

戦略的創造研究推進事業
CREST(チーム型研究)
追跡評価用資料

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～2016 年度)

研究総括: 山口 真史

2023 年 3 月

目次

要旨	1
第 1 章 研究領域概要.....	2
1.1 戦略目標.....	2
1.2 研究領域の目的.....	3
1.3 研究総括.....	4
1.4 領域アドバイザー.....	4
1.5 研究課題、代表研究者、主たる共同研究者.....	5
第 2 章 追跡調査	8
2.1 追跡調査について.....	8
2.1.1 調査の目的.....	8
2.1.2 調査の対象.....	8
2.1.3 調査方法	9
2.2 追跡調査概要.....	10
2.2.1 研究助成金.....	10
2.2.2 論文	11
2.2.3 特許	12
2.2.4 受賞	13
2.2.5 共同研究、企業との連携状況.....	14
2.2.6 実用化・製品化.....	15
2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果.....	16
2.3.1 研究領域の展開状況(まとめ図).....	16
2.3.2 研究成果の科学・技術の進歩への貢献.....	17
2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献.....	26

要旨

本報告書は、戦略的創造研究推進事業 CREST(チーム型研究)の研究領域「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～2016年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)事業及び事業運営の改善等に資することを目的とした追跡調査報告である。

本研究領域は、「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」を戦略目標として、2009年度から2016年度において太陽光を利用したクリーンエネルギー技術の創出を目指し、実施された。

CREST 研究期間中、研究論文発表は 605 件、国内外での研究発表は 1790 件 その内招待講演は 586 件(研究終了時点)と、高い水準で、結晶 Si 太陽電池の効率向上に寄与する界面キャリア再結合速度の低減、フォトニック結晶構造による光閉じ込め技術、色素増感太陽電池からペロブスカイト太陽電池へと革新に繋がる成果が得られていた。

本追跡調査の結果、本研究領域における学術論文は、CREST 研究の成果論文は 717 報、CREST 研究終了後の発展論文は 467 報が発表され、特許出願は、研究期間中に国内 117 件、海外 25 件、研究終了後は国内 25 件、海外 6 件であった。また研究終了後の受賞は 44 件あり、後継研究において、NEDO プロジェクト、JST 戦略研究事業、科研費研究へと多くの研究が引き継がれ、それぞれの研究者の研究発展が認められた。

上記のような研究終了後の進展を以下の章立てに沿って、本報告書をまとめた。

第 1 章は、研究領域の戦略目標、研究領域の目的、研究総括、領域アドバイザー、研究課題と研究代表者について記載した。

第 2 章は、追跡調査の実施の概要と調査結果の概要、各研究者の成果について記載した。具体的には、2.1 では、追跡調査の目的、調査の対象、調査方法を記載した。2.2 では、各研究代表者が獲得した研究助成金、発表した論文、出願・登録した特許等の成果概要を記載した。2.3 では、2.2 の成果や各研究課題の展開状況から、研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果について、研究領域の展開状況、研究成果の科学技術の進歩への貢献、研究成果の社会・経済への貢献および新たな展開や分野間融合をまとめた。また、各研究者の研究活動状況、研究領域の展開状況を、表、展開図としてもまとめた。

第 1 章 研究領域概要

1.1 戦略目標

本研究領域の戦略目標は「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」である¹。この戦略目標が設定された背景には、以下のような想定があった。

①太陽光発電におけ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されていた。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られた。

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であり、量子物理を中心に基礎研究者の参画も期待されていた。また、集光や光閉じ込め制御も高効率化に有効と考え、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していた。

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ていた。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ていた。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、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していた。

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生成、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ていた。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、化学、電気化学と物理学や電子工学等の融合を期待していた。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していた。

¹ 本戦略目標に基づいて、本 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」(2009 年度～2016 年度)の他に、さきがけ研究領域「太陽光と光電変換機能」(2009 年度～2016 年度)、さきがけ研究領域「光エネルギーと物質変換」(2009 年度～2016 年度)が設定された。

1.2 研究領域の目的

上記、戦略目標の下、本研究領域「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」には以下の観点での活動が期待されていた。

1. 太陽光発電技術を対象とし、さらに水素等を生成する化学燃料生成技術も含め、独創的クリーンエネルギー生成に資する研究開発を推進する
2. 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、全く新しい原理により動作する材料、デバイスを目指す
3. 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する

そこで、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ことを目的として研究開発を行った。

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し、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、さらに、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した。

そのような研究開発を実現するための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ことに注力した。

1.3 研究総括

山口 真史

(領域終了時)

豊田工業大学 シニア研究スカラ

山口真史氏は、長年にわたり太陽電池の研究開発に携わり、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である。

1.4 領域アドバイザー

領域アドバイザー選定にあたっては、以下を基本にして、それぞれの分野から下記の方が務めた。

- 戦略目標に沿って、研究総括と共に研究を評価・指導できること
- 高度な専門知識のみならず科学技術や社会動向など幅広い見識を持っていること
- 若手研究者の育成に重きを置いてアドバイスが行えること
- 領域の幅広い技術範囲をカバーするために、専門分野やテーマのバランスを考慮し、工学、理学の幅広い分野での第一人者を選ぶこと。アドバイザーと専門分野は下記の通り

表 1-1 に領域アドバイザーを示す。

表 1-1 領域アドバイザー

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

1.5 研究課題、代表研究者、主たる共同研究者

代表研究者として、第1期7名、第2期5名、第3期3名の計15名を採択した。研究課題、代表研究者について表1-2に、主たる共同研究者を表1-3に示す。

表 1-2 研究課題と研究者(第1期、第2期、第3期)

期 (研究期間)	研究課題	研究代表者	採択時の所属・役職	終了時の所属・役職	追跡調査時の所属・役職
1期 (2009年10月～2015年3月)	高感度な可視光水分解光触媒の創製	入江 寛	山梨大学クリーンエネルギー研究センター教授	山梨大学・教授	山梨大学クリーンエネルギー研究センター 教授
	アモルファスシリコンの光劣化抑制プロセスの開発	岡本 博明	大阪大学大学院基礎工学研究科教授	大阪大学・教授	大阪大学 名誉教授
	界面局所制御による光・キャリアの完全利用	佐藤 真一	兵庫県立大学大学院工学研究科特任教授	兵庫県立大学・特任教授	－(退官)
	色素増感太陽電池におけるデバイス物性に関する研究	韓 礼元	物質・材料研究機構太陽光発電材料ユニットユニット長	物質・材料研究機構・ユニット長	東京大学教養学部附属教養教育高度化機構環境エネルギー科学特別部門 特任教授
	有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス	平本 昌宏	自然科学研究機構分子科学研究所分子スケールナノサイエンスセンター 教授	自然科学研究機構・教授	分子科学研究所物質分子科学研究領域 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	堀越 佳治	早稲田大学理工学術院教授	早稲田大学・名誉教授	早稲田大学理工学術院 名誉教授
	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	安武 潔	大阪大学大学院工学研究科 教授	大阪大学・教授	－(2020年度末で大阪大学退職)
第2期 (2010年10月～2016年3月)	Next次世代を目指す化合物薄膜太陽電池の高性能化	片桐 裕則	長岡工業高等専門学校電気電子システム工学科 教授	長岡工業高等専門学校・教授	三条市立大学工学部技術・経営工学科 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	重川 直輝	大阪市立大学大学院工学研究科 教授	大阪市立大学・教授	大阪市立大学大学院工学研究科 教授

期 (研究期間)	研究課題	研究 代表 者	採択時の所 属・役職	終了時の所属・役職	追跡調査時の所属・役職
	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	末 益 崇	筑波大学数 理物質系 教授	筑波大学・教授	筑波大学数理物質系 教授
	Cat-CVD など 新手法によ る太陽電池 高効率化	松 村 英樹	北陸先端科 学技術大学 院大学 特 任教授	北陸先端科学技術大学院大学・名 誉教授	北陸先端科学技術大学院大学 名 誉教授
	革新的塗布 型材料によ る有機薄膜 太陽電池の 構築	山 田 容子	奈良先端科 学技術大学 院大学物質 創成科学研 究科 教授	奈良先端科学技術大学院大学・教 授	奈良先端科学技術大学院大学 先 端科学技術研究科 教授
第3期 (2011年 10月～ 2017年3 月)	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	金 光 義彦	京都大学化 学研究所 教授	京都大学・教授	京都大学化学研究所 教授
	フォトリソ グラフィ・ナ ノ構造を 活用した 新しい光マ ネジメント 技術の開発	野 田 進	京都大学大 学院工学研 究科 教授	京都大学・教授	京都大学大学院工学研究科 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	本 間 敬之	早稲田大学 先進理工学 部 教授	早稲田大学・教授	早稲田大学理工学術院 教授

表 1-3 主たる共同研究者リスト

研究代表者	主たる共同研究者
入江 寛	－
岡本 博明	山本 憲治(株式会社カネカ 太陽電池・薄膜研究所 太陽電池・薄膜研究所長)
佐藤 真一	小椋 厚志(明治大学 理工学部 教授)
韓 礼元	内藤 裕義(大阪府立大学 大学院工学研究科 教授)
平本 昌宏	伊崎 昌伸(豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 教授) 吉田 郵司(産業技術総合研究所 太陽光発電工学研究センター)
堀越 佳治	松岡 隆志(東北大学 金属材料研究所 教授)
安武 潔	－
片桐 裕則	仁木 栄(産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター 研究センター付) 和田 隆博(龍谷大学 理工学部 教授)
重川 直輝	葛原 正明(福井大学 大学院工学研究科 教授) 山本 嵩勇(福井大学 大学院工学研究科 特命教授) 渡邊 則之(日本電信電話株式会社 先端集積デバイス研究所 主幹研究員)
末益 崇	宇佐美 徳隆(名古屋大学 大学院工学研究科 教授)
松村 英樹	梅本 宏信(静岡大学 学術院工学領域 教授)
山田 容子	生駒 忠昭(新潟大学 自然科学系 教授) 中山 健一(山形大学 大学院有機材料システム研究科 准教授) 増尾 貞弘(関西学院大学 理工学部 准教授) 矢貝 史樹(千葉大学 大学院工学研究科 准教授)
金光 義彦	秋山 英文(東京大学 物性研究所 准教授)
野田 進	－
本間 敬之	野平 俊之(京都大学 エネルギー理工学研究所 教授)

第 2 章 追跡調査

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査の目的

追跡調査は研究領域終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST の事業および事業運営の改善に資するために行うもので、研究終了後の研究者の研究課題の発展状況等を調査した。

