

戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)
研究開発テーマ「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発」
事後評価報告書

総合評価 **A**

総合所見

戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ) の研究開発テーマである「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発」は、応募された課題の中から書類選考を通過した 5 件に対して面接選考を経て採択された、「3次元磁気記録ストレージアーキテクチャのための技術開発」(以下、「3次元磁気記録」) および「トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁図および脳磁図と核磁気共鳴像の室温同時測定装置の開発」(以下、「心・脳磁計」) の2つの研究開発課題からなり、ステージ I (平成 23 年 12 月～平成 26 年 3 月)、ステージ II (平成 26 年 4 月～平成 30 年 3 月)、およびステージ III (平成 30 年 4 月～令和 3 年 3 月) の研究開発期間を設定して実施された。ステージ II までの進捗に対する本研究開発テーマの中間評価の総合評価は「A」であった。

本事後評価は、ステージ I～III までの全期間に対し、「研究開発テーマのねらい(目標)」、「研究開発テーマのマネジメント」、「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状況」等を評価項目に設定して実施したものである。以下に総合所見を述べる。

20 世紀における磁気工学を基礎とした社会的・産業的にインパクトのあるデバイスの開発が社会実装に繋がり、我々の日常生活の向上に大きく貢献してきたことは言を俟たない。1980 年代後半の巨大磁気抵抗 (GMR) の発見に端を発したスピントロニクスは、ハードディスクの大容量化に寄与したトンネル磁気抵抗 (TMR) 素子や不揮発性メモリである磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) を創出し、わが国の大学、企業の研究開発の進展に果たしてきた役割は大きく、今後も重要な研究分野である。とくに、スピン偏極やスピン注入などの磁気の流れである「スピン流」が引き起こす物理現象が、革新的なデバイスの創製に応用できると期待されている。本研究開発テーマと本研究開発課題はそのような期待に応え、デジタルトランスフォーメーション (DX) を下支えするストレージ産業や超高齢化社会における早期診断・治療に資する医療機器産業の発展に貢献すると期待され、テーマおよび課題の設定は妥当である。

プログラムオフィサー (PO) は本研究開発全体にわたって、「3次元磁気記録」と「心・脳磁計」の研究開発課題の各ステージの研究進捗状況の把握と課題間で共通するスピン流デバイス作製技術に関する情報共有に精力的に努めており、さらに、臨機応変な体制と目標の変更、課題間協力の推進等により、的確にマネジメントを行ったと評価できる。

「3次元磁気記録」では、ステージ I～II の期間、アドバイザーや課題実施者との協議を重ねた上でステージ II, III の目標を修正している。そのような対応が必要となった要因の一つとして、研究開発開始時の体制、計画、マイルストーンの設定が不十分であったと思われる。ステージ II 終了時点で、担当企業が経営状況の大きな変化により研究開発を辞退

したため、ステージ III が実行されず、結果的に最終目標が未達であったと判断せざるを得ないが、スピントルク発振機 (STO) による強磁性共鳴 (FMR) を用いた記録と共鳴検出という極めて挑戦的な目標を掲げて研究開発に取り組み、将来の産業創出に資するポテンシャルを秘めた技術の開発に繋がったことは評価できる。

「心・脳磁計」では、ステージ I~III まで計画通り、もしくは目標以上の研究成果を得て、最終目標をほぼ全て達成した。ステージ III 終了時点で、高感度 TMR 素子が心磁計、脳磁計へ活用が可能であり、超伝導量子干渉素子 (SQUID) に比べて優位性があることも実証した。産業創出の核となる技術を確認し、様々な産業・社会分野に実装される可能性は高く、社会的にもインパクトのある成果が得られたものと高く評価できる。また、実施期間中にベンチャー企業の設立に至るまでの成果を得たことは特筆すべきことである。

