

研究成果展開事業
産学共創基礎基盤研究プログラム

技術テーマ
「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」

追跡評価用資料

令和5年1月

目 次

1. 技術テーマの詳細	3
(1) 概要	3
(2) プログラムオフィサー (PO)	4
(3) アドバイザー	4
2. 追跡調査の概要	5
(1) 調査の目的	5
(2) 調査の対象	5
(3) 調査の方法	6
3. 追跡調査結果	8
(1) 研究開発の継続状況	8
(2) 研究開発資金等	12
(3) 研究開発成果 (科学技術や社会・経済への波及効果)	13
(4) 主な研究活動 (主要論文、特許、受賞、テレビ、新聞報道等)	15
(5) 研究開発成果に対する制度支援の効果等	21
4. 総合所見	23

1. 技術テーマの詳細

(1) 概要

「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」（平成 23 年度発足、令和 2 年度終了）

概要

永久磁石の開発・製造技術では、我が国は最先端を走っている。Nd-Fe-B 磁石の普及により、高性能永久磁石が産業・民生・医療機器等に広く使用されるようになり、これらの機器の小型・高性能化が達成されている。優れた永久磁石の製造技術が我が国の社会基盤を支える技術の一つとなっていると言っても過言ではない。

一方で、海外諸国の追い上げも極めて急速である。永久磁石生産量では、既に一位の座を中国に譲っている。もし、永久磁石の開発・製造技術における我が国の優位性が失われることになれば、その影響は永久磁石製造の分野を越えて我が国の産業全体に広がり、我が国の産業、特に製造業の国際競争力の低下へと繋がることにもなりかねない。

Nd-Fe-B 磁石の発表以来、この特性を超える新永久磁石の探索や製造が試みられてきたが、現時点では、これを超える新永久磁石の開発には至っていない。平成 23 年には希土類資源偏在の問題も浮上し、磁石性能に加えて資源的な観点からも既存永久磁石の特性改善や新永久磁石の開発が必要とされている。このような状況に対応するためには、革新的な次世代永久磁石の創製に向けて、我が国の産学がその英知を結集して戦略的に取り組むことが必要不可欠である。

本技術テーマでは、革新的次世代永久磁石の創製のための基盤技術とそれに繋がる指針を確立するために、大学・公的研究機関等での基盤研究を推進し、我が国の産業競争力の維持・強化と社会基盤の強化に資することを目的に

- (1) 永久磁石の革新に繋がる磁石評価技術の開発
 - (2) 資源リスクを回避する観点から、現存のバルク Nd-Fe-B 磁石を代替できる磁石材料の研究
 - (3) 現存磁石の特性を大きく超える磁石を開発することを目的とする基礎研究
- に取り組んだ。

(2) プログラムオフィサー (P0)

福永 博俊 (長崎大学 理事)

(3) アドバイザー

表1 アドバイザー

氏名	所属 役職	任期
入山 恭彦	大同特殊鋼 (株) 技術開発研究所 理事	平成 23 年 10 月 ~ 令和 03 年 03 月
大橋 健	信越化学工業 (株) 研究開発部 主席研究員	平成 23 年 10 月 ~ 令和 03 年 03 月
佐久間 昭正	東北大学 大学院工学研究科 応用物理学専攻 教授	平成 23 年 10 月 ~ 令和 03 年 03 月
眞保 信之	TDK (株) 技術・知財本部 技術企画グループ 基盤技術支援部 シミュレーション室 担当課 長	平成 30 年 10 月 ~ 令和 03 年 03 月
杉本 諭	東北大学 大学院工学研究科 知能デバイス材 料学専攻 教授 (レアメタル・グリーンイノー ベーション研究開発センター センター長)	平成 23 年 10 月 ~ 令和 03 年 03 月
徳永 雅亮	電気学会 次世代永久磁石の研究開発動向と応 用に関する調査専門委員会 副委員長	平成 23 年 10 月 ~ 令和 03 年 03 月
西内 武司	日立金属 (株) 機能部材事業本部 機能部材研 究所 磁性材料研究部 主管研究員	平成 24 年 03 月 ~ 令和 03 年 03 月
森迫 昭光	信州大学 名誉教授	平成 23 年 10 月 ~ 令和 03 年 03 月
日高 徹也	TDK (株) 磁性製品ビジネス・グループ 材料開発部 金属材料開発課 担当係長	平成 23 年 10 月 ~ 平成 30 年 03 月
大山 和伸	ダイキン工業 (株) 常務執行役員	平成 29 年 06 月 ~ 平成 30 年 11 月

※所属、役職は技術テーマ終了時の情報に基づく。

2. 追跡調査の概要

(1) 調査の目的

追跡調査は技術テーマ終了後、一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況を明らかにし、JST（科学技術振興機構）事業の改善に資することを目的に行うもので、研究終了後から現在までの研究課題の発展状況等を調査した。

(2) 調査の対象

本追跡調査は、産学共創基礎基盤研究プログラム 技術テーマ「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」(略称)（平成 23 年度～令和 2 年度）の採択課題を対象とした。表 2 に追跡調査対象課題を示す。

表 2 追跡調査対象課題（採択課題）

採択年度	終了年度	項番	研究代表者（所属 役職）		研究課題名
H23	H27	01	石尾 俊二 ※1	秋田大学 大学院工学 資源学研究科 教授→名誉教授（ご逝去） 回答者： 長谷川 崇（准教授）	$L_{20}FeCo$ 及び $L_{10}FePt$ $bccFeCo$ に着目した革新的磁石創成に関する基礎研究
H23	H28	02	小野 寛太	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 准教授 → 大阪大学大学院工学研究科 教授・高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 特別教授	磁気構造可視化に基づく保磁力モデルの構築
H23	H28	03	加藤 宏朗	山形大学 大学院理工学研究科 教授 →（退職）山形大学非常勤講師	ナノスケール構造制御による高性能磁石創製への指針獲得
H23	H26	04	小林 久理眞 ※2	静岡理工科大学 理工学部 物質生命科学科 教授→（退職）	3次元磁区構造観察装置を用いた、永久磁石の微構造と磁区構造の相互作用の研究
H23	H25	05	高梨 弘毅	東北大学 金属材料研究所 教授→日本原子力研究	貴金属フリー L_{10} 型規則合金磁石創製の指針構築

				開発機構 先端基礎研究センター センター長	
H23	H25	06	中村 裕之	京都大学 大学院 工学研究科 教授	鉄系酸化物磁石の飛躍的高機能化を目指した微視的評価技術の開発と保磁力機構の解明
H26	H28	07	嶋 敏之	東北学院大学 工 学部 教授	ラティスエンジニアリングによる高磁化磁性材料の創製および高性能永久磁石材料の開発
H26	H28	08	中村 裕之	京都大学 大学院 工学 研究科 教授	遷移金属元素の価数に着目した鉄系酸化物磁石の実用材周辺の基礎科学とその高性能化に向けた物質設計指針の提案
H26	R01	09	柳原 英人	筑波大学 数理物 質系 教授	電子論に基づいたフェライト磁石の高磁気異方性化指針の確立
H28	H30	10	齊藤 準	秋田大学 大学院 理工学研究科 附 属理工学研究セ ンター 教授	磁石破断面の3次元磁場イメージングが可能な高分解能・交番磁気力顕微鏡の開発による保磁力機構の解明
H28	R01	11	嶋 敏之	東北学院大学 工 学部 教授	軽元素添加による高磁化磁性材料の創製ならびに革新的永久磁石材料の開発
H28	R02	12	中村 哲也	高輝度光科学研究センター 研究 プロジェクト推 進室客員主席研 究員 →東北大学国際 放射光イノベー ション・スマート 研究センター 放 射光次世代計測 科学連携研究部 門 教授	永久磁石の微細組織とその局所磁気特性の解析による高保磁力化の指針構築
H28	R02	13	宝野 和博	物質・材料研究機 構 理事／フェロ ー → 同、理事長	ネオジム磁石の超微結晶化による高温磁石特性の飛躍的改善