2.1.2 調査の対象

本追跡調査は、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」(2009 年度～2016 年度)の研究者全員を対象とする。採択研究者は、2009 年度採択 7 名、2010 年度採択 5 名、2011 年度採択 3 名である。表 2-1 に調査対象(代表研究者)と調査対象期間を示す。

表 2-1 調査対象と調査対象期間

採択年	研究者	CREST 研究期間	CREST 終了後の調査対象期間
第 1 期 (2009 年)	入江寛	2009 年 9 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	岡本博明	2009 年 9 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～調査終了月
	佐藤真一	2009 年 9 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	韓礼元	2009 年 9 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	平本昌宏	2009 年 9 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	堀越佳治	2009 年 9 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
	安武潔	2009 年 9 月～2015 年 3 月	2015 年 4 月～調査終了月
第 2 期 (2010 年)	片桐裕則	2010 年 10 月～2017 年 3 月	2017 年 4 月～調査終了月
	重川直輝	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～調査終了月
	末益崇	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～調査終了月
	松村英樹	2010 年 10 月～2016 年 3 月	2016 年 4 月～調査終了月
	山田容子	2010 年 10 月～2017 年 3 月	2017 年 4 月～調査終了月
第 3 期 (2011 年)	金光義彦	2011 年 10 月～2017 年 3 月	2017 年 4 月～調査終了月
	野田進	2011 年 10 月～2017 年 3 月	2017 年 4 月～調査終了月
	本間敬之	2011 年 10 月～2017 年 3 月	2017 年 4 月～調査終了月

調査終了月：2021 年 11 月

2.1.3 調査方法

調査は、2021年5月～8月にかけて実施した研究者アンケート、領域事後評価用資料等の文献、エビデンス情報収集のための各種データベース、取りまとめ後の情報に関する研究者への事実確認を基に実施した。具体的な調査方法を以下に示す。

(1) 研究助成金

研究者アンケート回答にあった中から、原則、研究助成金の総額が1千万円/件以上のものを抽出した。

(2) 論文

論文の抽出は、文献データベースとしてScopus(データソース：2021年6月13日～8月1日)を用い、対象者は研究代表者、文献タイプは、Book、Editorial、Erratumを除く全文献タイプを対象として絞り込みを行い、リストを作成した。収集したリストと、各課題の終了報告書に記載されている成果論文と照合し、不足分があれば、Scopusで検索を行い、Scopusに収録があれば、追加した。

作成されたリストから、①CRESTの成果と認められる論文、②CRESTの発展と認められる論文を分類した。

分類基準は、CREST期間中であって、Scopusの助成金情報が認められたもしくは対象者の所属機関に本調査対象となるプロジェクト/プログラムが入っていた場合の論文、及び終了報告書に記載の論文を、①の論文と判別した。

分類①を確定した後、確定された①を引用している文献についてScopusの機能を利用して確認を行い、引用しているもののうち、課題終了後のものを②とした。終了年については4月以降に出版もしくは受理された論文については、引用関係があれば、②を付した。また、引用関係はないが、著者、タイトル、概要等から論文①の発展的研究内容と考えられる論文も②とした。

リストを基にエルゼビア社より、Citations、Field Weighted Citation Impact (FWCI)、FWCI Percentile、CiteScore、ASJC27 Code and Name、ASJC27 Code、Research Topics & Prominence(Topic ID、Topic Name、Prominence Percentile)、International Collaboration Flag、Academic-corporate collaboration Flag、Patent citation Flag、Self Citation Flagの指標について取得した。

(3) 特許

代表研究者が発明者になっているもので、研究期間中の特許出願および登録の状況と、研究終了以降の特許出願および登録の状況について調査した。データベースはPATENT SQUAREを用いた。調査期間は、2021年5月21日～8月10日。

本調査の対象は研究代表者としているため、課題終了後は特許の収集でも研究代表者が発明者に入っている特許のみ収集を行ったが、共同研究者の特許についてアンケートに記載のあったケースについては、研究代表者を含まない旨を記載し、欄外に記載した。

(4) 受賞、共同研究や企業との連携等

受賞、共同研究や企業との連携については、研究終了以降から現在に至るまでについて、研究者アンケートにある内容を記載した。

2.2 追跡調査概要

2.2.1 研究助成金

研究発展状況を把握するために、研究終了後の外部資金獲得状況は非常に重要である。代表研究者の外部資金獲得状況を研究者アンケートに基づいて表 2-2 に示す。

代表研究者の半数にあたる 15 人中 8 名の研究者が研究終了後も科研費、NEDO プロジェクトを中心に競争的研究資金 3 件程度を獲得し、研究開発を継続的に実施している。

表 2-2 研究助成金獲得状況



研究代表者	研究期間(年度)	研究種目	研究課題	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	獲得資金(千円)	
入江寛	2009~2014	CREST	高感度可視光水分解触媒の創製	■	■	■	■	■	■													13.6	
	2017~2020	科研費	太陽光による水素製造のための水分解触媒の高活性化									■	■	■	■							1.5	
	2021~2025	基盤研究(B)	太陽光を利用した二酸化炭素還元による有用物質合成																				1.4
	2021~2026	基盤研究(B)	太陽光を利用した水素製造																				2.6
岡本博明	2009~2014	CREST	アモルファスシリコンの光劣化抑制プロセスの開発	■	■	■	■	■	■													34.4	
佐藤真一	2009~2011	CREST	界面局所制御による光・キャリアの完全利用	■	■	■	■	■	■														34.7
	2015~2018	NEDO	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(低コスト・拡散系太陽電池におけるキャリア再結合に関する研究)									■	■	■									7.9
韓礼元	2009~2011	CREST	色素増感太陽電池におけるデバイス物性に関する研究	■	■	■	■	■	■														35.9
	2015~2019	NEDO	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(基盤技術と性能評価技術の開発)									■	■	■									-
	2018~2022	科研費	逆型ペロブスカイト太陽電池の発電メカニズムの解明										■	■	■	■							1.7
	2021~2024	基盤研究(B)	逆型ペロブスカイト太陽電池の効率低減原因の解明																				1.7
平本昌宏	2009~2014	CREST	有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス	■	■	■	■	■	■														28.5
	2013~2016	科研費	共役鎖の p-n 制御による 15% 効率的有機タンデム太陽電池の開発																				1.5
	2015	NEDO	pn 制御有機半導体単結晶太陽電池の開発																				8.0
	2017~2019	基盤研究(B)	有機単結晶エレクトロニクス																				1.8
堀越佳治	2009~2014	CREST	陽電子吸収による増感を利用した高効率太陽電池の研究	■	■	■	■	■	■														24.3
安武潔	2009~2014	CREST	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	■	■	■	■	■	■														17.7
	2015	共同研究(企業)	「高圧プラズマを利用した PFC ガス改質技術の開発および PFC ガスの分離・精製技術の開発」																				2.2
片桐裕則	2010~2015	CREST	Next 世代型を目指す化合物薄膜太陽電池の高効率化	■	■	■	■	■	■														32.8
重川隆輝	2010~2015	CREST	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	■	■	■	■	■	■														26.8
	2016~2019	NEDO	低コストセル技術開発/シリコン上 111-Vcセル(直接接合)																				4.0
	2017~2019	科研費	半導体ナノ粒子の波長変換機能によるアドオン型の太陽電池特性制御																				1.1
	2019~2021	基盤研究(B)	NEDO 先端研究プログラム																				5.0
末益英	2021~2024	科研費	Si/ダイヤモンド直接接合による高耐熱性界面の研究開発																				1.4
	2010~2015	CREST	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	■	■	■	■	■	■														29.9
	2015~2017	基盤研究(A)	結晶 Si タンデム型太陽電池に向けた Si ショドギャップ材料の探索																				2.5
	2018~2020	基盤研究(A)	組成比制御によるシリサイド半導体の伝導型制御とガラス上の高効率半導体接合太陽電池																				3.4
	2021~2024	基盤研究(A)	界面層によるキャリア再結合抑制効果を用いたガラス上シリサイド半導体高効率太陽電池																				4.2
松村英樹	2010~2015	CREST	cat-CVD など新手法による太陽電池高効率化	■	■	■	■	■	■														26.9
	2015~2019	NEDO	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	■	■	■	■	■	■														39.6
山田裕子	2010~2015	CREST	革新的塗布型材料による有機薄膜太陽電池の構築	■	■	■	■	■	■														18.5
	2016~2018	基盤研究(A)	「前駆体法」による芳香族機能性材料の開発・薄膜構造制御と有機デバイスへの展開																				3.7
	2020~2022	基盤研究(A)	前駆体法を基盤とする π 共役芳香族化合物の創成																				3.5
	2020~2024	科研費	動的エキシトン制御を志向した有機ドナー・アクセプター材料創成																				8.9
金光義彦	2011~2014	CREST	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	■	■	■	■	■	■														31.1
	2016~2021	CREST	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	■	■	■	■	■	■														18.5
	2018~2019	基盤研究(A)	ナノ構造半導体の高次高調波発生と強電場非線形光学の展開																				1.5
野田進	2019~2022	特別推進研究	ナノ物質科学と強電場非線形光学の融合によるフォトニクスの新展開																				42.9
	2011~2014	CREST	フォトリソ・ナノ構造を活用した新しい光マシナリー技術の開発	■	■	■	■	■	■														35.2
	2017~2022	基盤研究(S)	近接場熱放射の領域制御手法の確立と熱発光電への展開																				15.5
	2017~2022	CREST	窄帯フォトニック結晶レーザーによる 2 次元ビーム変換技術の開発																				30.0
本間聡之	2018~2022	SIP	フォトニック結晶レーザーの高効率化およびスマート化の研究開発																				~200
	2011~2016	CREST	異質界面反応設計による新規高純度シリコン材料創成プロセスの構築	■	■	■	■	■	■														24.7
	2016~2022	NEDO 革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発(RIS/NEDO)	高精度ラマン分光分析技術の開発																				9.9
	2018~2022	NEDO 水素利用等先端実用化事業	アルカリ性アニオン交換膜を用いた低コスト高性能水素燃料電池の開発																				7.0
	2020~2022	JST 研究促進 最速展開支援プログラム(A-STEP)	プラズマモンテカルロを用いた超高速表面・界面分析用表面増強ラマン顕微鏡の開発																				3.7
2021~2022	基盤研究(B)	基局系次世代型エネルギー変換貯蔵システムの電気化プロセスと多段階モデリング																				1.3	