以上により、本研究開発テーマの事後評価は、「A」とする。

1. 研究開発テーマのねらい (目標) について

本テーマの研究開発課題である「3次元磁気記録」および「心・脳磁計」は、スピン流の特長を生かした新たな産業創出を志向した本プログラムの主旨に合致したテーマ設定といえる。「3次元磁気記録」は、記録容量増大に有効ではあるが、実現が困難である技術であると考えられていたものであり、ハードディスクドライブ (HDD) の大容量化、さらに人工知能やビッグデータを活用した DX の推進に資する研究開発課題であり、10兆円を超える世界市場が見込める基幹技術に関与するものである。「心・脳磁計」は、TMR素子の感度を極限まで引き上げることが求められる研究開発であり、超高齢化社会やリアルな対話が少なくなる社会において増大すると危惧されている認知症・脳梗塞・精神疾患の早期発見や治療への応用需要が高まり、将来、医用計測分野における新産業創出に繋がると期待される。

これらの社会的ニーズを考えると、POが採択した「3次元磁気記録」および「心・脳磁計」の課題は妥当かつ有効なものであるといえる。これらは、ともに技術的なハードルの高い産業応用を見込んだチャレンジングな研究開発目標が設定されており、目標設定としては十分なものであると考えられる。

アドバイザーは、スピントロニクス、磁気記録、MRAMなど本研究開発テーマに関連する研究・開発の専門家で構成されており、妥当である。「3次元磁気記録」および「心・脳磁計」の課題のそれぞれに、実際の製品開発プロジェクトを担った経験が豊富な企業人がアドバイザーに入っており、開発した技術の社会実装を意識した構成になっていることは評価できる。ただし、「3次元磁気記録」の開発においては、要素技術の最適統合が必要であり、基礎技術を応用技術に展開して工業化までの技術ストーリーを俯瞰するには、戦略の多面的な検討が不足したと思われ、異視点を有する磁気記録分野のアドバイザーが複数名加わっていたならば、マイルストーンの設定や研究のアプローチがより適切化され、効率的な運営ができたのではないかと考えられる。

2. 研究開発テーマのマネジメントについて

本研究開発テーマは、「3次元磁気記録」と「心・脳磁計」の2課題で構成され、いずれもスピントロニクスがベースであるが両課題の特徴は相当異なる。「3次元磁気記録」は複数要素技術の統合・最適化が必要であるのに対し、「心・脳磁計」はキーデバイスの超高感

度磁気センサの開発が必要となるという特徴を持つ。

研究開発期間を、ステージ I, II, III に区分し、ステージ I を準備期間、ステージ II は最終目標の実現可能性を確認する期間と位置づけ、その後、ステージ III に移行し、最終目標を達成するという基本方針は妥当である。ステージ I, II の達成状況を考慮して、次ステージ目標やメンバーを変更するなどの臨機応変な対応も適切であった。

研究開発推進において、テーマ関係者が一堂に会するテーマ推進会議の年一回程度の開催や、PO がアドバイザーとともに研究開発実施場所を訪問するサイトビジットの実施に加えて、PO が課題実施者の定例打ち合わせへの参加やプロジェクトマネージャー (PM) との個別打ち合わせを適時行う等、進捗状況を常時把握し、その都度問題点などの解決に向けて研究担当メンバーの意思統一を図った。

ステージ I においては、「3次元磁気記録」では検証や検討が示され、問題点を明確に抽出できている。「心・脳磁計」はステージ I において目標値を上回る素子性能を達成し、次のステージ目標の再設定を行うなど、順調に研究開発をマネジメントした。ステージ II においては、PO は各課題の進捗状況を把握しており、PO が体制・目標の変更を決断し、課題間協力を推進したことは評価できる。

