

CREST・さきがけ「藻類・水圏微生物の機能解明と制御による
バイオエネルギー創成のための基盤技術の創出」
複合領域事後評価報告書

総合所見

本複合研究領域は、高い脂質・糖類蓄積能力や多様な炭化水素の産生能力、高い増殖能力を持つ藻類・水圏微生物を利用したバイオエネルギー生産のための基盤技術創出を目的として2010年に開始された。近年急速に発展したゲノミクス・プロテオミクス・メタボロミクス・細胞解析技術等を含む先端科学技術を活用し、藻類・水圏微生物の持つバイオエネルギーの生産等に有効な生理機能や代謝機構の解明を進めるとともに、それらを制御することによりエネルギー生産効率を向上させる技術開発研究を進めた。さらにこれに付随する有用物質生産や水質浄化等に資する技術の創出に関する研究成果も得られている。バイオエネルギー生産には、生物学・工学・化学等の複数の分野の研究者が協力する必要があるが、本複合研究領域では各分野に精通したグループの有機的協働による画期的な基盤技術の創成に資する CREST と、個人研究者の独創的発想による個々のボトルネックの解決に資するさきがけを、1人の研究総括の下で一体的に推進する体制に特色がある。CREST とさきがけの双方について、生物系（植物生理学、藻類学、分子生物学、遺伝学）、物理系（生物物理学）、化学系（触媒化学）、および工学系（生物工学、化学工学）の世界的な研究者に加えて、産業界の実務担当者も領域アドバイザーとして招き、課題の採択から研究成果の評価まで、研究総括の下で一体的に推進したことで、将来のバイオエネルギー創成につながる革新的基盤技術シーズを数多く開発しており、戦略目標を十分達成したと言える。特に、CREST とさきがけで緊密な人的交流と研究交流を行ったことで、新たなイノベーションにつながる研究成果（論文、特許、国際学会等での報告）が数多く生み出されている。複合領域としての設定、研究総括による研究の方向性の判断とアドバイザーの助言は適切であり、我が国の科学技術の進歩と基盤技術の創出に多大なる貢献をしている。今後の社会実装に向けて、これまでに得られた技術シーズと情報を産官学で共有して新たなエネルギー資源の実現に踏み出すことが望まれる。

以上を総括し、本複合領域は総合的に優れていると評価できる。

1. 複合領域としての成果について

1.1 さきがけ

(1) 研究領域としての研究マネジメントの状況

本研究領域は、藻類・水圏微生物を利用したバイオエネルギー・有用物質生産のための基盤技術の確立を目的にしている。この戦略目標の達成に向けて、生物学、化学、農学、および工学等の様々な専門分野から研究者が選ばれ、多面的な課題が採択されている。研究者の

所属については偏りがなく、挑戦的な課題に取り組む本研究領域では、若手の研究課題採択が鍵となっていた。チーム型研究の CREST と比較すると、個人研究者の独創的発想に依存する多様な新規技術の創出、また人材の育成という観点での課題や人選がなされていることが分かる。

領域アドバイザーの構成は、多様な専門領域における優れたアドバイザーが選ばれており、所属機関にも偏りがなく良く考えられていた。

さきがけ領域会議への CREST 研究者の参加や、さきがけの研究進捗にあわせて CREST と共同研究を推進するシステムを構築し、CREST 研究者との交流の機会を設けることで、領域内の連携が効果的に推進された。特に、さきがけの研究期間終了後、さきがけ研究者を関連する CREST チームに参加させることで、領域全体が活性化された。さらに、研究見直しや研究加速費を有効に活用して、より多くの成果を生み出すように研究マネジメントがされており、制度設計も非常に有効であった。

採択された研究課題の研究者 27 名中の 17 名が、さきがけ研究期間中開始後に PI (Principal Investigator) として自立した職位を獲得し、新たに歩み始めたことは特筆に値する。また、多くの研究者が国際会議ならびに国内会議への招待講演や表彰を受けていることから、優れた研究者を採択し優れた研究成果を挙げていると言える。

以上により、本研究領域の研究マネジメントは特に優れていたと評価できる。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

