

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」
中間評価報告書

総合評価 A

総合所見

電子の電荷とスピンを扱うスピントロニクス技術は、高感度磁気センサーの Tunnel Magneto Resistance (TMR) 素子に適用されて磁気記録装置(Hard Disk Drive: HDD)の大容量化に寄与し、また新規な不揮発性メモリ—Magnetic Random Access Memory (MRAM) として実用化され、ストレージとメモリの高性能化に多大な貢献を果たしている。スピントロニクスが学会で注目され始めた 1980 年代後半から日本は技術発展に積極関与することで物理と工学領域で主要な役割を果たし、現在も世界をリードする高い技術力を有する。スピントロニクス技術が持つ特徴を生かして、磁気記録を 3 次元化することで記録密度の飛躍的向上を狙う「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 (3 次元磁気記録)」と、超高感度磁気検出機能を活用した「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室温同時測定装置の開発 (心・脳磁計)」の 2 つの研究開発課題からなる研究開発テーマは、次世代ストレージ産業発展や医用分野の事業創出を可能とするテーマである。「3 次元磁気記録」は既存技術の飛躍改良型、「心・脳磁計」は事業創出型とテーマ性格は異なるが、いずれも日本の高い技術ポテンシャルを生かすことにより目標達成も見込める。課題の選考とテーマ設定は妥当である。

「3 次元磁気記録」と「心・脳磁計」の個別研究課題を有する研究開発テーマ「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」は平成 23 年に着手され、ステージ I (平成 23 年 12 月～平成 26 年 3 月)とステージ II (平成 26 年 4 月～平成 30 年 3 月)を既に終了し、現在ステージ III (平成 30 年 4 月～)に至っている。

「3 次元磁気記録」の研究開発では、ステージ I でスピントルク発振 (Spin Torque Oscillation: STO) 素子を開発し、ステージ II で 2～3 層媒体を対象に STO 素子を用いた選択的磁気共鳴によって 3 次元磁気記録が可能であることを示した。しかし最終数値目標の記録密度 (10 Tb/in²) の達成可能性を示すエビデンスとなるビット寸法 35 nm 程度の 2 層磁気記録検証には至っていない。磁気記録をシステムとして成り立たせるには、記録素子、再生素子、記録媒体、信号処理などの要素技術を狭い許容範囲で統合することが必要で、それぞれの要素技術開発の目標達成難易度も高い。プログラムオフィサー (PO) は研究開発の進捗状況把握と方針を議論するため、ステージ I ～II の期間に 17 回と多くの会議を開催している。アドバイザーや課題担当者との検討結果を踏まえて、媒体、信号処理、システム・シミュレーションの技術開発担当をステージ I, II で追加し、さらにステージ II および III の目標を改定している。これらの緻密な対応はシステム要因が含まれる 3 次元磁気記録の検証に向けた極めて適切なマネジメントであり、高く評価する。ただ着手以降にこれら一連の修正がなされたことは、このテーマが発足した時点での目標やマイル

ストーン設定やアプローチに若干の問題があったと考える。P0 はスピントロニクス技術の専門家であるが、装置システム開発は経験されたことはない。従って複数要素技術の統合が必要な「3 次元磁気記録」の研究開発では、アドバイザー等からの助言が重要となる。磁気記録の 3 次元化は、いままで誰も挑戦をしたことのないほど斬新で飛躍的、かつ高難度な研究開発である。要素技術の統合システム化が重要であることを踏まえ、磁気記録装置の実用化経験を有する複数アドバイザー委託が望ましかったと思われる。ステージ II の数値目標の検証には至らなかったが、実験結果を考慮したシミュレーションを活用して 3 次元磁気記録が可能であることを示している。この成果は磁気記録の更なる高密度化に展望を与えるものであり、関連学会で評価されている。P0 および開発担当の努力により推進されてきたが、ステージ II 後半に実施企業の経営状況の大きな変化があり、実施者がステージ III への移行を辞退するに至っている。P0 のマネジメントが及ばない範疇の状況変化が原因であるが、結果として実用技術としての可能性が十分に示されないままに、3 次元磁気記録の課題が終了するに至ったことは誠に残念である。ステージ II までに得られた研究結果は、産業界で今後採用されるであろう 2 次元 Microwave Assisted Magnetic Recording (MAMR) の高密度化、そして 3 次元化による超高密度化に多大な貢献が期待される。これまでの研究開発で取得した知見や知財等を有効活用する方策を検討頂きたい。