※1：現在は、当時の共同研究者であった長谷川 崇 准教授により研究が継続されている。

※2：退職時に今後の研究の継続はない旨、ご連絡をいただいている。

(3) 調査の方法

研究代表者に依頼して、研究開発の現状に関する調査票に回答頂いた。本追跡評価用資料では、共同研究を実施する企業名、共同研究費等の機密性の高い情報は非公開とした。なお、

本追跡評価用資料の公表にあたり、研究代表者から記載内容の確認と、公表の許諾を頂いた。

3. 追跡調査結果

(1) 研究開発の継続状況

①継続状況

本技術テーマで実施した研究開発の現在の継続状況を図1に示す。本技術テーマの研究開発課題13課題(2課題は2度目の採択あり)の内、7課題(54%)が「A. 現在も継続している」と回答している。また、3課題(23%)については、「C. 一旦中断しているが、条件が揃えば再開する予定である」、1課題(8%)が「E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している」としている。一方、D. 「研究を中止した」課題は2課題(15%)となっている。

多くの研究課題が、当時の研究を継続、もしくは派生的に創出された成果について研究開発を継続しており、技術テーマ全体としての研究課題の設定、研究計画は妥当であり、継続的な研究の発展性がある研究課題が大多数であったことがうかがえる。

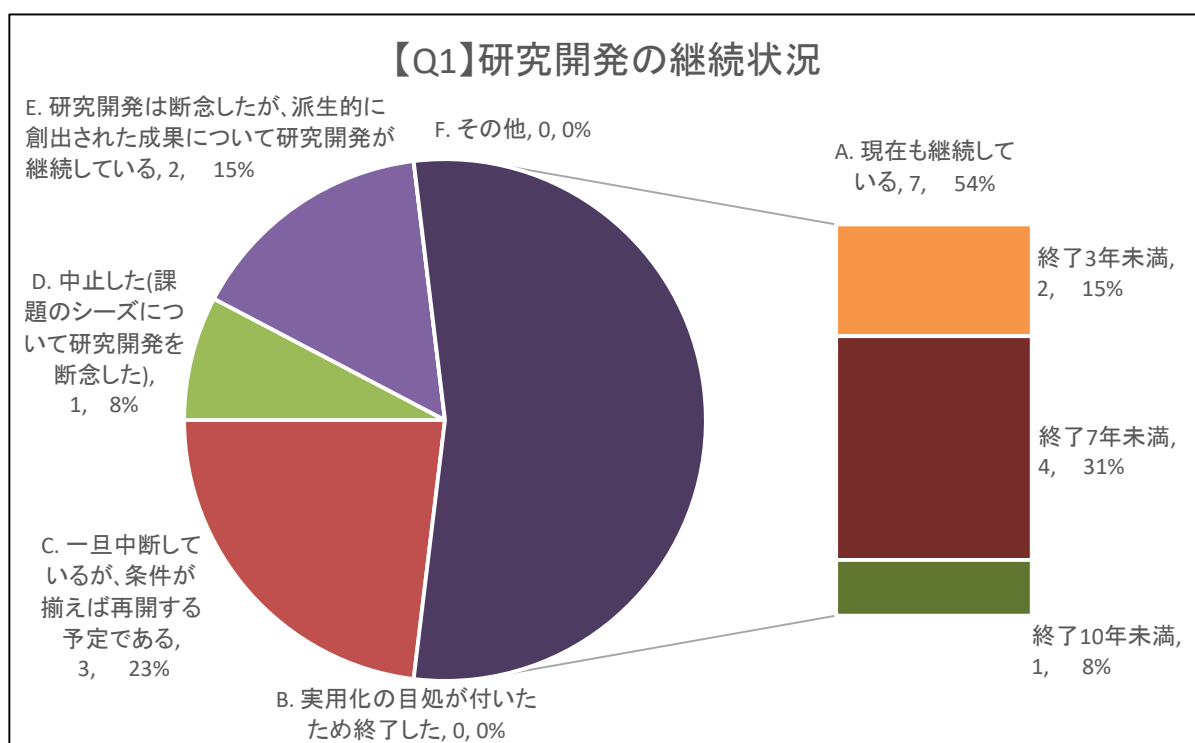


図1 研究開発の継続状況

②現在の研究開発体制

①で「A. 現在も継続している」もしくは「E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している」と回答した研究課題の現在の研究開発体制を図2に示す。

現時点で産業応用、実用化に向けて企業との共同研究開発を実施している課題(選択肢A, B及びC)は計2件(計25%)となっている。企業との意見交換を通じて産業界のニーズを把握する場としての産学共創の場が有益であったとの複数の回答をいただいております。本技術テーマで設定した産学共創の場が有効に機能していたことがうかがえる。一方で大多数(6件、75%)は、「E. 自機関での基礎研究(大学との共同研究を含む)」の基礎研究のステージにある。

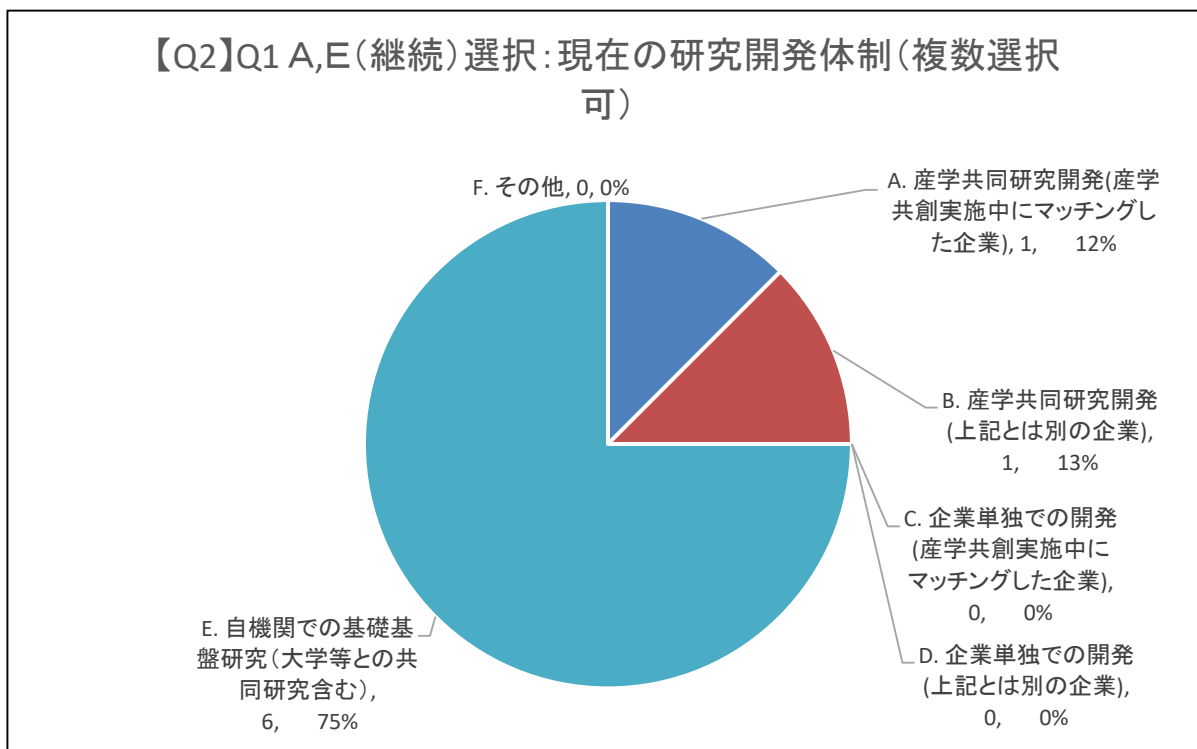


図2 現在の研究開発体制

③派生的に創出された成果

研究課題ごとに「(3) 研究開発成果(科学技術や社会・経済への波及効果)」で記載する。

④研究の中断・中止の理由

①で「C. 一旦中断しているが、条件が揃えば再開する予定である」もしくは「D. 中止した（課題のシーズについて研究開発を断念した）」と回答した研究課題（計4課題）が研究開発を中断・中止した理由を図3に示す。

