

**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」**

技術テーマ事後評価用資料

令和3年5月

目 次

1. 技術テーマ	3
2. プログラムオフィサー (P0)	3
3. 採択課題	3
4. 技術テーマのねらい (目標)	5
(1) 技術課題解決に向けた考え方	5
(2) P0 の目標	5
(3) 「産学共創の場」の活用方針	5
5. 研究課題の選考について	6
(1) 選考の方針	6
(2) 採択課題の構成	7
6. アドバイザーの構成について	10
7. 技術テーマのマネジメントについて	11
(1) P0 の運営方針	11
(2) 技術テーマの進捗状況の把握	11
(3) 技術テーマの研究計画の見直しの有無、概要	12
(4) 研究課題の評価と指導	12
(5) 課題中間評価における評価基準 (研究計画の見直し、研究中止、研究継続の根拠) ..	14
(6) 研究費の配分	14
(7) 「産学共創の場」の推進と活用	14
(8) アウトリーチ活動	15
8. 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立状況	16
(1) 課題評価結果を踏まえた最終目標の達成状況 (産業界で共通する技術的課題「技術テ マ」の解決に資する成果創出)	16
(2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果 (特に、技術のブレークスルー (新 指導原理、開発技術)、社会・経済の発展に繋がる重要な成果、派生して生まれた技術、等)	22
(3) 個別の産学共同研究への発展状況	25
(4) 技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等	25
(5) 今後のプログラム運営への提言	26
9. 技術テーマ中間評価時の指摘事項に対する対応状況	26
10. 総合所見	30

1. 技術テーマ

「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）

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、既存のバルク Nd-Fe-B 磁石を代替できる磁石材料の研究
- (3) 既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でいる。

2. プログラムオフィサー (PO)

福永 博俊（長崎大学 理事）

3. 採択課題

本技術テーマにおいては、平成 23 年度に 6 課題、平成 26 年度に 3 課題、平成 28 年度に 4 課題を採択した。平成 26 年度及び 28 年度の採択は、先行の採択課題の終了に伴い、技術テーマの目的を達成するために新たな研究課題を採択したものである。

表 1 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（秋田大学 大学院工学資源学研究科 教授）	$L2_0FeCo$ 及び $L1_0FePt-bccFeCo$ 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）	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）	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（静岡理工科大学 理工学部 物質生命科学科 教授）	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）	貴金属フリーL1 ₀ 型規則合金磁石創製の指針構築
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）	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）	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

※平成 28 年度採択「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（研究代表者：東北学院大学嶋敏之教授）」については、平成 28 年度採択時に研究代表者が H26 年度採択分の研究開発を実施中だったため、平成 28 年度採択分の委託費の配分はない。平成 30 年度の課題中間評価で次年度再評価（継続条件付き）、令和元年度再評価で継続条件未達のため令和元年度末で研究開発を中止した。

4. 技術テーマのねらい（目標）

（1）技術課題解決に向けた考え方

本技術テーマは、電気学会マグネティクス技術員会（永久磁石の評価技術に関する提案）及び日本ボンド磁性材料協会（次世代永久磁石の開発に関する提案）からの提案に基づいて設置された。技術課題の解決においては、以下の事情も考慮して開始した。

- (1) 産学共創基礎基盤研究プログラムでは、大学・公的研究機関が技術テーマの解決に取り組むが、永久磁石の開発を主な研究テーマとする大学・公的研究機関の研究者は多くはない。他分野の研究者の参入を促す募集とする必要がある。
- (2) 平成 23 年には、希土類資源の価格が高騰したが、Nd 等の軽希土類資源については、暫くは資源不足には陥らないと考えられる。したがって、Nd-Fe-B 系の磁石の飛躍的特性改善も重要である。
- (3) 磁石材料として、希土類磁石が注目されるが、フェライト磁石においても、我が国の高い技術水準を維持することが重要である。
- (4) 第一原理計算の助けを借りることで、革新的磁石の開発を促進することができる。
- (5) 我が国の磁石メーカーの技術水準は極めて高い。本技術テーマでは、産業界では実施できない研究課題を扱うべきである（前競争領域、非競争領域）。

希土類の価格は、2013 年後半からは落ち着きを示し、希土類フリー磁石開発への要請は一旦小さくなったかのように見えたが、

- (A) 高性能希土類フリー磁石の開発は、資源的にも價格的にも、着実に我が国の産業力強化に結び付くものである。
- (B) 希土類の資源供給状況には政治情勢や環境問題が大きく影響するので、不安定性を払拭はできない。リスク管理の観点からも希土類フリー磁石開発の開発は重要である。

を考慮し、平成 26、28 年度採択課題においても、フェライト磁石に関する研究課題のほかに希土類フリー磁石の開発に関する研究課題を採択した。

電気自動車等の需要が飛躍的に増加するとの予測や中国における希土類資源管理方法の変更等から、本技術テーマ終了間近の 2020 年半ばより Nd や Dy の価格が再び上昇しており、省希土類磁石、希土類フリー磁石、高性能フェライト磁石開発への要請が再び強くなっている。

（2）P0 の目標

前述の考え方を踏まえて、以下の項目を目標とした。ただし、すべての項目を満足することは目的とするものではない。技術テーマ開始時には、それぞれの項目に対応する研究課題を採択できるかは不明であったが、結果として各項目に対応する研究課題を採択できた。

- (1) 従来技術では得られない情報取得を可能とする新評価技術の開発とその利用
- (2) 既存磁石の飛躍的特性改善を可能とする基礎的知見の明確化と特性改善に向けた指導原理の提示
- (3) 新磁石（原理は既知）のポテンシャルの明確化と実用化に向けた指針の提示
- (4) 新原理に基づく磁石材料の開発指針の提示

（3）「産学共創の場」の活用方針

産学共創の場は、研究実施者が産業界の視点を理解する重要な観点である。また、産業界

が各研究課題の成果を把握し、次のステップに進むことを可能とする機会でもある。これを達成するために

- (1) 産学共創の場は非公開として、研究実施者に公開前の成果を発表することを可能とする。
- (2) 産学共創の場での情報については、企業内で共有することを可能とする。

として、運営した。

一方で、産業界からの参加者には、その視点を直接的に研究者に伝えることに躊躇する傾向も感じられた。この対策として

- (3) アンケート等も利用して、産業界の参加者の視点を明らかにし、研究実施者に提供すると共に、P0による指導に反映させる。

とした。さらに、産学共創の場の効果を高めるために

- (4) 産学共創の場に加えて、全実施課題に対して毎年サイトビジットを行う。サイトビジットは、産業界からのアドバイザーを中心に行なうが、全アドバイザーが参加する総括会議を毎年開催する。これらを融合利用して、各実施課題に対する研究の方向性の指導及び研究遂行支援を行なう。

とした。

5. 研究課題の選考について

(1) 選考の方針

「技術テーマのねらい」に基づいて、

- (1) 評価技術については、次世代高性能の磁石の開発を可能とする新しい評価技術を対象とする。評価技術を利用した高性能化のための指導原理の確立を念頭においた研究を進める観点から、評価技術を利用する研究者との共同研究を歓迎する。
- (2) 材料については、フェライト材料から希土類磁石を代替する希土類フリー磁石まで、競争力強化のための広範囲な次世代材料を対象とする。
- (3) 新永久磁石材料の設計あるいは設計指導原理の確立のための基礎研究も対象とする。得られる知見がどのように次世代磁石に繋がるかを明確にした研究を求める。
- (4) 実験と計算科学・物性論との融合を歓迎する。

の方針で選考した。

平成 23 年度の課題公募時には、喫緊の課題として希土類フリー磁石開発があった。次世代高性能磁石創製の指針構築に関する技術テーマであることを踏まえ、薄膜を対象とした申請課題については、バルク磁石への展開の可能性を選考審査の観点とした。特に、平成 28 年度の募集においては、P0 による公募・選考・技術テーマ運営にあたっての方針に「今回の募集においては、希土類資源の供給状況、本技術テーマでの成果、現存磁石材料における技術革新状況を考慮し、バルク磁石と開発技術の産業化を強く念頭においた、下記の例のような提案を求めます。」と記載し、バルク磁石への展開を重視することを明示した。

平成 28 年度の技術テーマ中間評価では、P0 への要望の中で、薄膜材料研究の有効利用として、「薄膜であっても磁石の革新的研究に繋がる知見が得られることも期待され、研究課題によってはバルク材を念頭に置いた薄膜材での研究・評価でも構わないと思われるものもあ

り、必要以上にバルク材料を意識する必要はない。」とのご指摘頂いた。

平成 23 年度の技術テーマ開始時には、希土類フリー磁石の開発が世界的に喫緊の課題と考えられていた。この状況を反映して、平成 23 年度の採択課題で材料を扱う 4 課題中 2 課題が希土類フリー磁石の開発（項番 01, 05：薄膜によるアプローチが中心）、1 課題が薄膜プロセスを利用した Nd-Fe-B 磁石の保磁力機構の解明と改善（項番 03）に関する研究であった。平成 26, 28 年度の採択においては、材料を扱う 5 課題のうち、研究の中心に薄膜を据えた研究が 3 課題（項番 07, 09, 11）という状況であった。

技術テーマ中間評価後に新たな募集は行われず、中間評価で頂いたご指導を公募要領の中に反映させる機会はなかったが、「原理の確認や材料のポテンシャルの確認は薄膜の利用でも良い。薄膜の研究の中で、是非、バルク化の芽を探して頂きたい。」が P0 の一貫した方針であった。

（2）採択課題の構成

平成 28 年度までに、合計で 13 課題を採択した。それぞれの研究課題は、複数の目標を掲げているが、主要な目標・材料で整理すると、

- (A) 3D での磁化反転過程に関する情報を得るための新評価技術開発に関する課題：4 課題
- (B) フェライト磁石に関する課題：3 課題、
- (C) 希土類フリー磁石に関する課題：4 課題
- (D) Nd-Fe-B 系磁石に関する研究：2 課題

と整理される。一方で、P0 が設定した技術テーマの目標の観点から整理すると、

- (1) 新評価技術の開発に関する課題：4 課題
- (2) 既存磁石の飛躍的特性改善を可能とする基礎的知見の明確化と特性改善に向けた指導原理の提示：4 課題
- (3) 新磁石（原理は既知）のポテンシャルの明確化と実用化に向けた指針の提示：2 課題
- (4) 新原理に基づく磁石材料の開発指針の提示：3 課題