「3次元磁気記録」は、ステージ II の終了時にステージ III への移行が許可されたが、開発主体を担当した企業の経営状況の変化による継続辞退により、「3次元磁気記録」の実現可能性を検証することなく終了した。「3次元磁気記録」の研究開発課題の推進に、PO は最大限の努力で対応し、効果的な研究開発マネジメントを図ったと認められる。しかし、最終目標の実現可能性を確認すべきステージ II で、計算機シミュレーションによる可能性を示したものの実験によるビット長 35nm の 2 層磁気記録の検証が未了であり、STO を用いた 3次元磁気記録の可能性を示すに至らなかった。この主要因は、要素技術の統合・最適化が必要である磁気記録の特徴と各要素技術の進展展望の把握が不十分であったと指摘せざるを得ない。前述したように研究開発スタート時における計画のストーリー立案やマイルストーン設定、および進捗状況の把握に基づいた計画修正などに改善の余地があったと思われる。なお、ステージ II から III への移行が見送られて、中止となったことは PO の責任ではないが、それら技術を受け継ぐ企業や研究者がいなかったことは残念であった。研究開発に関わった研究者らがそれまでの成果を何らかの形で活かすことを期待したい。

「心・脳磁計」では、脳磁信号の検出を目指した高感度化と低ノイズ化に重点が置かれ、その定量的な目標値が設定されている。高い Signal-to-noise (SN) 比を得るために、ノイズ原因の抜本的な究明を行い、フラックスコンセントレータなどの新たな素子構造や磁区安定性を図る新たな材料を提案し、検出回路システムにも工夫を重ねるなど、目標とする性能を実現した。また、実際の医療診断現場への適用を強く意識した開発がなされており、使用環境による影響を抑える開発が重点的になされるなど、実際の産業応用を想定した研究開発が精力的に行われたことは、本プログラムの主旨に適合していると高く評価できる。光ポンピング磁力計の高感度化や、本研究開発期間中に急速な勢いで進展を遂げてきたダイヤモンド窒素-空孔 (NV) センタによる高感度・局所的磁場センシング技術などの対抗技術の進展も見据え、MTJ 磁場センサの高感度化および磁場センサを用いた心・脳磁計の改良を行う際、医用現場の応用を考慮しながら展開を進めており、本研究開発が担う産業創出に向けたマネジメントが的確に行われていたと判断する。

本研究開発テーマにおける研究費の配分については、傾斜配分を行わずに配分したことは問題がなかったものと判断する。

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状況

「3次元磁気記録」は、ステージ I において、3次元記録を可能とする多層 Anti-Ferromagnetic Coupling (AFC) 記録媒体を提案・試作し、2層記録媒体を用いてマイクロ波アシスト記録 (MAMR) 方式による記録再生が可能であることを示した。さらに、シミュレーション技術による検討も行い、記録再生用の垂直磁化 STO 素子の開発などを行った。ステージ II では、AFC 磁性ドットへの書き込み読み出しにおける層選択可能性を示していること、および記録層が3層までの実現可能性を示すことに成功したことは高く評価できる。また、信号処理によるビット誤り率 (BER) 評価も試行するなどシステム化に向けた取り組みも評価できる。ステージ II の重要なマイルストーンであった STO 素子によるビット寸法 35nm の2層磁気記録再生の実験検証には至らず、産業創出に資する道筋を得たとは言えない。また、企業の経営状況の変化による継続中止により、ステージ III への移行を断念せざるを得なかったことは残念である。

ただし、本課題において開発されたシミュレーションや STO デバイス、多層 AFC 記録媒体、マイクロ波アシスト磁化反転や層選択書き込み・読み出し技術は、2次元 MAMR 磁気記録への応用のための技術としてインパクトを持っているといえる。また、現行の MRAM とは異なる原理の固体型メモリへの応用などの可能性を秘めていると考えられる。将来の3次元磁気記録の実現へ向けた大きな一歩であると評価できる。研究成果の外部発表および特許申請を行っており、3次元磁気記録の学術の発展に寄与したことは大きな意義があると考ええる。