2.2.2 論文

研究者について CREST 研究の成果に該当する成果論文数と CREST 終了後の発展に該当する発展論文数とを調査した。

成果論文数は全体で 717 報、発展論文数は全体で 467 報であった。また、それぞれの責任著者となっている論文は 153 報、130 報であった。研究者一人あたりの発表論文数で見ると、代表研究者全体では、成果論文の 39 報、発展論文で 21 報となった。また、論文数が 30 報を超える研究者数は、成果論文では 8 名で、発展論文では 6 名となった。

研究者別では、韓（成果論文・発展論文をそれぞれ 76 報、68 報）、重川（62 報、50 報）、末益（109 報、90 報）、山田（122 報、43 報）、金光（104 報、54 報）野田（57 報、40 報）の論文を発表しており、該当研究分野での研究活動の活発さが裏付けられる。

FWCI の平均値は、成果論文においては、ほぼすべて研究者が 1 を超え、発展論文においても、3 分の 1 以上の研究者が 1 を超えていた。

Top10%以内の論文数については、成果論文では 131 報、発展論文では 90 報、それぞれの論文全体に対する比率は 18.2%および 19.2%であり、論文の平均的な質的は維持されていた。研究者では韓が（成果論文・発展論文のそれぞれで 26 報 37 報）、また末益（24 報、17 報）および金光が（19 報、19 報）と多い。Top1%以内の論文数においても、成果論文では 19 報（韓 7、末益 4、金光 3、重川、本間の各 2、山田 1）、発展論文では 16 報（韓 13、金光 2、末益 1）であった。研究者間共著については、本研究領域内で、1 報（金光、野田共著）であった。

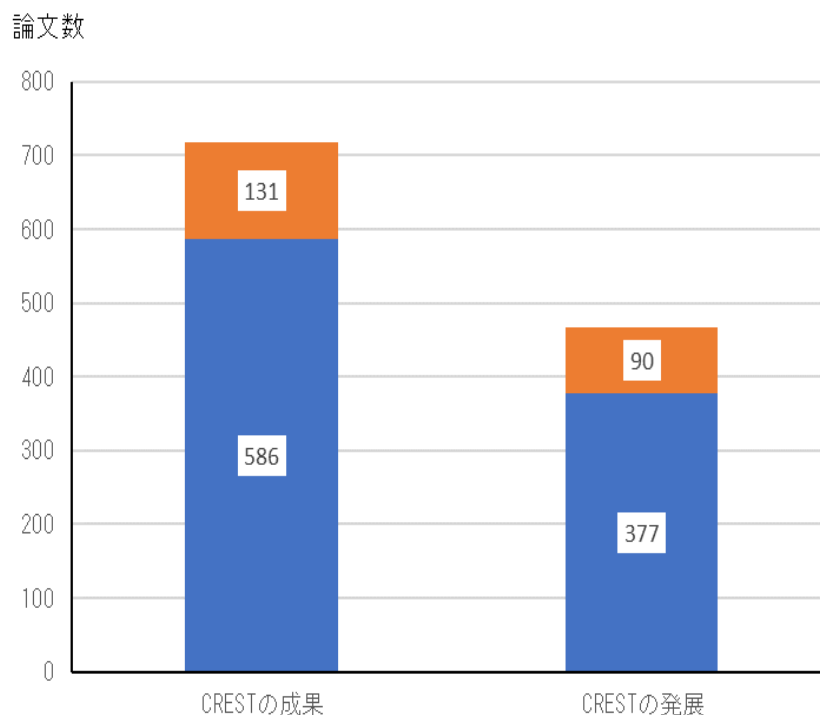


図 2-1 成果および発展に関する論文数、Top10%論文数(茶色部分)

2.2.3 特許

特許出願件数・登録件数は研究開発が応用に向けて進展していることを表す一つの指標である。研究期間中と研究終了後の状況について表 2-3 に示す。

研究期間中の特許出願は国内 117 件、海外 25 件であった。登録件数(期間中に出願した特許のうち、現時点で特許登録されている件数)は、国内 66 件、海外 8 件であった。

研究期間中では、野田の特許出願数が 32 件(国内 21 件、海外 11 件)と多く、うち 20 件(国内 15 件、海外 5 件)が登録されている。また、重川も、国内特許出願数は 25 件と多く、11 件が登録されている。研究期間後の特許出願は、国内 25 件、海外 6 件であり、うち国内 2 件が特許として成立している。研究期間後においても、重川と野田の特許出願数は多い。

表 2-3 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

研究期間中				研究終了後			
出願件数		登録件数		出願件数		登録件数	
国内	海外	国内	海外	国内	海外	国内	海外
117	25	66	8	25	6	2	0

2021 年 7 月調査

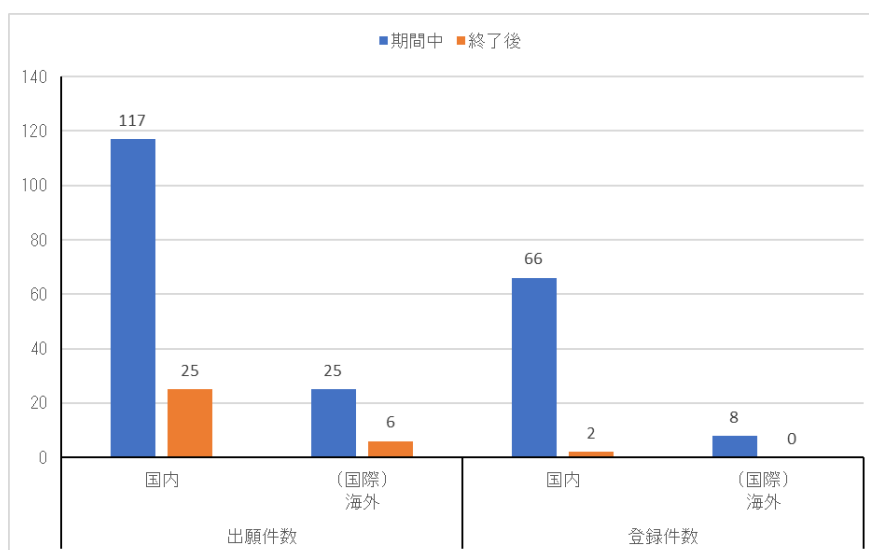


図 2-2 研究期間中・終了後の特許の出願と成立状況

2.2.4 受賞

金光は、2020年グリーン・サステイナブルケミストリー賞・文部科学大臣賞、2021年に第53回市村地球環境学術賞 貢献賞をペロブスカイト太陽電池に関して受賞している。野田も、井上研究奨励賞、日本学士院賞など多くの受賞を果たしている。

表 2-4 研究終了後の受賞リスト

№	受賞者	賞の種類	授賞機関	受賞年
1	入江 寛	電気化学会論文賞	公益社団法人電気化学会	2020
2		日本セラミックス協会学術賞	公益社団法人日本セラミックス協会	2021
3	平本 昌宏	応用物理学会第11回フェロー表彰	公益社団法人 応用物理学会	2017
4		応用物理学会有機分子バイオエレクトロニクス (M&BE) 分科会業績賞	公益社団法人 応用物理学会	2021
5	安武 潔	精密工学会関西支部功労者表彰	公益社団法人 精密工学会	2015
6		TACT 2015 International Thin Films Conference, Poster awards of TACT2015: Excellence	Taiwan Association for Coatings and Thin Films Technology	2015
7		2017年第78回応用物理学会秋季学術講演会講演奨励賞	公益社団法人 応用物理学会	2017
8		2017年度精密工学会秋季大会学術講演会ベストポスタープレゼンテーション賞	公益社団法人 精密工学会	2017
9		2017年度精密工学会秋季大会学術講演会ベストプレゼンテーション賞	公益社団法人 精密工学会	2017
10		2017年度精密工学会秋季大会学術講演会ベストプレゼンテーション賞	公益社団法人 精密工学会	2017
11		精密工学会 2019年度関西地方定期学術講演会ベストポスタープレゼンテーション賞	公益社団法人 精密工学会	2019
12		精密工学会2019年度関西地方定期学術講演会ベストポスタープレゼンテーション賞	公益社団法人 精密工学会	2019
13		18th Int. Conf. Precision Engineering, Young Researcher Award	公益社団法人 精密工学会	2020
14		2021年度精密工学会春季大会学術講演会ベストプレゼンテーション賞	公益社団法人 精密工学会	2021
15	片桐 裕則	2017年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 研究部門	文部科学省	2017
16		新潟日報文化賞 産業技術部門	新潟日报社	2017
17	末益 崇	第7回 (2017年度) 応用物理学会北陸信越支部貢献賞受賞者	公益社団法人応用物理学会 北陸・信越支部	2017
18		第44回応用物理学会講演奨励賞	公益社団法人 応用物理学会	2018
19		第50回応用物理学会講演奨励賞	公益社団法人 応用物理学会	2021
20	松村 英樹	第8回 (2018年度) 応用物理学会北陸・信越支部貢献賞受賞者	公益社団法人応用物理学会 北陸・信越支部	2018
21		第6回産学連携推進会議 産学官連携功労者表彰 日本経済団体連合会会長賞	日本経済団体連合会	2019
22	山田 容子	2018年日本化学会学術賞	日本化学会	2018
23	金光 義彦	衛藤細矢記念賞	公益財団法人双葉電子記念財団	2018
24		第38回島津賞 (2018年度)	公益財団法人島津科学技術振興財団	2019
25		第41回応用物理学会解説論文賞	公益社団法人 応用物理学会	2019
26		第48回加藤記念賞 (令和元年度)	公益財団法人加藤科学振興会	2019
27		グリーン・サステイナブルケミストリー賞・文部科学大臣賞	公益社団法人新化学技術推進協会	2020
28		第53回 市村地球環境学術賞 貢献賞	公益財団法人市村清新技術財団	2021
29		American Physical Society Outstanding Referee	American Physical Society	2022
30	令和4年度文部科学大臣表彰・科学技術省	文部科学省	2022	
31	野田 進	第3回レーザー学会フェロー受賞	一般財団法人レーザー学会	2017
32		Best Student Paper Award, CLEO-PR (2017)	The Optical Society of America	2017
33		泰山賞: レーザー進歩賞	公益財団法人レーザー技術総合研究所	2018
34		2019 MOC Award	The Japan Society of Applied Physics / Microoptics Group	2019
35		第34回井上研究奨励賞	公益財団法人井上科学振興財団	2018
36		第3回フォトニクス研究会 優秀ポスター賞	公益社団法人 応用物理学会フォトニクス分科会	2018
37		2018年度LQE奨励賞	電子情報通信学会 エレクトロニクスソサイエティ レーザ量子エレクトロニクス研究会	2019
38		第45回応用物理学会講演奨励賞	公益社団法人 応用物理学会	2019
39		2019年 第66回 応用物理学会春季学術講演会 Poster Award	公益社団法人 応用物理学会	2019
40		2019 IPC STUDENT PAPER & POSTER AWARD	IEEE Photonics Society	2019
41	IEEE Photonics Society Kansai Chapter Best Student Presentation Award	IEEE Photonics Society Kansai Chapter	2019	
42	第47回応用物理学会講演奨励賞	公益社団法人 応用物理学会	2019	
43	第4回フォトニクス奨励賞	公益社団法人 応用物理学会フォトニクス分科会	2020	
44	第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SICE SI 2020) 優秀講演賞	公益社団法人計測自動制御学会	2021	
45	第5回フォトニクス奨励賞	公益社団法人 応用物理学会フォトニクス分科会	2021	
46	日本学士院賞	日本学士院	2022	
47	本間 敬之	米国電気化学会フェロー表彰	米国電気化学会	2019
48		電気化学会フェロー	公益社団法人 電気化学会	2020

