

プロジェクト中間評価報告書

評価委員会開催日：2020年1月7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 教授
湯浅 新治	産業技術総合研究所 スピントロニクス研究センター センター長

確定年月日：令和2年3月24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 副拠点長
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、磁気センサー特性、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>

<p>ミッションステートメント（具体的な達成目標）</p>	<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> <p>(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>
<p>平成 23 年度～平成 25 年中間評価時までの主な研究成果（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>1) 主な研究成果（アウトプット）</p> <p>1-1) 世界最強ネオジウム磁石の主相の Nd₂Fe₁₄B 化合物の固有磁気特性を凌駕する新規磁石化合物 Sm(Fe_{0.8}Co_{0.2})₁₂ の単結晶薄膜の作製に世界で初めて成功した。Zr や Ti の添加により、安定バルク相の創製にも成功した。</p> <p>1-2) 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。</p> <p>1-3) マイクロ波アシスト磁気記録用スピントルク発振素子の磁化ダイナミクスを実験とマイクロマグネティクスシミュレーションにより世界で初めて解明した。</p> <p>1-4) 4Tbit/in²熱アシスト磁気記録用の FePt 媒体の微細組織制御を行なった。平均粒子径 4.3 nm の極めて均質な微細組織を実現した。</p> <p>1-5) Co₂FeGa_{0.5}Ge_{0.5}ホイスラー合金と半導体 CuGaSe₂を組合せた磁気トンネル接合 (MTJ) において、1 Ωμm²以下の超低抵抗素子の作製に成功し、室温 100%に達する大きな磁気抵抗比を実現した。半導体バリア MTJ としては世界最高値である。</p> <p>1-6) FeAl/MgAl₂O₄において、実用的なスパッタ法で作製したヘテロ構造としては世界最高の界面垂直磁気異方性 $K_u = 1.1 \text{ MJ/m}^3$を実現した。</p> <p>1-7) NIMS 発の新規バリア MgAl₂O₄の研究開発において実用化のためのブレー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。</p> <p>1-8) 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。</p> <p>2) 研究成果から生み出される効果・効用、波及効果等</p> <p>磁性材料はモーター、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。また「情報爆発時代」に対応するため、記録再生にスピードの要求されないデータストレージの分野では、HDD の記録密度の向上は ICT 分野での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 が実用化できれば、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。</p>
<p>中間評価時の進捗状況及び自己点検・評価</p>	<p>中間評価時の進捗状況</p> <p>当該技術分野の情勢変化に対応して一部当初目標を見直しつつも、全体的には計画以上に進展している。</p> <p>自己点検・評価</p> <p>いくつか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がある。実際、NIMS で開発した材料が実用化に向い始めており評価できる。</p> <p>また、民間企業からの研究費の取得状況から分かるように、磁石産業、磁気記</p>

	録産業での評価は世界トップクラスである。
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 副拠点長
【評価項目】	コメント
①研究計画、実施体制、マネジメント、連携 (研究開発の方向性・目的・目標の見直し、計画・ロードマップの問題点、実施体制・マネジメントの改善、連携のあり方、ほか)	【A】 <ul style="list-style-type: none"> ・サブテーマ1, 2, 3, 6と4(理論)、5(測定)という構成となっており、有効な組み合わせで構成されている。 ・磁性・スピントロニクスは重要な分野であり、成果を期待したい。これまでの期間で大きな成果があがっている。 ・サブテーマ6の熱電を加えたために、研究の幅が広がった。 【B】 <ul style="list-style-type: none"> ・6つのグループからなっており、どのグループも優れた世界的な成果が出ている。 ・ロードマップも明確であり、体制やマネージメントが優れていると考えられる。 ・JST「さきがけ」を獲得した若手も多く、人材育成も期待できる。 ・産総研とも連携を強化して、我が国の強みをさらに強化する試みは重要である。 【C】 <ul style="list-style-type: none"> ・NIMSがオリジナルに開発した磁性材料をコアにして、基礎から応用までを含んだ極めて重要なプロジェクトとして順調に研究が進んでいる事を高く評価する。 ・研究のフェーズを踏まえて、適切に数値目標が設定され、マネージメント、連携も順調なようである。 【D】 <ul style="list-style-type: none"> ・拠点長のリーダーシップにより、適切なマネージメントが行われている。 ・磁性材料、磁性記録材料、スピントロニクス素子などのテーマについて産業化を目指した明確なロードマップがあり、概ねチャレンジングな数値目標も設定されている。 ・民間企業や他の公的研究機関との連携が積極的に行われている。
②研究開発の進捗状況及び進め方 (進捗状況の把握、研究責任者の自己点検・評価の妥当性、進め方の見直し(継続・変更・中止等)、研究資源(資金・人材)の再配分、ほか)	【A】 <ul style="list-style-type: none"> ・企業との連携は十分うまく進められている。 ・評価資料の「プロジェクトの競争力」に書かれているように、世界の研究成果と比較してもベンチマークとしても大きな成果が上がっている。 ・後半で実用レベルまで持ち込むことが期待できる。 ・「目的」の中に、異常ネルンスト効果とスピンホール効果を活用するということが書かれていたが、今後はこれらの方面でも成果を期待したい。 【B】

