

**研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP)**  
**ステージ I : 戦略テーマ重点タイプ**  
**研究開発テーマ「IoT、ウェアラブル・デバイスのための環境発電の実現化技術  
の創成」**  
**中間評価報告書**

**総合評価           A**

**総合所見**

本研究成果展開事業の目的は、「IoT、ウェアラブル・デバイスのための環境発電の実現化技術の創成」であり、近い将来の到来が予期される IoT 社会（センサネットワークが拓く新たな ICT 社会）において、必要不可欠となる低コストで安定な小型自立電源技術、すなわち配線の敷設や電池の充電・交換が不要な環境発電技術に焦点を当てたもので、時宜を得た研究開発テーマである。

IoT 技術で昨今注目されるウェアラブル・デバイス（例えば、腕時計型、テキスタイル型などの体表密着型の生体データ計測デバイス）の研究開発が急ピッチで進められているが、ユーザー視点での使い易さ、センシング機能、ビジネスモデルの点で、未だ十分に市場が立ち上がっているとは言えない。このような状況に対し、環境発電技術の飛躍的な性能向上と共に、ウェアラブル・デバイスへの適合性を高め、実用的な基盤技術の創成をねらった本研究開発テーマの設定は、新たなウェアラブル・デバイス市場創出の契機となる可能性があり意義がある。ウェアラブル・デバイスに関し、将来大きな市場になると見込まれる領域は、超高齢化社会を見据えた健康管理・見守り、医療機器分野であろうが、その前段階として、第一の目標をスポーツ分野に置いた点、それに向けて東京オリンピックでの露出機会の活用を想定している点など、開発方針が明確で戦略的である。このような選考方針の下、採択された 4 研究課題は、何れも新たな産業を創出する可能性を秘めており、本研究開発テーマのねらいに合致するものと言える。

採択された 4 研究課題において、研究課題①「ジャイロ効果を利用したウェアラブル発電システム」（以下、「ジャイロ発電」）では、元来ジャイロ効果は振動発電技術の中で大きな発電ポテンシャルを有するが、これまで特定の角振動でしか発電しないという制約があり、適用範囲が限定されていた。今回開発されたジャイロ発電機は任意の角振動で発電し、適用範囲を大きく拡大する可能性を秘めている。実際、直径 100mm サイズ試作機で目標 10mW を大きく上回る 1.8W の出力を実証している。また新たに自転モーターを使用しないランダムジャイロ発電を考案するなど、特筆すべき成果が得られている。

研究課題②「スポーツを対象としたウェアラブル圧電型振動発電モジュールの開発」（以下、「振動発電スマートシューズ」）においては、大手シューズメーカーを開発体制に加え、圧電素子を内蔵したデモシューズの作製から、ランニング時の発電とセンシング、データの

送信、データ活用のスマホアプリ作製に至る一連の研究を進め、実用に向けた有効性を実証した。今後、耐久性、信頼性、コストなど実用化課題の観点からスマートシューズとしての完成度を高めると共に、ユーザー視点でのサービスビジネス創出の検討も期待される。

研究課題③「3次元圧電単結晶スプリングを用いた振動発電の研究開発」(以下、「3次元圧電スプリング」)では、独自のマイクロ引き下げ法によるスプリング形状の圧電単結晶の作製と発電デバイスへの展開をねらいとし、先ずモデル材料としてサファイア単結晶のスプリング作製に成功したが、目標とするランガサイト系圧電材料での検討が遅れ、研究進捗としては目標未達の状況にある。1年後の見直しを前提に、テーマの位置付けを基盤技術の研究に変更したが、研究課題の現状と難度を勘案し、継続停止の判断があっても良かった。