さきがけの研究成果は非常に多彩で、これまでバイオエネルギー研究に関わってこなかった研究者も多数が参画していたこともあり、独創性が高い研究成果が多く、今後の進展が期待できるものであった。特許 (出願 31 件、権利化 3 件)、査読付き論文 (239 件)、顕彰・受賞・国際学会への招待講演 (85 件) は多く、特に論文については国際的に著名な多くの雑誌に成果が報告されており、科学技術イノベーションの発展に結びつく先駆的なもので、国際的にも高い水準の成果として認められる。

特に、国際的にもリードする研究成果として、人工補酵素の設計と合成による次世代太陽電池システムのプロトタイプ開発 (天尾)、代謝改変による PHB の増産 (小山内)、藻体からの油脂抽出法の開発 (神田)、代謝プロファイリング手法の開発 (蓮沼)、人工代謝経路確立によるブタノール生産法の開発 (本田)、高速型ミオシン発現によるバイオマス増強法 (富永)、海底深部帯水層由来のメタンガス生成機構の解明と利用法の開発 (木村)、自己溶菌による油脂生産法 (朝山)、光スイッチの開発 (成川)、円石藻の形質転換法 (遠藤)、進化学を用いた色素の生産法 (梅野) が挙げられる。

これらの研究成果は科学的に大きなインパクトが期待できることから、JST の研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) や未来社会創造事業、戦略的創造研究推進事業、また NEDO の事業等に継承されて社会実装に向けて研究が継続されている。

以上により、本研究領域としての戦略目標の達成状況は特に高い水準にあると評価でき

る。

1.2 CREST

(1) 研究領域としての研究マネジメントの状況

採択された研究課題の構成、研究者の専門分野・所属等については、戦略目標を達成していく上で適切であった。バイオエネルギーとしては、種々の出口（油脂、アルコール類、アンモニア、メタン、ワックスエステル、炭化水素）をカバーする課題を選んだことは評価できる。

領域中間評価時にも指摘されていたが、13 課題中 4 課題が微細藻類の中で形質転換が最も容易なモデル生物のシアノバクテリアを取り扱う研究であった。バイオエネルギー創出の基礎研究として、研究の進捗が期待できる研究材料としてシアノバクテリアは適しているが、社会実装を意識した研究としては疑問が残った。他の研究材料に注力した研究課題を選択することで、今後の社会還元の手を広く開け続けることができたのではないかとと思われる。

領域アドバイザーの構成は、さきがけの場合と同様に適切であったと考えられる。さらに、2016 年に領域運営アドバイザーを任用したことは、研究成果の社会還元を後押しし、本研究領域の研究者の意識を高める点で意義があった。一方で、領域アドバイザーに、産業化を見据えた観点から、「生産物の分子構造」「不純物」「回収・抽出」等の問題点を、藻類等に課題設定できる専門家が配置されるとより良かったと思われる。

各研究課題評価では適切なアドバイスがなされており、領域会議などを通じて、研究領域の運営方針の周知および研究進捗状況の把握がなされた。また、研究領域内の共同研究に加えて企業との連携の促進も進められていた点は高く評価できる。さらに、イノベーション創出への貢献の達成度により各課題に対して積極的に指導を行い、研究費の配分に反映させた運営は、優れたマネジメントであった。特に、河野チーム、太田チーム、宮城島チームのような社会実装に踏み出すことができた成果は高く評価できる。一方で、目標とした研究成果が上がらない研究課題に対して、もう少し踏み込んだ研究マネジメントをしても良かったのではないかとと思われる。

以上により、本研究領域の研究マネジメントは優れていたと評価できる。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

① 研究成果の科学技術への貢献

研究成果は、チームによって到達度に差は認められるが、査読付き論文（344 件）および国際学会への招待講演（166 件）として多く発表されている。特に論文については基礎研究や実用化技術に関する研究成果を掲載する国際的に著名な雑誌に報告されており、総合的には、国際的にも先駆的で高い水準の成果が発信されたと認められる。