「心・脳磁計」の研究開発は、目標達成の成否を左右する TMR 素子の高感度化をステージ I で着実に進め、ステージ II で素子材料の改良などで目標を上回る磁界検出感度の 115%/0e を達成している。TMR 素子のアレイ化など医用計測で必要な装置化を着実に進め、心磁および脳磁信号の検出に成功した。ステージ目標を上回る研究開発の進捗状況であり、高評価する。P0 および参画者の所属組織が持つ高い技術ポテンシャルを活用して達成した TMR 素子の高感度化が、研究開発テーマ推進を加速する好ましい効果を生み出している。本研究開発は良好な産学および医工連系を背景に順調に推移している。P0 のマネジメント、そして研究・開発リーダーおよび担当者の意欲溢れる研究開発態度に敬意を表したい。ステージ III の実施で当初目標の達成が見込まれ、さらには目標を上回る成果も期待される。本研究開発は、医用計測分野に新事業を創出する大きな可能性を有するものであり、積極果敢に研究開発を進めて頂きたい。

本評価は、ステージ I～II の研究開発期間（平成 23 年 12 月～平成 30 年 3 月）の進捗およびマネジメント状況が主たる対象である。「3 次元磁気記録」テーマは、前述のように担当企業の辞退理由で終了となったが、得られた結果は一部で数値未達があるもののステージ II 目標をほぼ満たすものであり、「心・脳磁計」は目標を上回って優れた成果を上げつつある。従ってステージ II までの進捗状況は総じて目標通りの取り組みが行われてきていると認められるので、総合評価を A とする。

1. 研究開発テーマのねらい（目標）について

1-1. 目標

1980 年代後半からスピントロニクスの物理と工学の発展に日本は主要な役割を果たし、磁気記録装置 HDD における Giant Magneto Resistance (GMR) ヘッド、TMR ヘッドや新規な不揮発性メモリー MRAM の実用化・商業化を可能にした。スピントロニクスは急成長しつつある学術分野に属し、世界レベルで研究者数も増加中である。学会レベルでスピント

ロニクスを活用した様々な新デバイスや応用技術の提案が相次いでいる。物理と工学の両面で日本が保有する高いポテンシャルを生かし、スピントロニクス応用技術の開発ターゲットとして、(1) 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：「3次元磁気記録」と(2) トンネル磁気抵抗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：「心・脳磁計」を選定したのは妥当である。「3次元磁気記録」は、高度情報化社会において主要な情報ストレージとして活用されているHDDの大容量化を可能とする研究開発課題で、10兆円を越える世界市場が見込める基幹技術が関与する。「心・脳磁計」は、健康社会や高齢化社会で必要とされる医用計測分野に新産業を創出する可能性を持つ研究開発課題で、将来の発展が見込まれる。これら研究開発課題は、実現された際の社会・産業インパクトが大きく、次世代産業技術基盤となり得るものである。研究開発テーマ発足時(平成23年)に掲げられた両課題の研究開発目標は、リスクはあるが日本の産官学の知力を結集すれば実現可能性が見込めたものと判断する。研究開発課題の採択と設定目標は妥当である。

