

## ERATO「橋本光エネルギー変換システム」プロジェクト 追跡評価報告書

### 総合所見

ERATO「橋本光エネルギー変換システム」プロジェクトは、自然界で身近に存在する安全で安価な材料を用いて、新しいエネルギー変換材料・システムを開発するという野心的な目的を掲げ、橋本和仁研究総括（現、国立研究開発法人物質・材料研究機構（NIMS）理事長）の指揮のもと、有機化学、物理化学、電気化学、微生物学など異なった学問領域の研究者が、有機高分子材料グループ・金属錯体グループ・微生物グループにそれぞれ所属し「目的指向型基礎研究」を展開した。その結果、有機高分子材料グループは、各種半導体ポリマーを開発すると共に、ナノ構造制御、自己組織化、薄膜・界面制御を巧みに組み合わせ、2010年当時、世界最高の短絡電流密度を有する全ポリマー型有機薄膜太陽電池を創出した。金属錯体グループでは、希少金属や有害金属を使用しない環境調和型光触媒系の構築を進め、多核クラスター間電子移動に基づく光駆動多電子移動型CO<sub>2</sub>還元触媒や高効率の酸素発生触媒を見出した。微生物グループでは、遺伝子工学的な手法も駆使し細胞外電子伝達の機能解明を進め、長距離電子移動などに新しい現象を見出すと共に、これらの成果を利用した高効率微生物燃料電池を開発した。各グループ間の連携も活発に行われ、特に金属錯体グループと微生物グループの連携研究では、深海熱水噴出孔が天然の電池として機能することを見出し、大きなシナジー効果が発揮された。さらに、鉄系鉱物などが関わる深海系での電気化学反応や微生物と無機材料の新しい電子伝達経路を見出し、「深海電気化学」とも呼べる新しい学問領域の扉を拓いたことや細胞外電子移動の分野で新しい学理を提唱したことは特筆すべき研究成果として非常に高く評価された。

本研究プロジェクト終了後も、生物学的視点を取り入れながら、国際的な水準からみても極めて高いレベルの研究を継続している。その研究成果は、JST さきがけ研究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）をはじめとするプロジェクト研究として展開され、多様な種類の競争的研究資金の継続的な獲得にも繋がり、本研究プロジェクトを起点とした新しい研究を多面的に力強く推進している。本研究プロジェクトの期間中、及び終了後の研究成果は海外の著名な学術誌に多数発表され、その数はあわせて268報に達している。その影響力を表す指標の一つでもある論文の被引用数の総和は2017年11月時点で、プロジェクト期間中とプロジェクト終了後で、それぞれ7659、961に達しており、国際的に極めて高い水準の研究が継続的に実施されていると同時に、関連分野に強い影響を及ぼしていることがわかる。

人材育成の面での貢献も大きく、次世代のエネルギー変換に関わる科学技術を基礎および応用の両面で牽引する多くの人材を輩出している。特にグループリーダーとして本研究プロジェクトの研究を推進した4名は、3名が国内有力大学の教授に、1名は理化学研究所のチームリーダーに就任し、この分野の研究を先導している。また、日本人研究員も5

名中、教授1名、特任講師1名、助教1名、主任研究員2名と、着実にキャリアアップしており、今後、これらの研究者が異分野融合をさらに推し進め、日本の科学技術の進歩に多大な貢献をしてくれることが十分期待できる。

本研究プロジェクトでは、「目的指向型基礎研究」をプロジェクト理念に掲げ、開始時から応用展開を意識した明確な目標を設定し研究を遂行した。本研究プロジェクトにより、基礎科学の面では「深海電気化学」のようなこれまでに無い新しい研究領域や「電気合成微生物」なる概念が創出され、また、細胞外電子移動の学術的理解の深化に大きく貢献し、新しい学問の潮流を創成する若きリーダーが誕生するに至っている。一方で、研究成果の社会還元を視野に置いた研究も着実になされ、後述するように研究成果の一部は直ちにNEDO ナショナルプロジェクトへと継承され、省エネルギー型排水処理システムが社会実装されつつあることは高く評価できる。このような研究スタイルは、最近注目されている持続可能な開発目標（SDGs）を意識した研究やバックキャスティング型研究のさきがけと考えることもでき、研究プロジェクト終了から今日までの数年間を俯瞰すると、応用を指向した研究であっても基礎科学の発展にも大きく貢献できることを実証した卓越したプロジェクトに進化発展を見せていると評価できる。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究プロジェクト終了後も継続して精力的な研究活動が行われており、成果の発展状況も極めて優れている。研究総括を代表者とする NEDO ナショナルプロジェクト・実用化促進事業「グリーン・サステナブルケミカルプロセス基盤技術開発」や科研費特別推進研究「細胞外電子移動を基軸とした生体電子移動論の開拓」、但馬を研究者とするさきがけ「太陽光と光電変換機能」（早瀬修二研究総括）の研究課題「光電変換過程の高効率化を目指した有機界面の精密制御」、加藤を研究代表者とする環境省環境研究総合推進費循環型社会形成推進研究事業「電気共生型メタン生成を利用した有機性廃棄物の高効率バイオガス化技術の開発」など、プロジェクト終了後も各メンバーが多く的大型研究資金を獲得しつつ、本研究プロジェクトで得られた研究成果を多面的に力強く展開している。以下に新たな展開について研究課題に分けて記載する。

