

**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」

技術テーマ中間評価用資料

平成 28 年 12 月

目 次

1. 技術テーマ.....	3
2. プログラムオフィサー（PO）	3
3. 採択課題.....	3
4. 技術テーマのねらい（目標）	5
5. 研究課題の選考について	6
7. 技術テーマのマネジメントについて.....	10
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に向けた状況.....	14
9. 総合所見.....	17

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）

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、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・副学長）

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 及び 28 年度の採択は、先行の課題の終了に伴い、技術テーマの目的を達成するために新たな課題を採択したものである。各年度の採択課題を、表 1 に示している。

表1 採択課題一覧

採択年度	課題番号 (末尾2桁)	研究 代表者名	中間・事後評価時 の所属及び役職	研究課題名
23 年度	01	石尾俊二	秋田大学 教授	L2 ₀ FeCo 及び L1 ₀ FePt-bccFeCo に着目した革新的磁石創成に関する基礎研究
23 年度	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
23 年度	03	加藤宏朗	山形大学 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
23 年度	04	小林久理眞	静岡理工科大学 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
23 年度	05	高梨弘毅	東北大学 教授	貴金属フリーL1 ₀ 型規則合金磁石創製の指針構築
23 年度	06	中村裕之	京都大学 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
26 年度	07	嶋 敏之	東北学院大学 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
26 年度	08	中村裕之*	京都大学 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
26 年度	09	柳原英人	筑波大学 准教授	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
28 年度	10	齊藤準	秋田大学 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
28 年度	11	中村哲也	高輝度光科学研究センター 副主席研究員	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
28	12	宝野和博	物質・材料研究機構	ネオジム磁石の超微結晶化による

年度			構 磁性・スピン トロンクス材料 研究拠点 フェロー・拠点長	高温磁石特性の飛躍的改善
28 年度	未契約 (13)	嶋 敏之*	東北学院大学 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

4. 技術テーマのねらい（目標）

4-1 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ている。技術課題の解決においては、以下の事情も考慮した。

- (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）。

4-2 P0 の目標

上記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

4-3 「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ADを中心に行なうが、全AD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、各課題に対する研究の方向性の指導および課題に対する研究遂行支援を行なう。

とした。

産学共創の場等を活用して行なった指導の例を「7-6 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、研究用スパッタターゲットの作製（AD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、添付資料「6. 終了課題の産学共同研究等への展開状況」に記載の#20110106などが相当する。

5. 研究課題の選考について

5-1 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。評価技術の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。

また、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について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。

【参考】H28 年度公募要領〈公募・選考・技術テーマ運営にあたっての方針〉（抜粋）

・永久磁石の革新に繋がる磁石評価技術の開発

評価技術の利用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します。

・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

ターゲットとする特性を明確にした研究を歓迎します。

高エネルギー積の磁石だけでなく、例えば、優れた等方性磁石、高温対応磁石等も考えられます。

・現存磁石の特性を飛躍的に改善することを目的とする基礎研究

改善すべき特性を明確にした研究を求めます。

5-2 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。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課題を採択することができた。

「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ている。

表3 採択課題で扱う材料と要素技術

表2 採択課題の構成

大分類	小分類	研究課題 (課題番号 末尾2桁)	POの目標	
新評価技術 (3D磁化過程の解明)	MFM, Kerr 効果顕微鏡, 走査型ホール素子顕微鏡	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 (11)	(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 (未契約 13)	(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 (12)	(2)	

☺ : 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

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。

本技術テーマのアドバイザーを表4に示している。なお、井上光輝氏は、校務多忙のため平成24年3月31日でアドバイザーを辞退された。

表4 アドバイザー

アドバイザー名	現在の所属	役職	任期
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3月
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～ 継続中
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～ 継続中
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～ 継続中
杉本 諭	東北大学 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 (大学院 工学研究 科教授)	平成23年10月～ 継続中
徳永 雅亮	電気学会 永久磁石に おける最先端研究と 応用動向調査専門委 員会	幹事	平成23年10月～ 継続中
西内 武司	日立金属(株) 磁性材料カンパニー 磁性材料研究所	主任 研究員	平成24年3月～ 継続中

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～ 継続中
森迫 昭光	信州大学 工学部	特任 教授	平成 23 年 10 月～ 継続中

7. 技術テーマのマネジメントについて

7-1 P0 の運営方針

技術テーマに対する基本的な運営方針は以下の通りである。

- (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などして、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 (AD) が係わる。P0 と AD は、各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。

7-2 技術テーマの進捗状況の把握

各課題へのサイトビジット、産学共創の場および各課題からの成果報告書で、各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 AD (必要に応じてアカデミアの AD も加えた) で行い、研究実施者と意見を交わしながら各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、AD およ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、研究課題の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。