1-2. アドバイザーの構成

アドバイザーはP0補佐であるがその役割は、(1)提案課題の選択審査補佐と(2)研究開発課題採択後の運営補佐、に区分されよう。(1)観点では産学および専門の分野バランスがとれ、各アドバイザーはいずれもスピントロニクスと関連技術において世界トップレベルの学術見識を持つ方々である。構成は妥当である。ただ、(2)観点では改善の余地がある。採択決定された2課題(「3次元磁気記録」、「心・脳磁計」)は、高難度のチャレンジングな設定目標の下で産業指向の研究開発がなされている。P0がスピントロニクス専門家であることを考慮すると、技術開発経験がある専門アドバイザーの役割が重要となる。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ためには、技術開発経験で得られた知見が決定的に重要な役割を果たす。複数の要素技術の統合と最適化が必須な「3次元磁気記録」の研究開発においては、このような専門アドバイザーの役割が特に大切である。予算、人員、関連技術状況、期間などの制約条件を考慮しつつ、時系列的に複合要因の優先順位を考慮して研究開発計画を立てる必要がある。「3次元磁気記録」のような高度で複雑な製品指向の研究開発では、技術開発経験のある複数のアドバイザー意見を考慮した開発目標とアプローチの設定が重要である。最初から技術開発経験のある専門アドバイザーが1名いることは評価できるが、研究課題採択の決定時点で、採択課題に関連した技術開発経験がある専門アドバイザーが追加されていたならば、より効率的な研究開発運営ができたのではないかと考える。アドバイザー委嘱のポリシーや方法にも関連するが、未来志向の研究開発を効果的に運営する上で留意すべき事項と思われる。

2. 研究開発テーマのマネジメントについて

2-1. 運営方針

研究開発期間をステージI、II、IIIに区分し、ステージIを準備期間とし、ステージIIで最終目標に対する実現可能性を確認した後、ステージIIIに移行する基本方針は妥当で適切である。研究着手時に未知・未解明・不足していた要因をステージI実施中に検討考察して設定目標や体制を補正するアプローチも、実用化指向の技術開発として評価される。ただ、スピントロニクスがベースであるが「3次元磁気記録」と「心・脳磁計」テ

マでは、内容が相当異なる。「3次元磁気記録」は複数要素技術の統合と最適化が必要で、それぞれの要素技術の目標達成難易度も高いことに加えて技術統合の許容条件も厳しいという問題を含む。これに対し「心・脳磁計」はキーデバイスの超高感度磁気センサーが実現できれば、装置化展開への視界が開けるテーマ性格を持つ。ステージ I および II の研究開発期間中に開催した研究進捗モニター会議の回数が、「3次元磁気記録」で 17 回であるのに対し「心・脳磁計」では 5 回であったことは、これら研究開発課題の性格の違いを反映していると思われる。また研究推進状況を把握して議論する会議に加えてブレインストーム合宿やサイトビジットを行なって、担当者間の目標や問題意識の共有化を図っている。メールや書面での情報のやり取りで済ますことなく、関係者が膝を交えて議論を行うことは高難度な研究開発を進める上で極めて効果的であったと推察される。P0 は研究開発課題の性格に応じて許容範囲で最大限の努力で対応し、効果的な研究開発推進を図ったことが伺われる。運営方針は適切・妥当と判断される。

2-2. 進捗状況の把握、計画の見直し、次のステージへの移行のための対応など

「3次元磁気記録」の研究開発課題では、公募採択の際の指摘事項を考慮し、記録媒体と磁気記録の学術専門家を研究開発担当者に加えたのは、臨機応変で適切な対応である。さらにステージ II で磁気記録シミュレーションと信号処理の学術専門家を加えて 3次元磁気記録のシステムとしての実現可能性検証を目指している。ステージ II では実験に比ベシミュレーション検討の比率が増大している。これは要素技術を組み合わせた実験が部品や機器準備、実験パラメータの設定範囲などを考慮すると必ずしも容易ではなかったことが関連したものと推察される。STO 素子などの要素技術開発の難易度に加えて要素技術統合と最適化の必要性がテーマ発足時にどの程度認識されていたのか疑問が残るが、公募課題採択時のコメントおよびステージ I から II へ移行に際しての中間評価結果コメントを考慮した迅速な対応は適切である。設定目標実現に向けた最大限の努力がなされたものと認める。

「心・脳磁計」の研究開発課題では、ステージ I で TMR 素子の高感度化を図り、ステージ目標を上回る実績を上げている。産学および素子開発グループと計測応用グループの連携も良好で、ステージ II では室温で TMR 素子による心磁信号と脳磁信号を世界で初めて検出する注目すべき成果を上げ、ステージ III への順調な移行に至っている。良好な医工連系が背景にあると思われるが、当初計画に沿って順調な研究開発が推進されている。研究開発進捗状況の把握、次のステージに移行させる際の評価と指導を含むマネジメントは適切、良好と判断する。