である。研究課題の扱う目標・材料と P0 の設定の技術テーマの関係を整理すると、表 2 のようになる。結果として、所期に目指した内容に 4 つの目標を達成するための研究課題をバランス良く採択することができた。

表 2 要素技術による採択課題の分類

大分類	小分類	研究課題 (項番)	PO の目標	
新評価技術 (3D 磁化過程の解明)	MFM, Kerr 効果顕微鏡, 走査型ホー素子顕微鏡	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 (04)	(1)	
		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 (10)	(1)	
	放射光	磁気構造可視化に基づく保磁力モデルの構築(02)	(1)	
		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解明 (12)	(1)	
次世代磁石の創製	フェライト磁石の高性能化	La-Co 置換 M フェライト	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 (06)	(2)
		スピルフェライト	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 (08)	(2)
			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 (09)	(4)
	希土類フリー高性能磁石の開発	Fe-Ni, Fe-Co 系	貴金属フリーL1 ₀ 型規則合金磁石創製の指針構築 (05)	(3)
			L2 ₀ FeCo 及び L1 ₀ Fe-Pt-bccFeCo に着目した革新的磁石創成に関する基礎研究 (01)	(3)
		Mn 系	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 (07)	(4)
			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 (11)	(4)
	Nd-Fe-B 系	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 (03)	(2)	
		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 (13)	(2)	

* カッコ内の数字は, 表 1 に示した項番を表す。

「4 (1) 技術課題解決に向けた考え方」で述べたように, 本技術テーマでは, フェライト磁石も含めて課題を採択することにした。本技術テーマで扱う材料と, 指針獲得のために用いる手法を整理すると, 表 3 のようになる。広範囲の材料を取り上げるとともに, 「計算科学・物性論」との融合研究を進めた。

研究課題名	項番	対象材料				要素技術		
		Nd-Fe-B系	その他の希土類系	フェライト系	希土類フリー	評価技術開発	ナノ構造制御	計算科学・物性論
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	04	○				◎		
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	10	○				◎		
磁気構造可視化に基づく保磁力モデルの構築	02	○				◎		○
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解明	12	○	○			◎		
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	06			◎		○		○
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	08			◎		○		○
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	09			◎			○	
貴金属フリーL1 ₀ 型規則合金磁石創製の指針構築	05				◎		○	○
L2 ₀ FeCo及びL1 ₀ Fe-Pt-bccFeCoに着目した革新的磁石創成に関する基礎研究	01				◎		○	○
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	07				◎		○	○
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	11				◎		○	○
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	03	◎	○				○	○
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	13	◎				○	○	○

◎：主たる取組， ○：関連した取組

6. アドバイザーの構成について

(1) 人選にあたっての考え方

表4 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
井上 光輝	豊橋科学技術大学 理事・副学長	平成23年10月～平成24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

アドバイザーについては、産業界とアカデミアの領域から以下の観点で選定し、技術テーマを開始した。

(1) 産業界からのアドバイザー

磁石を製造する企業に所属し、磁石に関する技術動向に幅広い知見有する研究者から選定する。アドバイザーには、焼結Nd-Fe-B磁石製造メーカー、フェライト磁石製造メーカーを含む構成とする。

(2) アカデミアからのアドバイザー

磁石に関する幅広い知見を有する研究者とする。「5(1)選考の方針」に沿った課題選考とテーマ運営を行う観点から、アドバイザーには、物性科学に詳しい研究者、薄膜に詳しい研究者を含める。計算科学については、POが対応可能である。

その後、技術テーマの運営の中で、磁石の応用も考慮した磁石開発の必要性が指摘され、

(3) 磁石の応用の知見があるアドバイザー

を加えることし、ダイキン工業（株）の大山和伸氏を選任した。大山氏の任期終了後は、TDK（株）の眞保信之氏がその任を果たした。

7. 技術テーマのマネジメントについて

(1) P0 の運営方針

本技術テーマにおいては、以下の運営方針掲げてテーマをスタートさせた。

- (1) 産学共創基礎基盤研究プログラムでは、大学・公的研究機関が技術テーマの解決に取り組むが、永久磁石の開発を主な研究テーマとする大学・公的研究機関の研究者は多くはない。課題募集の際には、具体的なターゲット例示する等して、他分野の研究者の参入を促す。
- (2) 平成 23 年には、希土類資源の価格が高騰したが、Nd 等の軽希土類については、暫くは資源不足には陥らないと考えられる。したがって、Nd-Fe-B 系磁石の飛躍的特性改善に関する課題も推進する。
- (3) 磁石材料として、希土類磁石が注目されるが、フェライト磁石においても我が国の高い技術水準を維持することが重要である。この観点から、飛躍的特性改善に関する研究課題も推進する。
- (4) 第一原理計算の助けを借りることで、革新的磁石の開発を促進することができる。この観点を各研究課題の推進に反映させる。
- (5) 我が国の磁石メーカーの技術水準は極めて高い。本技術テーマでは、産業界では実施できない研究課題を扱う。
- (6) 運営には、事務局としての JST に加えて、P0 及びアカデミアと産業界から選定されたアドバイザーが係わる。P0 とアドバイザーは、各研究課題の研究の方向付けに積極的に関与し、産業界の視点や知見を加味した研究遂行がなされるように指導する。

10 年間の実施期間を通じて、設定した運営方針はおおむね有効に機能したと評価しているが、Nd-Fe-B 磁石については、商品化されている磁石であることから、競争領域と前競争領域の境界が曖昧であった。産業界からのアドバイザーもそれぞれの企業の研究内容については明らかにできない面もあり、運営上難しい点であった。

(2) 技術テーマの進捗状況の把握

各実施課題へのサイトビジット、産学共創の場及び成果報告書で、各実施課題の進捗状況を把握し、「4 (2) P0 の目標」に照らして、技術テーマの進捗状況を把握した。

サイトビジットは、P0 と産業界からのアドバイザー（必要に応じてアカデミアのアドバイザーも加えた）で行い、研究実施者と意見を交わしながら各実施課題の進捗状況を詳しく把握した。研究の方向性についての産業界の視点を、P0、アドバイザー及び研究実施者が共有することを可能とする機会として、非常に有効だったと考えている。

産学共創の場においては、サイトビジットに比べてより多くの産業界の視点を踏まえたご意見を頂くことができた。一方で、研究代表者への直接的アドバイスを躊躇される傾向も見られたので、書面（無記名可）での意見・アドバイスの集約を行い、産業界の視点を把握するとともに、意見・アドバイスの内容を研究実施者にもフィードバックした。

なお、「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（項番 11）」の最終年度の進捗状況については、サイトビジット、産学共創の場に加えて、P0 と一部のアドバイザーが skype 会議により研究代表者らから進捗状況の報告を受けることにより確認した。

（3）技術テーマの研究計画の見直しの有無、概要

本技術テーマにおいては、基本的には、「7（1）P0 の運営方針」に示したとおりの計画で進めた。薄膜を利用した研究課題においては、バルク磁石への展開を意識して研究を進めて頂くよう指導した。特に、平成 28 年度の募集においては、P0 による公募・選考・技術テーマ運営にあたっての方針に「今回の募集においては、希土類資源の供給状況、本技術テーマでの成果、現存磁石材料における技術革新状況を考慮し、バルク磁石と開発技術の産業化を強く念頭に置いた、下記の例のような提案を求めます。」とし、バルク磁石への展開をより重視した研究を求めた。

これに対して、平成 28 年度の技術テーマ中間評価では、P0 への希望の中で、薄膜材料研究の有効利用として、「薄膜であっても磁石の革新的研究に繋がる知見が得られることも期待され、研究課題によってはバルク材を念頭に置いた薄膜材での研究・評価でも構わないと思われるものもあり、必要以上にバルク材料を意識する必要はない。」とのご指摘を頂いた。

平成 23 年度の技術テーマ開始時には、希土類フリー磁石の開発が世界的に喫緊の課題と考えられていた。この状況を反映して、平成 23 年度の採択課題で材料を扱う 4 課題中 2 課題が希土類フリー磁石の開発（項番 01, 05：薄膜によるアプローチが中心）、1 件が薄膜プロセスを利用した Nd-Fe-B 磁石の保磁力機構の解明と改善（項番 03）に関する研究であった。平成 26, 28 年度の採択においては、材料を扱う 5 課題のうち、研究の中心に薄膜を据えた研究が 3 課題（項番 07, 09, 11）という状況であった。

技術テーマ中間評価後に新たな募集は行われず、公募要領の中に中間評価で頂いたご指摘を反映させる機会はなかったが、「原理の確認や材料のポテンシャルの確認は薄膜の利用でも良い。薄膜の研究の中で、是非、バルク化の芽を探して頂きたい。」が P0 の一貫した方針であった。

P0 の方針や頂いたご指摘は、具体的に技術テーマの運営に以下のように反映した。

平成 26 年度採択の「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（項番 09）」では、薄膜材料による原理の干渉と材料のポテンシャルの確認後にヤーン・テラー効果を利用した粉末材料の開発へとステップを進めることができた。平成 26, 28 年度採択の Mn 系磁石の開発（項番 07, 11）は、薄膜とバルクの研究を併用して研究が開始されたが、最終局面では P0 の指示により、薄膜プロセスによる原理の検証に集中して研究が進められた。さらに、平成 28 年度採択の「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（項番 10）」では、バルク磁石の評価を目的とした研究を進める中で、薄膜材料を利用した原理の検証が試みられた。

（4）研究課題の評価と指導

サイトビジットと産学共創の場での議論を反映させる形で研究の方向性を指導した。課題に共通した指導方針は

- (1) 評価技術に関しては、産業界が期待する情報に沿った研究の方向性の設定
- (2) 材料の創製に関しては、磁化及びその温度特性の評価

である。上記の指導方針は、従前は永久磁石を主な研究の対象としなかった研究者が技術テ

一マの解決に取り組んでいることを反映している。

個別の研究課題に対して、研究の進捗状況を考慮しながら、研究グループの追加、研究項目の廃止・追加、研究対象の変更、産業界からの支援の仲介等を行った。そのうち、研究グループの追加については、課題採択時の議論を踏まえ、研究開始時に行った。追加したグループは、主に、第一原理計算により実験の方向性を支援するグループや磁石の評価方法を理論的に支援するグループである。また、産業界からは、評価用試料等の協力を頂いた。