	<ul style="list-style-type: none"> ・このまま進めても問題ないと考えられる。 <p>【C】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・適切なグループ体制によって、世界標準から見てもトップレベルの要素技術、材料研究開発が進められており、さらに進む事を期待したい。 <p>【D】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全ての主要テーマにおいて、計画通りあるいは一部前倒しで研究開発が進捗している。 ・競争的外部資金および民間企業資金を数多く獲得しており、申し分ないレベルにある。
<p>③論文・特許等の直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）、波及効果（インパクト）</p> <p>（研究成果の質は世界レベルか、どのような効果・効用あるいは波及効果が出たか/期待されるか、研究タイプを考慮した費用対効果はどうか、セレンディピティー、ほか）</p>	<p>【A】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・これまでに大きな成果があがっている。 ・応用の分野に関しても大きな波及効果があると期待できる。 <p>【B】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・論文は着実にでており、それぞれの分野の代表的なジャーナルに報告されている。 ・外部資金も積極的に獲得している。 <p>【C】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Nature, Appl. Phys. Lett., Phys. Rev., などに代表されるトップジャーナルへ複数の発表がなされており、高く評価される。 <p>【D】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・論文発表、特許出願・登録、民間企業との連携などを高いレベルで両立しており、基礎研究から応用研究開発までバランス良く成果を創出している。
<p>④見込まれる直接の成果（アウトプット）、効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）</p> <p>（質の高い成果は期待できるか、論文・特許数は十分出そうか、新技術や実用材料につながるか、多くの外部資金獲得・共同研究につながるか、他分野への波及効果は、ほか）</p>	<p>【A】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・今後は熱電関係についても、大きな成果を期待したい。 ・また企業との連携も引き続き拡大して行き、実用化に向けて努力してほしい。 <p>【B】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新しい機能を有するスピントロニクス分野の材料の展開が期待できる。 ・企業との積極的な連携・共同研究で成果がでていくこと期待できる。 <p>【C】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・既に ImPACT, CREST、元素戦略事業のような大型予算を獲得し、NIMS がコアとして産業分野を巻き込んでこの分野を先導しており、大きな波及効果が期待できる。 <p>【D】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・永久磁石材料については、$\text{Sm}_1(\text{Fe-Co})_{12}\text{Nd}_4(\text{Fe-Co})_{42}$系の新材料を開発した点を高く評価する。 ・$\text{Nd}_2\text{Fe}_{47.14}\text{B}$が30年以上にわたって改良を重ねながら用いられているが、それに代わる新材料系になるポテンシャルがある。まだバルク材料で保磁力は得られていないが、今後の進展に期待したい。 ・ホイスラー合金を用いたCPP-GMR素子や化合物半導体トンネル障壁のMTJ素子、熱アシスト磁気記録用の記録媒体の開発などで、高いレベルの成果が得られてい

		<p>る。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・熱スピン変換については、Nature 誌への論文掲載など、基礎研究として価値のある成果が得られている。
<p>⑤総合評価 （研究全体に対する総合的所見、及び上記評価項目①～③に含まれない、その他の評価ポイント、問題点等があれば追加してコメント）</p>	<p>【A】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・全体的な成果は申し分ない。 ・評価資料の「目的」の記述が4ページもあり、他のプロジェクトの2～4倍の長さがあり、多少長い感じがした。詳細は後半の資料に出てくるので、この最初の「目的」の部分では要点をまとめてほしい。 ・評価資料の「達成目標」、および「ロードマップ」が、この中間の時点でどこまで達成できたのか明確に書かれていない。最後まで読んで考えれば分かるが、他のプロジェクトでは分かりやすい書き方がされているものもある。 <p>【B】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・このまま研究を進めて、さらなる新しい展開が期待できる。 ・新しい応用などに積極的に展開している。 <p>【C】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・NIMS を代表する基盤研究として、また次世代への新発展をも睨んで、重層的に研究が進められる事を期待したい。 <p>【D】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・研究計画、マネージメント、基礎から応用にわたる研究開発の成果、外部資金の獲得、民間企業との連携など、全ての点において模範的に優れている。 ・計画はそのまま推進すべきである。 ・あえて欲を言うなら、予想もしなかったようなセレンディピティ的な成果にも期待したい。 	
委員の評価点 (10点満点)		9, 10, 10, 10
総合評価点平均 (10点満点)		9.8点
評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れている。 計画を変更することなく継続すべきである。
9		
8	A	総合的に優れている。 一部計画を見直し継続すればS評価になる可能性がある 平均的なプロジェクトである。 継続は認めるが、継続する時に、一部計画を見直した方が良い点がある。
7		
6		
5	B	期待されたほどではない。 計画を見直して継続すべきである。
4		
3		
2	C	プロジェクトの見直し、計画の抜本的な変更が必要である。

1	大きな問題があり、継続を中止すべきである。
---	-----------------------