研究課題④「バイオ燃料電池を搭載したウェアラブルヘルスケアデバイスの創成」(以下、「バイオ燃料電池」)は、多孔質炭素電極材料の開発から、同炭素材料インクと印刷技術の構築、多段階酸化反応可能な高効率・安定な酵素群の調整、バイオ燃料電池に適した電解質&生体親和性あるハイドロゲルの開発、さらにウェアラブル・デバイスへの実装化までの多岐に渡る課題から成り、5チームで構成されるメンバーと十分に連携し、目標とする成果を達成している。今後は対象となる体液成分(汗中の乳酸、グルコース)での高効率&安定な発電の実現と共に、共同する企業(タニタ社)のヘルスマニター製品への展開が課題となる。多くの開発技術を統合する際に生じる摺り合わせ課題に注視し、ユーザーニーズに合致した製品開発が期待される。

全体的に1研究課題を除き、順調に進行し目標以上の成果を達成していると判断できる。今後は、実用化を意識した取組みがますます重要となる。すなわち使用時を考慮した製品としての耐久性、信頼性、使い易さに加え、生産時を想定した歩留まり、コストなどの課題を、研究開発の段階から意識して進めることが必要である。また代替手段(例えば、リチウムイオン電池など)に対する優位性と提供価値を多角的に明示すると共に、「モノ」の実用化だけでなく、ユーザーニーズを踏まえ「サービス」を軸に、ソリューションビジネスの可能性検討も有用と考える。

また論文(34件)および学会発表(116件)の件数は多く、9件の受賞実績があることは、研究成果に対する国内外での評価が高いことを示唆している。一方、特許出願件数が全体で3件(国内2件、海外1件)に止まっている。各研究課題で開発した技術を、着実に権利化しておくことは実用化を目指す研究課題では必須であり、今後の運営において知財戦略の推進を強く期待する。

## 1. 研究開発テーマのねらい(目標)について

本研究開発テーマのねらいは、IoTデバイス、特にウェアラブル・デバイスのための環境発電の実現化技術の創成であり、ひいては新産業の創出にある。今後大きな成長が見込まれるIoT、ウェアラブル・デバイス市場が立ち上がるにつれて、これらデバイスの電源確保に対する問題は益々顕在化してくると予想される。その問題を解決する上で、環境発電技術は重要な位置を占めると考えられ、本研究開発テーマのねらいは正鵠を射たものと言える。

現状、国内での環境発電に関わる製品については、消費電力が低い(数 $\mu$ Wレベルの)腕時計などの用途に限定されていた。長期的には社会ニーズの大きい健康管理・見守り、ライフログ、高齢者介護支援、生産現場の作業効率化、さらにエンタテインメントなどの分野に

利用されるウェアラブル・デバイスが主要な市場を形成するものと考えられるが、まずはウェアラブル・デバイスとしての信頼性を確保し市場での認知度を高める上で、第一の目標をスポーツ分野に置いた点は評価できる。また将来の周辺デバイスの低消費電力化を想定し、市場導入時期を事業化に向けた開発期間を含めたテーマ開始 10 年後(2025 年)に設定している点、さらに市場導入の前段階として 2020 年の東京オリンピックでの露出機会の活用を提案している点も合理的である。

このようなねらいの下、研究課題の選考に当たっては、(1)環境発電の確たるシーズを有する大学、(2)ウェアラブル・デバイスへの実装技術を有するデバイスメーカー、(3)ウェアラブル・デバイスを活用した製品・サービスを目指す事業者からなる研究開発体制を重視した点は適切と言える。

今回採択された 4 研究課題は、基礎から実装まで一貫した取組みを要する研究課題、保有技術を短期に統合し実装を中心に成果を目指す研究課題、基礎研究に比重を置いた挑戦的な研究課題と、バランスの良い構成になっている。