研究計画の大幅な変更を伴う指導の例を以下に示す。

(A) 項番 01, 課題名 : $L2_0FeCo$ 及び $L1_0FePt$ - $bccFeCo$ に着目した革新的磁石創成に関する基礎研究

- ・ 研究項目の廃止（コストの観点から産業競争力の強化に繋がらないとの視点）
- ・ 新たな研究項目の追加（研究目標達成のため）

(B) 項番 02 課題名 : 磁気構造可視化に基づく保磁力モデルの構築

- ・ 研究対象の集中化（研究目的達成のため）

(C) 項番 03 課題名 : 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

- ・ 研究項目の廃止（コストの観点から産業競争力の強化に繋がらないとの視点、研究資源の集中による目的達成）
- ・ 産業界からの支援仲介
- ・ 研究組織の追加（研究目的達成のため）

(D) 項番 04, 課題名 : 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

- ・ 研究年次計画の変更（研究目的達成の観点から研究実施順序変更）
- ・ 研究対象の集中化（研究の発散抑制）と新たな研究項目の追加（研究目標達成のため）

(E) 項番 07, 課題名 : 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

- ・ 研究組織の追加（研究目的達成のため）

(F) 項番 09, 課題名 : 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

- ・ 研究年次計画の変更（研究目的達成の観点から研究実施順序変更）

(G) 項番 10, 課題名 : 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

- ・ 研究組織の追加（研究目的達成のため）
- ・ 産業界からの支援仲介
- ・ 研究項目の追加（研究目的達成のため）

(H) 項番 11, 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

- ・ 研究項目の廃止（研究資源の集中のため）
- ・ P0 指示による達成目標の設定と研究項目の集中

等を行った。

課題中間評価時には、フェロ磁性 Mn 系合金の創製に近づいているのか否か、その時点

での実験結果からは、判断が困難であった。そこで、令和元年度上半期を目処に再評価を行うこととし、「再評価以降の研究継続を可」とする条件を

1. 正方晶 XA 構造が実現していること
2. 高磁気異方性が実現していること

と設定し、薄膜技術の有効利用と研究資源の集中により、条件達成を求めた。さらに、課題に関する指導を強化するために、アドバイザー3名を選任して P0 のフォローをお願いした。

令和元年度再評価においては、令和元年7月の段階で継続条件未達のため、年度末で研究開発の中止を決定した。研究を終了するにあたり、成果のまとめと終了後の取組について、文章（テーマ事後評価添付資料 pp.9-10）及び skype 会議 による指導を行った。

(I) 項番 12, 課題名：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

- ・ 産業界からの支援仲介
- ・ 研究対象の変更と追加（目的達成のため）
- ・ 研究項目の追加（目的達成のため）

(5) 課題中間評価における評価基準（研究計画の見直し、研究中止、研究継続の根拠）

中間評価時における評価基準としては、研究代表者が設定したマイルストーンを参照したが、高い目標のマイルストーンを掲げた研究課題と妥当な目標を掲げた研究課題が存在している。このことを考慮し、「マイルストーンの達成度」に加えて、「研究代表者による研究のマネジメント」、「中間評価時での技術テーマの解決への寄与及びそれによる将来的な産業競争力強化への貢献度」、「産業力強化に資する基礎的な研究としての新たな知見の創出」、「産学共創の場（サイトビジットを含む）等の研究への活用状況」、「中間評価後の研究計画と研究を継続したときに期待される成果」を評価し、「4. 技術テーマのねらい（目標）」への十分な寄与が期待できることを「継続決定」の基準とした。

(6) 研究費の配分

初年度を除いて、一課題あたりおおよそ 30,000 千円/年の研究費（間接経費を含む）を配分したが、一部、研究の加速のために、その必要性を評価して、重点配分を行なった。加速経費は1課題あたり、50万円～200万円程度とした。また、項番 12「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」については、令和元年度途中で研究代表者の所属機関変更があったため、新しい所属機関での研究継続を容易とすることを目的に、新所属機関にデータ処理用ワークステーション、旅費等を措置する対応を行った。

H28 年度採択の項番 11「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（研究代表者：東北学院大学嶋敏之教授）」については、平成 28 年度採択時に研究代表者が平成 26 年度採択分の研究開発を実施中だったため、平成 28 年度採択分の研究費の配分を行わなかった。平成 30 年度課題中間評価で次年度再評価（継続条件付き）、令和元年度再評価で継続条件未達のため令和元年度末で研究開発を中止した。

上記の理由から研究課題ごとに、配分額に差が出ており、詳細は別添資料（非公開）別表 2 に示している。

(7) 「産学共創の場」の推進と活用

「4（3）「産学共創の場」の活用方針」に示した方針に従って、推進・活用した。また、

研究進捗状況の報告と質疑・コメントに加えて、パネルディスカッション等も組み込み、産業界の視点や知見を多角的に議論することに努めた。

「6 アドバイザーの構成」に示すように、産業界からのアドバイザーは主に磁石メーカーの研究者であるので、サイトビジットでは、磁石メーカーの視点で詳細で深い議論がなされる。これに対して、産学共創の場には、磁石のユーザを含めた研究者が参加するので、両者の視点を融合して、課題研究者を指導するように努めた。

産学共創の場等を活用して行なった指導の例を「7 (4) 研究課題の評価と指導」に示している。研究遂行支援としては、評価用試料の提供、研究用スパッターターゲットの作製（アドバイザーが所属する企業が作製）等を行なった。さらには、企業との共同研究実施にも協力した。例えば、テーマ事後評価添付資料「6 産学共同研究等への展開状況」に記載の別表7の項番06等が相当する。

なお、令和2年度においては、新型コロナウイルス感染症拡大の影響で、サイトビジット、産学共創の場ともオンライン開催とした。

(8) アウトリーチ活動

(1) 制度の紹介

① The 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Their Applications (ポスター展示) (2012.9.2-5)

INDUSTRY-ACADEMIA COLLABORATIVE R&D PROGRAMS (Collaborative Research Based on Industrial Demand)
Japan Science and Technology Agency

② 日本磁気学会学会誌

「産学共創基礎基盤プログラム」～産がかかわる新しい形の基礎基盤プログラム～
まぐね (Magnetics in Japan), Vol.9, No.1, pp.28-32 (2014.2).
福永博俊

③ 日本ボンド磁性材料協会

「JST 産学共創基礎基盤研究プログラム：革新的次世代高性能磁石創製の指針構築 — その概要と役割 —」
福永博俊
2016BM シンポジウム (2016.12.9)

④ Korea-Japan international Symposium on Permanent Magnet Materials (2019.2.14)

Introduction of a national project of permanent magnets in Japan; “INDUSTRY-ACADEMIA COLLABORATIVE R&D PROGRAMS” High Performance Magnets: Towards Innovative Development of Next Generation Magnets
Hirotoshi Fukunaga

(2) 研究課題成果公表のためのシンポジウム等

⑤ 電気学会 マグネティックス研究会

テーマ 「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築2」
開催日：2016年11月29日(火)

⑥ 第41回 日本磁気学会学術講演会シンポジウム

Symposium “High performance magnets and evaluation techniques toward innovative development for next generation magnets”

Chief Organizer: H. Fukunaga (Nagasaki Univ.)

開催日：2017年9月20日

文部科学省元素戦略磁性材料研究拠点 (ESICMM) と協力してシンポジウムを設定し、「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」での研究及びコンセプトを同じくする研究について、その成果を磁気研究のコミュニティで共有した。

⑦ JST 新技術説明会：産学共創基礎基盤研究プログラム 磁石 新技術説明会

～解析・分析技術～「磁性材料内部の磁気構造を可視化する技術」

開催日：2018年2月22日（木）

https://shingi.jst.go.jp/kobetsu/kyousou/2017_kyousou.html

⑧ 日本金属学会秋季講演大会シンポジウム

S7 永久磁石開発の元素戦略6 一次世代材料の開発を支える基礎・基盤研究—

開催日：2018年9月21日（金）

文部科学省元素戦略磁性材料研究拠点 (ESICMM) での研究成果を中心に企画されたシンポジウムに、「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築」での研究成果を加え、磁気研究のコミュニティで共有した。

⑨ 電気学会 マグネティックス研究会 (2020年)

テーマ「永久磁石と応用」

開催日：2020年12月22日（火）

⑩ 技術テーマ「磁石」パンフレットの公開 (JST 産学共創 WEB サイト)

磁石の研究・開発にかかわる〔産〕と〔学〕の多くの方々に、研究成果をご覧いただけるよう、全研究課題をまとめたパンフレットを作成し公開した。

https://www.jst.go.jp/kyousou/topics/k_tp_00_20201029_00.html

等である。詳細は、技術テーマ事後評価用資料添付資料「12アウトリーチ活動」に示している。

8. 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立状況

(1) 課題評価結果を踏まえた最終目標の達成状況（産業界で共通する技術的課題「技術テーマ」の解決に資する成果創出）

本技術テーマでは、「4(2)P0の目標」に示す4つの目標を掲げて研究を展開した。研究課題をそれぞれの目標ごとにまとめ、発見した新指導原理や開発した技術を整理して、表5に示している。各目標の達成状況を以下に説明する。

(1) 従来技術では得られない情報取得を可能とする新評価技術の開発とその利用

表 2 及び 5 に示した項番 04, 10, 02, 12 の課題が相当する。項番 04 及び 10 は 3 次元磁区構造に迫る評価技術の、項番 02, 12 は放射光を利用した磁石の評価技術の開発と利用を目的とした研究課題である。

項番 04 「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：事後評価 B」においては、表面酸化を抑制した 150~300 μm サイズの微小焼結磁石調製、希土類元素による表面被覆・反応拡散による保磁力の回復技術を確立すると共に、これらの試料の磁区構造を高分解能で MOKE 及び MFM により観察する技術を開発された。所期の目的である磁区の 3 次元的な連結性を議論するまでには至らなかったが、磁石内の微構造と磁区挙動の関係を複数の手法を用いて多面的に観察し、保磁力の違いによる磁化挙動と磁区状態の違いを明らかにした。

項番 10 「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：事後評価 B」においては、MFM による Nd-Fe-B 焼結磁石破断面の磁区観察技術と可逆的に移動する磁壁と強くピンされた磁壁を区別して同時に観察する技術が開発された。Nd-Fe-B 焼結磁石においては、試料表面の研磨が特性劣化を引き起こすため、破断面での磁区観察技術の開発はバルク Nd-Fe-B 磁石の減磁過程の解析に有用な技術の開発と評価される。さらに、ニューラルネットワークを用いた機械学習による 3 次元磁区構造推定原理を小規模モデルで確認しているが、推定の精度の改善、推定の大規模化を実現するまでには至っていない。