①有機薄膜太陽電池： 高効率な有機薄膜太陽電池の開発を目指し、プロジェクト期間中に開発したナノ構造や界面制御方法をさらに発展させ、有機半導体デバイスで重要な自己組織化的ナノ構造制御やドナー／アクセプターの界面構造が太陽電池性能へ与える影響に関する詳細な解析に継続的に取り組んでいる。現状では大幅な太陽電池性能の向上には繋がっていないが、ナノ構造や界面の影響を様々な方法で解明していくことは、有機薄膜太陽電池の高効率化に繋がるだけでなく、有機ELや有機トランジスタなど将来のフレキシブル有機薄膜デバイスにも役立つ知見となるため、非常に重要である。

②微生物燃料電池を利用した省電力排水処理プロセスの構築： 実用化を目指して、NEDOの「微生物触媒による創電型廃水処理基盤技術開発プロジェクト」として2015年度まで継

続検討され、2016年度からはNEDO「省エネルギー型廃水処理デバイスおよびシステムの実用化開発」プロジェクトで企業と共に実用化研究が進められた。実用的な観点から電極の開発を進め、微生物燃料電池の原理を利用した従来法とは全く異なる排水処理法を確立し、社会実装に繋げたことは評価できる。

③人工光合成・酸素還元触媒開発： プロジェクト期間中のマンガン酸化物の酸素発生反応の機構解析結果等を発展させ、高効率で低コストな酸素発生電極の開発に繋げた。また、鉄や窒素をドーピングした芳香族ポリマーから作製した電極が優れた酸素還元特性を示すことを明らかにした。硝酸還元や水素酸化触媒の開発も行い、水素酸化触媒では、窒素原子を介して単原子白金を分散担持させる触媒を開発し、従来の白金ナノ粒子担持燃料極に対し、白金使用量を80%削減できる成果を得ている。

④細胞外電子移動の深化： プロジェクトで見出した細胞外電子移動現象の解明を進め、細胞外電子移動で新しい視点からの基礎的研究成果を積み重ね、この現象のより深い理解に繋がった。本研究プロジェクト終盤の2012年から2017年まで科研費特別推進研究として「細胞外電子移動を基軸とした生体電子移動論の開拓」プロジェクトを推進し、新しい電子伝達メディエーターの開発を進め、電流生産菌の電子移動機構の解明や概日リズムの計測と制御に成功した。さらに、発電菌の新しい代謝反応を見出すとともに、微生物の長距離電子輸送系の解明、微生物金属腐食現象の解明など電子移動論的研究を系統的に進めた。この研究で電気をエネルギー源として増殖する「電気合成微生物」を発見し、光や化学物質の他に電気が第3のエネルギーとして食物連鎖を支えている可能性を提示するなど、この分野の基礎科学の進展に大きく寄与したことは特筆できる。

⑤深海電気化学の創成： 光が届かない深海では微生物が電気で増殖するという仮説の下、中村らによる人工チムニーを用いた海底発電の実証実験により、天然の深海熱水噴出孔周辺での熱水から海水への硫化鉱物を介した電流を発見したことは、本研究プロジェクトが生み出した深海電流生態システム概念を深化・展開するものと言える。また、深海の導電性材料の研究から、深海における発電現象、電気化学的反応、およびその生命起源との関わりを追求した一連の研究成果により、「深海電気化学」という新しい研究領域が創成された。

