

研究領域「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」 事後評価（課題評価）結果

1. 研究領域の概要

本研究領域は、様々な環境に存在する熱、光、振動、電波、生体など未利用で微小なエネルギーを、センサーや情報処理デバイス等での利用を目的とした μW ~ mW 程度の電気エネルギーに変換（環境発電）する革新的な基盤技術の創出を目指します。

具体的には、2つの大きな柱で研究を推進します。1つは熱、光、振動、電波、生体等のエネルギーを電気エネルギーに高効率に変換または高度に利用するための基盤技術の構築とその源となる基礎学理の創出です。これらは、全く新しい原理・新物質または新デバイスなどを用いて、未利用の微小エネルギーを電気エネルギーに変換する研究であり、例えばスピンとトポロジーの相関等、革新的なエネルギー変換に資する原理の解明・実証、及びそれらを活用した新物質の創製や、従来の特長や機能を飛躍的に向上させる優れた物性を有する新物質の創製に挑戦します。もう1つの柱は、上記基盤技術の創出のための理論・解析評価・材料設計の研究で、エネルギー変換時における物理現象（材料物性、界面、輸送現象等）の新しい解析技術の構築や、物性理論に基づく、あるいは計算機シミュレーションを駆使した、新たな材料設計の指針を提示することに挑戦します。これら2つの柱は、相互補完的に密接に結びついて研究を進めることが非常に重要です。

したがって、本研究領域では、挑戦的な提案を求めつつ、領域終了時には、革新的な新原理、新物質、新デバイスが検証・実証できること、それらが次の研究開発ステージに繋がることを目指して研究を推進します。

そのため、研究総括及び副研究総括の強い統率の下、CREST・さきがけを複合領域として一体的に推進し、成果最大化のために研究チームの再編や研究進捗の調整、また課題間の連携などに取り組みます。

2. 事後評価の概要

2-1. 評価の目的、方法、評価項目及び基準

戦略的創造研究推進事業・CRESTにおける事後評価の目的、方法、評価項目及び基準に沿って実施した。

2-2. 評価対象研究代表者及び研究課題

2019年度ステップアップ評価採択研究課題（2023年度1年追加支援課題）

（1）年吉 洋（東京大学生産技術研究所 教授）

MEMS振動発電を用いたパーペチュアル・エレクトロニクス

2020年度ステップアップ評価採択研究課題（2023年度1年追加支援課題）

（1）石橋 孝一郎（電気通信大学先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター 特任教授）

スーパースティープトランジスタによるレクテナと圧電トランスの融合によるRFエネルギーハーベスティング技術の実用化

2021年度ステップアップ評価採択研究課題（2023年度1年追加支援課題）

（1）小野 新平（(一財)電力中央研究所エネルギートランスフォーメーション研究本部 上席研究員）

スマートメカトロニクスを基盤とした振動発電素子の開発

2-3. 事後評価会の実施時期

2024年2月 各研究者からの研究報告書に基づき研究総括、副研究総括による事後評価（1年追加支援課題）

2-4. 評価者

研究総括

谷口 研二 大阪大学大学院工学研究科 特任教授

副研究総括

秋永 広幸 産業技術総合研究所デバイス技術研究部門 総括研究主幹

領域アドバイザー

該当なし

外部評価者

該当なし

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： MEMS 振動発電を用いたパーペチュアル・エレクトロニクス