具体的には、「ジャイロ発電」は、発電ポテンシャルの大きいジャイロ効果を利用し、低周波数・低加速度の振動から比較的大きな出力を得ることにより、靴/ベルト/衣服/ザックなどへの装着を目指すもので、理論解析・設計から小型実装技術の開発まで取り組む研究課題である。「振動発電スマートシューズ」は、スポーツシューズに特化し、センサ機能内蔵振動発電モジュールの開発を行うもので、シューズメーカーをチームに加え、実装化を軸とした早期の実用を目指す研究課題である。「3 次元圧電スプリング」は、人の動作による変形を利用し、必ずしも共振現象によらない革新的な小型振動発電を目指すもので、チャレンジングなテーマであるが実用化までのハードルは高く、基礎研究に比重を置いた研究課題である。「バイオ燃料電池」は、体液中に含まれるグルコースや乳酸から電力を取り出すバイオ燃料電池を開発し、アスリートの疲労管理などに活用できる自己駆動型ヘルスケアデバイスを目指すもので、酸化酵素/炭素電極材料/印刷実装プロセスなど、基礎から実装までの多くの開発要素を含む研究課題である。

今回の研究課題の選考に当たってアドバイザーの構成は、環境発電・センサ分野で幅広い知識と専門性を有し、第一線で活躍する研究者で構成されており、また企業出身者および企業との連携推進経験者も含まれている。実用化を意識した観点が加味されており、市場導入への成果最大化に向けた配慮がなされていると言える。一方、サービスビジネスを含めた実用化を円滑に進める上で、情報通信技術を活用したコンセプト設計、システム設計、およびデバイス仕様を助言できる企業での開発経験豊富な技術者が、さらにアドバイザーとして含まれていても良かった。

## 2. 研究開発テーマのマネジメントについて

本研究開発の実施期間 6 年を 2 年毎の 3 期に分け、第 1 期：研究開発方針の明確化とアドバイザー、第 2 期：課題間の連携支援、第 3 期：実用化検討・体制強化の支援と、研究開発の進捗に合わせたマネジメントを進めている。現在は第 2 期に当たるが、研究開発の方針をしっかりと明示して、円滑な運営に注力していると言える。定期的な研究開発テーマ進捗会議の開催、サイトビジットの実施、開発実施報告書の作成で、研究開発の進捗状況の正確な把握に努め、状況に応じてチーム体制の見直しやチーム間連携推進を実施している。また研究

成果の評価、結果に基づく指導、計画の見直しが必要な場合は、タイムリーに適切な指示を与えている。なお第3期には、P0が主宰するエネルギーハーベスティング・コンソーシアム会員企業との連携を構想していることも評価できる点と考える。

具体的なマネジメントとして、「ジャイロ発電」では、商品性とデバイス特性を考慮し、さらに想定を超える発電特性の成果を踏まえ、ターゲット製品を発電靴から空調服に変更した点、また新たに大手空調服メーカーを研究開発チームに参加させることを指示した点など、十分なマネジメントを発揮した。「振動発電スマートシューズ」では、進捗報告でのデータ解釈の誤りを指摘し、研究開発が回り道になることを未然に防止した。「バイオ燃料電池」に対しては、当初計画にあったグルコースの燃料カートリッジ供給型デバイス開発を停止させ、汗などの体液成分を利用するデバイスに重点化させて、効果的な成果達成につなげた。一方、「3次元圧電スプリング」については、圧電スプリング作製基礎技術の確立、アプリケーション企業の参画という当初目標を達成していないことから、研究目標を基盤技術の確立の位置付けに切り替えて1年間継続とした。但し、1年後に大きな研究の進展を期待することにはリスクがあると考えられ、研究課題の本来のねらいと難度に照らし、その根拠にやや判り難さが残った。少なくとも論文などによる学術貢献を求め、圧電スプリング製作と評価までのスケジュールと研究費を再度立案させて、今後の判断ポイントを明確にしても良かったと考える。

本研究開発テーマ後半に向け、今後実用フェーズへ重心が移行して行くと考え、その際、メリハリを付けた進め方がいっそう重要になる。必要に応じ研究課題内外の連携強化、新たな企業の参画など、これまで以上にタイムリーな運営・指導を期待する。また今後の取組みの中で、研究成果の特許出願を進めるというP0の方針があるが、現状では特許件数が非常に少ない。各研究課題の進捗をフォローし、特許戦略の策定と特許出願の実施を確実に進めることを願う。