7-3 技術テーマの研究計画の見直し

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。なお、薄膜を利用した研究も行なったが、全ての課題において、バルク磁石への展開についての研究を行なった。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。」とし、バルク磁石への展開をより重視した研究を進めることにした。

7-4 中間評価における評価基準

中間評価時における評価基準としては、申請者が設定したマイルストーンを参照したが、一方で、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」、「産学共創の場（サイトビジットを含む）など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. P0 のねらい」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。

7-5 「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、産学競争の場には、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。

7-6 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エーの解決に取り組んでいることを反映している。平成 23 年度および 26 年度採択課題に対して行った、研究計画の大幅な変更を伴う指導の例を以下に示す。

- (A) 表 1 課題番号 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) 表 1 課題番号 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) 表 1 課題番号 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) 表 1 課題番号 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) 表 1 課題番号 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) 表 1 課題番号 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) 表 1 課題番号 11, 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
- ・ 研究対象の追加 (目的達成のため)

7-7 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, 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。そのため, 研究課題ごとに, 配分額に差が出ている (別添資料)。

7-8 アウトリーチ活動

本技術テーマでの成果は, まず, 産学共創の場で発表される。産学共創の場 (非公開) には, テーマ提案組織の研究者が参加するので, 産業界はそれぞれの課題の成果を知り, 利用することができる。公開の場での成果の公表については, 主に論文, 学会発表の形で

行なってきた。技術テーマとしてまたまった形での公表は

(1) 制度の紹介

- ・ The 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Their Applications (ポスター展示) (2012. 9)
- ・ 日本磁気学会学会誌 (2014. 1)
- ・ 日本ボンド磁性材料協会 2016BM シンポジウム (2016. 12)

(2) 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クス研究会 (2016. 12)

なお、P0 の企画ではないが、(公社)日本磁気学会第 40 回学術講演会での” Symposium “Research trends in permanent magnet motors and permanent magnets from marginally hard magnetic phases” (2016. 9) および同学会誌まぐね「特集 硬磁性膜作製技術の最前線」(2016. 12~2017. 2) では、本技術テーマの多くの成果がまたまった形で公表されている(「まぐね」に関しては一部予定)。

7-9 今後の取り組み

(1) 産学の知見を有機的に結合したアドバイス体制の有効活用

各研究課題への指導は、サイトビジット、産学競争の場での P0、AD からの直接指導及びそれぞれの場での意見を斟酌した P0 の指導の形で行なってきた。これらの指導は、産業界の視点を入れる観点から重要であるばかりでなく、多様なアカデミアの知見を研究に反映させるためにも重要である。産学の知見を有機的に結合したアドバイス体制の有効活用

を進めたい。まずは、年度末の全 AD と P0 が参加する会議の有効利用することから始めたい。

(2) 産学競争の場の一層の活性化

産学競争の場は産学競争プログラムの目玉でもある。研究課題の成果発表会を超えた場にする必要がある。パネルディスカッション等を有効に利用することにより、産学双方の議論を活性化する。

(3) 知的財産戦略の強化

本技術テーマで行なった特許申請は 2 件のみである。近年、大学等は特許出願・維持の経費を抑制する傾向にあり、特許を出願してもその維持の経費を確保することが困難になっている。このことが、特許出願数低迷の一因になっていると考えられる。また、前述したように、我が国の磁石メーカーの技術力は極めて高く、広範囲に特許権が設定されている。競争領域に近い研究においては、特許の取得が困難な状況もある。

しかしながら、産業競争力強化の観点からは、知的財産の確保は重要な要素である。基礎基盤研究では、研究者の意識が低い点もあるので、既存の特許化支援制度も利用しながら、JST 事務局の力も借りて特許化を進めたい。

(4) 成果発信の強化

本技術テーマの研究資金に税金が充てられていることを斟酌すると共に、本テーマでの

成果を基礎にこの分野での研究の発展を加速する観点から、シンポジウムなど、技術テーマとしてまたまった形での成果公表を強化したい。

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に向けた状況

8-1 技術テーマの設定目標に対する達成状況

「4-2 P0 の目標」に示した様に、技術テーマの解決に向けて4つの具体的な目標を設定した。それぞれの目標ごとに達成状況を、平成23及び26年度採択課題の成果に基づいて説明する。

(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

(関連課題)

(A) 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

(B) 磁気構造可視化に基づく保磁力モデルの構築

(目標の達成状況)

従来は、Kerr効果、磁気力顕微鏡(MFM)、走査型ホール素子顕微鏡(SHPM)等を用いて試料表面の磁区を観察することにより磁石の磁化過程に関する情報を得ていた。