2-3. 中間評価結果を踏まえた対応、今後の取り組み等

「3次元磁気記録」研究開発課題では、実施企業の経営状況悪化が主理由で、実施者がステージ III への移行を辞退するに至り、研究開発がステージ II で終了している。P0 およびアドバイザーからの助言、そして中間評価結果に基づく研究開発計画へのアドバイスを考慮して困難を克服しながら着実な研究開発が行われていたことを考慮すると、誠に残念である。企業経営状況への対応は P0 責任の及ばない領域の問題で、本評価でも状況把握できないためコメントを控えざるを得ない。ステージ II 終了までに得られた知見や知財等を何らかの形で国内の関連産業発展に生かす方策を検討頂きたい。

「心・脳磁計」の研究開発課題は、前述のように順調に推移しており、ステージ III で

設定目標の達成が期待される。ステージ III では医用計測装置としての研究開発に重点が置かれる計画であるが、競合従来技術に対する優位性やユーザーへのアピールなど関連技術や社会の動向を考慮することも必要となろう。学会や業界にインパクトを与える成果発表やデモンストレーションなども視野に入れて研究開発を推進頂きたい。これら研究開発課題に対するマネージメントは適切で良好と判断する。

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に向けた状況

3-1. 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：「3次元磁気記録」

磁気ディスク (HDD) 技術は半世紀以上にわたって記録密度向上が図られ、大容量情報ストレージとして高度情報化社会の重要インフラストラクチャを構成している。しかしながら HDD が実用化されてから既に磁気記録単位 (ビット) 面積は $1/10^9$ まで微細化が進み、記録単位の熱的安定性が問題となる領域に突入し、記録密度は数年以上も年率 10-20% の低成長で技術進展が飽和しつつある。このような状況において、記録密度の飛躍的向上を可能とする「3次元磁気記録」が実現できれば、国内だけでなく世界レベルで多大な産業貢献となる。本研究開発テーマでは、記録再生用の ST0 素子を開発し、2層媒体を用いて選択的磁気共鳴によって3次元磁気記録が可能であることを実証した。さらにシミュレーション技術を活用して多層媒体への記録再生を検討し、2層積層媒体で 2Tb/in^2 の記録密度の達成が可能であることを示すとともに、ST0 素子を活用した3次元磁気記録のメカニズムを解明している。これらの結果は3次元磁気記録の可能性を示すものであるが、ステージ II の重要マイルストーンであったビット寸法 35nm 程度の2層磁気記録再生の実験検証には至っていない。ステージ II までに得られた結果と明らかになった種々の問題点を考慮してステージ III の開発指針と目標が改定設定されたが、担当企業の社内事情等のため継続中止に至っている。ステージ III が実行されたならば、 2Tb/in^2 以上の高い記録密度領域で3次元磁気記録のフィージビリティ検証がなされた可能性は多分にあったものと考ええる。研究開発は終了したが、これまでに得られた技術成果は磁気記録技術の進展に寄与するものであり、現在商業レベルで実用化が進行中の2次元 MAMR 磁気記録の加速および次ステップの3次元化への明確な指針を与えるものである。

3-2. 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室温同時測定装置の開発：「心・脳磁計」

心磁計や脳磁計などの磁気計測は、健康指向や日本社会の高齢化を背景に今後さらなる発展が予測される技術領域に属す。現状の市場規模はストレージの市場規模ほど大きくはないが今後の需要増大や非医用分野への展開を考慮すると、今後の市場規模拡大が見込まれる。本研究開発で扱う TMR 素子を高感度磁気センサーとして用いる「心・脳磁計」は、磁場感度・低ノイズ性・消費電力・価格および装置形態の諸点で現用の高感度磁気計測装置である SQUID などを凌駕する可能性を持つ。本課題の研究開発では、TMR 素子の高感度化がポイントで、HDD で実用化されている TMR 素子の磁場感度 ($1\%/0\text{e}$) を脳磁計 (磁界強度： $0.1\text{--}1\text{pT}$) で必要とされる磁場感度 $100\%/0\text{e}$ まで増大させる必要がある。この目標に対し、ステージ I で $40\%/0\text{e}$ 、ステージ II で $115\%/0\text{e}$ の高感度化を TRM 素子構造、材料、プロセスなどを検討することにより達成し、高感度 TMR 素子を用いて室温で脳磁場信号検出に世界で初めて成功している。PO が所属する産業技術総合研究所と参画組織の東北大学が