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

年吉 洋（東京大学生産技術研究所 教授）

主たる共同研究者

橋口 原（静岡大学大学院工学領域 教授）

鈴木 孝明（群馬大学大学院理工学府 教授）

3. 事後評価結果

○評点（2022 年度事後評価時）：

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント：

（以下、2022 年度課題事後評価時のコメント）

パーペチュアル・エレクトロニクスという新しい技術分野を提唱し、独自に開発したシリコン酸化膜由来のエレクトレットを MEMS 振動子構造に付加することで世界最高水準の振動発電デバイスを実現した。振動発電デバイス実用化への課題を新規な着想で解決することにより、学術面および社会実装面でインパクトの大きい成果を挙げている。具体的には、物性理論解析や設計理論構築とその理論を実証する実験を緻密に行い、汎用性の高い研究成果を得ている。振動発電の非共振化・広帯域化、周波数追従性付与、さらにメタマテリアル構造の基板からの発電を含めた振動発電量の増大化等を達成。また理論計算の結果を基にシリコン酸化膜エレクトレットの形成・劣化機構を解明し、さらなる長寿命化への道筋を示した。これら研究成果は、幅広い産業分野において MEMS 振動発電素子の応用範囲を拓けるなど、その波及効果は大きい。さらに企業への技術移管によりシリコンプロセスと整合性の高い MEMS 振動発電素子の実用化も間近である。

戦略目標における「次世代型の環境保全」という社会の実現に資する成果にまで到達している。利用価値のある「For What に向けた基礎研究」の成功事例として特筆すべきと判断した。

（2024 年 2 月追記）

本課題では、期間を 1 年間延長し、(1)エレクトレット安定性の根拠となる 5 配位シリコン結合の観測実験とエレクトレット形成理論モデルの構築、(2)レーザー加熱エレクトレット形成とウエハレベル・パッケージング、(3)位相ロック回路方式を用いた周波数追従システムによる大出力維持に関する実証実験を行った。その結果、埋め込み酸化膜を介した浮遊容量に起因する素子内部を環流する無効電力に関する課題、シリコン酸化膜エレクトレット劣化の課題を解決するトータル・プロセス技術、周波数追従システムなどを新たに開発した。事業期間中に、理論計算の結果を基にシリコン酸化膜エレクトレットの形成・劣化機構を解明することで示したデバイス長寿命化への道筋を、延長期間にて、実際のパッケージングプロセス開発へと発展させたことは特筆に値する。さらに、実用化する上で課題であった材料コストに関しても、その解決の糸口をつかみ、製造技術の実証まで進めた。2023 年 11 月には、「小型・高効率 MEMS 振動発電素子の実用化」にて第 71 回電気科学技術奨励賞を受賞されている。このように、社会実装によるイノベーションに向けた展開を強力に推進する成果が得られた。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： スーパースティープトランジスタによるレクテナと圧電トランスの融合による RF エネルギーハーベスティング技術の実用化

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

石橋 孝一郎（電気通信大学先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター 特任教授）

主たる共同研究者

井田 次郎（金沢工業大学工学部 教授）

柳谷 隆彦（早稲田大学先進理工学部 教授）

平山 裕（名古屋工業大学大学院工学研究科 准教授）

3. 事後評価結果

○評点（2022 年度事後評価時）：

A+ 非常に優れている

○総合評価コメント：

（以下、2022 年度課題事後評価時のコメント）

ステップアップ CREST 研究の初期段階から関係企業参加のアドバイザー委員会を立ち上げ、目標を明確化・共有化しながら技術開発を進めてきた。研究成果としては、急峻な電圧電流特性を有する SOI-MOSFET とそれを用いたインバータおよびレクテナの考案、電波の到来方向によらず安定な受信が可能な無指向性のアンテナ（351MHz 帯、クレジットカードサイズ）、高インピーダンス・メタマテリアルアンテナと Cross Current 整流回路を組み合わせた高効率レクテナ（920MHz, 2.4GHz の周波数領域における世界最高整流効率達成）、ブラッグ反射器上に c 軸方向にジグザグ積層した ScAlN 圧電トランスの発明、極低消費電力 CPU、ウェークアップ信号受信デバイス、バックスキッター方式の低電力センサー信号送信方式の試作など、各研究グループの強みを生かした独自の実用的な RF エネルギーハーベスト技術を創出した。また、レクテナ・リファレンス設計技術を確立し、920MHz 帯向けの微小ループアンテナとショットキーバリアダイオードの高精度モデルを共同研究企業に技術移転している。アジア最大の展示会 CEATEC では、要素技術を組み合わせて無線環境発電による電子ペーパー上に画像表示するデモンストラレーションに成功。研究期間の満了までに、100 μ W 発電デバイス実証の目途も立っており、十分に初期の設定目標を達成したと認められる。

