K. Nakayama, “Supramolecular Engineering of Oligothiophene Nanorods without Insulators: Hierarchical Association of Rosettes and Photovoltaic Properties”, Chem. Eur. J. 20, 16128-16137, 2014、引用数 12)。

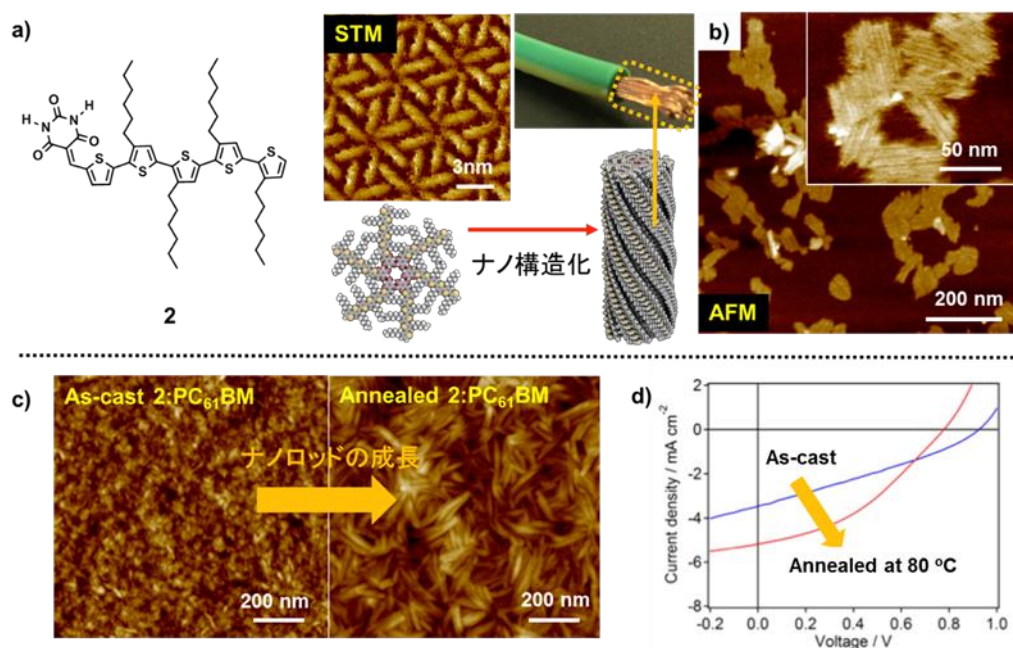


図 4 a) アルキル鎖を分子側面に有するバルビツール酸置換オリゴチオフェンの自己組織化、b) 溶液中で形成されたカラム状集合体、c) アニールによるロッド状構造体の形成および、d) それによる太陽電池デバイス性能の向上

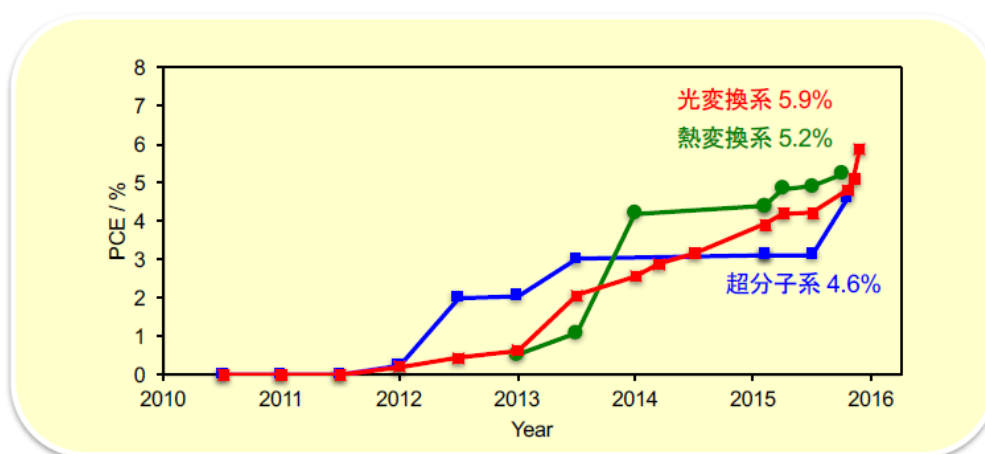


図 5 各材料系の変換効率の変遷

以上のように、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、図 5 に示すように顕著な改善はされたものの、5%程度と低く、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。今後、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。