持つスピントロニクス技術の世界トップレベルのポテンシャルが効果的に生かされた好例である。良好な産学および医工連系の下、当初計画を上回る実績を上げつつある。ステージ III の研究開発目標は、心磁計や脳磁計としての実装ユニット試作と臨床評価が主体である。既にロードマップが明確化され、研究開発体制も構築済みで、大きな問題は認められない。目標の順調な達成を期待する。ステージ III では、医用分野関係者の新技術導入に対する反応や医用計測機器の特殊性も考慮し、ベンチマーキングや成果アピールも必要となろう。今後、次世代産業の芽を育てるストーリーを検討頂きたい。

3-3. 知的財産権と学術情報の状況

研究開発過程で生じた知的財産権の確保のため、特許出願が重要である。「3次元磁気記録」の特許出願では、多層の記録再生を行う基本原理に関する内容に加えて磁気記録システムとして要素技術の構成に関する内容も含め、17 件の特許を出願済みである。「心・脳磁計」では、重要デバイスである高感度 TMR 素子構造に関する内容、および生体磁場検出に TMR 素子を活用することに特化した素子構成、信号処理回路、アンプ、ノイズフィルター等の内容を含む特許など 12 件を出願済みとしている。基本的な知的財産権確保の手は打たれていると思われるが、「心・脳磁計」のステージ III で、さらに応用を考慮した環境ノイズのシールド技術などを含む測定装置システムに関する特許出願を促進して頂きたい。学術情報発信は、論文及び口頭発表数が目安となる。「3次元磁気記録」および「心・脳磁計」の研究開発のステージ I, II の期間での論文、口頭発表件数はそれぞれ「51, 68 件」と「53, 160 件」である。特許出願および学術情報発信の状況は良好と判断する。

4. その他

「3次元磁気記録」の研究開発課題はステージ II で、実施企業の経営悪化が主理由で終了となった。国内外のストレージ関係業界や学会が注目する研究開発課題であり、高度で困難な課題に果敢に挑んで着実にデータを積み上げてきた研究開発担当者や PO にとって、終了の判断は誠に残念だったろうと思われる。

磁気記録は 100 年以上にわたり種々の技術改良が加えられて発展し、記録ビット寸法も既に熱揺らぎ限界に近く、飽和しつつある技術である。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最適化を図ることが必須で、難易度が極度に高い。採択時（平成 23 年）に想定していたであろう 2 次元 MAMR 磁気記録の実用化がもたらす補助波及効果が HDD 関連企業の技術開発遅れで低減し、加えてステージ II で担当企業の財政困窮問題に遭遇している。困難な研究開発環境下で PO および研究開発担当者らは最大限の努力を継続し、磁気共鳴を活用した 3 次元磁気記録の重要基礎データを取得し、さらなる高密度化の実現可能性に展望を与えた実績は、学術面から高く評価される。本研究開発が生み出した知的財産（特許）と学術知見（論文など）が、何らかの形で将来の産業発展に貢献することを願う。

「心・脳磁計」は、産業応用の出口に向かってステージ III の研究開発を推進中である。日本が高いポテンシャルを有するスピントロニクス技術が新たな産業の芽を生み出す可能性が顕在化しつつある。新技術が従来技術を置き換えて応用分野で活用されるためには、技術以外の要因を総括的に考慮した対応も必要になると思われる。心磁計や脳磁計が関与する医用計測領域の国内外の状況を調査し把握した上で、新技術アピールする努力も必要

であろう。研究開発を通して得られた貴重な知的財産やノウハウの不本意な拡散に留意・対処も必要である。本技術開発が医用および関連分野で新たな技術潮流の源となることを強く期待する。

以 上