

プロジェクトプレ終了評価報告書



評価委員会開催日: 令和5年2月3日

評価委員氏名(敬称略, 五十音順)

小形 正男 東京大学大学院 理学系研究科 教授
加藤 隆史 東京大学大学院 工学系研究科 教授
浜地 格 京都大学大学院 工学研究科 教授
湯浅 新治* 産業技術総合研究所 新原理コンピューティング研究センター 研究センター長

*代表者を務めているNEDOプロジェクトにおいてNIMSが再委託先となっており、三谷誠司拠点長が機関代表者として参画している。本プロジェクトの研究開発成果等を次期プロジェクトに向けてどのように発展させていくべきか専門家の立場で助言をいただくため、プレ終了評価委員を依頼した。

確定年月日: 令和5年3月10日

プロジェクト名	省エネデバイスのための磁性・スピントロニクス材料の基盤研究
研究責任者の氏名・所属・役職	三谷 誠司 磁性・スピントロニクス材料研究拠点 拠点長
実施予定期間	平成28年度～令和4年度
研究目的と意義	<p>本プロジェクトでは磁性材料を用いてナノ構造を構築することにより、省エネ・クリーン環境に貢献する永久磁石材料、省エネデータストレージ、省エネコンピューティングを実現させる磁気応用における新たなイノベーション創出を目指す。磁石特性、磁気記録特性、磁気センサ特性、磁気抵抗特性、磁気に起因する熱電特性を引き出すために、強磁性体とその他の物質とのナノ構造制御を行う。また、デバイス試作においては、やみくもにナノ構造を作っても目標を達成することは困難であり、理論的な検討によりどのようなナノ構造で磁気・伝導特性が最適化されるのかについて理解する。磁性理論を駆使した新規磁性材料の探索し、それをデバイス化させて特性を評価すること、その際に理論で最適とされるナノ構造を実現するプロセス設計を行い、試作された材料・デバイスを原子レベルで評価する技術の有機的な連携を推進する。</p> <p>本プロジェクトの意義は省エネと超スマート社会の実現に資することであり、エネルギー利用の効率化に高性能永久磁石等は直接的な貢献を果たす。高密度磁気記録はデータセンター等の情報分野での省エネに不可欠である。また、超スマート社会の実現には新規かつ高性能な情報関連デバイスが中心的な役割を果たすと考えられ、高性能不揮発磁気メモリ・センサの開発に期待が寄せられる。</p>
研究内容	<p>磁性材料開発では、省希少金属の永久磁石材料、および、磁気ヘッドやセンサ応用のための磁気抵抗効果材料について研究を推進する。磁気記録材料関連では、4 Tbit/in²級磁気記録を目指して、新規媒体材料の開発を中心に記録方式も含めて必要な検討を進める。スピントロニクス素子に関しては、不揮発磁気メモリの基盤技術となる垂直磁化トンネル接合の開発等を行う。熱スピン変換に係る研究では、新規現象の探索、革新的な冷却原理の開拓の他、新規異常ネルンスト効果材料の開発も行う。これらに加え、上記研究内容全般に寄与するナノ解析と理論計算も行う。理論では、第一原理による物性予測に加え、実験結果の理論解析も行う。ナノ解析では、最先端のマルチスケール組織解析に加え、磁気イメージングやマイクロマグネティックシミュレーションも行う。</p>
ミッションステートメント (具体的な達成目標)	<p>省エネ磁性材料に関するイノベーション創出、主要なものは以下の通り。</p> <ol style="list-style-type: none">(1)新規磁石材料に関する基盤研究(2)室温で100%を超える磁気抵抗比等、高出力のCPP-GMR素子の実現(3)熱アシスト磁気記録(4 Tbit/in²)に必要なFePt媒体の組織実現。(4)大きな垂直磁気異方性($K_u > 1 \text{ MJ/m}^3$)と室温高TMR比(>300%)を有する垂直磁化トンネル接合素子の実現(5)磁気抵抗効果素子(CPP-GMR、TMR)の特性向上のための新材料・素子の理論提案(6)3DAP/TEM/SEM等による相補的組織解析手法の高度化と材料設計指針の創出