(4) 科学技術イノベーション創出に寄与する卓越した成果が得られたか(国内外の競合技術と比較した技術の独創性・先行性・優位性等は国際的にどのような水準にあるか、成果の産業や社会への展開・実装の見通し、等について、知的財産権の出願・取得の状況等も踏まえて)

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 接合形成など、代表者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。

〔研究成果〕 太陽電池セルのパッシベーション膜形成では低温(～300℃)プロセスであるプラズマ CVD が使用されているが、プラズマ損傷の問題がある。図 6 に示す触媒化学気相成長法(Cat-CVD)ではプラズマを用いず低温成膜が可能であり、成膜界面を透過型電子顕微鏡(TEM)で観測すると図 7 に示すように遷移領域が狭い、すなわち基板シリコンに損傷がほとんど発生していない(H. Matsumura, M. Miyamoto, K. Koyama, K. Ohdaira, “Drastic reduction in surface recombination velocity of crystalline silicon by surface treatment using catalytically-generated radicals”, Sol. Energy Mater., Sol. Cells 95, 797-799, 2011、引用数 14)。結果、表面再結合速度は窒化シリコン(SiNx)とアモルファス・シリコン(a-Si)積層膜で 1.5 cm/s 以下、また、本研究の成果である低温不純物導入技術と Cat-CVD 技術の組み合わせにより、SiNx 膜単層でも 2.0cm/s 以下と、世界最高レベルを実証した。

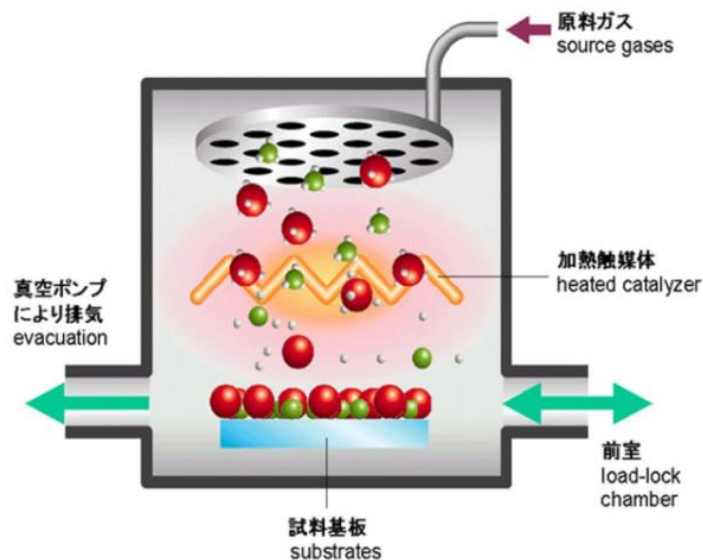


図 6 Cat-CVD 装置概要

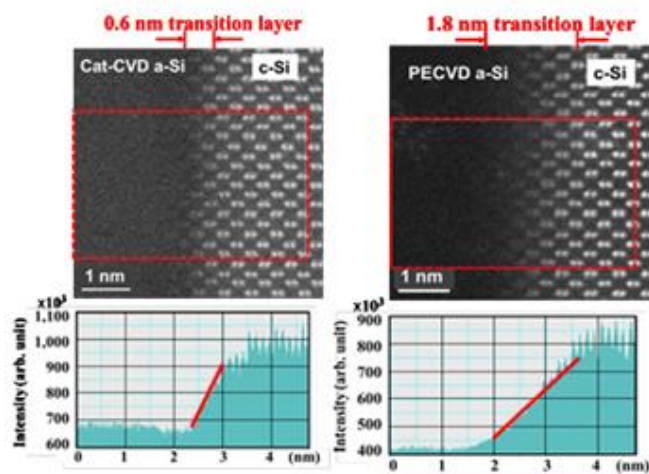


図7 TEMによる界面の比較。下図の縦軸はSiの結晶性の良好度を示し、横軸は場所を示す

本成果に基づいた実用化研究提案がNEDO「2015年度高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」に課題「Cat-CVDなど新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発」として採択された。CREST基礎研究の成果が高効率太陽電池実現に展開され、JSTからNEDOへの橋渡し成功例となることが期待される。

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(マイクロ結晶シリコン・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。

〔研究成果〕フォトニック結晶構造(図8)の導入により、広帯域での1.8倍の光吸収増大が可能となることを明らかにし、500nm厚の薄膜微結晶Si太陽電池セルにおいて、世界トップレベルの真性効率9.18%を達成した。また認定データとしても面積1cm²の薄膜微結晶Siセルで、真性効率9.1%(図9)を得ている。