「C. A, B以外の研究環境的要因（異動、退職、所属機関の方針転換等）」のため中止したとの回答が3件（43%）となっている。一方で研究のリソースに関わる「A. 研究開発資金の不足」「B. 研究開発人材の不足」が各2件（各28%）となっており、本技術テーマの研究課題終了後の新たな競争的資金などの確保、研究室が取り組んでいる他の研究テーマとの研究要員の割り振りなどに難しさがあったことが窺える。

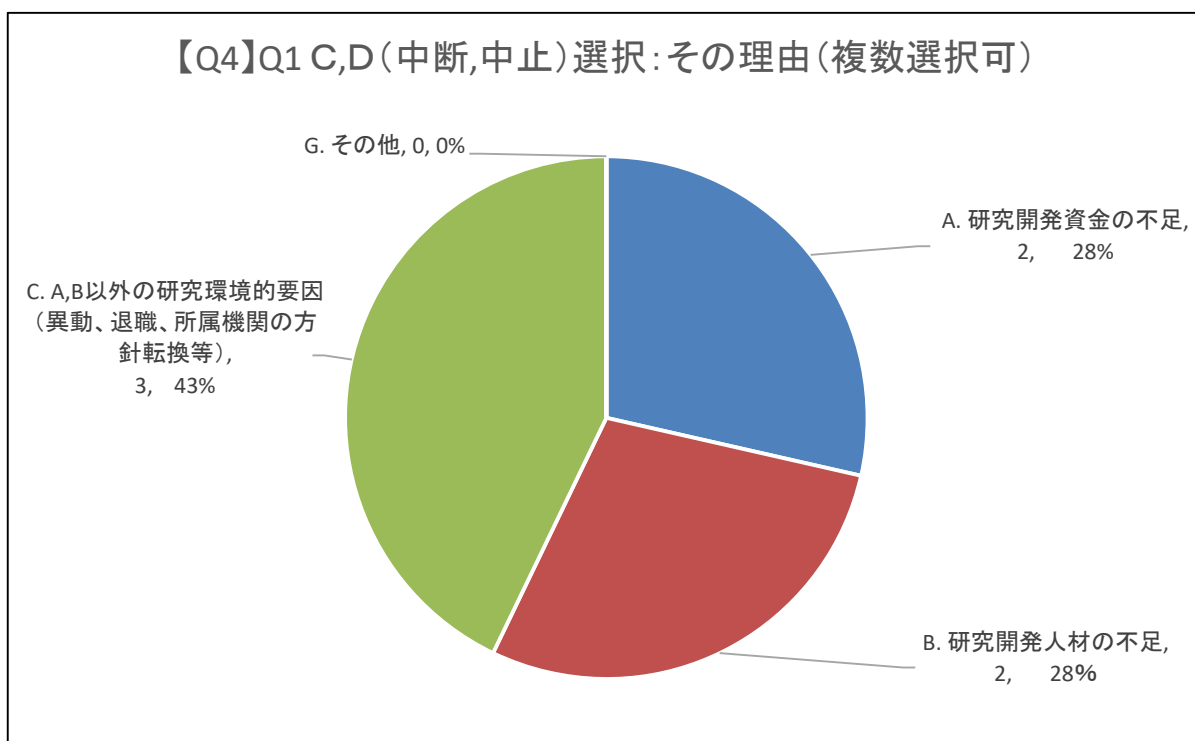


図3 研究中断・中止の理由

⑤進捗状況（技術成熟度）

研究開発を継続している場合は現在の、中断・中止した場合はその時点の技術成熟度を図6に示す。

各回答の件数は以下の通りである。

1. 基礎研究(発明:基本原理の明確化) : 5 課題 (42%)
2. 基礎研究(発明:技術シーズの形成) : 4 課題 (33%)
3. 基礎研究(可能性検証:要素技術や動作原理の検証) : 1 課題 (8%)
4. 応用研究・開発研究(可能性検証:実験室レベルでのプロトタイプ評価) : 2 課題 (17%)
5. 応用研究・開発研究(実用性検証:実用環境でのプロトタイプ作製) : 0 課題 (0%)
6. 応用研究・開発研究(生産技術開発:実用環境での生産検証) : 0 課題 (0%)
7. 実用化開発(生産技術開発:少量パイロット生産) : 0 課題 (0%)
8. 実用化開発(市場投入:生産体制構築) : 0 課題
9. 実運用(市場拡大:製品生産・出荷) : 0 課題

「1. 基礎研究(発明:基本原理の明確化)」が5 課題 (42%)、「2. 基礎研究(発明:技術シーズの形成)」が4 課題 (33%)、「3. 基礎研究(可能性検証:要素技術や動作原理の検証)」が1 課題 (8%) となっており、全体の83%が基礎研究のステージにある。一方、「4. 応用研究・開発研究(可能性検証:実験室レベルでのプロトタイプ評価)」は2 課題 (17%) となっている。磁石の応用・開発ステージの研究では、実用レベルの磁石試料の試作に比較的大型の設備を要するため、大学では、基礎研究に重点が置かれていると推察される。