2.2.5 共同研究、企業との連携状況

本研究領域では、研究者自身の研究者ネットワークや国際共同プログラムへの応募などを通じて、国内外の大学・企業との共同研究が数多く行われている。表 2-5 に、国内および海外の大学・研究所との共同研究、共著論文発表状況、企業との連携状況実績をまとめた。

平本は、化学、材料メーカー、装置メーカー、民間企業研究所と、また、末益は化学材料メーカー、民間企業研究所、電子材料メーカーと共同研究を行い、研究成果の社会実装に取り組んだ。安武は、半導体デバイスメーカー3社と共同で PFC(パーフルオロカーボン)ガス改質用高圧プラズマ装置を、また、電機メーカー2社と共同で大気圧プラズマ輸送装置の開発に取り組んだ。末益は、化学メーカー、民間企業研究所との共同研究を進めた。野田は、フォトニック・ナノ構造を活用した大面積共振作用の活用について、10社以上の企業連携を実施し、高輝度レーザーを活用したレンズフリーLiDARシステム開発、ビーム走査型レーザーによる新たな LiDAR システム開発などに貢献した。

表 2-5 共同研究、企業連携

代表研究者	国内共同研究	国際連携	連携企業
入江 寛	・北海道大学触媒科学研究所、名古屋大学、神奈川県立産業技術総合研究所と共同研究 ・山梨大学内で光化学機能材料研究ユニットを結成	・ハノーバー大学(独)、武漢理工大学(中)と共同研究	・公的研究機関に技術提供
佐藤 真一	・九州大学、名古屋大学、東京工業大学、豊田工業大学、明治大学と共同研究	—	・太陽電池製造メーカーに技術提供
平本 昌宏	・豊橋技科大(伊崎研)、大阪府立大学(内藤研)、静岡大学(高橋研)と共同研究 ・愛知教育大、東京理科大学と共同実験	・ロチェスター大学(米)、マヒドール大学(タイ国)、チュラロンコン大学(タイ国)、ChemiParisTech(仏)と論文共著	・材料メーカーが材料製造・販売 ・装置メーカーと共同開発 ・化学メーカー、民間企業2研究所、石油化学メーカーに技術提供。
安武 潔	—	—	電機メーカー2社、電子デバイスメーカー3社に技術提供
片桐 裕則	・中部大学と共同研究	メキシコ国立工科大学と共同研究	—
重川 直輝	・東京大学(岡田研、杉山研)、豊田工業大学(山口研)、富山大学(前澤研)、佐賀大学(嘉数研)、産業技術総合研究所と共同研究	英国ブリストル大学と共同研究	—
末益 崇	・名古屋大学、九州工業大学と共同研究	デルフト工科大学(蘭)、グルノーブルアルプ大学(仏)共同研究 中国、ペラルーシの大学と共同研究	・化学メーカー、民間企業研究所、電子材料メーカーと共同研究
松村 英樹	・京都大学(野田研)、名古屋大学(宇佐美研)、豊田工大(大下研)、明治大学(小椋研)と共同研究	—	・独太陽電池メーカーと共同評価
山田 容子	・名古屋大学(忍久保研)、関西学院大学(増尾研)、神戸大学(富永研)と共同研究・共著	・UCSB(米)、マサチューセッツ大(米)、EMPA(スイス)、北京工科大(中)と共同研究・共著	—
金光 義彦	・千葉大学、北海道大学、九州大学、上越教育大学と共同研究・共著	・マックスプランク研究所(独)、台湾国立大学と共同研究・共著	・研究機器メーカーが装置開発・販売
野田 進	—	・Fraunhofer研究機構(独)、Sungkyunkwan大学(韓)と共同研究	・電子部品メーカー、電機メーカー3社、ガス事業者、分析計測機器メーカー、他3社以上と共同研究 ・センサー開発企業2社に技術提供
本間 敬之	—	・バージニア大(米)、スタンフォード大学(米)、ダルムシュタット工科大学(独)、ケースウェスタンリザーブ大学(米)と共同研究	—

2.2.6 実用化・製品化

平本の研究成果から、材料メーカーがフラーレン材料を販売した。また、民間企業と共同開発の結果、同社は昇華精製装置の製造・販売を行っており²、民間企業や大学研究機関において利用されている。

金光らは、基礎研究で得られた評価手法に関する知見を知財化し、太陽電池評価システムとして市販が開始されるなど、研究成果の実用化も達成している³。

² <http://www.epitech.co.jp/>

³ https://www.atto.co.jp/products/illuminators/node_5685/WSL-2000

2.3 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

2.3.1 研究領域の展開状況(まとめ図)

CREST「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」まとめ図

戦略目標、達成目標	インプット	アクティビティ/アウトプット	アウトカム (short/mid-term)		アウトカム (long-term) /インパクト																									
			科学技術的および社会・経済的な波及効果	今後予想される展開	今後想定される波及効果																									
<p>戦略目標: 「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」</p> <p>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(水素などの有用物質)に関する研究開発を対象とし、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、さらに、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した。</p> <p>達成目標:</p> <p>1) 太陽光発電技術を対象とし、さらに水素等を生成する化学燃料生成技術も含め、独創的クリーンエネルギー生成に資する研究開発を推進する</p> <p>2) 単なる高効率化、長寿命化を追求のではなく、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、全く新しい原理により動作する材料、デバイスを目指す</p> <p>3) 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生み出すため、物理学、化学、電子工学等の異分野の研究者の英知を結集する</p>	<p>研究総括: 菅根 純一</p> <p>研究代表者</p> <p>入江 寛 岡本 博明 佐藤 真一 韓 礼元 平本 昌宏 堀越 佳治 安武 潔 片桐 裕則 重川 直輝 末益 崇 松村 英樹 山田 容子 金光 義彦 野田 進 本間 敏之</p> <p>15名</p>	<p>研究成果</p> <p>論文</p> <table border="1"> <tr> <td>①CREST研究成果の論文数</td> <td>②CREST研究成果の継続発展の論文数</td> </tr> <tr> <td>717(131)</td> <td>467 (90)</td> </tr> </table> <p>()の値はTop10%以内論文数</p> <p>特許申請・登録</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>期間中</th> <th>終了後</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>出願</td> <td>117</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>国内</td> <td>25</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>国際</td> <td>25</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>登録</td> <td>66</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>国内</td> <td>66</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>国際</td> <td>8</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p>領域内共同研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ・松村-野田: キャリア寿命に及ぼす保護膜効果検証 ・松村-佐藤(小原): 不純物混入経路分析 ・金光-野田: 共同論文 ・重川: 佐藤と山口との共同研究 <p>製品・サービス</p> <ul style="list-style-type: none"> ・C60誘導体 (平本、フロンティアカーボン(株)) ・有機半導体昇華精製装置 (平本、エビテック(株)) ・太陽電池評価用イメージシステム (金光、アトー (株)) 	①CREST研究成果の論文数	②CREST研究成果の継続発展の論文数	717(131)	467 (90)		期間中	終了後	出願	117	25	国内	25	6	国際	25	6	登録	66	2	国内	66	2	国際	8	0	<p>独創的クリーンエネルギー生成技術への貢献 実産業において使われるベース技術に貢献</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PERCセルへの貢献: 裏面パッシベーション技術へヘテロ接合、キャリア選択コンタクト技術に展開 ・プラズマ技術を材料創製、加工技術へ展開: プラズマ技術をPFCガス改質、エッチングおよび成膜技術への応用、高密度ラジカル利用 ・Cat-CVD技術: c-Siシリコン結晶太陽電池プロセス応用、高性能パッシベーション技術。Cat-doping非晶質Siの極性制御 ・接合技術の高度化により、化合物半導体接合技術、さらに、化合物-ダイヤモンド接合など実デバイス応用可能な技術に躍進 <p>新原理・新材料デバイスへの挑戦</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ペロブスカイト太陽電池における逆構造デバイスの有効性を示し、セル効率を18%以上にまで、向上。 ・有機薄膜太陽電池は効率改善の流れを受けて、VoC改善の可能性を示唆(有機半導体太陽電池の開放端電圧の向上) ・ppmドーピング技術、水平多層展開セルを提案バルクヘテロ接合超厚膜をもつ有機太陽電池 ・光触媒技術は、可視光全領域利用の実証し、水素製造から、より発展が期待されるCO2削減へとステージアップ ・CZTSの効率を12%まで向上 <p>物質科学とデバイス物理の異分野融合した新研究の創生</p> <ul style="list-style-type: none"> ・光熱発電効率が黒体放射を超え、新たな光熱発電の可能性を実証した。 ・フォトリソグラフィ、光学結晶領域の光学特性を太陽電池デバイス効率向上のための光閉じ込め構造に適用し、有用性実証 ・励起子物理を材料評価技術に応用し、ペロブスカイト材料様々な物性を明らかにし、科学技術を大きく進展させた。 <p>展開 SIP 1件、CREST 2件、NEDO 8件、科研費19件など計32件</p> <p>受賞 計10名、計48件</p>	<p>太陽電池実用化技術のバックボーン貢献、シリコンタンDEM実用化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・バックコンタクトは今後、シリコン太陽電池の主流であり続ける。 ・シリコンベース化合物タンDEM化による40%に迫る高効率化の実現の可能性 <p>薄膜太陽電池立ち上がり後押し</p> <ul style="list-style-type: none"> ・薄膜太陽電池、フレキシブル太陽電池という新たなソリューション提供可能性 ・脱希少金属技術の加速(CZTSへ) ・有機薄膜PVが実用効率を獲得し、産業実装が開始される <p>新たな領域・技術発展</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フォトリソグラフィによる平面レーザー新展開、LiDAR技術への展開 ・新評価技術標準化の可能性 ・フォトリソグラフィ、光学結晶領域の光学特性を太陽電池デバイス効率向上のための光閉じ込め構造に適用し、有用性実証 ・励起子物理を太陽電池評価技術に応用し、社会実装へと結びつける 	<p>カーボンニュートラル社会に向けた光エネルギー利用技術への貢献</p> <p>既存太陽電池技術への貢献</p> <ul style="list-style-type: none"> ・多接合、効率超30%PV時代の基礎技術 ・省資源追従型PVの登場 ・省資源化シリコンベースPV <p>設置場所を選ばない太陽光利用の新たな利用シーン</p> <ul style="list-style-type: none"> ・従来の広い平地に太陽電池を設置から、設置場所を選ばないペロブスカイトPVの市場投入 ・有機PVによるアンビエント光利用の新たな用途開拓、弱い光利用の世界。 ・バッテリーフリーIoTデバイスによる電源問題からの開放 <p>新原理デバイスの萌芽</p> <ul style="list-style-type: none"> ・トポロジカルフォトリソグラフィへの応用 <p>異分野融合</p> <ul style="list-style-type: none"> ・有機分子技術とフォトリソグラフィ結晶技術の融合による、新原理デバイス ・励起子物理に立脚した光量子デバイス ・アップコンバージョンによる究極の光エネルギー利用の世界
①CREST研究成果の論文数	②CREST研究成果の継続発展の論文数																													
717(131)	467 (90)																													
	期間中	終了後																												
出願	117	25																												
国内	25	6																												
国際	25	6																												
登録	66	2																												
国内	66	2																												
国際	8	0																												