加えて20~50μm厚の単結晶Si太陽電池へも展開を開始し、18.5μm厚の結晶Si太陽電池の試作結果では、フォトニック結晶利用により短絡電流密度が30.5mA/cm²より36.1mA/cm²に改善されるなど、優れた成果を得ている。

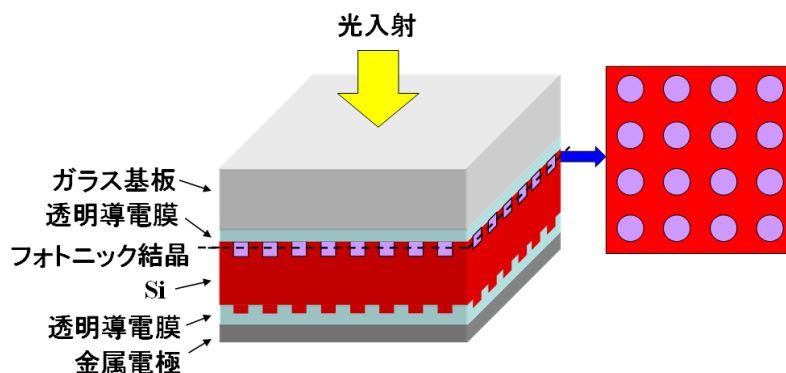


図 8 フォトニック結晶を有する薄膜太陽電池の構造図

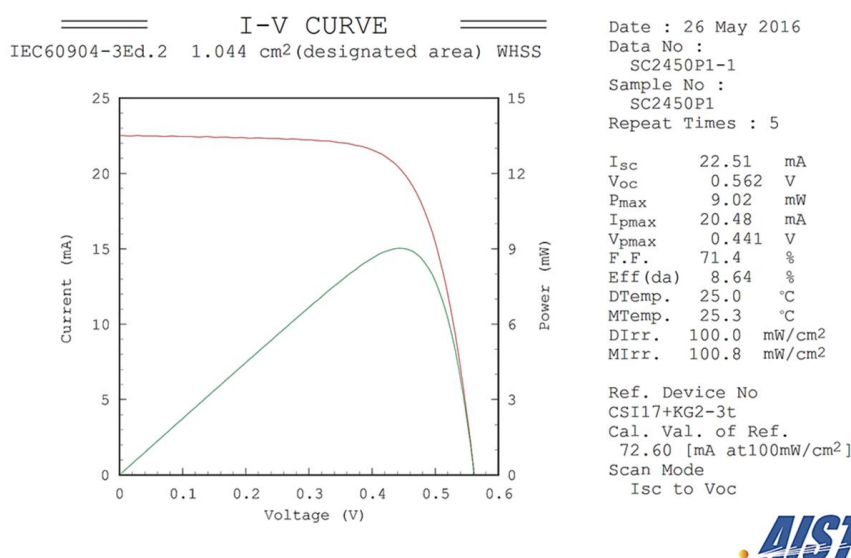


図 9 フォトニック結晶を有する薄膜微結晶太陽電池の認証データ
 (真性変換効率 9.1%を達成)

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。

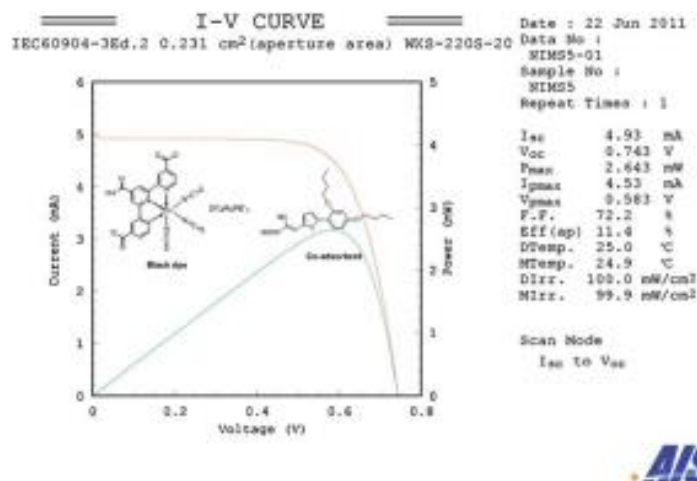


図 10 世界最高の公認変換効率(電流－電圧曲線)

[研究成果] 光閉じ込め効果の向上、新規色素の展開によりアルキル基を有する共増感色素を用いたダイ・カクテル構造のセルで、変換効率 11.4%(図 10)と色素増感太陽電池の変換効率記録を更新した(S. Zhang, A. Islam, X. Yang, C. Qin, K. Zhang, Y. Numata, L. Han, “Improvement of spectral response by co-sensitizers for high efficiency dye-sensitized solar cells”, J. Mater. Chem. A, 1, 4812-4819, 2013、引用数 446)。その後、共増感色素の改良により、変換効率を 11.6%に向上させた。