注目すべき研究成果として、高熱耐性紅藻における遺伝子導入ならびに改変法の確立（宮

城島)、超好熱菌におけるペントース代謝系の発見(跡見)、ボトリオコッカスにおける MEP 経路の新酵素の同定(岡田)、ユーグレナのゲノム配列決定や代謝改変の成功(石川)、炭化水素蓄積を支配する「アルケノンボディー」のハプト藻での発見(白岩)、緑藻における共発現データベースの構築と公開(太田)、酵素工学による加水分解反応の改良(久堀)が挙げられる。

以上により、研究成果の科学技術への貢献については、高い水準にあると評価できる。

②研究成果の科学技術イノベーション創出への貢献

現時点で特許が 51 件出願されている。複数のチームが今後の産業化に発展する試みを既に開始している点は十分に評価できる。一方で、「技術的・社会的に大きなインパクトを期待できる成果」と言える段階に達していない研究課題も見受けられた。

有機溶剤耐性のある株の獲得はバイオ製品の多様化や製造効率の観点から、イノベーション創出に貢献できると思われる(花井)。また、産業化においてコスト削減効果が大きな課題となる「油分の回収」について、さきがけ研究者を取り込んで自己溶解する藻を開発した点は、工学的な回収方法以外に、回収の可能性を示したことは意義がある(早出)。さらに、個々の藻類や菌類で、ゲノム解析・機能改変等が可能となり、成長速度増強や代謝経路構築などの研究の出口が見えてきた。これらの技術は、将来、実用化に近づいた藻類や菌体(つまり別の藻類や菌体)にも適用できるはずであり、その意味でもイノベーション創出への貢献度は高いと思われる。

他の事業では、2020 年の東京オリンピックまでにジェット燃料の供給を目指した微細藻の利用が検討されており、更なるバイオエネルギーの推進と社会実装には、今回得られた個々の研究成果が統一的に利用できるプラットフォームの構築が期待される。

CREST として優れた研究成果が得られているが、本研究領域での研究費の規模を考えると、採択された研究チームの構成には更なる多様性と研究成果の公開性が求められる。今後、得られた生物資源や知財を確保しつつ公開し、日本の研究者が有効活用できるようにしておくことが必要である。また、微細藻等を利用したバイオエネルギーは、現在でも国際的な競争の中にある研究領域であり、世界的に巨額な資金を投入している国・組織(例えば、中国・多国籍企業・複数のプライベート財団)と比較して、本 CREST 研究領域で得られた研究成果による科学技術イノベーション創出を判断することは現時点では難しい。

以上により、研究成果の科学技術イノベーション創出への貢献については、高い水準にあると評価できる。

2. 複合領域の活動・成果を踏まえた今後の展開等についての提言

本研究領域で行われたバイオエネルギー創生のための基盤技術を整備する研究開発は大きな進展が認められるが、一方で、未解決の課題や取り扱う生物種固有の解決困難な問題点が明らかになってきた。本研究領域で生まれた優れた成果を将来の科学技術の進歩や産業

化・実用化していくためには、当面は、継続した支援が必要であると思われる。

また、研究成果の社会実装には、得られた成果の新規性・重要性・展開性を、ベンチャーを含む民間企業に対してPRする「マッチング」の場を設けることも期待される。

さらに、研究により得られた「ビッグデータ」を公開し維持する点が重要である。今後、バイオとデジタルやAIの融合による「スマートセルインダストリー」が社会に大きな変革をもたらすのは確実であり、産業競争力懇談会（COCN）やバイオインダストリー協会でも議論が進められている。このような新技術の創成とその発展には、今後、個別の学問領域として分散している基礎生物学・生命科学・生物工学・農芸化学・水産資源学・培養工学・化学工学等の基盤研究を担う研究者と、民間企業を含むこの分野の研究者をさらに組織化するとともに、その技術開発力と研究に対する意識向上を図り、社会実装に向けた研究開発を実施する事が肝要である。

一方で、産業化・実用化には、事業者や投資家としての目線で経済価値を考慮した評価も不可欠である。研究成果を論文や学会での講演などの研究者目線だけでなく、社会還元、産業化・実用化を担う立場の方々の率直な評価を受け、実用化可能な成果に集中して取り組むことが重要であり、本研究領域の研究者の中から事業の担い手が出て来ることを期待したい。