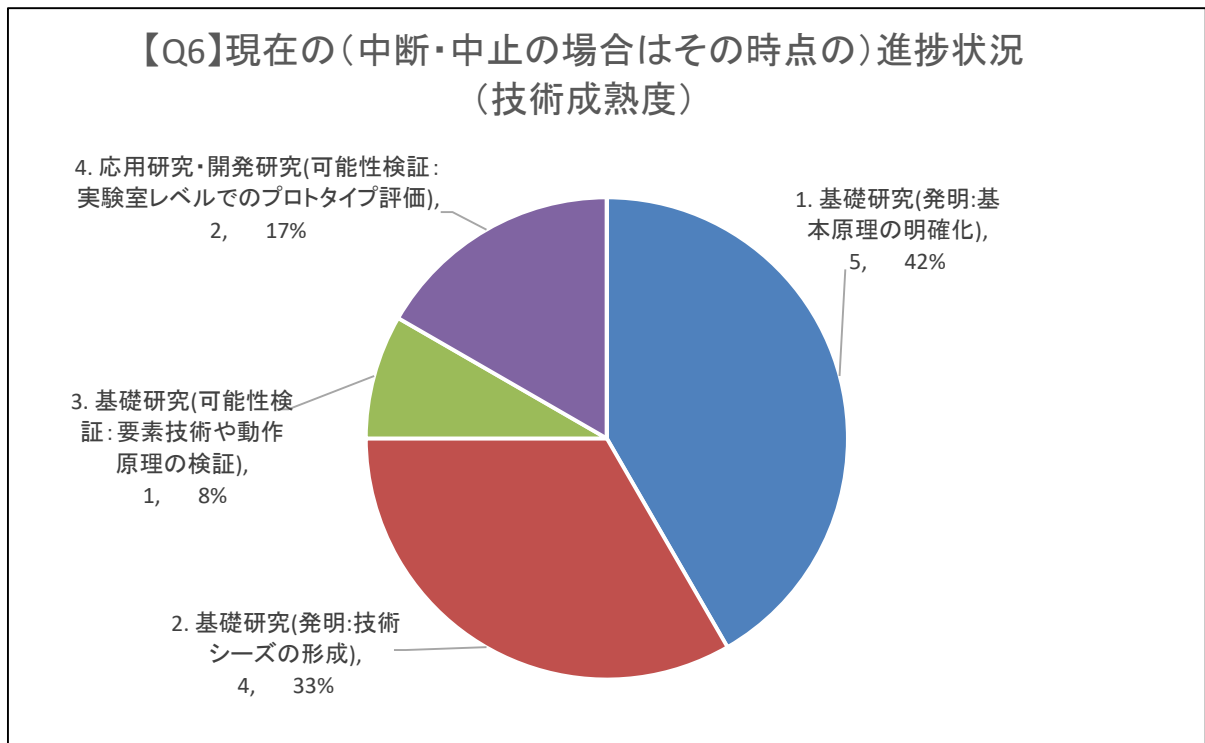


図4 技術成熟度

(2) 研究開発資金等

①資金の種別

「(1) 研究開発の継続状況 ①継続状況」で「A. 現在も継続している」、「B. 実用化の目処が付いたため終了した」もしくは「E. 研究開発は断念したが、派生的に創出された成果について研究開発が継続している」と回答した研究課題の、本技術テーマにおける研究開発終了後から現在までの研究開発資金を図5に示す。各回答の件数は以下の通りである。

回答（複数選択可）：

- A. 企業の自己資金で実施：4件（57%）
- B. JSTの競争的資金等で実施：0件（0%）
- C. JST以外の競争的資金・公的資金で実施：3件（43%）
- D. その他の資金で実施(他社からの投融資など)：0件（0%）

研究課題の終了後は、企業からの資金提供、及び競争的資金（JST、他の公的資金）により、研究開発が進められている。研究の継続には、企業の資金提供、または、競争的資金等の確保が基本的に重要な要件であることがうかがえる。

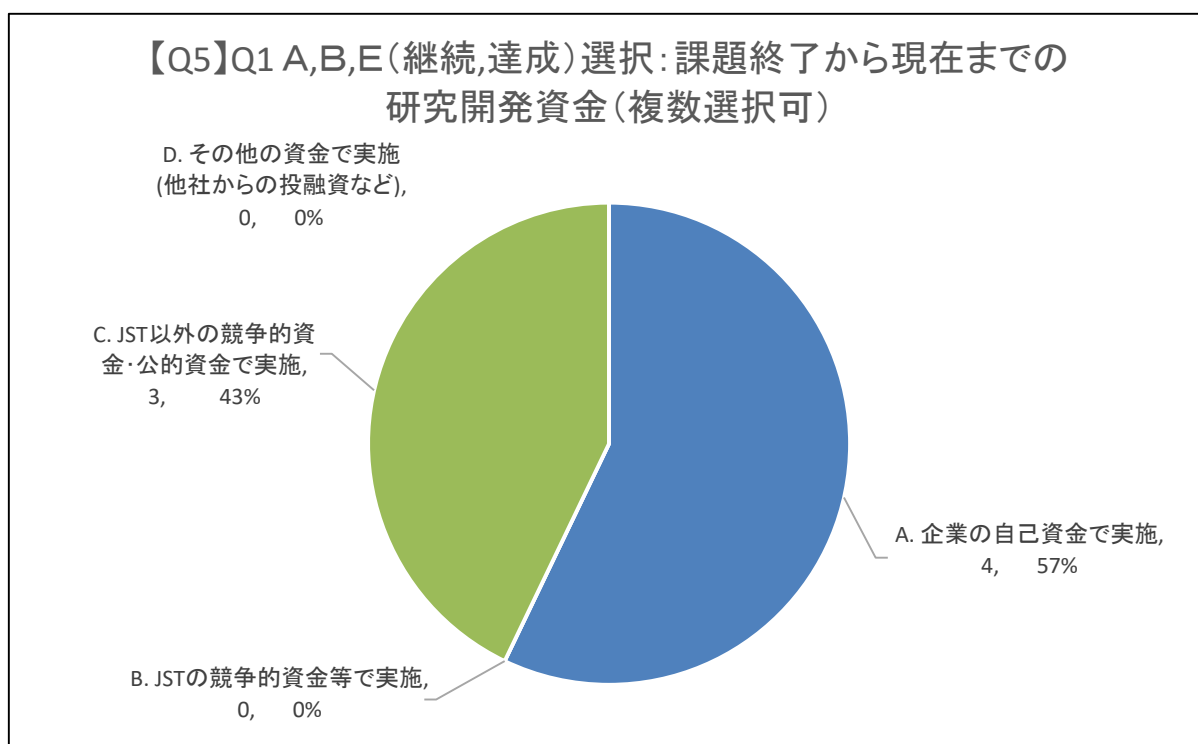


図5 研究開発資金の種別

②資金の獲得状況（公的研究資金）

本技術テーマにおける研究開発終了後に獲得した公的研究資金を表3に示す。

表3 公的研究資金リスト

項番	研究代表者	資金の詳細（制度名「課題名」、実施期間、代表者）
01	石尾 俊二	(i) JSPS 科研費基盤研究 (B)「全物質中で最高の磁石性能を示

		し得る FeCo 合金ベースの超強力磁石材の開発」(2020~2024) 長谷川 崇 (ii) NEDO 先導研究プログラム 未踏チャレンジ 2050「超高効率・高出力モーターに資する世界最強磁石の開発」(2017~2021) 長谷川 崇
02	小野 寛太	(i) 元素戦略プロジェクト 研究拠点形成型「磁石材料」(2012~2021) 広沢 哲
03	加藤 宏朗	(i) JSPS 科研費基盤研究(C)「Sm-Fe 系化合物における局所磁気異方性の回復による高保磁力の発現」(2020~2023) 小池 邦博 (ii) JSPS 科研費基盤研究(B)「超顕微解析に基づく積層型ナノコンポジット膜磁石の配向界面制御」(2020~2022) 板倉賢 (iii) JSPS 科研費基盤研究(B)「界面制御された積層型ナノコンポジットモデル磁石膜の開発」(2016~2019) 小池 邦博
05	高梨 弘毅	(i) NEDO「次世代自動車向け高効率モーター用磁性材料技術開発」「FeNi 超格子磁石材料の研究開発」(2014~2021)
06, 08	中村 裕之	(i) JSPS 科研費基盤研究(A)「多席化合物六方晶フェライトにおける能動的サイト選択置換による革新的磁性材料開発」(2022~2025) 中村裕之 (ii) JSPS 科研費基盤研究(C)「次世代鉄系酸化物磁石開拓のための汎用強磁性核共鳴法実証機の開発」(2017~2020) 中村裕之 (iii) JSPS 科研費基盤研究(C)「高性能フェライト磁石のサイト選択的コバルト置換法の確立」(2019~2021) 和氣剛
09	柳原 英人	(i) JSPS 科研費挑戦的研究(萌芽)「窒化・脱窒素法による遷移金属化合物の合成」(2020~2022) 柳原 英人
10	齊藤 準	(i) JSPS 科研費基盤研究(B)「高感度・超常磁性探針による超広帯域磁気イメージング法の開発とソフト磁性材料評価」(2021~2023) 齊藤 準
12	中村 哲也	(i) 元素戦略プロジェクト 研究拠点形成型「磁石材料」(2012~2021) 広沢 哲

