

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報告書

総合評価     A

1. 総合所見

高性能な永久磁石は、今後大幅な需要拡大が見込まれる電気自動車やハイブリッド車の駆動モータ、風力発電機、産業用モータなどに欠かせない材料部品であり、脱炭素社会を支えるキーマテリアルのひとつである。

日本は、これまでフェライトや希土類系磁石材料などの開発で世界をリードしてきた。しかし近年、磁石の生産量で中国が世界トップとなり、技術開発も強化されつつある。更に、米中貿易摩擦に伴い高性能磁石の原料である希土類の生産・調達の特定国への一極集中リスクが顕在化し、サプライチェーン再構築の必要性が改めて認識されるようになった。

本技術テーマは、既に実用化されている磁石材料の特性改善と今後期待される新規な磁石材料の開発、並びに磁石関連の新評価技術の開発に関する基礎的研究を目的としており、昨今の世界的なEV化への加速および上述の希土類問題などの状況における日本の産業競争力の強化に果たす役割は、本技術テーマがスタートした10年前に比べ一段と重要性、深刻さを増し、ますます意義深いものとなっている。

本技術テーマの実施により新たに開発された磁石材料の評価技術は、今後、産学官の磁石に関連する研究開発力の増強に大きく寄与することが予測される。産業界にあっては、速やかな技術開発や広範な応用展開に、アカデミアにおいては、基礎的研究力の強化に繋がることを期待する。また、Nd系磁石やLa-Co置換Srフェライト系磁石など既存磁石の特性改善は、今後の産業競争力強化に直接繋がる成果として極めて高く評価する。FeCo系およびFeNi系合金などの新磁石（原理は既知）に関する研究、並びにMn合金およびCoを含むスピネル型フェライトなどの新原理に基づく磁石材料の開発に関しては、当初技術テーマ設定の際に目標とした磁石材料としてのポテンシャルの明確化は十分に達成した。これら新磁石および新原理に基づく磁石材料は、今後、本技術テーマで開発された最先端評価技術並びに計算科学の導入による原理追求およびマテリアルズインフォマティクスなどの利活用によって、必ずや実用材料へ向けてのブレークスルーが見出され、日本が磁石材料の研究開発に関しリーダーシップを発揮し続ける上で、極めて重要な役割を果たすものと期待したい。

また、本技術テーマの運営に関しては、サイトビジットと産学共創の場を有効活用して、磁石材料専門家や磁石ユーザの意見を収集するとともに、進捗状況の把握、研究計画の見直し、研究の方向性の指導も適切になされており、高く評価する。

## 2. 技術テーマのねらい（目標）と課題の選考

### （1）プログラムオフィサー（P0）のねらい（目標）と課題選考方針

本技術テーマは、革新的次世代高性能磁石創製の指針構築を目的として、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（以下「新評価技術」という。）、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（以下「既存磁石」という。）、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（以下「新磁石（原理は既知）」という。）、④新原理に基づく磁石材料の開発指針の提示（以下「新原理に基づく磁石材料」という。）、の4つを具体的技術課題として設定した。

これら技術課題は、いずれも新高性能磁石創製に向けた指導原理構築の核心を突いたものであり、本技術テーマがスタートしてから10年後の現在においても新磁石開発の指針となっていることから、その適正さが証明される。特に、長期のプログラム実施期間を見据えて、研究課題および研究テーマに通常では取り組み難い新たな材料評価技術の開発や計算科学などを導入した点は、評価に値する。また、研究開発対象材料として、現用磁石（Nd-Fe-B系、フェライト系）から新磁石（非希土類系磁石、新原理に基づく磁石材料）までの広範な材料を設定した点は、産業界の関心を引きつつ10年に及ぶ長期の研究開発を推進する上で有効であった。

バルク磁石材料の研究者が多くない現状を考慮して、他分野研究者の参入を促すために材料開発の視点を変え、研究対象として薄膜材料を積極的に活用した点も適切だった。

### （2）アドバイザーの構成

アドバイザーは、産業界およびアカデミアからほぼ半々でバランスよく構成され、アカデミア側に偏らないよう配慮がなされた。また、メンバーについても、材料分野または応用分野を専門とする研究者がアドバイザーとなり、本格的に革新的次世代高性能磁石を生み出すための最強のオールジャパン体制が構築されたと言える。

### （3）採択課題の構成、追加採択

採択された研究課題は、新評価技術が4課題、既存磁石が4課題、新磁石（原理は既知）が2課題、新原理に基づく磁石材料が3課題であり、P0の狙いに対応する研究課題をバランスよく採択した。

## 3. 技術テーマのマネジメント

### （1）P0の運営方針

P0の掲げた6項目の運営方針（評価用資料，P.11）は、深く考察されており妥当である。特に、他分野の研究者の参入を促す取り組みや、計算科学を活用し従来とは異なる元素や組成を考慮した探索研究は、研究開発を加速させ新たな展開を図る上で極めて効果的であり、高く評価する。また、磁石開発ではバ