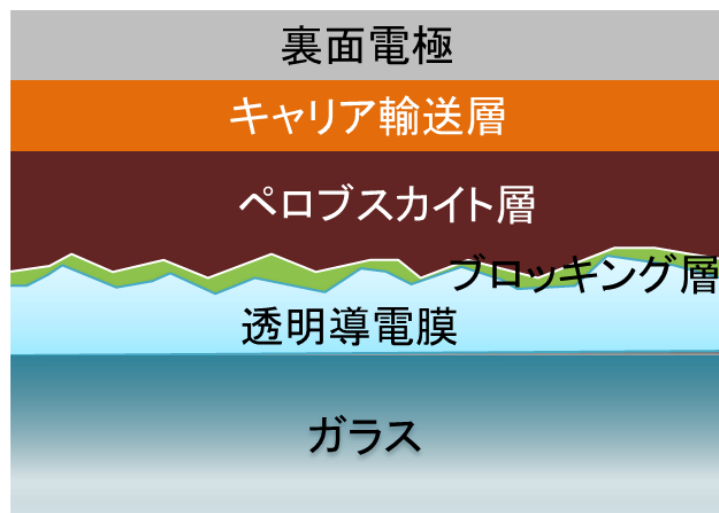


図 11 検討したペロブスカイト太陽電池の構造

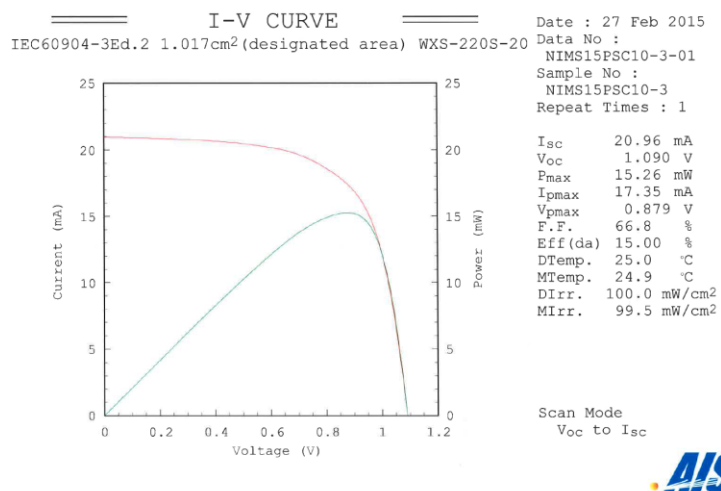


図 12 公認変換効率(電流—電圧曲線)

一方、2013 年にスイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) の Grätzel らがペロブスカイト太陽電池で高変換効率を実現し、注目を集めるなか、韓チームもペロブスカイト太陽電池の研究を展開し、図 11 に示した構造で劣化問題と大面積化の検討を進めるなか、セル面積 1.017cm² にて公認変換効率 15% を達成した。

(5) 本研究領域に続く研究資金の獲得状況

NEDO プロジェクトへの展開などもあるが、新材料については基礎研究の継続が必要である。JST-ALCA もあるが、光・エネルギー変換の学理に軸足を置いた研究領域の設定を望む。特に将来の太陽電池需要を考えると、薄膜太陽電池の研究は急務と考える。

(6) その他特記事項(国内外の顕彰・受賞等、終了時点では研究の途上であるが、将来性が見込まれ、大きな成果に繋がる可能性があるもの、等)

将来の太陽電池需要を踏まえると稀少材料フリーの薄膜太陽電池は完成させるべきデバイスである。片桐チームの CZTS/Se 太陽電池はその有望な候補である。作製に必要な硫化プロセスの詳細な解析がなされ、マルチステップ硫化法も開発されており、高効率化に向けた基礎的知見が得られている。研究代表者の先駆的研究は 2014 年 11 月京都にて開催された WCPEC-6 において第 1 回 HAMAKAWA AWARD を受賞したことで国内外から高く評価されている。一方、変換効率については、同時蒸着プリカーサに NaF を真空蒸着してからセレン化を行う Na 添加 CZTSe 太陽電池で、効率 9.57%。表面硫化処理を行うことにより、効率 11.2% を達成している。しかし効率目標 15% に対して十分とは言えず、継続的な支援が必要なテーマと考える。