項番 02 「磁気構造可視化に基づく保磁力モデルの構築：事後評価 A」においては、X 線顕微鏡を用いて、永久磁石の構成元素の化学マッピング及び元素識別磁区観察を 10 ナノメートルオーダーの空間分解能で行う技術及び中性子小角散乱技術を用いてバルク磁石の磁化反転領域サイズを決定する技術を開発した。さらに、マイクロマグネティクス学に基づく磁化過程の大規模シミュレーションと組み合わせて保磁力機構にアプローチする方法を示している。

項番 12 「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解明：事後評価 S」においては、走査型ラウエ顕微鏡を開発し、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 型磁石について走査型軟 X 線 MCD 顕微鏡による磁区観察技術と融合利用した解析を通じて、新しい磁化反転モデルの提唱に至った。

以上、MFM, MOKE 等の磁区構造解析技術については、3 次元の磁区構造の解析技術の開発までには至らなかったものの、解像度の改善や破断面の磁区構造解析技術の開発等で、一定の成果を得た。放射光を利用した解析技術については、高分解能の元素識別磁区観察技術の開発、中性子小角散乱による磁化反転領域サイズの決定技術の開発、走査型ラウエ顕微鏡の開発等、大きな進歩があった。さらに、それぞれの開発技術を用いて磁石の減磁過程の解析が行われ、一定の成果が得られている。

これらのことから、本目標は達成されたと評価する。

(2) 既存磁石の飛躍的特性改善を可能とする基礎的知見の明確化と特性改善に向けた指導原理の提示

表 2 及び 5 に示した項番 06, 08, 02, 12 が相当する。項番 06 と 08 は、フェライト磁石に関する、項番 02 と 12 は Nd-Fe-B 磁石に関する研究である。

項番 06 「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：事後評価 S」及び項番 08 「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：事後評価 S」では、La-Co 置換 Sr フェライト単結晶を作製し、正確な化学式及び Co^{2+} の置換サイトを決定するとともに、 Co^{2+} 量が酸素分圧により制御できることを示した。さらに、La-Co 置換による巨視的

異方性増大の原因を明らかにし、異方性増大のための指針が示された。

項番 03「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：事後評価 B」においては、所期の目的である 64 MGOe を上回り、薄膜レベルでは世界最高の最大エネルギー積を示すナノコン ポジット薄膜モデル磁石の創製には至らなかったものの、 $R_2Fe_{14}B/\alpha-Fe$ 界面における交換結合の面方位依存性の実験的な検証を通じて、 $Nd_2Fe_{14}B/\alpha-Fe$ ナノコン ポジット磁石において高残留磁化を得るための指針が示された。

項番 13「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：事後評価 S」では、SEM、収差補正 STEM、3次元アトムプローブを相補的に活用した、ミクロノー原子レベルのマルチスケール解析とマイクロマグネティクスシミュレーション、MOKE による磁区観察を併用し、重希土類を拡散した焼結磁石におけるコアシェル構造の形成メカニズムを明確にし、最適加熱処理により形成される 2 次シェル中の重希土類元素濃度増加による高保磁力が達成されることを示した。また、微細結晶粒で高保磁力の得られる Nd リッチ Ga 添加熱間加工磁石の高保磁力化の指針を示した。さらに、これらの研究の過程を通じて、Nd-Fe-Ga-Cu 共晶合金拡散熱間加工磁石では室温保磁力 2.2 T と残留磁気分極 1.3 T が、Nd-Tb-Cu 共晶合金拡散熱間加工磁石では、室温での保磁力 2.5 T と残留磁気分極 1.38 T、160°Cでの保磁力 1.3 T が、Nd リッチ Ga 添加焼結磁石においては、熱処理後に 2.0 T を超える保磁力が達成された。加えて、保磁力発生機構の解明に大規模マイクロマグネティクスシミュレーションを積極的に利用することにより、保磁力発生機構解明のための手法としての有用性を示した点も評価される。

以上のように、フェライト磁石においては、La-Co 置換磁石を対象に、置換による保磁力改善のメカニズムが明確にされた。支援期間終了後の研究において、さらに研究が進められ、令和 3 年度の産学共創の場では、「保磁力改善のレシピ」の形でまとめて発表されている。Nd-Fe-B 磁石においては、熱間加工磁石、重希土類を拡散した焼結磁石を中心に保磁力発生メカニズムが明確にされ、磁石特性の改善が実現された。

これらのことより、本目標は達成されたと評価する。

(3) 新磁石（原理は既知）のポテンシャルの明確化と実用化に向けた指針の提示

項番 01 と 05 の課題がこれに相当する。ともに、規則化させた 3d 遷移金属合金の磁石としての利用について研究したものである。

項番 01「 $L2_0FeCo$ 及び $L1_0Fe-Pt-bccFeCo$ に着目した革新的磁石創成に関する基礎研究」においては、産学共創の場での産業界からの意見並びに P0 の指摘により、 $L2_0FeCo$ 合金に関する研究に集中して研究が行われた。高精度の第一原理計算では、 $L2_0FeCo$ 合金の磁気異方性に及ぼす正方晶歪み、規則度、第 3 元素添加等の影響を計算し、 $L2_0FeCo$ 合金のポテンシャルを明らかに、 $L2_0FeCo$ 合金 の設計指針を与えた。さらに極薄膜ではあるが、 $(Fe_{0.5}Co_{0.5})_{0.9}Al_{0.1}$ 合金で $Ku \sim 2.1 \times 10^6 \text{ J/m}^3$ の磁気異方性を得て、第一原理計算結果を実験的に検証した。

項番 05「貴金属フリー $L1_0$ 型規則合金磁石創製の指針構築：事後評価 A」においては、エピタキシャル成長を利用した FeNi 膜で $9 \times 10^5 \text{ J/m}^3$ の磁気異方性を実現し、 $L1_0FeNi$ 規則合金のポテンシャルを示した。さらに、バルク FeNi 合金に対する巨大ひずみ加工技術 (HPT 法) を使用し、極めて微量ではあるが、 $L1_0$ 型 FeNi 規則相を含むバルク Fe-Ni の作製に成功し、その可能性を示した。

以上のように、規則化した 3d 遷移金属合金の磁石としてのポテンシャルが明確にされた。項番 01 の研究については、他機関の支援も得て研究が継続され、第 3 元素添加による厚膜化等が進んでいる。Fe-Ni 規則化合金については、他の研究グループによる微粒子や粉末での作製法の研究にも進展している。

これらのことより、本目標は達成されたと評価する。

(4) 新原理に基づく磁石材料の開発指針の提示

本技術テーマで設定した4つの目標の中では、最もハードルの高い目標である。項番 07, 11, 09 の課題が相当する。項番 07 と 09 はホイスラー系 Mn 系合金を、Mn 原子間距離を制御することによりフェロ磁性化して、希土類フリー磁石材料とすることを目指す研究である。項番 09 は、軟磁性のスピネルフェライトを歪ませることにより、高磁気異方性を発現させ、磁石材料とすることを目指す研究である。

項番 02 「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：事後評価 A」及び項番 11 「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：中間評価 B」では、まず、産学共創の場及び P0 の指摘に基づき、第一原理計算グループを研究組織に加え、 D_{022} -Mn₃Ga 合金体積を異方的に 5%縮めるか、50%膨張させることによりフェリ磁性からフェロ磁性への相変態が生じること等を明らかにした。実験的には、薄膜プロセスでは $J_s \sim 0.9$ T と $K_u = 1.66$ MJ/m³ の異方性が、バルク合金においても $K_u > 1$ MJ/m³ の磁気異方性を得たが、所期の目標の特性は達成できなかった。その後、第一原理計算で、正方晶逆ホイスラー構造（正方晶 XA 構造）を持つ Mn 合金が存在することを見だし、正方晶 XA 構造、立方晶 L2₁、正方晶 L2₁、fcc 構造の安定性の計算から、この構造が最も安定となる安定性が保たれる組成範囲では、飽和磁気分極 1.28 T、磁気異方性定数 2.0 MJ/m³、異方性磁界 2.8 MA/m を超える特性が得られることを示し、Mn 系合金のポテンシャルを示した。

項番 09 「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：事後評価 A」においては、スピネル CoFe₂O₄ 薄膜と基板との格子不整合を利用して、 $-6 \sim 4$ MJ/m³ の異方性エネルギーが実現できることを実験的に示すとともに、ヤーン・テラー効果を利用して、スピネル型微粒子に正方歪を発生させ、一軸性の磁気異方性を誘導できることも実験的に示した。

Co を含むスピネルフェライトにおいては、格子ひずみの導入により希土類合金に匹敵する磁気異方性を発生できることが示され、磁石材料としてのポテンシャルが示された。また、ヤーン・テラー効果を利用した微粒子の自発的ひずみにより磁気異方性が導入されることも明らかにされた。Mn 系合金については、実証には至っていないが、高飽和磁気分極、高磁気異方性を併せ持つ正方晶 XA 構造の合金の存在を第一原理計算で示した。

これらのことより、本目標は達成されたと評価する。

表 5 技術のブレークスルー（新指導原理、開発技術等）

項番	研究代表者 (所属 役職)	研究課題名	技術のブレークスルー (新指導原理、開発技術等)
(1) 新評価技術の開発とその利用			
04	小林 久理眞 (静岡理工科大学 理工学部 物質生命 科学科 教授)	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	・MOKE 及び MFM により微小試料の磁区 構造を高分解能で観察する技術の開 発
10	齊藤 準	磁石破断面の3次元	・MFM による Nd-Fe-B 焼結磁石破断面 の磁区観察技術の開発