<p>プロジェクト実施期間（平成28年度～令和4年度）の見込みを含む主な研究成果（アウトプット）及び研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）</p>	<p>➤ 主な研究成果（アウトプット）</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) 世界最強ネオジム磁石の主相の $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物の固有磁気特性を凌駕する新規磁石化合物 $\text{Sm}(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{12}$ の磁石化に成功した。ボロン添加によって複相組織を実現し、残留磁化と保磁力で NdFeB 焼結磁石（N50）を超える特性を実現した。SmFe_{12} 系で最高の保磁力を有する異方性バルク磁石も創製した。 (2) 希土類磁石材料研究で培われた知見・技術に基づき、20K-77K の温度範囲で巨大な磁気熱量効果を示す RECo_2 系化合物を開発した。結晶構造変態を伴わない化合物であり、連続動作による劣化の問題を克服するものである。 (3) $4\text{Tbit}/\text{in}^2$ の熱アシスト磁気記録を目指し、ピッチ間距離 5.2nm、平均粒子径 4.3nm、アスペクト比 1.5 以上の極めて均質な微細組織をもった FePt 媒体構造を実現した。 (4) FePt-C 系熱アシスト磁気記録媒体のナノ構造最適化手法として、TEM 像に基づくモデル化を行い、マイクロマグネティックシミュレーションによって実際の磁化曲線を再現することに成功した。これは欠陥の定量評価ができたことを意味し、機械学習の導入による媒体構造最適化ツールに展開中である。 (5) 高スピン分極ホイスラー合金薄膜を実用的な多結晶薄膜で作製し、新規 AgInZnO スペーサーにより、多結晶素子で世界最高の 50-60% の MR 比を達成した。 (6) NIMS 発の新規バリア MgAl_2O_4 の研究開発において実用化のためのブレイクスルーとして多結晶化に成功した。TMR>240% の高いトンネル磁気抵抗比に加え、高バイアス電圧下の磁気抵抗特性向上（MgO バリアの特性を凌駕）も達成した。 (7) MRAM 用のスピバルブ型磁気トンネル接合素子の磁気抵抗比は 400% 程度が事実上の上限であったが、結晶配向性と界面を制御することによって磁気抵抗比の世界記録を更新した。 (8) 異方性磁気ペルチェ効果は強磁性体において磁化と電流の相対角にペルチェ係数が依存する現象であり、その観測に世界で初めて成功した。 (9) ゼーベック効果によって駆動される新機構の横型熱電変換を実証した。新規素子構造によって、異常ネルンスト係数の世界記録よりも 1 桁大きな $82\ \mu\text{V}/\text{K}$ を達成した。 (10) 巨大トンネル磁気抵抗効果を示す新規(111)配向磁気トンネル接合の理論提案を行った。界面共鳴効果と呼ばれる新機構によるものであり、新たな潮流となり得る。 <p>➤ 研究成果から生み出された（生み出される）効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）</p> <p>磁性・スピントロニクス材料はモーター、発電、省エネデータストレージ、省エネコンピューティングで必須の材料であり、モーター・発電機に使われる磁石材料の特性の改善は電気自動車、産業用モーター、風力発電機のエネルギー効率を高め、大きな省エネ効果が期待される。「情報爆発時代」に対応するためのデータストレージの分野では、HDD の記録密度の向上は省エネに極めて効果的である。また不揮発性メモリである高集積度の STT-MRAM の実用化が今以上に進めば、待機電流を流す必要のないコンピューティング技術が大きく進展し、顕著な省エネ効果が期待される。実際、上記の SmFe_{12} 系磁石、FePt 媒体、磁気抵抗効果に関する成果は大きなインパクトを有する。</p>
<p>プレ終了評価時の見込みを含む進捗状況及び自己点検・評価</p>	<p>➤ プレ終了評価時の見込みを含む進捗状況 計画以上の進捗</p> <p>➤ 自己点検・評価</p> <p>多くの項目で世界最高記録や世界初を達成している。産業界の意見を反映しながら研究を行っており、基礎的知見を産業界に提供するとともに、産業界に大きなインパクトを与える成果を挙げた。実際、これまでに新規材料の実用化や事業化検討に NIMS が寄与した具体的事例があり、評価できる点である。</p> <p>民間企業からの研究費の取得状況から分かるように、永久磁石、磁気記録媒体、磁気抵抗効果に関する評価は世界トップクラスである。</p>