(A)の課題では、磁区の3次元な連結性に注目して解析すると共に、磁石の微細構造の観察結果と合わせて磁壁と粒界相の相互作用を明らかにし、以て、保磁力向上の指針を得ようとした。3次元磁区構造の評価法の確立には至らなかったが、MFM観察技術を大きく進歩させた。

(B)の課題では、X線顕微鏡による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が開発されている。さらに、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、磁気微細構造の平均サイズ、逆磁区あるいは反転結晶粒の体積と密度を定量的に求める手法での観察結果に基づき、当該課題で開発した大規模マイクロマグネティクスシミュレーション等を融合利用して、Nd-Fe-B系磁石の磁化過程の明確化が進められている。

このことより、本目的とは達成されている評価される。

(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

(関連課題)

(C) 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

(D) 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

(E) 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

(目標の達成状況)

(C)は、Nd-Fe-B磁石におけるNd₂Fe₁₄B相と粒界およびFe相との界面の物性を明らかにし、もって、現存のNd₂Fe₁₄B焼結磁石を越える指針を得ようとするものである。現状では、焼結Nd-Fe-B磁石を越える特性は実現されていないが、界面の物性を明らかにすることにより、高保磁力化及び高飽和磁化化の方針を示している。

(D), (E)はLa-Co置換Srフェライトの基礎物性の明確化と更なる高性能化のための物質設計指針を示した研究である。研究を通じて、Co置換サイトと Fe^{2+} の存在を明確にすると共に、 Fe^{2+} の量を制御できること、それにより更なる高異方性化が可能であることを示している。

これらの研究を通じて、永久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が行われていると判断される。中でも、(D), (E)の研究により得られた知見は、フェライト永久磁石における我が国の国際競争力を強化する観点から重要な成果であると評価している。

(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
(関連課題)

(F) 貴金属フリー $L1_0$ 型規則合金磁石創製の指針構築

(G) $L2_0FeCo$ 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

(目標の達成状況)

(F), (G)は、希土類フリーのFe-Ni および Fe-Co 磁石を薄膜技術を用いて作製した研究である。粉末等で高性能を得るには至らなかったが、前者で 1×10^6 [J/m^3] 程度の、後方で 2×10^6 [J/m^3] 程度の磁気異方性を実現しており、これらの合金のポテンシャルと今後の開発に対する方向性を示している。また、高異方性を実現できる材料としてFeCoAlを発見している。

Fe-Ni, Fe-Co 磁石のバルク化への指針を示すには至らなかったが、それぞれの材料のポテンシャルを、第一原理計算と突き合わせながら、実験的に明らかにしており、目標をおおよそ達成したと評価される。

(4) 新原理に基づく磁石材料の開発指針の提示
(関連課題)

(H) 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

(I) 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

(目標の達成状況)

(H)の研究課題は、Mn-Ga, Mn-Geなどの格子間隔を制御することにより、フェリ→フェロの相転換及び磁化の増大を達成しようとする研究である。薄膜技術、添加物、静圧力による格子間隔の制御と第一原理計算を組み合わせる研究を進めている。現状では、フェリ→フェロの相転換は実現していないが、第一原理計算によって示された方針沿って研究が進められている。

(I)の研究課題は、スピネルフェライトを高異方性化して永久磁石材料とする研究である。薄膜技術では、 2.4 [MJ/m^3]、微粒子で 0.21 [MJ/m^3] の磁気異方性が達成されている。前者の値は、Srフェライトの磁気異方性の数倍の値である。

なお、両課題とも研究内容は継続される予定である。

いずれの研究課題のハードルの高い目標を掲げての研究であるが、新原理に基づく磁石材料の開発指針の構築に向けて研究が進みつつあると評価される。

9-2 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果

上記の成果は、いずれも、産業競争力強化に繋がるものであるが、以下に、特筆すべき成果 2 点について説明する。(詳細は添付資料の 4 に記載)

(1) X 線顕微鏡を用いた元素識別磁区観察技術の開発

上記評価技術は、磁石の磁化反転過程を研究する新しいツールを提供し、磁石の保磁力発生機構の解明および高保磁力化等を加速すると高く評価される。

元素識別磁区観察技術は透過 X 線を使用するので、試料厚さは 100 nm レベルに制限されるが、極微細結晶で構成される熱間加工磁石等の磁化過程解明に極めて有効である。X 線顕微鏡での観察結果とマイクロマグネティクスシミュレーションを組み合わせ、磁化過程と静磁気エネルギー分布の関係の明確化等にも展開されている。この評価技術の開発は、従来得られなかった評価情報の取得を可能としており、技術のブレークスルーに繋がると期待される。

