

CREST・さきがけ「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」 複合領域中間評価報告書

総合所見

本研究領域は社会実装を前提とした環境発電デバイスの実証を目標とし、①新原理の解明及び物質・デバイスの創製、②理論及び解析・設計技術の開発について、CRESTでは両者を、さきがけでは一方を必須とした。研究総括は多様な技術からなる環境発電を体系的に扱うため、エネルギー源を熱、振動、電波に分類し、またそれらの共通要素をエネルギー取込み機構、エネルギー変換材料、電力変換回路に分類し、これにより環境発電技術全体を網羅し、かつ技術の関連を明確化したうえで研究マネジメントを行った。採択された研究課題は多様なエネルギー源と技術成熟度を網羅出来ており、全体としてはバランスが取れ、テーマ間の連携もとれている。また、領域アドバイザーの構成も適切である。

本研究領域の特色は CREST とさきがけの完全複合領域として運営されていることであるが、合宿形式の合同会議、設備の共同利用、国際会議の開催などが実施され、その結果、CREST とさきがけの間で新テーマの発生やチーム再編など、様々な協働や人的交流につながっている。また、CREST では最適な研究者群を分野融合的に形成し、更に研究を推進するため、融合加速方式（ステップアップ評価）が実施されている。この方式に則り、本研究領域では前半を基盤技術、後半を実証研究とし、中間評価で研究をいったん終了させた後、補完技術や必要人材を見極めてチームを再編し、より最適化した新チームで研究を再スタートさせている。融合による研究加速は、さきがけからステップアップした野村チームで顕著である。

学術的には、本研究領域合計で論文 604 報、招待講演 650 件の発表があり、受賞は 47 件にのぼる。被引用数 50 以上の論文も 10 報あり、質量ともに十分な成果が得られている。論文の被引用数からは、中辻チームの異常ネルンスト効果の 118 を筆頭に、森チームの磁性材料の熱電効果、塩見チームのナノ構造中のフォノン伝導、さきがけの野村のフォノンの熱輸送に関する研究成果などが注目すべきものとしてあげられる。

産業貢献においては CREST の各チームが共同研究などで企業と連携しているほか、さきがけでは産業化へ向けた指導の一環として、SciFoS 活動（企業訪問）と展示会参加を行った。特許出願は 105 件あり、全体として国際特許出願がやや少ないものの、適切に出願されていると言える。また、社会実装へ向けた動きとしては、上野チームが磁歪振動でベンチャー企業(V-Generator)を起業し、サンプル出荷中であること、年吉チームは圧電振動で上市予定であることなどが注目される。鈴木チームは IEC-TC47 の振動発電特性評価法の国際標準化を進めており、いずれの研究成果も高い水準にあると考えられる。

以上を総括し、本複合領域は総合的に特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 CREST

(1) 研究領域としての研究マネジメントの状況

本研究領域は社会実装を前提とした環境発電デバイスの実証を目的とし、①新原理の解明及び物質・デバイスの創製、②理論及び解析・設計技術の開発の両者を行っている。多様な技術からなる環境発電を体系的に扱うため、研究総括はエネルギー源を熱、振動、電波に分類し、またそれらの共通要素をエネルギー取込み機構、エネルギー変換材料、電力変換回路に分類し、環境発電技術全体を網羅し、かつ技術の関連を明確化したうえで研究マネジメントを行った。

研究課題の選考においては、多様なエネルギー源と技術成熟度を網羅出来ており、技術成熟度としては、原理解明、実証研究、技術開発の各段階にわたるテーマを採択している。個々の研究課題は基礎または開発に偏ることがあるが、研究領域全体としてはバランスが取れ、テーマ間の連携もとれている。電波発電は実用化が難しい分野であるが、電力変換回路とのシナジーがあり、領域としては有用な選択である。なお、有機系材料のテーマがあれば、さきがけとの連携がさらに高まったと思われる。