図 2-3 研究領域の展開図

2.3.2 研究成果の科学・技術の進歩への貢献

本研究領域全体として科学技術論文発表数は、CREST研究期間を含め、これまでに1184報が確認された。CREST研究終了後の研究論文(発展論文)において示された本研究領域における科学技術の進歩への貢献は、表2-6に示す4つの観点から整理できる。

表2-6 科学・技術の進歩への貢献

貢献の観点	研究代表者 材料・デバイス・技術
期待感のある材料の基礎研究を継続することで、技術革新、新たな発見に結びついた	韓 逆構造ペロブスカイト太陽電池セル 金光 ペロブスカイト材料の光物性評価技術 野田 フォトニック結晶熱電発電デバイス 平本 有機単結晶太陽電池デバイス 山田 NFA グラフェンナノリボン合成技術
既存太陽電池の基礎技術、製造技術分野において、メカニズム解明への貢献や技術開発貢献に繋がった	佐藤 結晶界面制御技術 安武 狭プラズマエッチング技術 松村 Cat ドーピング技術 本間 シリコン電解析出技術 重川 ダイヤモンド直接接合技術 片桐 CZTSバルク結晶技術 末益 Ba-Si太陽電池デバイス
太陽光利用技術の範疇において、CREST研究成果を新しいデバイス・材料に展開した	平本 水平多層接合太陽電池 入江 可視光水分解技術、CO ₂ 還元触媒
太陽光利用技術以外の分野で、CREST研究成果を、新しいデバイス技術に展開した	野田 フォトニックレーザー技術 末益 Si系合金熱電発電材料

第一の観点、期待感のある材料の基礎研究を継続することにより、新たな発見、発明を生み出し、科学技術の進歩への貢献が認められた。期待感のある材料とはペロブスカイト太陽電池材料、フォトニック結晶材料、有機太陽電池に用いられる材料群が挙げられ、これらの材料研究分野において貢献した研究者は、韓、金光、野田、平本、山田である。

✓ペロブスカイト太陽電池に関する研究成果の科学技術への貢献

韓はCREST研究中間評価までは主に色素増感太陽電池の研究を行っていたが、後半はペロブスカイト太陽電池研究に重点を移した。プロジェクト期間中に色素増感、ペロブスカイトそれぞれの太陽電池において当時の最高変換効率を達成していたが、プロジェクト終了後は、ペロブスカイト太陽電池発電メカニズムの研究、ホール輸送材料やパッシベーション材料の開発などを行った。さらに、世界に先駆けてモジュール作製にも取り組み、モジュールの公認効率を取得した。

逆型構造のペロブスカイト太陽電池⁴において高効率を実証したことが、韓らの科学技術への大きな貢献の一つである。有機薄膜太陽電池に類似した多層構造のPlanar型で、電荷移動の方向が順構造型とは異なる逆型構造セルにおいて、3元系酸化物(Li_{0.05}Mg_{0.15}Ni_{0.80})を正孔輸送層に用い、電子輸送層側でもPCBM層の上にTi-Nb酸化物層を重ねてAg層に電子を取り出すことで、実験セルサイズ(1.02 cm²のセル)で16.2%の効率を報告し⁵、産業技術総合研究所の標準的評価条件下においても15.0%の効率を確認した。その後、さらに、標準評価条件下において18.2%を報告した⁶。

上記のように高効率を実証できたことに加え、薄膜デバイスに適している逆構造型のデバイス研究を推進したことにより、高い光電変換効率と柔軟性を両立できるペロブスカイト太陽電池は、新しいユースケース(壁面設置、曲面・シースルーデバイス)を提供できる可能性を示した。

✓太陽電池材料評価技術に関する科学技術への貢献

ペロブスカイトなどの新しい太陽電池材料の物性評価解析の領域で研究推進した金光らは、同材料系の基礎物性解明において、数多くの科学的貢献を果たした。

ハライドペロブスカイト(CH₃NH₃PbCl₃)が負の熱光学係数を有することを発見し、同ペロブスカイトが、光学温度補償材料としての新しい光機能を有することを報告した⁷。これは同材料の、様々な光技術応用における温度補償材としての可能性を示唆する。また、CH₃NH₃PbI₃のフォノンを高強度テラヘルツパルスで直接励起し、光励起キャリアのエネルギー分布の時間変化を測定した結果、テラヘルツ励起により高エネルギーキャリア分布(ホットキャリア)が増大し、そのエネルギー損失が非常に遅くなる現象(ホットフォノンボルト効果)を確かめた。フォノンを積極的に利用することで光励起キャリアのエネルギー損失を抑制できることを示したもので、フォノン制御が光電デバイスのさらなる効率向上の指針を与える可能性を示した⁸。

レーザー光パルスを手ハライドペロブスカイト半導体(CsPbBr₃)ナノ粒子に照射すると、可視光領域の光がレーザー光パルスの当たっている間のみ超高速に変調され、その大きさが近赤外領域レーザー光で特異的に増大する現象(複数の電子準位が光と相互作用することにより生じるアウトラー・タウンズ効果)を室温で発見し、従来の半導体ナノ構造では実現不可能であった新たな光スイッチングデバイスや光変調素子の材料としても同材料が可能性を有することを示した⁹。また、高効率層状ペロブスカイトLEDの実現¹⁰、高効率非鉛スズペロブスカイト太陽電池の実現¹¹、ハライドペロブスカイトの電子質量の決定¹²などの研

⁴ 日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす, 96, 148-155(2017)

⁵ Science, 350, 944 (2015)

⁶ Nature Energy, 1, 16148 (2016)、<https://www.nims.go.jp/news/press/2016/03/201603280.html>

⁷ Sci. Adv. 5, aax0786 (2019)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2019-07-22>

⁸ Phys. Rev. Lett. 126, 077401 (2021)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-02-19>

⁹ Nature Commun. 12, 3026 (2021)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-05-24-0>

¹⁰ Nature Photon. 14, 70 (2020)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2019-11-18>

¹¹ Nature Commun. 11, 3008 (2020)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-06-16-0>

¹² Phys. Rev. Lett. 126, 237401 (2021)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-06-14>

究も行い、太陽電池・フォトニクス材料であるペロブスカイトの物性解析・評価分野において、科学技術に数多く貢献している。

金光らの研究・評価技術が活用され、得られた成果を基盤にして、以下のプロジェクトを金光が研究代表者として推進し、研究成果の発展を進めた。すなわち、JST・CREST 研究「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」、科研費・特別推進研究「ナノ物質科学と強電場非線形光学の融合によるフォトニクスの新展開」である。このように金光は、研究終了後、ペロブスカイト材料の様々な特性を明らかにし、太陽電池のみならず、本材料系の光デバイスへの幅広い可能性を示した。

✓フォトニック結晶技術に関する研究成果の科学技術への貢献

野田らは、光エネルギーを利用する技術として、フォトニック結晶特有の熱輻射の帯域制御手法を確立し、フォトニック結晶技術を熱光発電技術へと発展・展開した。

科研費・基盤研究S「自在な熱輻射制御のための新技術/概念の構築」およびそれに続く、「近接場熱輻射の帯域制御手法の確立と熱光発電への展開」において、フォトニック・ナノ構造における大面積共振作用を発展的に活用し、所望の帯域のみで熱輻射を生じさせるとともに¹³、高温物体と受光素子を近接させた際に生じる近接場熱輻射¹⁴に着目することで、黒体輻射限界を超える熱輻射を引き出す技術を開発し、高出力・高効率な熱光発電実現に向けた基礎学理構築を推進した。また、11.2%という非常に高い熱-電力変換効率を達成した¹⁵。

特に近接場熱輻射制御においては、高温 (>1100K) の熱輻射体と室温の太陽電池を、140nm以下まで近づけた一体型熱光発電デバイスを開発し、高温物体の内部で発生した高密度な熱輻射を、直接、太陽電池へと取り込むことに成功し、黒体輻射限界をも超える光電流密度の生成を確認した¹⁶。これらの研究により野田は、太陽光や各種熱エネルギーを利用した発電システムの大幅な小型化・高出力化・高効率化の可能性を示した。

✓有機太陽電池材料に関する研究成果の科学技術への貢献

近年、状況が急展開しつつある有機太陽電池に関する研究分野においては、基礎研究の継続が新しい知見へと結び付いた。同研究分野は、脱フラーレン化、すなわちNFA (Non-Fullerene Acceptors) 研究進行に伴い、発電効率が著しく向上している。平本チーム、山田チームはその流れに従い、CREST研究終了後、以下の科学技術的貢献を行った。

平本は、有機単結晶成長技術と極超低速蒸着技術(1秒当たり10億分の1nm)を組み合わせ、1ppmの極低濃度でドーピングしたルブレイン有機単結晶を作製し、ホール効果シグナルを検出することに成功した。シリコン単結晶ウエハを用いたエレクトロニクス技術と同様

¹³ Science Advances 2 (2016), DOI: 10.1126/sciadv.1600499.