	(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	<ul style="list-style-type: none"> ・MFM により、可逆的に移動する磁壁と強くピンされた磁壁を区別して同時に観察する技術の開発 ・ニューラルネットワークを用いた機械学習による3次元磁区構造推定原理の確認
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)	磁気構造可視化に基づく保磁力モデルの構築	<ul style="list-style-type: none"> ・X線顕微鏡を用いて、永久磁石の構成元素の化学マッピング及び元素識別磁区観察を10ナノメートルオーダーの空間分解能で行う技術の開発 ・バルク磁石の磁化反転過程解析への中性子小角散乱技術の応用 ・マイクロマグネティクスに基づく磁化過程の大規模シミュレーション手法の開発
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)	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解明	<ul style="list-style-type: none"> ・走査型ラウエ顕微鏡の開発 ・元素濃度分布解析と結晶方位分布解析を同時に実施する基礎技術の開発 ・Sm₂Co₁₇系磁石における反転磁区の発生とその成長過程の明確化
(2) 既存磁石の飛躍的特性改善を可能とする基礎的知見の明確化と指導原理の提示			
06	中村 裕之 (京都大学 大学院理工学研究科 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	<ul style="list-style-type: none"> ・La-Co 置換 Sr フェライトにおけるCo²⁺の置換サイトを決定 ・Co²⁺量の酸素分圧により制御 ・La-Co 置換 Sr フェライトにおける巨視的異方性増大の原因の明確化と異方性増大のための指針の提示
08	中村 裕之 (京都大学 大学院理工学研究科 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	
03	加藤 宏朗 (山形大学 大学院理工学研究科 教授)	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	<ul style="list-style-type: none"> ・R₂Fe₁₄B/α-Fe 界面における交換結合の面方位依存性的に検証を通じたNd₂Fe₁₄B/α-Fe ナノコンポジット磁石の高残留磁化の指針の提示
13	宝野 和博 (物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠)	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	<ul style="list-style-type: none"> ・重希土類を拡散した焼結磁石におけるコア-シェル構造の形成メカニズムの明確化 ・最適加熱処理により形成される2次シェル中の重希土類元素濃度増加による高保磁力指針の提示 ・微細結晶粒で高保磁力の得られるNd

			<p>リッチ Ga 添加熱間加工磁石の高保磁力化の指針の提示</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Nd-Fe-B 系共晶合金拡散熱間加工磁石における省希土類・高性能の実現 ・Nd リッチ Ga 添加焼結磁石における高保磁力化の実現 ・大規模マイクロマグネティクスシミュレーションを利用した保磁力発生機構解明への応用
(3) 新磁石（原理は既知）のポテンシャルの明確化と実用化に向けた指針の提示			
01	石尾 俊二 (秋田大学 大学院工学資源学 研究科 教授)	L2 ₀ FeCo 及び L1 ₀ Fe-Pt -bccFeCo に着目した革新的磁石創成に関する基礎研究 (01)	<ul style="list-style-type: none"> ・高精度の第一原理計算による, L2₀FeCo 合金の磁石としてのポテンシャルと設計指針の明確化 ・(Fe_{0.5}Co_{0.5})_{0.9}Al_{0.1} 極薄膜での Ku ~ 2.1x10⁶ J/m³ の磁気異方性の達成
05	高梨 弘毅 (東北大学 金属材料研究所 教授)	貴金属フリーL1 ₀ 型規則合金磁石創製の指針構築	<ul style="list-style-type: none"> ・FeNi 薄膜での 9×10⁵ J/m³ の磁気異方性実現による, L1₀FeNi 規則合金のポテンシャル提示 ・巨大ひずみ加工技術 (HPT 法) での, 微量の L1₀ 型 Fe-Ni 規則相 (バルク) の作製
(4) 新原理に基づく磁石材料の開発指針の提示			
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	<ul style="list-style-type: none"> ・D0₂₂-Mn₃Ga 合金体積を異方的に5%収縮させるか, 50%膨張させることによりフェリ磁性からフェロ磁性への相変態が生じることを第一原理計算により示唆
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	<ul style="list-style-type: none"> ・高飽和磁気分極, 高磁気異方性を併せ持つ正方晶 XA 構造の Mn 系合金の存在を第一原理計算で示唆 ・フェロ磁性への相変態は実現されていないものの, 薄膜プロセスでは Js ~ 0.9 T と Ku=1.66 MJ/m³, バルク合金においても Ku>1 MJ/m³ の磁気異方性を実現
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	<ul style="list-style-type: none"> ・CoFe₂O₄ スピネルフェライト薄膜の基板との格子不整合を利用して -6~4 MJ/m³ の異方性エネルギーを誘導 ・ヤーン・テラー効果を利用して, スピネル型微粒子に正方歪を発生させ, 一軸性の磁気異方性を誘導できることを実験的に証明

(2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果 (特に、技術のブレークスルー (新指導原理、開発技術)、社会・経済の発展に繋がる重要な成果、派生して生まれた技術、等)

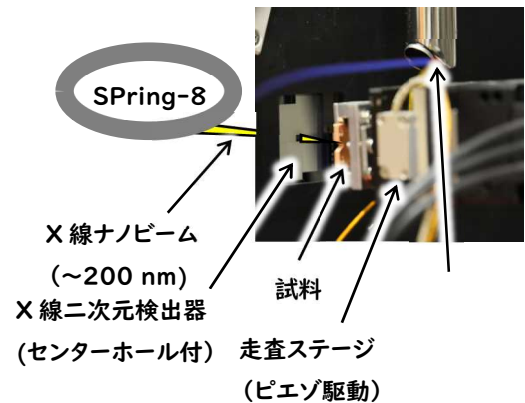
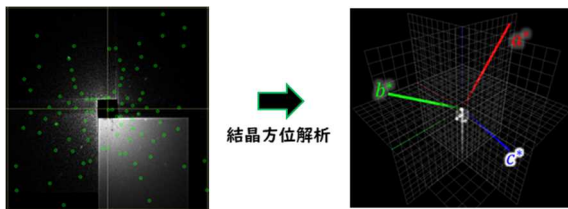
各研究課題の技術のブレークスルーの状況は表 5 に示す通りである。P0 が設定した所期の目標ごとの、特に、重要な成果は以下のとおりである。

(1) 従来技術では得られない情報取得を可能とする新評価技術の開発とその利用

放射光を利用した磁石の解析手法が進んだことは大きな成果である。走査型ラウエ顕微鏡, 10 ナノメートルオーダーの空間分解能での元素識別磁区観察技術, X 線顕微鏡及び中性子小角散乱によるバルク磁石内部の磁気微細構造観察技術等が開発された。放射光の利用には大規模設備が必要であることから, 今後, 産業界での利用を容易とすることが必要である。

走査型ラウエ顕微鏡 (項番 12)

XBSD 像と蛍光 X 線の走査同時計測を実現



X 線顕微鏡を用いた磁気構造の可視化 (項番 02)

走査型透過X線顕微鏡 (STXM)

Transmission Image

高分解能磁区観察

国内で実験可能に!

K. Ono et al., REPM 2012

顕微鏡開発

Rev. Sci. Instrum. 87, 013704 (2016)

単一結晶粒のXMCD

特許第6411722号
「磁気特性測定方法」
米国特許第9835569

元素識別磁気構造可視化

Nd₂Fe₁₄B 焼結磁石

まであり 50, 379 (2011)

磁気モーメント定量マッピング

500 nm AIP Advances 7, 056804 (2017)

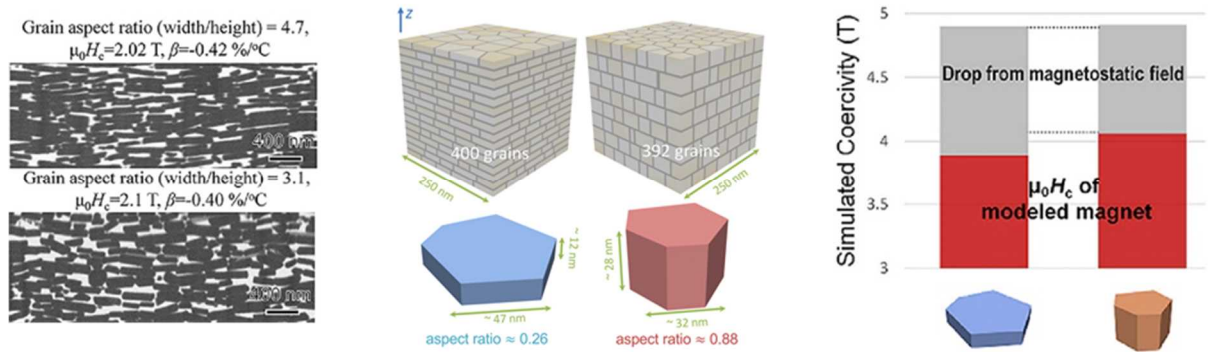
熱間加工磁石の静磁エネルギー可視化

J. Appl. Phys. 115, 17A717 (2014)
J. Appl. Phys. 117, 17B312 (2015)

粒界浸透により静磁エネルギー変化
高保磁力化の主要因

個別の研究課題において開発目標には掲げられてはいないが, 研究の中で大規模マイクロマグネティクスによる磁化過程のシミュレーションが利用され, 保磁力発生機構等を解明する手段として利用できるレベルにまで達したことも一つの大きな成果である。

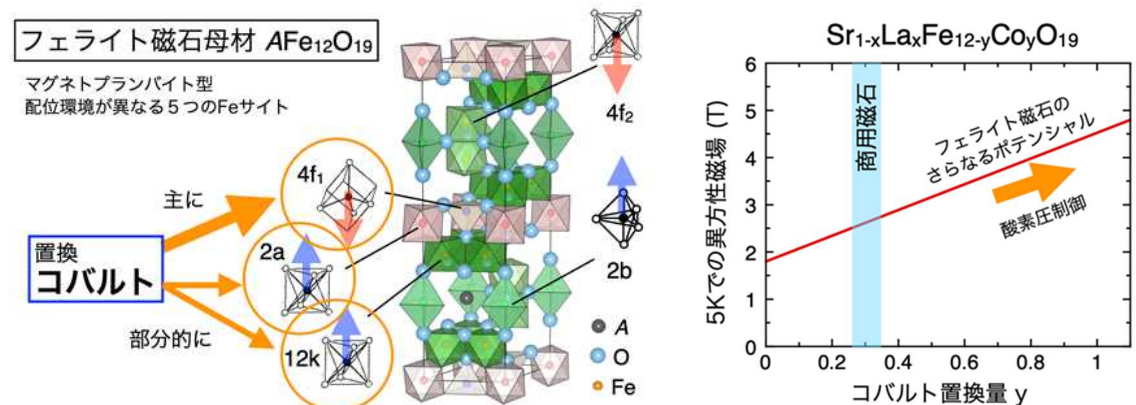
Nd-Fe-B 磁石の磁化反転シミュレーションと動的観察 (項番 13)