(3) 研究開発成果 (科学技術や社会・経済への波及効果)

研究開発成果の科学技術や社会・経済への貢献についての事例を示す。なお、文中には企業との共同研究の内容も記載している。秘密保持の観点から、企業名、研究期間、企業からの共同研究費を非公開としている。

01. 石尾 (逝去後の研究継承者 長谷川) は、遷移金属合金の中では、最も高い飽和磁化を示すが、一軸磁気異方性エネルギー K_u が小さい体心立方構造 (bcc) の FeCo に着目し、体心正方晶 (bct) 構造をとる厚さ数ナノメートルのエピタキシャル FeCo 薄膜が、エピタキシャル応力によって約 $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ の高い K_u 値を示すことを明らかにした。その後の研究により、V, N 添加によって安定化された bct 構造の FeCo 格子により、 $10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3}$ を超える高い K_u を得ている。この bct 構造は、アモルファス基板の上に堆積された厚さ 100 nm の薄膜でも安定してお

り、バルク磁石への展開の可能性を示唆するものである。

03. 加藤は、ナノコンポジット磁石として、MgO 基材上に形成した Nd-Fe-B / Mo / Fe-Co 多層膜の研究を進め、650°C以上の高温アニーリングにより、面内磁気異方性、良好な角形比、および約 8kOe の高い保磁力を有する硬磁性を得ている。

05. 高梨は、高い一軸磁気異方性と飽和磁束密度を特徴とする Tetrataenite ($L1_0$ -FeNi) の研究を継続し、企業との共同で、単相 $L1_0$ -FeNi 粉末が、新しい方法である窒素挿入およびトポタクチック抽出 (NITE) によって合成可能なことを示した。提案された方法は、 $L1_0$ -FeNi を使用した磁石の研究開発を大幅に加速するだけでなく、非平衡状態の秩序化された合金を得るための新しい合成ルートを提供するものである。

06. 中村は、共同研究者らとともに、La-Co 共置換 M 型 Sr フェライトの Co 置換量上限が合成時の酸素分圧に非常に敏感であることを初めて明らかにした。この知見を元に、より高い酸素分圧下で、Co 置換量の高濃度化を図り、理論的な上限まで価数 2 価の Co を置換することに成功した。得られた $LaFe_{11}CoO_{19}$ 試料では、保磁力の主要因となる結晶磁気異方性が、Co 非置換 M 型 Sr フェライトの約 3 倍に達することを明らかにした。また、 ^{59}Co 核磁気共鳴 (NMR) 実験および計算から、Co が四面体配位の $4f_1$ サイトを占有したときのみ一軸磁気異方性が増大し、さらに格子が対称軸 (c 軸) 方向に圧縮されるほど、置換 Co が $4f_1$ サイトを Co 占有する傾向が高まることを示した。この結果は、適切なパラメータ制御により、ハードフェライト磁石の磁気性能を、限られた Co 含有量でより効率的に調整できる可能性を示唆するものである。

09. 柳原は、コバルトフェライト $Co_{0.73}Fe_{2.18}O_4$ (001) 薄膜に室温で 3% を超える大きな格子歪みを誘起することにより $K_u = 6.1 \pm 0.8 \text{ MJm}^{-3}$ の垂直磁気異方性エネルギーが得られることを実証した。誘導された K_u は、 Co^{2+} の局所結晶場と現象論的磁気弾性モデルによって定量的に説明できる。フェライト用の非磁性スピネル層を使用し正方晶格子変形を制御することにより、大きな磁気異方性を持つ新材料を開発できる可能性を示すものである。

10. 齊藤は、Co-GdOx 超常磁性チップを使用した交流磁気力顕微鏡 (A-MFM) の技術により、Nd-Fe-B 焼結磁石の平面内の動的な可逆的磁壁移動の観察が可能であることを示した。この技術は、磁化反転、磁壁移動などをナノスケールで研究するための新しいツールを提供するものである。

13. 宝野は、共同研究チームとともに、優れた高温特性が期待できる熱間加工ネオジム磁石に着目し、その作製条件と特性のデータを機械学習することにより、優れた磁気特性の発現が期待される作製条件を予測した。また予測結果にしたがって作成した磁石は、磁石特性を効率的に最大化 (例、(BH) max 約 380 kJ/m^3) できていることを実証した。また、省 Dy で微細粒磁石の特性を向上する技術として、2 段階拡散プロセスを開発するとともに、重希土類に替わり軽希土類元素 ((Ce, Y, and La) を活用した微細粒磁石の研究を進めている。

企業との連携研究体制については、磁石業界で必要とされる基盤研究をアカデミアとともに継続するため、NIMS と磁石メーカー 4 社による磁石材料ズオープンプラットフォーム (磁石 MOP : Materials Open Platform) を発足した。世界最高水準の微細構造解析技術やデータ駆動型研究を、材料設計とプロセス最適化に応用し、用途に応じた必要特性を持つ材料の開発を迅速に行うツールの開発などを目指している。

(4) 主な研究活動（主要論文、特許、受賞、テレビ、新聞報道等）

①主要論文

本技術テーマにおける研究開発終了後に発表した論文のうち、プロジェクトリーダーから回答のあった主要な査読付き論文（10報程度まで）を示す。【 】内の記載は、プロジェクトリーダーが主要論文として選定した理由等である。

・ 01 石尾

①長谷川崇, 希土類フリーである正方晶 FeCo 基合金磁石の開発に向けた進展（解説論文）, 電気学会論文誌 A（基礎・材料・共通部門誌）, Vol. 141, No. 2, p.p. 105~111 (2021).

【FeCo 基磁石開発の現状を解説】

<https://doi.org/10.1541/ieejfms.141.105>

②T. Hasegawa, T. Niibori, Y. Takemasa, M. Oikawa, Stabilisation of tetragonal FeCo structure with high magnetic anisotropy by the addition of V and N elements, Scientific Reports, Vol. 9, Article number 5248 (2019). 【FeCo 基磁石開発の重要な指針となる VN 添加に関する論文】

<https://doi.org/10.1038/s41598-019-41825-7>

③K. Takahashi, M. Sakamoto, K. Kumagai, T. Hasegawa, and S. Ishio, Uniaxial magnetic anisotropy of tetragonal FeCoV and FeCoVC films, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 51, No. 6, p.p. 065005-1~065005-9 (2018). 【故 石尾俊二先生が共著の FeCo 基磁石の論文】

<https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaa4a1>

④T. Hasegawa, S. Kanatani, M. Kazaana, K. Takahashi, K. Kumagai, M. Hirao, and S. Ishio,

Conversion of FeCo from soft to hard magnetic material by lattice engineering and nanopatterning, Scientific Reports, Vol. 7, Article number: 13215 (2017). 【FeCo 基薄膜における高保磁力化、永久磁石化を初めて報告】

<https://doi.org/10.1038/s41598-017-13602-x>

・ 03 加藤

①K. Koike, K. Ohashi, T. Suzuki, C. Okita, N. Inaba, H. Kato, M. Itakura, S. Hara, Y. Saito, S. Okubo, and H. Ohta, Effect of Mo monoatomic interlayer on magnetic properties of in-plane anisotropic Nd-Fe-B/Mo/FeCo nanocomposite multilayered films, AIP Advances, 11, 015134-(1-5), (2021). 【IF:1.703】