¹⁴ Opt. Express 26, A192 (2018)

¹⁵ ACS Photonics 7, 80 (2020)

¹⁶ ACS Photonics 8, 2466 (2021)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-08-11>

のアナロジーで、有機半導体単結晶ウエハを用いた高性能の有機単結晶太陽電池などの有機単結晶デバイスという新しいデバイス分野を切り開いたといえる¹⁷。

また、平本は、高速キャリア移動度を有する有機半導体太陽電池が、太陽電池の理論限界値 (SQ(ショックレー・クエーサー)限界) に達する開放端電圧を示すことを見出した。これまでの有機太陽電池の開放端電圧は、すべてSQ 限界より0.5 V以上低く、これは分子振動にエネルギーが散逸する無輻射再結合によるロスと考えられている。平本は長鎖アルキルを有する有機半導体では、ファスナー効果によって分子振動が抑制された結果、無輻射再結合が抑制されたと考えている¹⁸。これは、有機太陽電池の開放端電圧を増大させる原理解明に繋がる可能性がある。

山田は、有機薄膜構造制御に対する置換基効果、及び新規NFA合成に関する研究を継続し、開放電圧 (V_{oc}) ロスと薄膜構造の相関について研究を進めた¹⁹。また、電荷分離過程や電荷再結合過程のメカニズムをテラヘルツ分光や、生駒との共同研究によりESRで詳細に解析した²⁰。山田の共同研究者である矢貝は、螺旋および非螺旋構造を有する超分子材料の有機薄膜太陽電池特性を比較し、螺旋構造が成膜性および電荷分離能の面で優れていることを明らかにした²¹。また、以前より、フラーレン型アクセプターで問題になっていた V_{oc} ロスがNFAにおいては小さく、大きな V_{oc} が得られることが報告されていたが、山田らが報告したn型材料も V_{oc} が予想値よりも大きい事実が確認され²²、これら材料を用いた有機太陽電池効率向上が期待される。

また、山田らは、上記研究で開発した前駆体法をバンドギャップの小さいアームチェアグラフェンナリボン (AGNR) 合成に展開し、バンドギャップが約0.6 eVの17-AGNRの基板上合成に成功した²³。山田の技術を用いることにより、バンドギャップを従来の材料より小さくすることが可能となった。この結果、電子移動度が大きいというグラフェン材料の優れた電気特性を活かした省電力・超高速電子デバイスの可能性を示した。

第二の観点として、既存の太陽電池が抱える課題を解決するため、多くの太陽電池に共通する分野での貢献や、製造技術における科学技術的貢献である。これらに貢献した研究者は、Si 太陽電池関連技術に貢献した佐藤、安武、松村、本間、また、化合物太陽電池技術に貢献した研究者は、重川、片桐、末益である。

¹⁷ Adv. Mater., 30, 1801236 (2018)

¹⁸ Appl. Phys Lett., 115, 153301 (2019)、https://www.ims.ac.jp/news/2019/10/16_4448.html

¹⁹ Chem. Sci., 2018, 9, 6614–6621 および Chem. Sci., 2020, 11, 1825–1831.

²⁰ Sol. RPL 2018, 1700234、および J. Photochem. Photobiol. A, 2020, 400, 112693/1–8.

²¹ Chem. Sci., 2018, 9, 3638–3643.

²² J. Org. Chem., 2020, 85, 168–178.

²³ J. Am. Chem. Soc. 2017, 139, 11658–11661 および Commun. Mater. 2020, 1, 36, 2020, <http://www.naist.jp/pressrelease/2020/06/007106.html>.

Si 太陽電池関連技術への貢献

✓シリコン結晶制御技術

CREST 研究期間中においては結晶 Si 太陽電池の効率向上に寄与する界面キャリア再結合速度の低減を目指していた佐藤らは、CREST 研究終了後、シリコン基板上に高い固定電荷を有する Sr シリケート層の形成に成功し、電界効果パッシベーション膜として十分な電荷量(10^{13} cm^{-2})が得られたこと、およびその静電界効果について報告した²⁴。

佐藤の後継研究において、堀田は Hf-Si-O 三元反応制御を用いたパルスレーザー堆積法により、HfO₂/Si 界面において Hf シリケート層の室温形成を実現した²⁵。その結果から、抵抗変化型メモリ (Al/HfO₂/Hf シリケート/Si 構造の抵抗変化型メモリ) を着想し、新しい素子構造を提案した²⁶。また、新船は原子層堆積法で作製した酸化アルミニウム (AlO_x) パッシベーション膜の電気的特性および構造に及ぼす蒸着後のアニーリング (PDA:Post Deposition Annealing) 効果を解析し、界面における遷移層形成の重要性を明確にした²⁷。このように佐藤の研究は多くの後継研究に引き継がれている。

安武は、高圧プラズマを利用した PFC(パーフルオロカーボン) ガス改質技術において、炭素電極を固体原料として用いて CF₄ ガスを改質し、半導体エッチング用 C₂F₄ ガスの高効率生成を実現した。C₂F₄ による SiO₂ エッチング実験を行い、従来の CF₄/O₂/Ar ガスよりも 2.7 倍の高速エッチング技術を確立した。安武は、狭ギャッププラズマの電極材料自身を固体原料として原料ガスに加えて利用することにより、さらに自由度の高いラジカル反応場が形成できることを実証した²⁸。

また、高ラジカル密度の形成により、これまで水素化物を生成しないと考えられていた金属元素が高速エッチングされる²⁹等の新しい反応系の存在を示し、学術発展に寄与した。

✓Cat-CVD 技術の進展

松村が研究を進めた Cat-CVD(Catalytic Chemical Vapor Deposition) 技術の科学技術への貢献は、Si 表面の高性能パッシベーション技術としての c-Si シリコン結晶太陽電池プロセス技術への貢献である³⁰。また、Cat ドーピング(Cat-doping)による非晶質 Si の極性制御技術への貢献においても研究進展が認められた³¹。

²⁴ Journal of Applied Physics 121, 225302-1 - 225302-6 (2017)

²⁵ AIP Advances 6, 105303-1 - 105303-7(2016)

²⁶ Appl. Phys. Lett., 113, 012103 (2018)

²⁷ Jpn. J. Appl. Phys., 58, 125502 (2019)

²⁸ Chem. Eng. Sci. 229, 116125 (2021), Jpn. J. Appl. Phys. 60, 050904 (2021).

²⁹ Appl. Phys. Lett. 109, 211603 (2016), ACS Omega, 4, 4360 (2019).

³⁰ Jpn. J. Appl. Phys., vol. 56, (2017), pp.056502-1—7, J. Material Research, vol. 33(2018), pp. 1515-1522, Japanese Journal of Applied Physics 57, 08RB17 (2018)

³¹ Jpn. J. Appl. Phys., vol. 55, (2016) pp.04ES051-1—4, および Jpn. J. Appl. Phys. 56 08MB06(2017)

Cat ドーピングを用いることにより、非晶質 Si 上に、薄い n 型または p 型のドーピング層を形成した結果、下地の a-Si 膜のパッシベーション品質がリン(P)とホウ素(B)の両方で維持できていることを確認し、B ドーピングした層を p 型 a-Si エミッターとして用いた SHJ(Silicon Hetro-Junction)太陽電池の整流特性と光起電力特性について報告している。これらの研究により SHJ 太陽電池に Cat ドーピング技術が適用できることを実証した。

✓シリコン電解析出技術の発展

本間 は CREST 研究において、資源的に豊富な珪藻土を原料にする、高精度・低エネルギーコスト・ウェットプロセスによる太陽電池級高純度シリコン材料の創製プロセスを開発し、それを CREST 研究終了後さらに発展させた。

発展の一つは電析法によるシリコン薄膜形成プロセスの開発である³²。電析出法(非水溶媒系、熔融塩系)によりシリコン薄膜を形成するための新規プロセスを検討し、光照射あるいはパルス電解などを導入して薄膜の特性の向上を達成している。他の発展としては、高純度シリコンの液相生成プロセスにおいてカソード電位制御を行うことにより、金属不純物およびリン(P)の濃度が一方向凝固プロセスに適する濃度条件を満たすことを確認し、太陽電池グレードシリコン材料製造技術に貢献した³³。さらに、金属電析初期過程の解析と析出反応機構の解明³⁴において金属電析過程の初期段階に及ぼす鉛(Pb)、スズ(Sn)の効果を検証している。

化合物太陽電池関連技術への貢献

✓界面制御技術の進展、半導体・ダイヤモンド直接接合技術への展開

重川 は、CREST 研究において III-V 半導体/Si 直接接合界面のプロセス耐性向上手法、電気抵抗低減手法を開発した。それらに基づき GaAs 基板の再利用による III-V/Si セルの低コスト化の方向性を示すとともに、並行して、接合界面に中間層を導入しセル特性向上を達成など、多くの研究発展を進めた³⁵。

金属箔の直接接合法により、半導体基板上に半導体素子プロセスに応用可能な金属厚膜電極、低抵抗配線を形成することに成功し、接合された金属箔から高周波受動部品を形成した。これにより、従来技術を用いて形成した受動部品と比べて、より優れた高周波特性を有することを実証した³⁶。さらに、上記の界面制御に基づくプロセス技術を応用し、ダイヤモンドと GaN などの半導体や、金属などとの直接接合を実現している³⁷。熱膨張係数差が存在するにも拘わらず、接合界面が優れた耐熱性を示すこと、従来技術と比較して界

³² Jpn. J. Appl. Phys., 57, pp. 08RB11 (2018)、J. Electrochem. Soc., 164, pp. H5049 (2017)、J. Electrochem. Soc., 164, pp. D994 (2017)

³³ J. Electrochem. Soc., 166(6), D162 (2019)

³⁴ Electrochim. Acta, 242, pp. 364 (2017)

³⁵ IEEE J. Photovolt. 8 (3), pp. 879-886 (2018)

³⁶ Jpn. J. Appl. Phys. 57, 02BE01 (2018)

³⁷ Advanced Materials 43(33), 2104564、<https://www.osaka-cu.ac.jp/ja/news/2021/210909>