- (2) 既存磁石の飛躍的特性改善を可能とする基礎的知見の明確化と特性改善に向けた指導原理の提示

La-Co 置換した Sr フェライトにおいては, Co^{2+} の置換サイトが決定され, 巨視的異方性増大の原因の明確化と異方性増大のための指針が提示された。

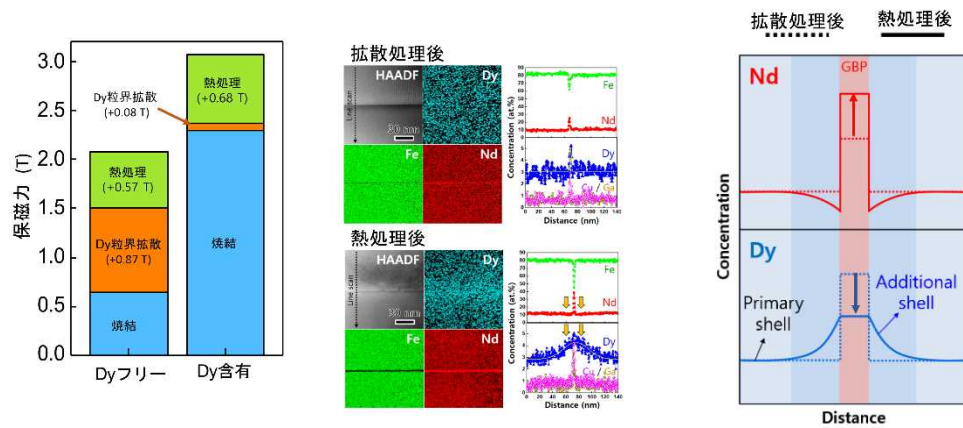
性能を向上させる置換コバルトの置換サイトの同定 (項番 06, 08)



NdFeB/ α -Fe ナノコンポジット磁石では, $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 界面における交換結合の面方位依存性の実験的に示され, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ ナノコンポジット磁石の高残留磁化の指針が提示されたが, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ ナノコンポジット磁石で高残留磁化を得ることの困難さを示した結果でもある。

重希土類を拡散した焼結磁石については, コア-シェル構造の形成メカニズムの明確化とともに, 最適加熱処理により形成される 2 次シェル中の重希土類元素濃度増加による高保磁力指針が提示された。さらに, 微細結晶粒で高保磁力の得られる Nd リッチ Ga 添加熱間加工磁石の高保磁力化の指針も提示された。これらの研究を通じて, Nd-Fe-B 系共晶合金拡散熱間加工磁石における省希土類・高性能化や Nd リッチ Ga 添加焼結磁石における高保磁力化や保磁力の温度依存性の改善が実現され, Nd-Fe-B 磁石の高性能化に大きく貢献した。

Dy 粒界拡散処理を施した Nd-Fe-B 焼結磁石の微細組織の解析 (項番 13)

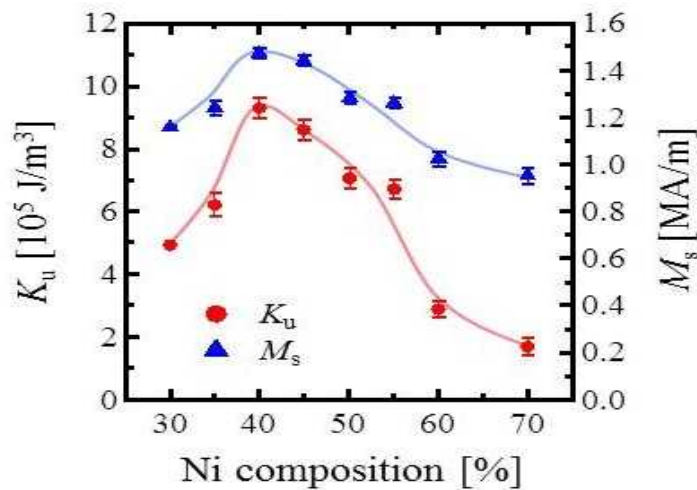


(3) 新磁石 (原理は既知) のポテンシャルの明確化と実用化に向けた指針の提示

Fe-Ni 及び Fe-Co 規則が合金のポテンシャルが理論的・実験的に明らかにされた。これらの材料は高飽和磁気分極を有し、理論(BH)max は希土類磁石材料より高いが、磁気異方性は希土類磁石には及ばないことも明らかとなった。

これらの材料は、本技術テーマの中では磁石として実現することはなかったが、磁石材料開発の研究は行われている。希土類磁石材料に匹敵する磁気異方性が得られないことから、利用の分野や利用機器の設計まで含めての研究が必要である。

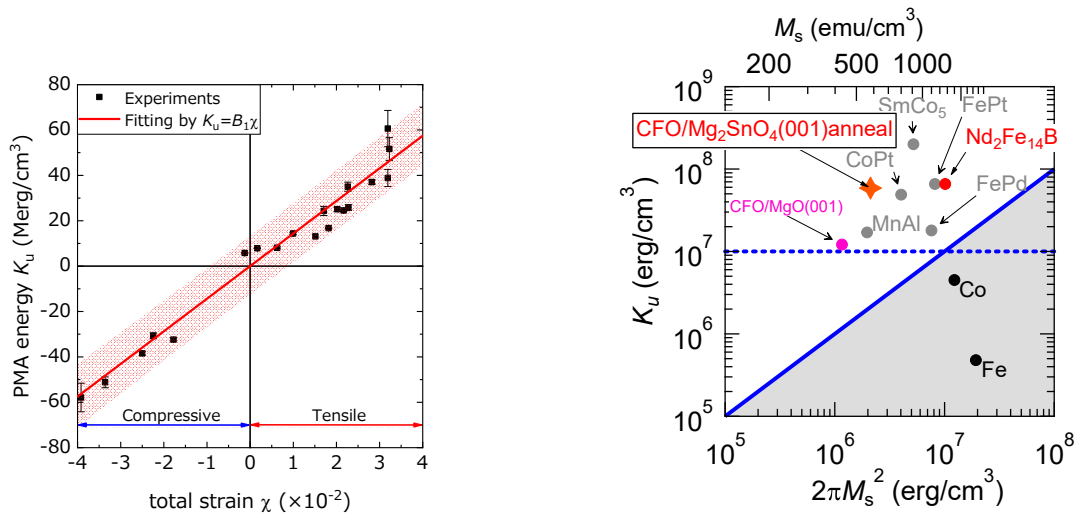
高規則度・高磁気異方性 L1₀型 FeNi 規則合金薄膜の作製 (項番 05)



(4) 新原理に基づく磁石材料の開発指針の提示

CoFe₂O₄スピネルフェライト薄膜に、基板との格子不整合を利用して -6~4 MJ/m³の異方性エネルギーを誘導できることが実験的に示された。この異方性は、希土類磁石材料の異方性に匹敵するもので、Co系スピネルフェライトの磁石材料としての可能性を示したものである。

最大で $K_u \sim 40 \text{ Merg/cm}^3$ の磁気異方性を誘導 $\rightarrow \text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ に匹敵 (項番 09)



IEEE Trans. Mag. 39, 691 (2003)の Fig.4 に追

記

Mn 系合金については、現在のところ実験的には実現できていないものの、高飽和磁気分極、高磁気異方性を併せ持つ正方晶 XA 構造の Mn 系合金の存在が第一原理計算で示された。これが実現できれば、極めて影響が大きいと考えられる。

(3) 個別の産学共同研究への発展状況

企業との連携・共同研究の状況は、技術テーマ事後評価添付資料の別表 7 のとおりである。本技術テーマで採択された研究を元に、7 課題の共同研究が実施または実施中である。また、別表 8 に示す様に、4 件の特許が出願され、1 件の製品化を目指したプロトタイプ・サンプルが作製されている。

(4) 技術テーマとしての成果を産業化に繋げるための方策・課題等

本技術テーマで開発された放射光を用いた磁石解析技術は、次世代磁石の開発において、強力なツールとなることが期待される。産業界では取組が困難な研究課題であり、本プログラムの趣旨に合う研究開発であったと考えられる。一方で、放射光施設が必要なこと及び市販の装置が存在しないことから、産業界が利用するためには、現状では開発者との共同研究等が必要な状況である。開発者には、共同研究等を積極的に受け入れることにより、産業競争力の強化に寄与頂きたいと考えている。また、研究費配分機関には、上記の解析技術を利用して革新的次世代磁石開発を行う、産学の共同研究を積極的に支援頂くことを期待したい。

マグネトプラムバイト型フェライト磁石の高性能化指針を示した研究は、本技術テーマの中では、最も基礎的な問題を扱った課題である。現存の材料の解析をベースに将来の更なる高性能化に向けた指針が提示されているが、支援期間中の新材料の開発には至っていない。産業界には、示された指針を利用して、マグネトプラムバイト型フェライト磁石の更なる高性能化を進めて頂きたいと考えている。

Nd-Fe-B 系磁石の飛躍的特性改善については、既に、産業界との共同研究が実施されており、本技術テーマでの成果は製品等に反映されていると考えられる。

Fe-Ni 及び Fe-Co 規則合金のポテンシャルが理論的・実験的に明らかにされた。これらの材料は高飽和磁気分極を有し、理論 (BH) max は希土類磁石材料より高いが、磁気異方性は希土類磁石には及ばないことも明らかとなった。本技術テーマの中では磁石として実現することは

なかったが、磁石材料開発の研究は行われている。しかしながら、材料研究者の視点と材料利用者の視点は必ずしも一致していないようにも見える。これらの材料では希土類磁石材料に匹敵する磁気異方性が得られないことから、産業化のためには、利用の分野や利用機器の設計まで含めての研究が必要だと考えられる。

本技術テーマでは、Co スピネルフェライトにひずみを導入すれば高磁気異方性を発生させることが示された。産業化にはバルク化が必要となる。研究課題においては、ヤーン・テラー効果を利用すれば自発的なひずみが可能であることが示されているが、飽和磁気分極の値を保持したままで、高磁気異方性を得るには至っていない。産業化に向けては、次のステップとしてバルク化手法の開発が必要である。

(5) 今後のプログラム運営への提言

(1) サイトビジット

本プログラムで毎年サイトビジットが行われたことは、研究の進捗状況の把握と指導に非常に有効であった。JST や他研究費配分機関の他プログラムでもサイトビジットはあるが、会計処理の確認等にも時間が割かれており、研究の進捗状況、参加者、実施回数は限られている場合が多い。本プログラムでは産業界からのアドバイザーを中心としたサイトビジットと産学共創の場での産業界からの意見も合わせて、研究の進め方の修正等をきめ細かに行うことができたと考えている。その例は、「7（4）研究課題の評価と指導」に示す通りである。