<https://doi.org/10.1063/9.0000181>

②H. Sato, Y. Kubo, T. Yoshioka, H. Tsuchiura, Y. Mizuno, K. Koike, K. Takahashi, and H. Kato, Reduction of Nd moments and local magnetic anisotropy in Nd₂Fe₁₄B single crystals, AIP Advances, 11, 025224(1-4), (2021). 【IF:1.703】

<https://doi.org/10.1063/9.0000148>

③K. Koike, T. Uchida, K. Sakurai, N. Inaba, N. Inaba, H. Kato, M. Itakura, S. Hara, Y. Saito, S. Okubo, H. Ohta, Infrared Laser Annealing of Nanocomposite Nd-Fe-B/Mo/FeCo Multilayered Magnet Films, AIP Advances, 12(3) 035042-1-1-035042-7-7, (2022). 【IF:1.703】 <https://doi.org/10.1063/9.0000346>

④H. Sato, Yoshioka, H. Tsuchiura, Y. Mizuno, K. Koike, K. Takahashi, and H. Kato, Rare-earth moment reduction and local magnetic anisotropy in $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ and $\text{Tm}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 545, 168684-1-168684-9, (2022). 【IF : 2.993】 <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168684>

・ 05 高梨

①Sho Goto, Hiroaki Kura, Eiji Watanabe, Yasushi Hayashi, Hideto Yanagihara, Yusuke Shimada, Masaki Mizuguchi, Koki Takanashi and Eiji Kita, Synthesis of single-phase L_{10} -FeNi magnet powder by nitrogen insertion and topotactic extraction, Scientific Reports, Vol. 7, pp. 13216/1-7 (2017年10月16日) 【企業との共同研究】 <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13562-2>

②Koki Takanashi, Masaki Mizuguchi, Takayuki Kojima and Takayuki Tashiro, Fabrication and characterization of L_{10} -ordered FeNi thin films, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 50, No. 48, pp. 483002/1-9 (2017年10月31日) 【Topical Review (招待論文)】 <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa8ff6>

③Sho Goto, Hiroaki Kura, Masahito Tsujikawa, Masafumi Shirai, Keita Ito, Takashi Suemasu, Koki Takanashi, Hideto Yanagihara, Synthesis and magnetic properties of tetragonally ordered $\text{Fe}_2\text{Ni}_2\text{N}$ alloy using topotactic nitriding reaction, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 885, pp. 161122/1-5 (2021年7月10日) 【企業との共同研究】 , <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161122>

④Takahiro Nishio, Hiroaki Kura, Keita Ito, Koki Takanashi, and Hideto Yanagihara, Fabrication of L_{10} -FeNi films with island structures by nitrogen insertion and topotactic extraction for improved coercivity, APL Materials, Vol. 9, No. 9, pp. 091108/1-8 (2021年9月14日) 【企業との共同研究】 <https://doi.org/10.1063/5.0062692>

・ 06、08 中村

①K. Uji, T. Waki, Y. Tabata, H. Nakamura, Phase stability, single crystal growth, and anisotropic magnetic properties of Ca-La magnetoplumbite-type ferrite, J. Solid State Chem. 245 (2017) 17-22 【物質新規合成】 <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2016.09.028>

②T. Waki, S. Okazaki, Y. Tabata, M. Kato, K. Hirota, H. Nakamura, Effect of oxygen potential on Co solubility limit in La-Co co-substituted magnetoplumbite-type strontium ferrite, Mat. Res. Bull. 104, 87-91 (2018) 【新物質合成】 <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2018.03.057>

③中村裕之, 永久磁石母材としての M 型フェライトの基礎物性と最近の研究動向, まぐね

13(2), 59–67 (2018) 【総説】

④H. Sakai, T. Hattori, Y. Tokunaga, S. Kambe, H. Ueda, Y. Tanioku, C. Michioka, K. Yoshimura, K. Takao, A. Shimoda, T. Waki, Y. Tabata, H. Nakamura, Occupation sites and valence states of Co dopants in (La, Co)-codoped M-type Sr ferrite: ^{57}Fe and ^{59}Co nuclear magnetic resonance studies, *Phys. Rev. B* 98, 064403/1–10 (2018) 【新説の提唱】

<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.064403>

⑤T. Waki, K. Uji, Y. Tabata, H. Nakamura, Single-crystal growth and magnetic properties of Co-substituted Ca-La magnetoplumbite-type ferrite, *J. Solid State Chem.* 270, 366–369 (2019) 【物質新規合成】 <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2018.11.036>

⑥H. Nakamura, T. Waki, Y. Tabata, C. Meny, Co site preference and site-selective substitution in La-Co co-substituted magnetoplumbite-type strontium ferrites probed by ^{59}Co nuclear magnetic resonance, *J. Phys.: Mater.* 2, 015007 (2019) 【新説の提唱】
<https://doi.org/10.1088/2515-7639/aaf540>

⑦中村裕之, Co 置換 M 型フェライト磁石中の Co の役割: ^{59}Co -NMR による研究, 粉体および粉末冶金 67(2), 78–83 (2020) 【総説】

⑧和氣剛, 永久磁石用フェライト化合物の La-Co 置換による磁気異方性向上原理の研究, 粉体および粉末冶金 69(4), 149–154 (2022) 【協会賞受賞記念論文】

⑨M. A. Kassem, T. Waki, Y. Tabata, H. Nakamura, Bismuth substitution at the strontium site in the magnetoplumbite-type Sr ferrite: Phase stability, structure, and magnetic properties, *J. Magn. Magn. Mater.* 560, 169603/1–8 (2022) 【新物質合成】
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169603>

⑩中村裕之, フェライト磁石の高性能化に向けた母材設計指針の提案, まぐね 17(4), 194–200 (2022) 【総説】

・ 07、11 嶋

① Masahito Tsujikawa, Yuito Mitsuhashi, and Masafumi Shirai, Theoretical design of tetragonal rare-earth-free alloys with high magnetisation and high magnetic anisotropy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 59, No. 5, Article no. 055506, pp. 1–5 (2020).
<https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab87dd>

・ 09 柳原

①J. -I. Inoue, H. Koizumi, H. Nakamura, and H. Yanagihara, Effects of local lattice deformation on magnetic anisotropy of W-type ferrites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 551, 169112 (2022) 【W 型フェライト材料へのモデル適用例】
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169112>

②S. Yoshihara, and H. Yanagihara, Magnetoelastic constant of thin films determined

by a four-point bending apparatus, Japanese Journal of Applied Physics, 61, 036502 (2022) 【得られた成果の新たな適用例】
<https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac4928>

③H. Onoda, H. Sukegawa, J.-I. Inoue, and H. Yanagihara, Strain Engineering of Magnetic Anisotropy in Epitaxial Films of Cobalt Ferrite, Advanced Materials Interfaces, 8, 2101034 (2021) 【最重要な成果、内表紙採用】
<https://doi.org/10.1002/admi.202170135>

④H. Latiff, G.G. Eslava, T. Devillers, H. Yanagihara, N.M. Dempsey, and D. Givord, Coercivity analysis of cubic and tetragonal (Cu,Co) ferrite particles within the global model, Journal of Physics D–Applied Physics, 54, 224001 (2021) 【重要な成果】
<http://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/abe5e1>

⑤Z. Li, J. Lu, L. Jin, J. Ruzs, V. Kocevski, H. Yanagihara, E. Kita, J. Mayer, R. E. Dunin-Borkowski, H. Xiang, X. Zhong, Atomic Structure and Electron Magnetic Circular Dichroism of Individual Rock Salt Structure Antiphase Boundaries in Spinel Ferrites, Advanced Functional Materials, 31, 2008306 (2021) 【IF:18.1】
<https://doi.org/10.1002/adfm.202008306>