評価結果		
【評価項目・基準】	評価	コメント
研究計画・実施体制・マネジメント・連携活動 【評価基準】 ・研究成果の最大化のための研究実施体制や研究開発の進め方(マネジメント)は妥当であったか。 ・国や社会のニーズに適合しているか。 ・進捗に応じ、研究計画の必要な見直しを行ったか。 ・機構内連携や大学・産業界との連携の取組は十分であったか。	s:4 a:0 b:0 c:0	・大学、産業界との連携、それと連動する外部資金獲得など、どれも大変に素晴らしい。 ・永久磁石材料、ハードディスク記録媒体、不揮発性メモリ MRAM、熱電デバイスなどの基盤技術研究において優れたマネジメントが発揮されている。 ・構造解析とデータサイエンスをコア技術として、プロジェクト内の各サブテーマが有効に連携できている。 ・産学官連携により多くの外部資金を獲得している。 ・永久磁石やハードディスクの研究開発では産業界との緊密な連携が形成されている。また、MRAMの研究開発では、産総研などとの連携を有効に活用している。 ・熱電デバイス・スピнкаロリトロンクスについては JST-ERATO プロジェクトを開始しており、基礎研究のマネジメントも良好に行われている。 ・元素戦略との連携、JST,ERATO などの獲得なども含めて、非常に成功したプロジェクトだと確信した。中間評価のときに書かれていた異常ネルンスト効果やスピホール効果の活用についても、順調に進展した。とくに異常ネルンスト効果については期待のもてるデータが得られたと思われる。また中間評価のときに指摘のあった新基軸の方向性についても検討され、データ駆動型、AI など第5期プロジェクトへの発展を期待できる内容だと思われる。 ・研究計画を最大化するために優れたマネジメントがなされており、多くの企業との共同研究、多くの公的資金の獲得がなされ、さらに国際共同研究も超伝導体や結晶構造の研究で進んでおり評価できる。また、本プロジェクトに参画した多くの若手もさまざまな進路で活躍している。
研究開発の進捗状況及び目標の達成状況 【評価基準】 ・設定した目標は達成されたか(または当初目標以上の成果が得られたか) ・設定された目標以外の成果があるか。	s:3 a:1 b:0 c:0	・大変優れており、問題点は見当たらない。 ・各サブテーマで優れた成果が創出されており、総じて目標が達成されている。 ・複数の項目について設定した目標以上のものが得られているので、非常に素晴らしい成果である。 ・新規磁性材料の開発やヨコ型熱電システムの開発、異方的磁気ペルチェ効果の発見など研究開発が進んでおり、いずれのプロジェクトも計画通りあるいは計画以上の進捗がみられている。本プロジェクトの末期にデータ駆動型の開発も進められ今後の発展が期待できる。
研究成果の創出等 【評価基準】 <科学的・技術的視点> ・世界トップレベルの研究成果が得られたか。 ・対外発表(論文・学会等)の量や質について費用対効果は十分なものであるか。 <社会的・経済的視点> ・研究成果は新技術や実用化につながるものであるか。 ・得られた研究成果により、優れた効果・効用(アウトカム)や波及効果(インパクト)が得られたか(期待されるか)	s:4 a:0 b:0 c:0	・非常に優れて、かつ NIMS の独自性を発揮された世界レベルの成果が、トップジャーナルに十分な量で発表されているので、高い評価できる。企業との共同研究も境であり、社会実装にもつながるであろう。 ・元素戦略プロジェクトで開発された新 Sm(Fe-Co)12系の規永久磁石材料は高いポテンシャルを有しており、今後の産業応用を期待したい。永久磁石の保持力機構の解明も進んでいる。 ・MRAM のための MTJ 素子の研究開発では、室温 MR 比の世界最高値の達成、(111)配向の新規トンネル障壁の作製など、顕著な成果を挙げている。 ・スピнкаロリトロンクス研究では基礎的に価値の高い成果が創出されており、高 IF 雑誌に複数の論文を掲載している。 ・プロジェクトの優れた研究業績を加味すると、特許出願が少な目という印象を受ける。 ・もちろん世界トップレベルの成果が得られているのは間違いないし、それに見合う成果発表が十分なされている。磁性材料、磁気記録、トンネル磁気抵抗など実用化が期待できる。熱を利用した材料も今後期待がもてる。 ・分野を代表するジャーナルにトップレベルの優れた論文が発表されている。また、新規磁石化合物の開発、異方的磁気ペルチェ効果の観測、横型熱電変換の実証など計画以上の進捗が多く見られている。費用対効果は十分なものであったと考えられる。

総合	<p>S:4 A:0 B:0 C:0</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ほぼ全ての観点において、文句のつけようがない素晴らしい成果と判断できる。NIMS の誇る磁性材料開発のコアが、大きく発展しているように感じられる。今後、材料インフォマティクスや AI/機械学習の流れの中で、これまでの優位性を活用した取り組みの中から、さらに先導する成果を期待したい。 ・構造解析とデータサイエンスをコア技術として、プロジェクト内の各サブテーマが有効に連携できてきおり、永久磁石材料、ハードディスク記録媒体、不揮発性メモリ MRAM、熱電デバイスなどの基盤技術研究において優れたマネジメントが発揮されている。 ・産学官連携により多くの外部資金を獲得している。 ・永久磁石やハードディスクの研究開発では産業界との緊密な連携が形成されている。また、MRAM の研究開発では、産総研などとの連携を有効に活用している。 ・熱電デバイス・スピнкаロリトロニクスについては JST-ERATO プロジェクトを開始しており、基礎研究のマネジメントも良好に行われている。 ・元素戦略プロジェクトで開発された新 Sm(Fe-Co)12系の規永久磁石材料は高いポテンシャルを有しており、今後の産業応用を期待したい。 ・スピнкаロリトロニクス研究では基礎的に価値の高い成果が創出されており、高 IF 雑誌に複数の論文を掲載している。 ・問題なく優れた成果が得られた。 ・新規磁性化合物や熱電素子の開発、異方的磁気ペルチェ効果の発見などに優れた成果が上がっており、世界トップレベルの研究がなされた。今後も大きな発展が期待できる。報告の時間配分やバランスも優れていた。 ・NIMS は、研究機関であり教育機関ではないが、文部科学省関係であり、各大学に連携教授などを務めている研究者も多く、ポスドク研究員や博士学生を受け入れており若手の育成に貢献しているということで評価できる。これら若手の進路が気になったが、それに関する質問にはあまり答えていただけず、若手の進路にあまり興味が無いようにも見受けられた。やはり研究を共にした以上、特に若手の博士のその後の進路などについて関心を持って、応援していただくとありがたい。たとえば、NIMS で研究した若手が大学や産業界で活躍するのも立派な大学や産業界との連携であり貢献と考えられる。
----	------------------------------------	--