大学等の研究組織では、他の研究グループの研究の進め方については干渉しないのが通例である。これは、大学と言う教育研究組織の長い歴史に基づくものではあるが、産学共創の枠組みの中で、産業界からのアドバイザーを中心としたサイトビジットがきめ細かな指導を可能としたと考えている。

本プログラムにおけるサイトビジットには、それなりの経費が必要であることはもとより、研究実施組織、P0、アドバイザーのスケジュール調整にも時間を要するが、積極的に取り入れるべき制度であると考えられる。

(2) 特許の扱い

現在の枠組みでは、特許は研究実施機関が所有し、企業等はそれを使用できるが独占使用はできない、との枠組みになっている。技術テーマを運営する中で、産業界からは独占使用できなければ企業としてのメリットは少ない、とのご意見も頂いた。

公的研究費での成果として得られた特許を一つの企業が独占使用することの可否については議論があるとは考えられるが、独占使用することが本プログラムの目的を達成するために必要であれば、プログラムの趣旨を外れない範囲で、それを可能とする枠組みがあっても良いと思われる。

9. 技術テーマ中間評価時の指摘事項に対する対応状況

(1) 指摘事項 1：薄膜材料研究の有効利用

本技術テーマは高性能バルク磁石の実現に繋がる技術開発を目標としているが、バルク磁石材料を作製する装置・設備を現有しているアカデミアの研究者は極めて限られる。一方薄膜作製装置に関しては、ほとんどの材料研究者は既に所有している。このような現状を考慮し、磁石材料として過去にない新たな化合物を探索する場合には、薄膜であっても磁石の革新的研究に繋がる知見が得られることも期待され、また、研究課題によってはバルク材を念頭に置いた薄膜材での研究・評価でも構わないと思われる（例えば課題番号 09

のフェライト磁石はバルク化が必須だが、課題番号 07 および 11 の Mn 系については、先ずは存在証明が優先されることから薄膜でも良いと考えられる。) ものもあり、必要以上にバルク材料を意識する必要はない。

指摘事項に対する対応

本技術テーマにおいては、基本的には、「7 (1) P0 の運営方針」に示したとおりの計画で進めた。薄膜を利用した研究課題においては、バルク磁石への展開を意識して研究を進めて頂くように指導した。特に、平成 28 年度の募集においては、P0 による公募・選考・技術テーマ運営にあたっての方針に「今回の募集においては、希土類資源の供給状況、本技術テーマでの成果、現存磁石材料における技術革新状況を考慮し、バルク磁石と開発技術の産業化を強く念頭ににおいた、下記の例のような提案を求めます。」とし、バルク磁石への展開をより重視した研究を求めた。

これに対して、平成 28 年度の技術テーマ中間評価で、上記のご指摘を頂いたものである。

平成 23 年度の技術テーマ開始時には、希土類フリー磁石の開発が世界的に喫緊の課題と考えられていた。この状況を反映して、平成 23 年度の採択課題で材料を扱う 4 課題中 2 課題が希土類フリー磁石の開発 (項番 01, 05 : 薄膜によるアプローチが中心)、1 課題が薄膜プロセスを利用した Nd-Fe-B 磁石の保磁力機構の解明と改善 (項番 03) に関する研究であった。平成 26, 28 年度の採択においては、材料を扱う 5 課題のうち、研究の中心に薄膜を据えた研究が 3 課題 (項番 07, 09, 11) という状況であった。

中間評価後に新たな募集は行われず、中間評価で頂いたご指摘を公募要領の中に反映させる機会はなかったが、「原理の確認や材料のポテンシャルの確認は薄膜の利用でも良い。薄膜の研究の中で、是非、バルク化の芽を探して頂きたい。」が P0 の一貫した方針であった。

P0 の方針や頂いたご指摘は、具体的に技術テーマの運営に以下のように反映された。

平成 26 年度採択の「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 (項番 09)」では、薄膜材料による原理の干渉と材料のポテンシャルの確認後にヤーン・テラー効果を利用した粉末材料の開発へとステップを進めることができた。平成 26, 28 年度採択の Mn 系磁石の開発 (項番 07, 11) は、薄膜とバルクの研究を併用して研究が開始されたが、最終局面では P0 の指示により、薄膜プロセスによる原理の検証に集中して研究が進められた。さらに、平成 28 年度採択の「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 (項番 10)」では、バルク磁石の評価を目的とした研究を進める中で、薄膜材料を利用した原理の検証が試みられた。

(2) 指摘事項 2 : 研究課題成果の公表 (アウトリーチ活動)

本邦の磁石関係研究者数があまり多くはないという現状を踏まえると、出来るだけ多くの分野の研究者に本技術テーマに興味を持ってもらい、如何にこのテーマの推進に協力してもらえ体制を築くかが成否の鍵を握り、この分野の将来の発展をも決定づけることに成る。P0 も既にこの考え方に沿って、電気学会、日本磁気学会で研究成果の公表などを行っているが、それら学会以外にも応用物理学会、金属学会等の物性科学に関係する研究会、学会などで、積極的に幅広く本技術テーマの趣旨および研究成果を公表することが必要である。

指摘事項に対する対応

技術テーマ中間評価後に日本ボンド磁石協会、国際シンポジウムでの制度紹介、日本磁気学会、金属学会、電気学会マグネティクス研究会での研究成果の公表を追加した。令和 2 年度には、研究成果をまとめたパンフレットを発行した。応用物理学会でのまとめた形で

の研究成果の発表については実現できなかった。追加したアウトリーチ活動は以下の通りである。

(A) 制度の紹介

- ・ 日本ボンド磁性材料協会
「JST 産学共創基礎基盤研究プログラム：革新的次世代高性能磁石創製の指針構築 — その概要と役割 —」
福永博俊
2016BM シンポジウム (2016.12.9)
- ・ Korea-Japan international Symposium on Permanent Magnet Materials (2019.2.14)
Introduction of a national project of permanent magnets in Japan: “INDUSTRY-ACADEMIA COLLABORATIVE R&D PROGRAMS” High Performance Magnets: Towards Innovative Development of Next Generation Magnets
Hirotoshi Fukunaga

(B) 研究課題成果公表のためのシンポジウム等

- ・ 電気学会 マグネティックス研究会
テーマ 「革新的次世代高性能磁石創製の指針構築 2」
開催日：2016年11月29日（火）
- ・ 第41回 日本磁気学会学術講演会シンポジウム
Symposium “High performance magnets and evaluation techniques toward innovative development for next generation magnets”
Chief Organizer: H. Fukunaga (Nagasaki Univ.)
開催日：2017年9月20日
- ・ JST 新技術説明会：産学共創基礎基盤研究プログラム 磁石 新技術説明会
～解析・分析技術～「磁性材料内部の磁気構造を可視化する技術」
開催日：2018年年2月22日（木）
https://shingi.jst.go.jp/kobetsu/kyousou/2017_kyousou.html
- ・ 日本金属学会秋季講演大会シンポジウム
S7 永久磁石開発の元素戦略 6 一次世代材料の開発を支える基礎・基盤研究—
開催日：2018年9月21日（金）
- ・ 電気学会 マグネティックス研究会（2020年）
テーマ「永久磁石と応用」
開催日：2020年12月22日（火）
- ・ 技術テーマ「磁石」パンフレットの公開（JST 産学共創 WEB サイト）
https://www.jst.go.jp/kyousou/topics/k_tp_00_20201029_00.html

アウトリーチ活動の全体像は7（8）に、詳細は技術テーマ事後評価資料添付資料「12. アウトリーチ活動」に記載している。

(3) 指摘事項3：研究課題成果の公表（成果選択の排除）

本技術テーマの成果報告書を一読した印象では、問題点記述を避けて表面的に良く見える成果を強調した例も見受けられ、産業界での技術ボトルネック解消のためには、問題点

の指摘、失敗例なども極めて重要な情報であることから、良い悪いにかかわらず得られたデータは全て報告書に載せて頂きたい。実現すればインパクト絶大だが、極めてハードルが高い研究課題については、計画していた数値目標が達成できなくても、ねらい、手段、結果を明確にした上で、「ここを掘ったが宝はなかった」という知見も、閉じ試行を繰り返す無駄を省く意味でも極めて有益であり、評価項目に加えて頂きたい。

指摘事項に対する対応

研究成果が研究継続の可否、研究費、最終評価に影響するとの考えから、表面的に良く見える成果のみを報告する傾向が出てきたものと推察される。アカデミアの研究者の傾向であり、技術テーマ中間評価で頂いた内容と同様な指摘は、技術テーマの運営の中で、産業界のアドバイザーからも度々なされている。研究が進捗していない研究課題については、特に、問題点の指摘、失敗例等も含めた報告をお願いしているところである。

また、研究成果報告書は非公開であることから、できるだけ公開の資料としても残して頂くことがより効果的である。一方で、実験結果の羅列では論文等にならない面もある。このことを踏まえ、例えば、項番 11「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」では、多くの実験結果を整理して、第一原理計算結果との比較等で実験結果に考察を加え、論文としても残すように指導した（テーマ事後評価添付資料 pp. 9-10）。

(4) 指摘事項 4：P0 サポート体制の強化（JST への要望）

本技術テーマへの参加はアカデミアが主体であり、興味の主体が真理探究に偏りがちであることから、産業化・実用化を強く意識した運営が必要となる。また、アカデミアは結果の良い点だけに目を向けがちであるが、産業界ではボトルネック解消のための技術開発を重要視する傾向があることから、この立場の違いを調整すると共に、各研究課題の進捗状況を見守り指導を行う P0 の役割は極めて重要であり、また多忙を極める。福永 P0 は広範な磁性関連の学術知識を保有し適任ではあるが、一人で全ての課題に対しこれらを行うことは物理的に無理であり負担が大きすぎる。このため P0 と共に各研究課題の進捗状況を注意深く見守り、常時細部に渡って指導・助言して P0 を直接的にサポートする数名のサブ・プログラムオフィサーの設置が必要である（アドバイザー組織とは別である）。実用化に応え得る新技術開発には、目標設定のみならず細部に渡るマネジメントが極めて大切であることに留意して、上記体制の実現が望まれる。