領域アドバイザーの専門は材料から市場まで、所属は産官学にわたり、いずれも各分野の第一人者であり、構成は適切と考えられる。

本研究領域の進捗評価については、融合加速方式（ステップアップ評価）が有効に機能している。前半を基盤技術、後半を実証研究とし、補完技術や必要人材を見極めて新チームに再編している。融合による研究加速は野村チームで顕著である。さきがけとの完全複合領域運営も適切であり、合宿形式の合同会議、設備の共同利用、試作評価解析での協力、国際会議の開催などを実施している。その結果、CREST とさきがけの間で新テーマが発生し、チームの再編が出来ている。また、テーマをまたぐ共著論文の発表、研究業績による若手の昇進にもつながっている。また、本研究領域ではニュースレターの発行、学会での特別企画、論文誌の特集号の企画などを実施し、領域主催の国際会議とシンポジウムを9回、領域としての展示会参加を6回実施するなど研究成果の公開と広報にも努めてきた。

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に向けた状況

① 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

本研究領域の13チーム合計の発表論文は395報、招待講演は国内176件、国際258件である。論文の被引用数は、中辻チームの異常ネルンスト効果の118を筆頭に、50以上の論文が7報ある。受賞では森チームのnano tech大賞、年吉チームの先端技術大賞など合計20件があり、産業技術関連が多い。また、ゼーベック効果、異常ネルンスト効果、ペイズ最適化による物質探索、熱電性能の磁性増強、平面ラットリング、各種の新規計測法、設計計

算方法、製造技術において相互連携による新規成果創出が認められる。

また、本研究領域で研究開始後 3 年目に実施されるステップアップ評価で、中辻チームは基礎研究を重視する研究事業等での実施が適当と判断され、高い評価にも関わらず採択されなかったが、反強磁性体を用いた熱電発電で新規 CREST「トポロジカル材料科学に基づく革新的機能を有する材料・デバイスの創出」研究領域に採択された。森チームはステップアップ評価採択後に、磁性半導体熱電材料で大規模プロジェクト型未来社会創造事業に応募し、2019 年度に採択され、本研究領域からは卒業となったが、技術実証研究による更なる研究の進展が期待できる。

以上により、研究成果の科学技術への貢献については、特に高い水準が期待できる。

② 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

本研究領域の研究成果で社会的・経済的なインパクトを期待できるものとして、発電材料の低価格化のため、熱電材料の高性能化（塩見チーム）と集積回路技術による量産化（野村チーム、渡辺チーム）の成果がある。また、環境対策として、非鉛圧電薄膜（神野チーム）、希土類フリー熱電材料（森チーム）の成果がある。年吉チームは振動発電デバイスで先端技術大賞（経産大臣賞）を受賞し、産学連携として、年吉チームは鷺宮製作所と、野村チームは前田建設、凸版印刷と、神野チームはロームと共同研究を実施している。鈴木チームは IEC-TC47 の振動発電特性評価法の国際標準化を進めており、研究水準の評価と応用探索の両者に貢献している。

社会実装へ向けた動きとして、1mW レベルのデバイス技術を背景に、年吉チームは圧電振動で上市予定（鷺宮製作所）であり、上野チームは磁歪振動でベンチャー（V-Generator）を起業し、サンプル出荷中である。

本研究領域 13 チーム合計の特許出願は国内 53 件、国際 11 件で、年吉チームが特許出願 18 件、上野チームは国際出願 7 件で技術を権利化しているのが目立つが、領域全体としては国際特許出願が少なく、将来環境発電に関する国際的なデファクトスタンダードを取りに行く際に障害となる可能性がある。また、上記商品の現時点の市場は小さく、電池による代替も可能と思われる。社会的・経済的インパクトについて、世の中が変わる期待感を得るには、新たな市場形成を待つ必要があると思われる。

最終評価に向けては、目標値の根拠が説明されることが望ましい。発電量の目標値を 10cc で μW ~ mW としているが、1 次電池で単純計算すると、 $1\mu\text{W}$ なら 360 年、 1mW なら 4 か月の電池寿命となる。将来の目標として、1 次電池や太陽電池を桁違いに超える性能あるいは特質を設定し、現在の目標から将来の目標に至るシナリオを示せば評価が高まるであろう。