ルクの研究に重点が置かれがちだが、薄膜による研究成果を活用しながら進めた方針は特筆に値する。

## (2) 研究費の配分

研究費は、予算ベースで新評価技術、既存磁石、新磁石（原理は既知）、新原理に基づく磁石材料の各分野にバランスよく配分された。

一方、研究目標の達成を図るためには、研究課題の内容とその進捗状況および目標達成の見通しを常に検討し、研究費を重点配分する臨機応変な対応が重要である。しかし、実際にこれを実行しようとするときかなりの勇気と先見性が必要となる。本技術テーマの運営に際し、P0は十分にその役割を果たした。ただ、重点配分枠は、研究課題間でよりメリハリを付けても良かった。

## (3) 産学共創の場の運営と活用

サイトビジットでは、P0、アドバイザーおよび研究実施者間で深い議論がなされ、また、産学共創の場では、更に磁石ユーザを含めた産業界からの意見も聴くなど幅広い視点での議論が行われ、その結果を研究の進め方に反映させるシステムを構築した。実際には、アカデミアと産業界側とで見解の相違や意見対立などもあったであろうが、P0の仲介などにより有効に運営されてきたものと推察される。また、産業界側は、会社の都合、或いは研究資金を直接提供している訳ではないなどの理由で研究実施者に意見を言いにくかったことも想像できるが、無記名形式のアンケートの活用により産業界側の意見を吸い上げ、本音や本気の助言が聴取できるように工夫して研究開発の方向付けに反映させる努力をしたP0の対応は、誠に適切であり高く評価する。

## (4) 技術テーマの進捗状況の把握

P0は、サイトビジット、産学共創の場、或いは成果報告書を通して各研究課題の進捗状況の把握を適切に且つ多面的に行った。また、当初設定した研究目標に照らし合わせその難易度を考慮して進捗状況を適切に判断し、研究内容の修正などを行い、P0としての責任を十分に果たした。

## (5) 研究課題の評価と評価結果に基づく指導

研究課題の中間評価では、サイトビジット、産学共創の場での議論、成果報告書を参照し、当初設定した研究目標の達成度をその難易度が課題毎に異なっている点に留意して実施した。中間評価後の「継続決定」などは、産業への貢献としての「将来的な産業競争力強化への貢献度」と学術への貢献としての「基礎的な新知見の創出」を加味して判断し、13の研究課題中9課題で研究内容の追加、変更、廃止、サンプル提供といった産業界からの支援の仲介などを行った。特に、商品化されている既存磁石の特性改善については、各企業が持つノウハウに関する部分が多く、オープンな議論が難しかったものと推察されるが、研究の進捗状況の把握に基づいた指導や研究内容修正などは、極めて妥当であり高く評価する。

## 4. 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) 課題評価の結果を踏まえた技術テーマの設定目標に対する達成状況

### ①新評価技術

本技術課題の研究では、MFMによる磁石破断面の磁区構造解析技術の開発、走査型ラウエ顕微鏡による個別結晶方位解析技術の開発、放射光を利用した蛍光X線計測による元素濃度解析技術の開発および走査型軟X線MCD顕微鏡による磁区観察技術の開発などにおいて多大な成果が得られており、当初の課題目標を達成したと言える。しかし残念ながら、走査型ラウエ顕微鏡による個別結晶方位解析技術、放射光を利用した蛍光X線計測による元素濃度解析技術については、本研究期間中に革新的次世代高性能磁石の開発研究に適用される段階までには至らなかった。今後更なる技術の向上を図ることによって、広く材料開発に利用されることを期待する。

### ②既存磁石

本技術課題の研究では、重希土類を拡散したNd系焼結磁石におけるコアシェル構造の形成メカニズムの解明、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の達成、また、NdリッチGa添加焼結磁石で最適熱処理により2.0 Tを超える高保持力の実現など、現在広く実用化されているNd磁石の特性改善に直接繋がる多大な成果が得られた。また、La-Co置換Srフェライトの研究では、Co<sup>2+</sup>量を制御することにより巨視的異方性が増大すること、Co<sup>2+</sup>量は酸素分圧によって制御可能であることなどを明らかにし、磁気特性改善に向けた新たな指針を得ることに成功した。このことも特筆すべき成果である。本技術課題は、当初の目標を十分に達成したと言える。

### ③新磁石（原理は既知）

本技術課題の研究では、FeCo系およびFeNi系合金の磁石材料としてのポテンシャル評価に薄膜試料を用いて行った。その結果、(FeCo)-Al系極薄膜で、 $2.1 \times 10^6$  J/m<sup>3</sup>の磁気異方性を実現し、第一原理計算結果を実証した。また、FeNi規則合金磁石では、エピタキシャル薄膜で $9 \times 10^5$  J/m<sup>3</sup>の磁気異方性を実現し、FeNi規則合金の磁石としてのポテンシャルを明らかにした。