指摘事項に対する対応

プログラムの途中で P0 補佐を制度上設けることは、大幅な改訂であり手続き上も難しい面があり、実現していないが、研究の進捗が計画から大幅に遅れている課題については、アドバイザー3名を選任してフォローをお願いした。

(5) 指摘事項 5：知的財産戦略の強化（JST への要望）

本技術テーマの特許申請数が 2 件にとどまっていることは、大きな問題である。本技術テーマには既にかかなりの金額が投入され、企業が実用化の際に拠り所とするところが知的財産権であることから、研究開発成果の権利化は極めて重要である。アカデミアの研究者は一般に知的財産権に対する意識が希薄であるので、課題研究者に本研究プログラムの趣旨を十分に認識してもらい、知的財産権取得の必要性、重要性を周知徹底すると共に、その手続き方法の簡便化、申請費用の別途予算化を図る等の方策の立案が望まれる。

指摘事項に対する対応

制度上は、本プログラムで直接経費からの出願費用の支出は、当初のとおり、認めていない（間接経費で対応いただく）。本プログラムに限らず大学単独で出願しても、その後の維持経費、海外出願の費用の捻出が難しい場合が多く、企業と共同出願をする等が必要であると考えられる。

一方で、本技術テーマに限らず大学等からの要望もあり、最近のA-STEPのトライアウト、育成、本格型では、特許関連経費を直接経費に計上することを可能としており、JSTとしても新しいプログラムからは対応が進みつつある。

なお、本技術テーマで出願された特許は、テーマ事後評価添付資料「9 知的財産権リスト」に示すように合計で10件となった。

10. 総合所見

(1) 技術テーマとしての研究マネジメントの状況

本技術テーマでは、4(2)に示すP0の達成目標を設定した。その目標を達成するために、7(1)に示すP0の運営方針を掲げてテーマをスタートさせた。4(2)の達成目標は、具体的な材料を特定しない目標としているので、7(1)のP0の運営方針は具体的な材料や研究の進め方について、応募者に周知する役目も担っている。

10年間の実施期間を通じて、設定した運営方針はおおむね有効に機能したと評価しているが、Nd-Fe-B磁石については、商品化されている磁石であることから、競争領域と前競争領域の境界が曖昧であった。産業界からのアドバイザーもそれぞれの企業の研究内容については明らかにできない面もあり、運営上難しい点であった。

運営上のキーとなる産学共創の場、産業界からのアドバイザーの採用、産業界からのアドバイザーを中心とするサイトビジットは、いずれも、有効に機能したと考えている。

産学共創の場において、産業界からの参加者にはその視点を直接的に研究者に伝えることに躊躇する傾向も感じられた。この対策としてアンケート等も利用して、産業界の参加者の視点を明らかにし、研究実施者に提供すると共に、P0による指導に反映させる手法を採用したことも有効であった。また、産業界からのアドバイザーの示唆は、アカデミアの研究者にはない視点を含んでおり、技術テーマの目標達成に有効に機能した。例えば、技術テーマ中間評価時の評価事項3「研究課題成果の公表（成果選択の排除）」はアカデミアの研究者には乏しい視点であるが、産業界のアドバイザーからも同様な指摘を頂いていた。毎年行った産業界からのアドバイザーを中心としたサイトビジットも研究の進捗状況の把握と指導に非常に有効であった。サイトビジットと産学共創の場での産業界からの意見も合わせて、研究の進め方の修正等をきめ細かに行うことができたと考えている。その例は、7(4)に示す通りである。

一方で、以下のような点では、運営に苦労した。

- (A) 企業で扱いにくい研究リスクの高い新規材料開発については、前競争領域で本技術テーマのターゲットでありながら、材料開発のハードルは高い。既存の材料を扱う研究に比べると企業の積極的なサポートが得にくい等の課題があった。
- (B) Nd-Fe-B系バルク磁石の性能向上に係る研究については、競争領域に近いことから、本技術テーマとしての位置づけに難しい点があった。
- (C) 材料開発をターゲットとしない基礎的な研究においては、磁石高性能化の機構に係る重要な指針が示されたが、研究成果が、直接、特許取得や産業化に繋がるものではない。技術テーマの重要な成果としての整理の仕方に注意する必要がある。

(2) 技術テーマとしての産業競争力強化につながる技術の確立状況

技術テーマとして産業競争力強化につながる技術の確立状況を、4(2)に示すP0の達成目標ごとにまとめて、8(2)に示している。中でも、放射光を利用した評価技術の開発は、大型施設を利用した基礎的な装置開発を伴うものであり、磁石の産業基盤の強化という点では本プログラムの趣旨に最も沿ったものであったと評価している。

これらの所期に設定した目標に加えて、技術テーマを実施する中で以下の2つの成果もあった。

- (A) 大規模マイクロマグネティクスによる磁化過程のシミュレーションが開発され、保磁力発生機構等を解明する手段として利用できるレベルにまで達した。このことは、次世代磁石開発のための一つのツールが大きく進歩したことを意味している。
- (B) 本技術テーマのスタート時には、永久磁石の開発を主な研究テーマとする大学・公的研究機関の研究者は多くはなかったのが実情である。本技術テーマや同時期にスタートした永久磁石に関連した他のプロジェクトの設定により、従来は永久磁石を主たる研究テーマとしなかった研究グループが永久磁石の研究に参入して現在も磁石の研究分野で活躍しており、アカデミアの研究が厚みを増したことも大きな成果である。産業界からのアドバイザーからは、本技術テーマに携わった大学院生が磁石メーカーに就職した例も報告されており、アカデミアの研究者の増加は、産業界の厚みの増加にも寄与している。

(3) 「産学共創の場」の意義

産学共創の場は、産業界からのアドバイザーと合わせて、アカデミアの研究に産業界の視点を入れる本技術テーマのキーとなる構成要素である。その活用方針については4(3)に、推進と活用については7(7)に示す通りである。産学共創の場には、アドバイザー企業以外の磁石製造企業及び磁石を利用する企業（電機、自動車メーカー等）の研究者が参加しており、産業界からの多様な視点を知ることができる。産学共創の場で得られたアドバイスは、研究解題ごとのきめ細かな指導（7(4)）に反映されており、産学共創の場の設定は有効に機能したと考えている。

産業界においても、研究成果を早めに知ることができるメリットがあり、7(7)に示す様に、共同研究に発展するケースもあった。

一方、産学共創の場は時間が限られており、産業界の側に消化不良を感じている向きもある（アンケートの結果より）。複数課題の発表を限られ時間で行うことから、改善が難しい面もあるが、ポスター形式での議論等もより積極的に導入する必要があったであろうと考えている。なお、プログラム実施期間最終年度の令和2年度の産学共創の場では、全採択課題のポスターセッションを計画していたが、新型コロナウイルスの感染拡大の影響で産学共創の場をオンライン開催することになり、ポスターセッションの開催を断念した。

(4) 技術テーマ設定の意義

技術テーマ開始時（2012～2015年）におけるフェライト磁石と希土類磁石の国内総生産額は1000～2000億円程度で推移していた（JITAによる）。際だって大規模な生産量ではないが、永久磁石が電気エネルギーと機械エネルギーの変換に欠かせない要素部品であることを踏まえれば（例えば、EV、HV、風力発電）、永久磁石産業の国際競争力強化は、我が国の産業競争力を支える上で欠かすことのできない技術である。

本技術テーマがスタートした平成23年度当時は、希土類資源の価格が高騰し、世界的に

永久磁石の安定的な供給に不安があった。この背景の下、我が国では文部科学省、経済産業省も永久磁石を研究対象とする大型のプログラムをスタートさせた。海外においても、米国及びEUで同様なプログラムがスタートし、世界的にも永久磁石に係る研究の意義が再認識されたと考えている。

技術テーマ開始時には、希土類価格の高騰を背景に、特に希土類フリー磁石の開発が注目されており、海外では、特にこの傾向が強かった。平成 23 年度の公募では、採択課題 6 課題中 2 課題の希土類フリー磁石の開発課題を採択したが、希土類フリー磁石のみに重点化するのではなく、評価技術、希土類磁石、フェライト磁石、希土類フリー磁石のバランスを取った研究課題を採択して技術テーマを運営した。

希土類価格は、2013 年後半から、落ち着きを示し、希土類フリー磁石開発への要請は一旦小さくなったかのように見えたが、4 (1) に示すように、希土類フリー磁石の開発は将来の技術として重要であると考え、平成 26, 28 年度採択課題においてもバランスを取った研究課題の採択を継続した。

本技術テーマ終了間近の 2020 年半ばより、電気自動車等の需要が飛躍的に増加するとの予測や中国における希土類資源管理方法の変更等から、Nd や Dy の価格が再び上昇しており、省希土類磁石、希土類フリー磁石、高性能フェライト磁石開発への要請が再び強くなっている。本技術テーマのねらいに対する社会的認識が再び進んでいると感じるとともに、バランスの取れた運営は、結果として成功であったと考えている。

(5) 今後の期待と展望案

我が国では、平成 23 年度前後に開始された永久磁石を対象とした大型の研究開発プログラムが相次いで終了する。(4) で述べたように、永久磁石産業の国際競争力を維持することは、我が国産業の国際競争力を維持するうえで極めて必要であり、今後も、重要な研究課題として扱われるべきであると考えている。

産学共創基礎基盤プログラムで開発された技術や得られた知見には、直ぐには産業化されないものも多いが、重要な基礎的技術や知見であり、今後、産業競争力の強化に繋がるものと期待している。

本技術テーマを通じて、希土類フリー磁石は、(BH)max において高いポテンシャルを有するものの、磁気異方性については希土類合金には及ばないことが明らかになった。この磁石を利用するためには、モータ等の設計変更を必要となる。その影響は磁心材料の変更や使い方も及ぶ可能性もある。例えば、現状のモータの希土類磁石を希土類フリー磁石で置き換えれば、保磁力が不足することは明白である。

希土類フリー磁石に限らず、新しい磁石の開発や産業化のためには、それがどのように利用できるかを踏まえた研究が必要であろう。希土類磁石の発展がモータ等の設計や磁石の使用法を変えてきたことを考えれば、必ず必要な過程だと思われる。

上記のような観点から、平成 29 年度より磁石の応用に関する専門家をアドバイザーに加え、産学共創の場でも磁石の利用者の意見を積極的に聴取した。今後、本プログラムと同様なコンセプトのプログラムが設定される場合には、材料開発と応用技術の研究者がより密接に連携できる枠組みが必要であると考えられる。