以上により、研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献については、高い水準が期待できる。

1.2 さきがけ

(1) 研究領域としての研究マネジメントの状況

本研究領域は社会実装を前提とした環境発電デバイスの実証とそれを担う人材育成を目標とし、①新原理の解明及び物質・デバイスの創製、②理論及び解析・設計技術の開発のいずれかを各研究課題に課している。多様な技術からなる環境発電を体系的に扱うため、研究総括はエネルギー源を熱、振動、電波に分類し、またそれらの共通要素をエネルギー取込み機構、エネルギー変換材料、電力変換回路に分類し、環境発電技術全体を網羅し、かつ技術の関連を明確化したうえで研究マネジメントを行った。

CREST との一体運営のため、複合領域全体として採択した研究課題の技術成熟度は基礎研究から実証研究まで、エネルギー源を熱、振動、電波、光と広くとっており、微小エネルギーを網羅するテーマ配置となっている。しかし、さきがけに限れば、技術成熟度はすべてが基礎、エネルギーは半分以上が熱である。偏りの主原因は当該分野の若手研究者数が多いためである。ただ、その中で有機やフレキシブル材料などの未開拓テーマを採択しており、従来技術の壁を破る意欲が見られる。

領域アドバイザーの専門は材料から市場まで、所属は産官学にわたり、いずれも各専門の第一人者である。さらに、若手研究者育成に熱意のある人材を選んでおり、構成は適切である。

本研究領域では合宿形式での CREST・さきがけ合同会議、サイトビジット、個別面談、国際会議の開催などにより、学術的専門性の高い指導を行った。また、産業化へ向けた指導の一環として、SciFoS 活動（企業訪問）と展示会参加を行った。その他、研究加速のため、研究管理技法「おにぎり」(For what、What's new、How to break the limit の自問自答)による進捗管理、設備の共同利用、試作評価解析での協力、学会の研究会設置による研究課題終了後の研究者連携を行っている。その結果、優れた研究業績、共著の論文発表、研究者の昇進、CREST への研究課題の発展などの成果が現れている。研究領域のマネジメントに関連して CREST と合同で、ニュースレター、学会での特別企画、論文誌の特集号の企画などを実施し、領域主催の国際会議とシンポジウムを 9 回、研究領域としての展示会参加を 6 回実施するなど研究成果の公開と広報にも努めている。

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ると評価できる。

(2) 研究領域としての戦略目標の達成状況

さきがけ研究者 27 人合計の論文数は 219 報、招待講演は国内 134 件、国際 82 件、受賞は 27 件にのぼる。特に、野村はフォノンの熱輸送で被引用数 50 以上の論文を 3 報出し、鈴木は MEMS 振動発電の動画論文で視聴数 4949 回を得るなど注目されている。著名な学術誌への掲載論文としては、多結晶 Ge/n 型ドーピング濃度の世界最高値(黒澤)、シリコン薄膜ナノフォトニクス(野村)、量子トポロジ物理学(藤岡)、TTF 光電変換シフト電流(中村)、n 型 SWNT(藤ヶ谷)、セレン化錫(酒井)、ホウ素ドープ CNT(野々口)、二酸化バナジウムの金属

—絶縁体転移(片瀬)、圧電薄膜共振子(柳谷)、電気二重層エレクトレット(小野)、エピタキシャル分極反転構造(柳谷)、振動発電カンチレバー加工法(鈴木)、圧電ポリマーフィルム(鈴木)などがあり、水準の高い優れた研究成果が得られた。

科学的・技術的なインパクトが大きいものとして、電波発電において、圧電トランスによる地デジ帯 12 倍増幅(柳谷)、振動発電において、3D 中空カンチレバーによる周波数制御(鈴木)、ナノロッドによる圧電特性向上(山田)などが顕著な成果としてあげられる。また、フレキシブル有機材料に対して、圧電材料のコスト低減(中嶋)、熱電材料の塗布法開発(村田)があり、応用範囲拡大に貢献している。

特許出願は国内 33 件、国際 8 件で、知財はやや少なめである。さきがけの研究課題は基礎研究が中心であるが、本研究領域では CREST に合流または昇格して実用化に進む体制となっているので、今後は期待される。

以上により、本研究領域としての戦略目標の達成状況としては特に高い水準が期待できる。