面熱抵抗が低いことを実証した。この接合界面のナノ構造を評価し、熱処理を施すことにより界面で結晶性の回復や混晶層の形成が生ずることを明らかにした³⁸。

接合界面の耐熱性を活かし、A-STEP（トライアウト）の支援を受けてダイヤモンドに接合された GaN エピタキシャル層をプロセスし、GaN トランジスターを作製した。素子特性を評価しダイヤモンドとの接合による放熱性改善効果を実証した³⁹。

✓ CZTS の物性評価技術の進展、SnS の太陽電池応用

片桐は、CZTS (Cu-Zn-Sn-S 系) バルク多結晶の作製と分析評価の深掘りを進めた。原材料として熔融法で作製された $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ を原料粉末として、無加圧真空焼結および放電プラズマ焼結した $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ バルク多結晶を作製し、それらを SEM-EDS、粉末 X 線回折、リートベルト法、ラマン分光法、フォトルミネセンス法などを用いて結晶の評価を行い、ラマン分光法解析を行った⁴⁰。

CZTS に関する研究の派生技術として、CZTS と同じくレアメタルフリー硫化物の一つである硫化錫 (SnS) に着目し、SnS 薄膜の作製及び CZTS のデバイス構造を踏襲した薄膜太陽電池の作製を行い、組成依存性や成膜温度依存性の解析も行っている。CZTS の代わりに SnS を光吸収層に用いた太陽電池素子においては、変換効率 ($\eta=0.3\%$) は低いものの、Sn-poor 組成において比較的良好な光電変換特性が得られることを明らかにしている⁴¹。

✓ BaSi 材料技術に関する科学技術への貢献

末益は、CREST 研究での Ba-Si 系材料の研究を継続し、水素照射による BaSi_2 膜に含まれる欠陥の不活性化と太陽電池動作の実証を行った。 BaSi_2 には Si 空孔が形成され易く、深い欠陥準位を形成するが、その Si 空孔を原子状水素照射により不活性化することに成功した⁴²。その研究においては、その不活性化のメカニズムについても第一原理計算で明らかにしている。

また、スパッタ法による BaSi_2 薄膜太陽電池の研究を進展させた。CREST 研究期間中は、分子線エピタキシー法により BaSi_2 の基礎物性を中心に研究したが、研究終了後は実用化を意識し、大面積高速成長が可能なスパッタ法によるガラス基板上への BaSi_2 太陽電池形成を企業と共同で行った。スパッタ法で形成した多結晶 BaSi_2 膜の方が、エピタキシャル膜よりもキャリア寿命が長く、分光感度に優れていることを明らかにした⁴³。

第三の観点として、太陽エネルギーを利用するという本研究領域の研究範疇において保有技術を新しい技術応用へと発展し、科学貢献に寄与した例が以下のように認められた。

³⁸ Appl. Phys. Express 12, 016501 (2019)

³⁹ Appl. Phys. Express 15, 041003 (2022)

⁴⁰ Thin Solid Films, vol. 638, pp. 312-317, (2017)

⁴¹ Japanese Journal of Applied Physics vol. 57 no. 2S2, 02CE08 (2018)

⁴² Physical Review Materials 3, 065403 (2019)、および (Journal of Applied Physics 127, 233104 (2020))

⁴³ Journal of Physics D: Applied Physics 54, 135106 (2021)

✓水平多層接合太陽電池構造の提案

平本は、科研費「超バルクヘテロ接合有機太陽電池の開発」および、NEDO プロジェクト「pn 制御有機半導体単結晶太陽電池の開発」の研究において、新たなデバイス構造を提案した。この新デバイス構造とは、電子とホールを、基板に対して水平方向に取り出す「水平多層接合」という新しいコンセプトに基づいた有機太陽電池デバイスで、従来のバルクヘテロ接合とは異なるデバイス作成方法⁴⁴を示した。この水平接合セルは、垂直方向の膜厚を通常の有機太陽電池デバイスより大きくできる可能性がある。そこで光吸収波長領域が異なる有機半導体を組み合わせて太陽光スペクトルの広い範囲に対応できるデバイスを実現できれば、飛躍的な変換効率向上が期待できる(現在の有機太陽電池に不可欠な、ドナー/アクセプターブレンドが不要になる可能性がある)。

✓水素生成技術を CO₂ 削減技術に展開

入江は、CREST 研究期間は光触媒による可視光照射下での水の完全分解による水素生成をターゲットとした研究を行い、同研究終了後はそれら技術をさらに進展させると共に、その技術を二酸化炭素還元へ応用する研究へと進んだ。

水分解に関する研究では、波長740 nmの赤色光、すなわち可視光ほぼ全域の光に応答する水分解光触媒の開発に成功した。水素発生光触媒としてロジウム酸亜鉛、酸素発生光触媒としてビスマス酸バナジウムを用い、導電層としての銀もしくは金を介して接合した二段階励起光触媒粉末を合成した⁴⁵。この二段階励起光触媒粉末は、波長740nm (赤色)までの可視光ほぼ全域において活性を有し、水を完全分解できることが確認されている。また、二段階励起光触媒粉末の水素発生光触媒と酸素発生光触媒に、それぞれ白金や銀とコバルト酸化物を選択的に担持することにより水分解活性が大幅に向上することも見出した⁴⁶。

さらに、上記、可視光全域に応答する二段階励起光触媒を二酸化炭素還元を展開している。上記技術の二段階励起光触媒を二酸化炭素還元に応用するため、水素発生光触媒には二酸化炭素還元光触媒として機能する金を助触媒として担持し、酸素発生光触媒にはコバルト酸化物を助触媒として担持する光触媒を作製し、二酸化炭素還元による一酸化炭素発生を確認した⁴⁷。

これらの光触媒技術の進展により、波長700nmにおける水素発生の外部量子収率 (AQE) 5%程度を見込めるようになり、実用化目安である波長700nmにおけるAQE40%が視野に入ってきたと言える。将来の太陽エネルギーによるエネルギー物質創成技術へと繋がる基礎的知見である。

⁴⁴ ACS Appl. Energy Mater., 2, 2087 (2019)、https://www.ims.ac.jp/news/2019/02/19_4254.html

⁴⁵ J. Mater. Chem. A 4, 3061–3067 (2016)、および Phys. Chem. Chem. Phys., 18, 27693–28378 (2016))

⁴⁶ RSC Adv., 9, 41913–41917 (2019)、および Appl. Catal. B: Environ., 284, 119744 (2021)

⁴⁷ Cat. Today, 335, 402–408 (2019)

第4の観点として、CREST研究領域で研究されたテーマと関連するが、太陽光エネルギー利用の範疇を超えた研究分野において、新たな展開に発展した研究も認められた。

✓フォトニック結晶技術は、フォトニックレーザーへの展開・応用が進行

野田のグループは、2つのフォトニックレーザー研究で科学技術に貢献した。

一つは、フォトニック結晶レーザーの高輝度化に向けた研究である。フォトニック結晶の特異点（ Γ 点）における安定した2次元共振作用を、より大面積で生じさせるための「2重格子フォトニック結晶」と自ら名付けた新たなフォトニック結晶構造を新たに考案・開発することで⁴⁸、10Wを超える高出力動作時においても高ビーム品質で、かつ狭い拡がり角をもつデバイスを実現した。また、それを活用した、レンズフリーで、高空間分解能をもつLiDARを初めて実現することに成功した⁴⁹。さらに短パルス（数10ピコ秒）かつ高出力（数10～100ワット以上）で動作可能なフォトニック結晶レーザーの開発にも成功した⁵⁰。

他の一つは、フォトニック結晶レーザーのスマート化に関するもので、「複合変調フォトニック結晶」という、格子点の位置と大きさを同時に変調した新たなフォトニック結晶を創出し⁵¹、任意の方向、形状のビーム出射を可能とする新たな学術の体系化に成功した。

✓Ba-Si系材料の熱電発電技術への応用

末益は、CREST研究過程においてBaSi₂の熱伝導率が極めて小さく、かつ、ゼーベック係数大きいことを見出した。この特性に加え、高濃度ドーピングも可能であるBaSi₂材料は熱電材料に必要な特性を有していることを確かめた。今後、Ba-Si系材料の熱電材料としての新たな展開が期待される⁵²。

⁴⁸ Nature Mater. 18, 121 (2019)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2018-12-20>

⁴⁹ Advanced Photonics Congress (On-line)2021年7月13～16日、
<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-07-08>

⁵⁰ Nature Photon. 15, 311 (2021)、https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101415.html

⁵¹ Nature Commun. 11, 3487 (2020)、<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-07-22-0>

⁵² Applied Physics Letters 119, 141603 (2021).

2.3.3 研究成果の社会・経済への貢献

前章に示した科学技術イノベーション創出に貢献した科学技術については、社会・経済的観点からも様々な成果が得られている。その状況を、表 2-7 に、太陽電池既存技術への貢献、新太陽電池デバイス技術への貢献、太陽電池材料技術を異分野のデバイス技術へ応用の観点からまとめる。

表 2-7 社会・経済への貢献

	研究者 技術・応用デバイス
太陽電池関連の既存技術への寄与	佐藤 裏面パッシベーション技術が PERC セルにおいて活用 安武 プラズマ技術を材料創製技術、加工装置に展開 松村 民間企業との Cat-CVD 技術の実用化にむけた取り組み 重川 表面活性化ボンディングを利用した多接合セル化技術開発
新太陽電池デバイス技術開発に寄与	韓 ペロブスカイト薄膜太陽電池セル化技術、色素増感太陽電池製品化への寄与 片桐 次世代 CIGS 太陽電池に関する国際共同研究への進展 金光 太陽電池評価装置の製品化 平本 有機太陽電池フラーレン材料精製技術、および材料の製品化
太陽電池材料技術を異分野のデバイス技術へ応用	重川 パワーデバイス応用への展開 松岡(堀越) 5G 基地局向け HFET デバイス応用 野田 フォトニック結晶レーザーの LiDAR 応用

Si 太陽電池製造技術、高効率を目指す多接合太陽電池技術への貢献

本研究領域で取り組んだ、Si 太陽電池における光閉じ込め技術、界面再結合速度の低減技術、III-V 族の薄膜多接合セルに必須の接合技術、フォトニック構造を備えた薄厚 Si 太陽電池等は継続して研究を進めたことにより、以下のように社会・経済に貢献したと考えられる。

シリコン太陽電池技術、シリコンベース多接合太陽電池に関する多くの実用化フェーズプロジェクトに本領域の研究が引き継がれた。CREST 研究終了時点で、4 研究課題（佐藤チーム、松村チーム、重川チーム、韓チーム）が NEDO プロジェクト「高性能・信頼性太陽電池の発電コスト低減技術開発」に採択され、実用化を目指す研究として展開していた。