(2) La-Co 置換 Sr フェライトにおける置換原子の占有位置、電子状態の変化の解明と高性能化に向けた物質設計指針の構築

La-Co 置換 Sr フェライトは、Fe の一部を Co で置換した高性能フェライトであるが、置換原子の占有位置、電子状態について統一見解がなく、より高性能な磁石の開発を阻んでいる。本研究では、多元素多サイト化合物の原子レベルの解析法を確立し、Co 置換サイトを明らかにすると共に、置換量に応じて、 Fe^{2+} が出現することを明らかにした。さらに、 Fe^{2+} の出現量を制御できることを明らかにし、それにより更なる高性能化の可能性を示した。

フェライト磁石は、コストパフォーマンスの観点から広く使用されている。この材料において、産業競争力を強化することも重要な目標である。上記の知見は、La-Co 置換 Sr フェライトの更なる高性能化における新たなブレークスルーに繋がると期待される。

9-3 最終目標達成の可能性

9-1, 9-2 で示したように、P0 が想定した 4 つの目標のうち、(1), (2)については、既に目標達成に相当する成果が得られている。

目標(1)については、平成 28 年度採択課題「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」及び「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」によって、成果をより充実できると考えている。

目標(2)については、フェライト磁石の特性改善において技術テーマの解決に寄与できたと考えている。さらに、平成 28 年度採択課題「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」を通じて、産業界の共通した期待である、高温で使用できる重金属フリー高性能 Nd-Fe-B 磁石の開発にも寄与できると考えている。

目標(3)においては、バルク Fe-Ni, Fe-Co 磁石に繋がる技術の提示までには至らなかった。すでに研究が終了しているので、当面、これらの材料を研究対象とすることは予定していないが、当該の研究課題は、Fe-Ni, Fe-C お材料のポテンシャルを明らかにした点で、技術テーマに相応の寄与をしたと考えている。

目標(4) は、高い目標を掲げた研究である。実現できれば、大きなブレークスルーとな

る。平成 29 年度以降は、「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」および「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」の 2 課題で研究を進める。前者については、既に高異方性の微粒子の作製に成功しており、革新的フェライト材料の開発に期待したい。

以上、総合して最終的に当所の目的を達成できると考えている。

9. 総合所見

本技術テーマでは、4-2 に示した所期の目標を設定した。材料を特定しない目標としたので、「7-1」に示した P0 の運営方針で、具体的な材料や研究の進め方について、応募者に周知する形を取った。薄膜材料を扱う課題を含めて、本技術テーマで採択した全ての研究課題は、バルク磁石への展開を視野に入れた研究であるが、薄膜の研究については、既採択課題での研究成果を踏まえて、徐々にバルク磁石への展開を重視した。この P0 の考え方は、公募要項の中で P0 の方針で示すことにより実現した。公募要項中の「P0 の採択・運営方針」をうまく利用できたと考えている。

本技術テーマでは、平成 27 年までに 4 課題が終了した。添付資料「6. 終了課題の産学共同研究等への展開状況」に示す様に、終了課題の総てで、本技術テーマの成果が民間企業との共同研究、NEDO & MagHEM での研究へと展開されている。平成 28 年度には 4 課題が終了する予定である。そのうち、1 課題は実質的に平成 29 年度以降も継続される（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(表 1 課題番号 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(表 1 課題番号 13))。残り 3 課題のうち 2 課題については、既に民間企業との共同研究が開始されており、産学共創基礎基盤研究プログラムの目的も達成されつつあると考えている。

産学共創の場は、本プログラムの重要な要素である。産学共創の場およびサイトビジットを受けて、各研究課題には、大幅な研究計画の変更をお願いする場面も多くあったが(7-6 参照)、研究計画の変更を受け入れて頂き、産学共創の場およびサイトビジットは技術テーマの運営に有効に機能したと考えている。

一方で、産学共創の場では議論の時間が限られているため、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)。今後、工夫が必要である。

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た時期でもあったので、希土類フリー磁石の開発への期待には大きなものがあった。平成 23 年の公募では、本技術テーマでも 2 件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課題として技術テーマを運営した。評価技術及びフェライト磁石において産業競争力強化に繋がる特筆すべき成果が得られており、バランスの取れた採択をしたことは、結果として成功であったと考えている。

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る(JITA による)。際だって大規模な生産量ではないが、永久磁石が多くの機器の特性を支える技術であることを考えると(例えば、EV や HV)、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。しかしながら、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課題としなかった研究グループが永久磁石の研究に参入し、アカデミアの分野での研究活動が活性化し、永久磁石に関する我が国の総合的な研究レベルが著しく向上したことも、副次的な大きな成果である。

以上 （完）