・ 10 齊藤

①Yongze Cao, Yue Zhao, Jin Tang, Haifeng Du, Yan Zhou, Hitoshi Saito, Direct visualization of magnetic domain wall motion in Nd-Fe-B magnets by alternating magnetic force microscopy using Co-GdO_x superparamagnetic tip, Ultramicroscopy 212, 112980, (2020) 【企業との共同研究成果】
<https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2020.112980>

②M.V. Makarova, Y. Akaishi, Y. Suzuki, K.S. Rao, S.Yoshimura, H. Saito, High-resolution alternating magnetic force microscopy using an amorphous FeB-based tip driven by an inverse magnetostrictive effect: Imaging of the high-density magnetic recording media, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 546, 168755 (2022) 【企業との共同研究成果】
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168755>

・ 12 中村

① Yutaka Matsuura, et al., Alignment and Angular Dependences of Coercivity for (Sm, Ce)₂(Co, Fe, Cu, Zr)₁₇ Magnets, MATERIALS TRANSACTIONS, 62, 7, 1009–1012 (2021) 【IF: 1.389、新理論の提唱】
<https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2020402>

②隅谷和嗣 et al., 光源の違いによる走査型X線後方散乱ラウエ顕微鏡の性能比較, SPring-8/SACLA 利用研究成果集, 9, 6, 405–410 (2021) 【企業との共同研究成果】
DOI 10.18957/rr.9.6.405

・ 13 宝野

- ①J Li, H Sepehri-Amin, T Sasaki, T Ohkubo, K Hono, Most frequently asked questions about the coercivity of Nd-Fe-B permanent magnets, *Science and Technology of Advanced Materials* 22 (1), 386-403, 2021/12. 【磁石の保磁力発現メカニズムに関する解説記事】
<https://doi.org/10.1080/14686996.2021.1916377>
- ②G. Lambard, T.T. Sasaki, K. Sodeyama, T. Ohkubo, K. Hono, Optimization of direct extrusion process for Nd-Fe-B magnets using active learning assisted by machine learning and Bayesian optimization, *Scripta Materialia* 209, 114341, 2022/3 【機械学習によって微細粒磁石の特性を向上】
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114341>
- ③M. Korent, Xin Tang, H. Sepehri-Amin, K. Hioki, K. Ž. Soderžnik, S. Kobe, T. Ohkubo, K. Hono. Significant coercivity enhancement of hot-deformed bulk magnets by two-step diffusion process using a minimal amount of Dy. *Scripta Materialia*. 205, 114207, 2021/12. 【省 Dy で微細粒磁石の特性を向上】
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114207>
- ④Y. Milov, Xin Tang, H. Sepehri-Amin, N. N. Sysoev, T. Ohkubo, K. Hono. Influence of LRE (Ce, Y, and La) on microstructure and magnetic properties of $(\text{Nd}_{0.8}\text{LRE}_{0.2})\text{-Fe-B}$ hot-deformed magnets. *AIP Advances*. 11 [11] 115118, 2021/11. 【軽希土類元素を活用した微細粒磁石開発】
<https://doi.org/10.1063/5.0072706>
- ⑤Xin Tang, Jiawei Lai, H. Sepehri-Amin, T. Ohkubo, K. Hono. $(\text{Pr}_{0.75}\text{Ce}_{0.25})\text{-Fe-B}$ hot-deformed magnets for cryogenic applications. *Scripta Materialia*. 194, 113648, 2021/3. 【微細粒磁石の磁気冷凍への応用】
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.113648>
- ⑥David Billington, Hiroyuki Okazaki, Kentaro Toyoki, Yoshinori Kotani, Yukio Takada, Takashi Sato, Yuji Kaneko, Akira Kato, Taisuke T. Sasaki, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, Tetsuya Nakamura. Relationship between the microstructure, local magnetism and coercivity in Ga-containing Nd-Fe-B sintered magnets. *Acta Materialia*. 205, 116517, 2021/2. 【ネオジム磁石副相生成と磁化過程を解析】
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.116517>

②特許

本技術テーマにおける研究開発終了後の特許出願、特許登録を示す。

01 石尾

(i) 未公開国内出願 1件

(ii) 【発明の名称】硬質磁性材料

【特許番号】特許第 6923185 号 (P6923185)

【登録日】令和 3 年 8 月 2 日 (2021. 8. 2)

【発行日】令和 3 年 8 月 18 日 (2021. 8. 18)

【出願番号】特願 2017-73008 (P2017-73008)

【出願日】平成29年3月31日(2017.3.31)
 【公開番号】特開2018-174282(P2018-174282A)
 【公開日】平成30年11月8日(2018.11.8)
 【審査請求日】令和2年3月25日(2020.3.25)
 【特許権者】国立大学法人秋田大学

(iii) 【発明の名称】硬質磁性材料
 【特許番号】特許第6734578号(P6734578)
 【登録日】令和2年7月14日(2020.7.14)
 【発行日】令和2年8月5日(2020.8.5)
 【出願番号】特願2016-44907(P2016-44907)
 【出願日】平成28年3月8日(2016.3.8)
 【公開番号】特開2017-162934(P2017-162934A)
 【公開日】平成29年9月14日(2017.9.14)
 【審査請求日】平成31年3月6日(2019.3.6)
 【特許権者】国立大学法人秋田大学、秋田県

05 高梨

(i) 【発明の名称】 L_{10} 型FeNi規則合金の製造方法
 【公開番号】特開2018-41873(P2018-41873A)
 【公開日】平成30年3月15日(2018.3.15)
 【出願番号】特願2016-175873(P2016-175873)
 【出願日】平成28年9月8日(2016.9.8)
 【出願人】国立大学法人東北大学

(ii) 未公開国内出願 2件

13 宝野

(i) 未公開国内出願 1件

③受賞

本技術テーマにおける研究開発終了後の受賞歴を表4に示す。

表4 受賞リスト

項番	研究代表者	受賞者	賞の名称(授与機関)	受賞年月
01	石尾俊二	石尾俊二	瑞宝中綬章(死亡叙勲)	2018.03
01	石尾俊二	長谷川崇	優秀論文発表賞【A部門賞】「正方晶FeCoドットパターンの作製と磁気特性」(日本電気学会)	2017.09
05	高梨弘毅	高梨弘毅	平成30年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門) 「規則合金のナノ構造化とスピントロニクス機能に関する研究」	2018.04
05	高梨弘毅	高梨弘毅	令和元年度日本磁気学会賞「規則合	2019.09

			金を中心としたスピントロニクス材料の先進的研究」	
05	高梨弘毅	高梨弘毅	第18回日本金属学会村上記念賞 「規則合金を中心としたスピントロニクス材料の先進的研究」	2019.09
08	中村裕之	和氣剛	粉体粉末冶金協会2019年度協会賞第44回研究進歩賞「永久磁石用フェライト化合物のLa-Co置換による磁気異方性向上原理の研究」	2020.05
13	宝野和博	佐々木泰祐	本多記念研究奨励賞「マルチスケール組織解析を活用した金属材料の高性能化の指導原理の構築」	2021.11.26
13	宝野和博	世伯理那仁	本多記念研究奨励賞「希少元素を用いない高性能永久磁石材料の研究」	2022.05.27