8. 総合所見

(1) 研究領域の設定、および研究総括の設定が適切であったかどうか(研究領域の設定の意義、および研究総括の果たした役割はどうであったか)

すでに研究領域発足時から、再生可能エネルギー利用の拡大が叫ばれているなか、太陽光利用は重要な位置を占めている。特に 2011 年の東日本大震災以降、ますます重要な位置を占めている。NEDO でも太陽光利用のプロジェクトはあるが、そこではカバーできない基礎研究に立脚した本 CREST の価値は十分にあったと考えている。

研究総括は NEDO の動向も熟知しており、基礎研究課題や将来有望な新規材料を積極的に採択し、材料の不完全性の理解、デバイスのセンスと等価回路的なアプローチで適宜、適切な指導を実施したことで多くの基礎研究成果とイノベーションの達成がなされたと考える。

(2) 研究領域のマネジメント(研究課題選考、研究領域運営)

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。

本研究領域の中間評価までは、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にとどまっていたが、領域中間評価以降は、強力な指導、助言を実施した。研究チーム間の連携を目標に 6 回の領域会議を開催し、進捗状況確認指導にとどまらず、科学技術イノベーションを推進した。

例えば金光チームはⅢ-V 系半導体材料をモチーフとして研究を開始したが、本 CREST 内の片桐チームで検討している CZTS や近年注目を集めているペロブスカイト材料を研究のスコープとするように指導した。CZTS ではバンドギャップ近傍の光学特性を明らかにすることで太陽電池としての課題を提言した。

山田チームは有機合成の専門家であるものの太陽電池の経験は浅いことから等価回路的なアプローチを指導した。また有機太陽電池として多くの知見を有する平本チームと連携することでグローブボックス一体型成膜装置の有効活用を実現した。

その他、ライフタイムなど物性評価においても領域内の連携が有効に機能した。

サイトビジットも活性化し、毎年各課題 1 回は訪問することで進捗状況確認と指導をした。サイトビジットには領域アドバイザーにも参加頂き、より専門的なアプローチによる助言も行った。

デバイス製作に当たっては、プロセス技術や成膜に詳しいアドバイザーの助言が有効に機能した。野田チームはフォトリソグラフィ結晶の展開においてマイクロクリスタルシリコン太陽電池をモチーフとしたが、世界トップレベルの変換効率を有する産総研との連携によりそれを凌駕する性能を実現した。

(3) 研究領域としての成果(研究課題の中間・事後評価等も総合して、科学技術の進歩に資する成果、具体的応用に繋がった成果、科学技術イノベーション創出に寄与する成果、終了時点では研究の途上であるが、将来的には大きな成果に繋がる可能性があるもの、等)

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、多くは順調に進んだ。その中で、特筆すべき成果として、以下のものがある。

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デバイスシュミレーション、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。後半ではペロブスカイト太陽電池へも展開し、面積 1cm²セルで効率 15.0%など、重要な成果を出しつつある。

片桐チームは、CZTS 太陽電池の変換効率が目標 15%に対して、効率 11.2%で、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。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 5.9%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、101 件の学術論文等に、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(1.3cm/sec)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、42 件の学術論文、4 件の特許出願、等に、成果がまとめられている。

(4) 科学技術イノベーション創出への展望

NEDO は 2020 年に発電コスト 14 円/kWh を、2030 年に発電コスト 7 円/kWh を狙っている。前者はシリコン結晶太陽電池の性能改善で実現する計画で本 CREST から Cat-CVD による表面再結合速度の低減に有効な松村チームの成果とダイポールを利用したパッシベーション技術を有する佐藤チームの成果が貢献する形となった。また後者はペロブスカイト太陽電池もしくは化合物半導体での実現が候補となっており、韓チームのペロブスカイト太陽電池の成果と重川チームの表面活性化ボンディングによるタンデム太陽電池の成果が貢

献することになった。

(5) 本研究領域を設定したことの意義、科学技術に対する貢献、問題点等(研究開始以前や中間評価時点と、終了時点の比較を念頭において)

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た。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。

(6) 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、ブレイ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。

(7) 所感、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 BaSi₂ などの新材料は、JST-CREST の 5 年間の研究では、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り、継続的な支援が必要と考える。

2009 年度の研究領域発足から 8 年間、研究推進にあたり多くの方々からご支援を頂いた。特に研究代表者をはじめ、主たる共同研究者や研究参加メンバーの日々の努力があつてこそ、多くの重要な研究成果をあげることができたと思う。この場を借りて感謝したい。また JST の領域関係者からは日々多大な支援を頂いた。この場を借りて御礼申し上げたい。

以上