### 3. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立に向けた状況

各研究課題の達成状況に関し、「ジャイロ発電」については、ジャイロ発電機の試作により目標の10mWを大きく上回る1.8Wの出力を実証したことは高く評価できる。また当初の実用ターゲットであった発電靴を空調服に変更し、大手空調服メーカーを研究開発体制に加えて、実用化に向けた取組みが前進したことも評価に値する。今回の目標から外れるが、ポータブルな自立電源として、スマートフォン、GPSなどの無線通信機器を駆動できれば、災害時や遭難時の非常時対応システムにも展開できる。また自転車搭載型も発電量の増加が見込まれ、GPSによるナビゲーション機能付きレンタル自転車などに適用し、新たな観光サービスなどへの適用も考えられる。

「振動発電スマートシューズ」では、実際にランニングシューズに振動発電デバイスを埋め込み、データの無線送信を実証するなど、既に製品に近いレベルまで到達している。確実な製品化を見据え、実用課題（耐久性、信頼性、コストなど）に取り組むフェーズにある。

「バイオ燃料電池」については、酵素の電極固定化による出力の向上、同安定化技術の確立、安価な酵素調整法の実現、スクリーン印刷法による安価なバイオ燃料電池製造法の検討、さらに自己発電型ウェアラブル・デバイスのプロトタイプ作製で無線伝送を実証したことなど、基礎から応用までの多岐に渡る成果が得られている。また介護サービス企業・施設と

の連携で、要介護者向け製品（例えば、成人用オムツ）への展開など、新たな成果の切り出しも可能である。

以上の3研究課題については、一部にターゲットの変更があるが、着実に研究開発が進展し、目標を超える成果を達成した。一方、「3次元圧電スプリング」に関しては、結果的に開始時点の保有技術レベルと開発技術に対する見通しが不十分で、圧電単結晶スプリングの作製法確立という当初の目標が未達となった。研究コンセプトに新規性は高いが、開発技術の難度から目標達成への見通しが得られていない。

これらの成果の中で、「ジャイロ発電」における任意の角振動に対応するジャイロ発電機は世界初である。将来の適応範囲の広がりが見込まれ、新たな産業創出の核となる可能性を秘めている。また「バイオ燃料電池」において、開発した乳酸やグルコースに対する多段階酵素反応系や高効率な酵素の大量調整法などの技術は、各方面に応用展開できる汎用的な技術になり得ると考える。

#### 4. その他

全体的にはPOの適切なマネジメントの下、産業創出の成果が期待できるプロジェクトになっている。今後、確実な市場導入・展開を見据え、実用上の課題（例えば、耐久性、信頼性、コストなど）に焦点を当てて取り組む段階に進むと考えられるが、改めて「対象となる市場（ユーザー）は何か?」、「真のユーザーニーズは何か?」に対し、さらなる市場調査と分析が有用である。その際には、「モノ」（製品）のビジネスだけでなく、ビジネスモデルを見直し、「サービス」視点でのビジネス展開やそのためのアプリケーション開発も対象に取り上げて良い。また開発技術を既存市場へ導入する場合、製品の製造プロセス、生産性（歩留まり）、生産コスト（原材料からシステム実装まで）を含めた競争優位性の正確な評価も必要と考える。これら共通の関心事となる市場調査やコスト見積もりなどに関し、JSTからのサポートも期待したい。

市場導入を考えた場合、開発技術の権利化を確実にする強力な特許戦略の構築が重要である。各研究課題の具体的な特許出願に関しては、参画企業間の秘密保持などの問題もあり、各課題担当グループに一任せざるを得ないが、少なくとも出願状況を確認し、論文や学会発表だけで研究成果の漏出が生じないようにフォローすることが必要と考える。可能ならばプロジェクト全体の特許戦略、特許網構築に関して、POを支援するための特許専任者の配置の検討も必要と考える。

また大きな成果が期待できる3課題に対し、新たな共創可能な企業やベンチャーキャピタルとのマッチング機会の設定に関しても、JSTからのサポートがあれば良いと考える。

以上