「心・脳磁計」は、キーデバイスである TMR 素子の感度をステージ I で 40%/0e、ステージ II で 115%/0e と向上させ、ステージ III で素子の多層構造、材料、フラックスコンセントレータ構造採用などを検討して更なる高感度化を図り、低抵抗素子で世界最高の検出可能磁場 ($1\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$) を実現した。装置化に向けて、ノイズ低減、素子のアレイ化、実装ユニットの試作を行い、臨床データの取得が可能であることを検証し、新規な心磁計および脳磁計のコア技術として活用できることを示した。ステージ目標を反映させた各年度の複数の開発目標を全て達成し、さらに目標以上の性能を実現した。開発した素子は、競合する SQUID や磁気インピーダンス (MI)、光ポンピングなどを活用した素子に比べ、多くの優位性が見られ、安価で小型・超高性能な磁気センサとして産業競争力の高い素子として大きな期待が持てる成果が得られているといえる。さらに、技術的難度の高い NMR 信号の検出により同一センサで脳磁計測と MRI 計測を実現できることが示されたことは、今後の高度医療に求められる要求を満たす素子として市場開拓できる可能性がある。医用応用以外への拡張展開も可能で、産業創出の核となる技術の確立を成し遂げたものと認められる。研究成果に対する外部発表は十分であり、ステージ I で1件、ステージ II で8件、ステージ III で6件の特許を出願済であることは評価できる。さらに、研究開発成果に基づくベンチャー企業「スピセンシングファクトリー株式会社」を設立したことも評価できる。

4. その他

磁気記録に関わる技術は 100 年以上にわたり大容量化に向けた改良が加えられて発展してきたが、2 次元平面に展開する記録保持単位をいかに高密度に充填するかを競った技術の延長線上にあり、記録密度はやがて飽和すると思われる。さらに記録密度を伸ばすには複数の新要素技術の開発に加え、狭い許容範囲内で統合化を図ることが必須であり、難易度がきわめて高い。磁気記録の 3 次元方向への展開はメモリ開発に携わる研究者にとっての夢であったといえる。HDD の競合技術であったフラッシュメモリは多層型 NAND 構造を実現して、3 次元への展開に舵を切ったことにより大容量化が実現できたと考えられる。「3 次元磁気記録」はストレージ技術開発者にとって挑戦すべきテーマである。「3 次元磁気記録」の開発は、従来の磁気記録の延長線上にある技術の開発で成り立つものではなく、新たな記録再生方式の提案である。本研究開発課題で得られた成果は MAMR タイプの磁気記録方式への応用の可能性があるだけでなく、さらに卓越した新規なメモリデバイスやセンサデバイスなどの社会実装に繋がるポテンシャルを有している。採択時に想定していた HDD 企業が開発途中で参画を辞退することとなったのは予想外の事態であった。そのような困難な環境下においても、3 次元磁気記録の基礎データを取得し、さらなる高密度化に向けたデータを得たことは、学術面から評価される。さらに、本研究開発が生み出した学術的知見（論文など）や申請した特許が、将来の産業発展に貢献することを願う。

「心・脳磁計」については、高感度化と高 SN 比の達成がすべてのステージにおいて目標を上回るペースで進められ、世界初となる成果も数多く達成されるなど、学術上において貢献がなされている。当初の目標である安価で小型・超高性能な磁気センサとして産業競争力の高い素子として期待が持てる。さらに、それら素子の活用により、次世代の産業創出の核となる競争力の高い技術となると期待できる。安価で小型で低消費電力な超高感度磁場センサの社会的ニーズは医用分野以外にも多種・多方面に存在しており、注目すべきものといえる。本研究成果が医用分野だけでなく、他分野でも新たな技術の進展に役立つことを期待する。さらに、開発を通して得られたコア技術に関する特許申請技術やノウハウの不本意な拡散への対処も重要であると言える。

スピン流を活用したストレージ技術や磁気計測技術の研究開発は DX を牽引する重要な研究テーマであり、わが国が得意としてきた研究分野でもある。今後も、「S-イノベ」のような大型研究開発プログラムが立ち上がり、世界トップレベルのストレージデバイスや磁気計測の研究開発を後押しすることを期待したい。

以上