④テレビ、新聞報道等

本技術テーマにおける研究開発終了後の取材実績を表5に示す。

表5 取材リスト

項番	研究代表者	取材対応者	内容	公開年月
13	宝野和博	佐々木泰祐	NHK ニュース「ネオジム磁石」AI で約1.5倍の強化に成功 物質・材料研究機構」 NIMS プレスリリース： https://www.nims.go.jp/news/press/2021/11/202111150.html	2021.11.27
13	宝野和博	磁石マテリアルズオープンプラットフォーム事務局	日本経済新聞「物質・材料研究機構(NIMS)と磁石メーカー4社による磁石マテリアルズオープンプラットフォームの発足の発足」 NIMS プレスリリース： https://www.nims.go.jp/news/press/2022/05/202205300.html	2022.05.30

(5) 研究開発成果に対する制度支援の効果等

今回の追跡調査の回答から、本技術テーマの産学共創の場などでの産業界アドバイザーからの意見、アドバイス、各企業からの磁石試料の提供により、産業界のニーズを研究計画に反映することが可能となり、また、それを契機に企業との共同研究が促進されたことがわかる。また、基礎磁分野の多くの研究者が応用指向の磁石の研究に取り組んだことにより、新たな研究コミュニティが形成され、研究の領域の拡大という点でも有用であったと推察される。

具体的な回答を以下に列記する。

<ul style="list-style-type: none"> ・基礎分野の多くの研究者が応用指向の研究に取り組んだことで、新たな研究コミュニティが形成された。その発展形としての研究が現在も継続中で、研究の領域も広がった。 ・産学共創の場において産業界の皆さんの意見を伺い、大学における基礎研究と企業が実施する応用研究、製品開発のギャップを感じられた点は、工学部で学生を指導する上で大変参考になった。

- ・第三者である大学関係者および企業の方々からの意見を伺えたのはとても貴重であった。
- ・産学共創の場を通じて、磁石メーカーが作製する信頼性の高い試料を用いて研究を効率的に進めることができるように、企業からの試料提供をアドバイザーにお取り計らいいただいた。さらに、産業界のニーズを研究計画に反映できたことで、企業との共同研究が促進された。
- ・産業界アドバイザーの皆様からのコメント、アドバイスが非常に有益であった。また、それを契機に共同研究が始まった。

プログラム全体については、研究期間が比較的長い（3年～6年）ことから、試行錯誤を含めて様々な挑戦が可能であったとのコメントがあった。

また、要望としては、産業界、企業が持っている技術的な問題意識がどこにあるか、より具体的に公開する機会を設けてほしいとの要望があった。JSTからも共創の場でのパネルディスカッションについて、企業に同様のお願いをしたこともあったが、企業の技術開発の方向性、重点課題など企業の技術開発の核心に触れる内容を公開の場で開示することになるため、企業として開示することは難しいとのことであり、大学と企業間の個別の二者間の共同研究の中で議論、理解をいただくことが現実的である。

また、研究資金等の面では、研究以外の用務を減らすため、事務職員の給与を直接費から充当したいとの要望がこれまでもあり、JSTでは、2021年度より直接経費から研究以外の業務の代行にかかる経費を支出可能とするバイアウト制度を導入している。一方で、研究者の事務作業の負担の低減は、重要な課題であり、計画書類、成果報告書類のフォーマットの統一・電子化、簡素化、データベースのデータ連携などを着実に進めていく必要がある。

- ・研究開発期間が6年あり、様々なことに挑戦できたことは良かったと思っています。いろいろと失敗をする余裕があったため、プログラム終了後の研究の展開が大きく開けたと感じている。
- ・産業界が持っている問題意識をもっと具体的、明示的な形で公開されるような機会があれば、アカデミアの研究の動機付けに役立つ。
- ・我々が、気がついていなかったような着眼点およびアイデアがあれば共創して提案していただきたかった。新物質の創製であるので基礎研究として継続できるよう、最低限に必要なとされる材料費の購入資金などを少額でも構わないので支援していただきたかった。
- ・事務補助員を直接雇用するなどして、研究代表者や主たる研究分担者の当該研究以外の用務を減らし、実質的なエフォートを増加することで、プロジェクト研究を最大限効果的に進めることが可能となる。今後、予算の用途に関する更なる柔軟性を期待する。

4. 総合所見

本技術テーマは、革新的次世代永久磁石の創製のための基盤技術とそれに繋がる指針を確立することを目指した研究開発であった。技術テーマ終了後2年を経過した現時点では、革新的な新材料の実用化までには至っていないが、既存の主力の磁石である NdFeB 系磁石やフェライト磁石、SmCo 系磁石については、本技術テーマ終了後も、着実に研究が進展しており、放射光・中性子利用計測、各種のマルチスケール解析技術などによる緻密な分析、検証をベースに大幅な特性改良につながる新しい材料設計指針、プロセス技術、機械学習を用いた最適設計技術などが提案されてきている。

革新的な新材料については、その高いポテンシャルから新材料として期待されていた FeCo 基合金、 L_{10} -FeNi 基合金の基礎研究、探索が現在も継続されており、着実に成果を生みつつある。FeCo 基合金については、薄膜試料での添加元素等の検討が進み、バルク磁石実現への道筋が見えつつある。また L_{10} -FeNi 基合金については、人工的なバルク材料の生成は極めて難しく、本プログラムの研究課題を含め、これまでに様々な生成プロセスが検討されてきたが、近年、単相 L_{10} -FeNi 粉末が新しい製造方法である窒素挿入およびトポタクチック抽出 (NITE) によって合成可能となっており、今後の研究開発の進展が期待できる。

各研究課題の現在の研究体制については全研究課題 13 課題の内、7 課題 (54%) が当該研究課題の研究を継続しており、2 課題 (15%) が派生的な研究開発を継続している。現時点で継続中の企業との共同研究は 2 件である。自機関 (及び他大学との共同研究) で研究を継続は 6 件 (75%) であり、さらなる企業との共同研究の推進が望まれる。また、課題終了時から現在までの研究資金については、競争的資金・公的資金 (43%) 及び企業の資金 (57%) で研究が進められており、外部資金の導入が研究継続に必須の状況となっていることがうかがわれる。

大学などのアカデミアの研究機関では、産業界の企業が持っている技術的な問題意識がどこにあるかについて知る機会は少なく、本技術テーマの産学共創の場の取り組みは、企業の技術開発の視点をアカデミアの研究者が各研究課題へ反映するための良い機会となっていた。また、企業からの磁石試料の提供は、アカデミアでの実用視点に立った材料解析、材料研究の推進に大きく寄与した。最近では、終了した元素戦略磁性材料研究拠点 (ESICMM) の機能を継承、発展させる取組みとして、物質・材料研究機構と磁石メーカー4社による磁石マテリアルズオープンプラットフォームが発足するなど、産業界で必要とされる磁石の基盤研究をアカデミアとともに継続する新たな研究体制もスタートしており、大学の研究者もこの様な企業との連携の取組みに積極的に参画していくことが望まれる。

COVID-19 感染拡大による影響については、海外渡航が困難な状況下で、海外の施設を用いた実験が行えず、研究の進展を大きく阻害したとのコメントがあった。また他の技術テーマにも共通するが、対面での多方面の研究者との打ち合わせ等が行われなかったため、副次的な情報収集・情報提供を行うことができなかったとのコメントがあった。オンライン会議の普及により、打合せなどで不自由を感じることは少なくなっているようだが、対面や実験の現場でないと進められない業務については引き続き不自由な状況が続いていると推察される。

最後に、追跡調査にご協力を頂いた研究代表者、共同研究グループの先生方へ感謝を申し上げます。研究者の先生方のご研究が益々発展されますことを祈念いたします。

以上