（2024 年 2 月追記）

本課題では、企業との共同研究に向けたプロトタイプ試作を目標に、期間を 1 年間延長した。その結果、本課題に係る共同研究及び協業企業が 23 社となり、本研究成果の実用化加速が認められる。また、新規採択された JST/A-STEP において、圧電材料の新しい応用技術の開発やその社会実装が一層進展するものと期待できる。通信周波数帯向けアンテナの開発も行い、エネルギーハーベスティング技術を活用した次世代通信システム分野で、世界のトレンドを先取りする研究成果が得られている。このように、戦略目標が掲げる「IoT、ビッグデータの活用による次世代型の環境保全・ものづくりが実現している社会」を構築する基盤技術となり得る成果が得られた。

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： スマートメカトロニクスを基盤とした振動発電素子の開発

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名（研究機関名・職名は評価時点）

研究代表者

小野 新平（（一財）電力中央研究所エネルギートランスフォーメーション研究本部 上席研究員）

主たる共同研究者

田中 有弥（群馬大学大学院理工学府 准教授）

中嶋 宇史（東京理科大学理学部第一部 准教授）

矢嶋 赳彬（九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授）

山根 大輔（立命館大学理工学部 准教授）

※1年追加支援時の体制

研究代表者

小野 新平（（一財）電力中央研究所エネルギートランスフォーメーション研究本部 上席研究員）

主たる共同研究者

中嶋 宇史（東京理科大学先進工学部 准教授）

矢嶋 赳彬（九州大学大学院システム情報科学研究院 准教授）

3. 事後評価結果

○評点（2022年度事後評価時）：

A 優れている

○総合評価コメント：

（以下、2022年度課題事後評価時のコメント）

研究代表者が提唱したスマートメカトロニクスの実現に向けて、電気二重層エレクトレットを求心力として、様々な分野のさきがけ研究者を糾合してステップアップ CREST の研究を進めてきた。エレクトレット材料、デバイス、システム、その応用技術まで広い範囲の技術を有するチームの中でエネルギーハーベスターという狭い枠を超えた分野で顕著な研究成果を得た。具体的には、電気二重層エレクトレットを使用したエネルギーハーベスターの開発、pA 級の極低消費電力変換器、エッジ AI を取り入れたインフラ異常診断アルゴリズム・異常診断システム、AI 解析技術を援用して「人の感動」をセンシングし演出と組み合わせる技術（ヒトコネクションテクノロジー）の開発などがある。ヒトとヒトが繋がり、Well-being を実現する「ヒトコネクションテクノロジー」については、SciFoS 活動の調査結果をもとに実用化障壁が高くない産業分野（玩具やゲームなど）に着目して技術開発を行った結果、芸術性を伴うエンターテインメント分野において外部と多種多様な連携関係が構築されたことは特筆に値する。電池の代替品と考えられていたエネルギーハーベスターの新しい利用法としての好事例である。

（2024年2月追記）

本課題では、事業期間中に得られた成果の社会実装を目標として、1年間研究期間を延長し、リアルタイムモーション解析技術の社会実装と、サブマイクロワットで駆動する環境発電用電源回路の適用先

探索を行った。その結果、リアルタイムモーション解析技術とエッジコンピューティング技術を融合させ、振動センサーのデータを限りなく遅延なく解析・通信に載せることに成功し、展示会出展、音楽コンサートでの実証等に成功した。また、エレクトレット振動発電回路で $1\mu\text{W}$ 以下でも高効率に昇圧できることを実証し、実用システムにおけるアナログニューロン回路の有効性を確認した。

これらは、本研究領域が「回路方式やパッケージング」に関する技術開発を推進したが故の成果であるが、今後、Well-being を志向した技術開発、より具体的には、身体に障害のある方の自立支援等への展開が期待できる波及効果の広い成果となった。なお、延長期間中に、学術論文等の数多くの研究成果が発表されており、滋賀発成長産業発掘・育成コンソーシアムにて実施されている滋賀テックプランングラプリでの受賞もなされた。