上記④⑤の一連の研究成果は生命起源についての考察に新しい視点を与えるものであり、新しい学理へと拡張させており、極めて高く評価される。

## 2. 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

### (1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

上述したように、本研究プロジェクトからは数々の画期的な研究成果が生み出され、新研究領域が創成され、新しい概念や理論の提唱に至ったものが多い。本研究プロジェクトの期間中およびプロジェクト終了後にはあわせて268報の論文が公表されており、特に学際的な研究によって、関連分野を格段に進展させる成果や、新機軸を打ち立てるような優れた成

果が生み出されてきたことは特筆される。

金属錯体グループと微生物グループの融合的研究からは、特に微生物の細胞外電子移動について、そのメカニズムの詳細解明、燃料電池開発や太陽電池開発へのユニークな応用展開、光を必要としない新しい生物群や生態系の存在を示唆する生命現象の発見など、関連分野に強いインパクトを与える魅力的な成果が多く生まれている。細胞外電子移動の現象自体は古くから知られ、そのメカニズム解析も行われてきたが、多くは微生物学分野の研究者による生化学的解析であり、その核心部分には不明な点が多く残されていた。本研究プロジェクトでは期間中から今日に至る変遷の中で、無機化学・電気化学の専門家と微生物学者の共同研究によって、細胞と電極との直接的な相互作用による電子授受の証明、生細胞における電子伝達タンパク質の酸化還元状態の分光学的観察、細胞外に微生物自らが作る硫化鉍物を利用した長距離電子輸送現象の発見、電気エネルギーを利用して増殖する微生物の発見、電極電位によって微生物の代謝・遺伝子発現制御が可能であることの実証など、革新的な研究成果が実に多く生まれている。光エネルギー、化学エネルギーに次ぐ第三のエネルギー源として電気を利用して増殖する「電気合成」微生物の発見と海底での電気化学反応の理解は、深海における電気化学反応の体系化を指向した「深海電気化学」という新しい学問領域の創成に繋がり、「光エネルギー変換」という本研究プロジェクトの当初の枠に収まらない新分野創出の代表的な例と言える。

また、有機薄膜太陽電池に適した新規な有機・高分子材料の探索と、薄膜中の電荷分離・電荷移動効率向上に関する研究の発展では、共役系ブロックコポリマーの相分離構造を用いて太陽電池に理想的な構造を自発的に形成させることに成功し、大面積太陽電池を簡単な塗布プロセスで作成するための基礎技術を構築した。さらに、生体電子移動系を参考に金属間電荷移動遷移に着目した人工光合成ナノデバイスの開発を進めた。本研究プロジェクトで得られた微生物のエネルギー変換システムの分子メカニズムに関する知見は、高性能微生物燃料電池や微生物を利用した省エネ型排水処理システム構築にも確実に繋がった。

このように、個別テーマの進展だけでなく、「深海電気化学」の学問領域の創成や細胞外電子移動に関わる学術的知見を大きく深化させたこと、微生物燃料電池と機能性材料制御技術を基盤に実用化技術を創出したことは、本研究プロジェクトが掲げた「異分野融合」が結実した大きな成果であり、科学技術の進歩に対する大きな貢献として評価できる。

## (2) 研究成果の応用に向けての発展

本研究プロジェクト終了後も、環境負荷低減のための実効的ナノ材料・システムの構築など応用展開を意識した「目的指向型基礎研究」という研究総括の考え方は継承され、新しい学理創成を含む科学技術研究分野の発展と進行へと繋がっている。また、企業との連携も進み、多くの分野で実用化に向けての進展が認められ、特許出願や登録にも繋がっている。例えば、本研究プロジェクト期間中の出願は 35 件（国内 20 件、国際 15 件）で、登録が 16 件（国内 12 件、国際 4 件）と非常に多いが、プロジェクトが終了しても、出願は 21 件（国内

12 件、国際 7 件、US 出願 2 件) で、登録が 7 件 (国内 4 件、国際 3 件) と続いている。プロジェクト終了後も将来の産業化を視野に入れた特許出願を継続させている点は高く評価される。産学共同の出願も多く、パナソニック (株)、旭硝子 (株)、住友化学 (株)、JXTG エネルギー (株)、アクアス (株) など国内複数の企業と共願があり、個々に広範な応用も考えられている。このように、研究成果の応用に向けた取り組みはプロジェクト終了後も強力に進められており、知財関連の活動や、企業との連携も高いレベルを維持し続けている。