今後の更なる研究開発により、本技術課題の目標の一部でもある材料の実用化を図るための研究開発指針、およびその有効応用分野の具体的な提示がなされることを期待する。

### ④新原理に基づく磁石材料

本技術課題の研究では、Mn合金に侵入型元素を導入して結晶を歪ませることによりフェリ磁性からフェロ磁性に相変態すること、高飽和磁気分極および高磁気異方性を併せ持つ正方晶XA構造のMn系合金が存在することなどを第一原理計算により明らかにし、磁石材料としてのポテンシャルを明確化した。また、スピネル型フェライトの研究では、Coを含むスピネル型フェライト薄膜に格子ひずみを導入することにより希土類合金に匹敵する磁気異方性の実現可能であること、ヤーンテラー効果を利用して自発的ひずみを発生させることにより磁

気異方性の誘起が可能であることなどを実験的に明らかにした。これらの研究成果は、新たな高性能磁石材料の開発指針を示すものとして評価する。今後、研究の更なる進展により、新規なバルク磁石の実現に向けた具体的展望が開けることを期待する。

#### (2) 産業競争力強化につながる技術の確立に資する成果

本技術テーマにより開発された新評価技術は、当初の課題目標を十分達成し、将来必ずや材料開発に広範に利用されて産業競争力強化に役立つと考えられる。しかしながら現時点では走査型ラウエ顕微鏡、放射光を利用した蛍光 X 線計測による元素濃度解析技術については、評価感度の限界および評価可能試料の条件などに関し未だ検討が不十分であり、完成した評価技術とは言い難い。広く一般の研究者が手軽に利用できる技術の確立に向けて、更なる研究の継続が望まれる。

既存磁石の特性改善を目的とした研究成果では、Nd リッチ Ga 添加焼結磁石の高保持力化技術、La-Co 置換 Sr フェライトにおける  $\text{Co}^{2+}$  イオン濃度制御による磁気異方性向上技術などは、直ちに産業競争力強化に繋がるものとして高く評価する。

新磁石材料（原理は既知）および新原理に基づく磁石材料の研究成果は、第一原理計算および薄膜材料を用いた研究により、磁石材料としてのポテンシャルはほぼ明確化された。しかし、実用材料としてのバルク化に向けた開発指針が示されていない。難度の高い研究ではあるが、今後、実用化に向けての進展を期待したい。

#### (3) 個別の産学共同研究への発展状況

本技術テーマでは、13の研究課題が実施されたが、プログラム終了時点で企業へのサンプル・ノウハウ提供件数は4件、企業との共同研究件数は7件であり、研究成果をベースとした産学共同研究への発展状況は、妥当である。

#### (4) 最終目標達成の状況

PO が設定した半数以上の技術課題において、目標達成もしくはそれ以上の成果が得られたと評価した。特に Nd 磁石および Sr フェライト系の既存磁石の特性改善に関する研究課題では、複数の高度な要素技術の融合により優れた特性の実現および知見が得られており、我国の産業競争力の維持・強化に力を発揮すると思われる。また、新たに開発された評価技術は、世界最高水準であり他の材料系にも展開できる可能性を持つことから、今後の研究の進展により産業界における材料開発にも広く取り入れられるものと考えられる。新磁石材料（原理は既知）および新原理に基づく磁石材料の研究に関しても、新磁石創製に関して重要な知見が得られており、今後に期待できる。

本技術テーマの最終目標は、一部に不十分な点も認められるが、全体的にはほぼ達成されたと判断する。今後も粘り強く研究を継続し、大きな技術飛躍に結び付くことを期待する。

## 5. その他

### (1) 数値目標による達成度評価

目標達成度の判断は、目標が数値を伴ったものであったのか、それとも定性的なものであったかによって大きく異なる。本技術テーマでは、多くの研究課題の目標が「・・・指針の解明」、「・・・技術の開発」といった定性的なものであった。例えば、評価技術などでは感度や分解能、材料開発では物性値などの数値を目標とすることが可能である場合には、数値を参照して達成度評価をするのが望ましい。

### (2) 知的財産戦略の強化

特許出願数が中間評価時点での2件から10件に増えたことは、中間評価の指摘事項に適切に対応した結果だと考える。しかしながら、本技術テーマには10年間のプログラム実施期間と多額の国費が投入されており、特許出願数が10件に止まり、特に外国特許が無いということは残念である。

研究開発成果に基づく知的財産権の取得は、企業が研究成果を実用化・製品化し、外国に対しても優位性を確保するための拠り所であり、我国の国益を守るためにも是非とも必要である。本技術テーマは、最終的には「我国の産業競争力の維持・強化と社会基盤の強化に資する」ことを目的としていることから、この最終目的の実現に向かって積極的に努力することが重要である。

アカデミアの研究者は、知的財産権への意識が希薄な場合もあることから、本技術テーマがスタートした初期の段階で、各研究課題担当者に本プログラムのこの趣旨（最終目的）を十分に説明し、知的財産権取得の必要性、重要性を理解してもらうことが必要である。また、外国特許も含めた知的財産に関する戦略を、弁理士などの専門家を加え検討しておくことも重要であると考えられる。

JSTにおいては、今後、これらの点を検討されることを是非ともお願いしたい。

以上