✓シリコン結晶成長における光閉じ込め技術への貢献、プラズマ関連技術

佐藤の技術は、プロジェクトで注力していた裏面パッシベーション技術が現在主流である PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) セルで活用され、また得られた知見はさらなる高効率化に必須のヘテロ接合やキャリア選択コンタクト技術に利用されていると考えられる。NEDO 「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」(2015~2019)においては、界面における再結合を抑制する機能性薄膜を作製する技術開発

を行い、製造コストの高い原子層堆積法と同等の性能を有する薄膜を、低製造コストのミスト CVD 法、LIA 援用反応性スパッタ法で作製することに成功した。

また、パルスレーザー堆積法を用いて、新しい材料探索も行い、以下の2つの後継研究に引き継がれ、本技術が実用化技術へと発展・活用されている状況が窺える (NEDO 「移動体用太陽電池の研究開発」(2020~2024)および 科研費 「シリコンナノワイヤ表面を用いたシリコン系太陽電池の高効率化に関する研究」(2018~2020))。

安武のプラズマ技術は材料創製技術および加工装置開発に展開された。安武は、①高圧力プラズマを利用したPFCガス改質技術開発⁵³、②高圧力水素プラズマによる各種機能材料のエッチングおよび成膜技術開発⁵⁴、③狭ギャップ高圧力プラズマの内部パラメータ制御⁵⁵による高効率窒化プロセス開発⁵⁶の3つの開発を行ったが、これらは、いずれも大気圧・準大気圧プラズマにより超高密度ラジカル反応場を形成し、実利用可能な機能材料創成・加工プロセスに応用するものであった。このうち②の水素を用いた高圧プラズマ技術は、今後の水素化社会に向けてエコグリーンで低コストの材料創成・加工技術として注目され、また、ガス供給設備が不要なオンサイトガス生成技術として、工業的な波及効果が期待される。これらの技術に関連してCREST研究終了後、企業と金属膜形成装置やエッチング装置の共同特許出願をふくめ、3件の特許出願を行っている。

✓界面再結合速度の低減技術への貢献、および関連実証研究

松村の Cat-CVD 技術は、結晶 Si 太陽電池のパンベーション材料や、界面再結合速度の低減に強みを持ち、NEDO プロジェクト「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(2015-2020)」を実施し、共同研究者の**大平**らにより、さらに4つの NEDO プロジェクトへと研究成果が引き継がれている。

松村が開発した Cat-CVD など新手法による高性能太陽電池低価格製造技術の開発については、CREST 研究期間では主に基礎的検討を主眼としていたが、CREST 研究終了後は NEDO プロジェクトの委託事業に採択され、大手太陽電池製造企業と組んで実用化を目指す研究開発を行った。その結果、Cat-CVD 法が、アモルファスシリコン(a-Si)/結晶シリコン(c-Si) 高効率ヘテロ接合太陽電池の作製法として適していることを証明し、太陽電池の実製造プロセスの現場において、その知見が活かされていると推察できる。

さらに、前述のように、松村チームの**大平**は本技術を進展させ、以下のとおり、多くの実用化を目指すプロジェクトに採択され、Cat-CVD 装置を用いた新規ドーピング技術の開発を進めている。

上記4つ NEDO プロジェクトとは、①「太陽光発電の寿命予測ならびに試験法の開発/n型結晶シリコン太陽電池における電圧誘起劣化機構の明確化(2015-2020)」。②「多機能・

⁵³ Chem. Eng. Sci. 229, 116125 (2021), Jpn. J. Appl. Phys. 60, 050904 (2021).

⁵⁴ Appl. Phys. Lett. 109, 211603 (2016), ACS Omega, 4, 4360 (2019).

⁵⁵ J. Appl. Phys. 122, 043303 (2017), J. Appl. Phys. 128, 133303 (2020), J. Appl. Phys. 129, 173302, (2021).

⁵⁶ J. Appl. Phys. 130, 063301 (2021).

高品質薄膜の利用による壁面太陽電池モジュールの長寿命化(2020-2023)」。③「イオン注入を用いた裏面電極型 Si ヘテロ接合太陽電池の製造技術開発(2021-2022)」。④「新概念結晶シリコン太陽電池モジュールの開発(2021-2022)」である。

✓シリコンベース多接合セルにおける接合技術への貢献

重川が研究を進めた表面活性化ボンディング(SAB: Surface Activated Bonding)技術をベースとした研究開発が、NEDO プロジェクト「低コストセル技術開発 2016-2019」において実施された。そのタンデム太陽電池の研究成果に基づいて接合界面の寄生抵抗低減手法を開発し、東京大学・杉山らによる PV 用 III-V/III-V 接合技術開発に貢献した。

新太陽電池技術の産業創生に関連した貢献

今後、技術発展が期待される新太陽電池開発においても以下のような貢献が認められる。

✓ペロブスカイト太陽電池セル開発への潮流、色素増感型太陽電池製品化への貢献

韓の研究による科学技術進展は、国内におけるペロブスカイト太陽電池の実用化に向けた取り組みを加速したと考えられる。ペロブスカイト太陽電池を用いた 1cm 角セルで変換効率 15%を確認していたが、NEDO プロジェクトを経て、現在、民間企業数社がペロブスカイト太陽電池開発・実用化を進めている。また、韓らが研究を進めた逆型構造のペロブスカイト太陽電池の実用化に取り組んでいる企業が出現していると考えられる。

韓らが CREST 研究期間初期に取り組んでいた色素増感太陽電池に関しては、民間企業における室内用途製品の商品化開発研究に繋がった可能性がある。

✓次世代 CIGS 太陽電池実用化に向けた国際共同研究貢献

片桐は NEDO プロジェクト「先導研究プログラム: 4 端子タンデム太陽電池用トップセルの開発」(2021~2022)に研究開発推進委員会委員として参加し、CZTS 系太陽電池の知見を活かし、研究プロジェクトの開発活動に協力した。

本分野は海外においても注目度が高く、本研究が関連した国際共同研究への展開として、HORIZON2020 STARCELL project⁵⁷への日本からの参加(2017.1~2019.12)に貢献した。CZTS の EU プロジェクトに日米の各 1 機関が共同研究するプロジェクトに産業技術総合研究所から共同研究者が参加している。

✓太陽電池材料評価技術の計測装置製品化

金光の共同研究者の秋山は得られた CREST 研究成果を基盤として、2つのプロジェクトを推進した(JAXA との多接合太陽電池の共同研究(東大・秋山)、太陽電池と熱電をハイブリッドした新構造太陽電池の開拓的研究(東大・秋山))。金光、秋山は産業応用とし

⁵⁷ <https://cordis.europa.eu/project/id/720907>

て、基礎研究で得られた評価手法に関する知見を知財化し、その技術は太陽電池評価システムとして市販が開始されている。⁵⁸

✓有機太陽電池材料開発のフラーレン材料の販売、昇華精製装置製品化

平本は、有機太陽電池の材料研究を通して、高純度化によるフラーレンの p/n 制御技術を確認し、そのフラーレン材料は、材料メーカー⁵⁹から市販されるに至った。

また、民間企業と共同研究を行い、この研究成果を通して、同社は昇華精製装置の製造・販売を行っている⁶⁰。

化合物半導体太陽電池技術を異分野のデバイス技術へ応用

✓パワーエレクトロニクスデバイス

重川の接合技術はパワーエレクトロニクス素子全般へ展開が期待されている。NEDO プロジェクト「新産業創出新技术先導研究プログラム：ダイヤモンド直接接合による高耐熱性界面の研究開発(2019～2021)」において、電機メーカー、材料メーカーと研究開発を進め、レーダーやインバータなどの大電力用途 GaN トランジスター製造において、窒化ガリウムとダイヤモンドの直接接合時の接合界面層の最小化に成功した⁶¹。

この技術等に関連し CREST 研究終了後に、民間企業や、他大学と、ダイヤモンド基板、セラミック基板(窒化物セラミック、SiC)への接合技術に関する共同出願特許を含め、5 件の特許出願を行い、本技術の社会実装に向けた取り組みを続けている。

✓HFET への応用

堀越の共同研究者である松岡は、研究期間に InGaAlN/GaN 太陽電池効率が一般的に用いられている Ga 極性基板を用いた場合に比べ、N 極性を用いた場合 8 倍に増大するという重要な研究結果を得て、結晶成長技術を構築した。この技術を HFET(Hetero Field Effect Transistor)に応用し、高速な応答の可能性を確認し、5G (28GHz) 基地局用トランジスターの実現に向けて研究を進めている⁶²。

✓フォトリック結晶レーザーのスマートモビリティ・スマート製造への展開

野田は、今後のスマートモビリティの発展に資するため、高輝度フォトリック結晶レーザーを活用して、小型高性能LiDARの実現に成功した。さらにその後、高輝度フォトリック結晶レーザーの利点を最大限活用することで、クラス最小のLiDAR開発にも成功した⁶³。

⁵⁸ https://www.atto.co.jp/products/illuminators/node_5685/WSL-2000

⁵⁹ <https://f-carbon.com/product/>

⁶⁰ <http://www.epitech.co.jp/>

⁶¹ <https://www.osaka-cu.ac.jp/ja/news/2021/210909>

⁶² https://www.rpip.tohoku.ac.jp/seeds/profile/115/search_keyword:/lang:jp/?iok=1642473373

⁶³ <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-07-14-1>

また、複合変調フォトニック結晶を用いて、広範囲2次元ビーム走査を実現し、新たなLiDARセンシングシステムの実証にも成功した⁶⁴。

さらに、スマート製造への展開に向けた連続動作デバイスへの実現や、機械学習を活用したビーム形状のオンデマンドな制御等のスマート化社会の実現に貢献できる技術開発を行っている。

本フォトニック結晶レーザーに関して、京都大学にフォトニック結晶レーザー拠点(PCSEL COE)を形成し⁶⁵、多くの企業や機関に対し、デバイスその「モノ」の提供や、デバイス製造に関する知見、すなわち、「コト」の提供を開始している。現在、拠点に関わる企業・機関数は、60を上回る。また、野田はフォトニック結晶技術全体に関して、CREST研究終了後、民間企業との共同出願をふくめ、30件以上の国内特許(外国特許を含めると45件以上)出願している。

⁶⁴ <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-07-22-0>

⁶⁵ <https://pcsel-coe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>