微生物燃料電池については、本研究プロジェクトの終了後も 2 度の NEDO「創電型廃水処理技術開発」プロジェクトで開発が進められた。企業との共同研究により、電極開発や微生物機能制御法開発などが行われ、実工場廃水を用いた実証実験が行われた。最大で 84% の消費エネルギー削減、活性汚泥法同等の処理性能が達成され、社会実装が近づいている。また、微生物太陽電池については、太陽光による光合成で植物が生産する有機物を電流生産菌に利用させ、これによって発電するシステムを水田などで構築し、電極の検討などによる出力の改善も行われている。出力は微小であるため想定される用途は環境モニタリング用現地電源などに限定されるが、環境に優しい発電技術として注目される。

本研究プロジェクトで得られた研究成果については、メディアなどを通じた社会発信も活発に行われている。本研究プロジェクトの研究成果が教科書や著書、メディアを通じて広く、分かりやすく喧伝され、子供たちに科学に対する夢を与えていることは、教育面で大いに貢献していると評価できる。

### (3) その他の特記すべき波及効果

本研究プロジェクトに参画した研究者の多くがキャリアアップを果たしている。期間中にグループリーダーを務めた 4 名の研究者はそれぞれキャリアアップしている。但馬は東京大学講師から理化学研究所グループリーダーに、石井は東京大学准教授から東京大学教授に、中西は東京大学特任准教授から大阪大学教授に、渡邊は海洋バイオテクノロジー研究所研究員から東京薬科大学教授に、それぞれ昇進した。また、加藤も海洋バイオテクノロジー研究所研究員から産業技術総合研究所主任研究員 (北海道大学客員准教授兼務) に、プロジェクトメンバーと協働して活動した中村は東京大学助教から東京工業大学教授 (理化学研究所チームリーダー兼務) に、同じく岡本は東京大学博士課程学生から NIMS 主任研究員に、それぞれキャリアアップした。博士研究員として参画していた研究員もそれぞれキャリアアップして活躍している。このように当該分野の推進を担う次世代研究者の育成・輩出という観点からも、本研究プロジェクトは顕著な成果を上げたと言える。

但馬は、科学技術分野の文部科学大臣若手科学者賞を「機能性高分子材料におけるナノ構造制御の研究」で受賞 (2013 年) しており、プロジェクトの成果を大きく発展させ、新規な有機半導体高分子材料の開発と、それらの有機電子デバイスへの応用に取り組んでいる。最近では、理化学研究所の他のチームとの共同研究の成果である「超薄型有機太陽電池で駆動する皮膚貼付け型心電計測デバイス」を海外の一流紙で発表し大きな注目を集めた。中村は、

プロジェクト期間中の深海微生物電気化学の研究を独自の視点で発展させ、科学技術分野の文部科学大臣若手科学者賞を「深海生命圏を支える生体電子移動論の開拓に関する研究」で受賞した（2016年）。現在、文部科学省のWPIプログラムによって設立された東京工業大学地球生命研究所の若手主任研究者・教授としてこの新しい研究分野を牽引している。最近、微生物の脱窒酵素を模倣した人工触媒を開発し、世界最高レベルの効率で亜硝酸イオンを窒素に無害化することに成功し、注目を集めている。同世代の研究者の中では、中村の論文の被引用数は極めて高く、世界の研究者から注目されていることが分かる。中西は、大阪大学に移り、光エネルギー変換システムの研究を発展させており、白金使用量を大幅に削減した世界最高レベルの性能を有する燃料電池用電極を開発し、最近注目されている。渡邊は微生物燃料電池の実用化研究を推し進めており、創電型廃水処理技術開発（NEDOプロジェクト）では、中核研究者としてシステムの社会実装に貢献した。渡邊の研究成果は、NHK「サイエンス ZERO」などメディアにも多く取り上げられ、一般市民を対象とした啓蒙活動も積極的に行っている。

### 3. その他

本研究プロジェクトでは研究総括のリーダーシップの下、環境保全を念頭に自然界のありふれた材料を用いて新しいエネルギー変換材料・システムを開発するという明確な目的を掲げ「目的指向型基礎研究」を展開したことが、今日大きな発展を見せている原資となっている。近年、前述したSDGsやバックキャストの重要性が指摘され、社会と関わる研究の必要性が以前に増して強調されるようになった。本研究プロジェクトはそのような研究のさきがけとなるものである。