

高性能永久磁石における研究開発動向

高性能永久磁石における研究開発動向調査専門委員会編

目 次

1. はじめに	03	5. 磁化反転メカニズムに関連した（評価解析技術と）シミュレーション技術の動向	37
2. レアアース資源の現状	04	5.1 磁化反転メカニズムの本質的解明に向けた計測とシミュレーション	37
2.1 はしがき	04	5.2 大規模マイクロマグネティックシミュレーションにおける計算高速化への取り組み	43
2.2 世界のレアアース供給量	04	5.3 実験による Nd-Fe-B 系焼結磁石の磁化反転支配要因解析	49
2.3 世界のレアアース需要量	04	5.4 複数距離で観察した MFM 像と画像処理を用いたフェライト磁石の磁区観察手法	54
2.4 世界のレアアース需給場欄とまとめ	05	5.5 ネオジム磁石の保磁力測定におけるパルス励磁型 $B-H$ トレーサー安定計測方法の検討	58
3. 省希土類 Nd-Fe-B 系磁石の開発動向	05	6. 永久磁石モータ・発電機の現状と応用	64
3.1 省 Dy/Tb ネオジム磁石の開発動向	05	6.1 各種永久磁石に適した自動車駆動用永久磁石同期モータの設計	64
3.2 高保磁力 Nd-Fe-B 系磁石における Dy 添加量削減技術の開発動向	10	6.2 鉄道駆動用永久磁石同期電動機の動向と効果	70
4. 新規磁石材料の開発動向	14	7. あとがき	76
4.1 ThMn ₁₂ 型新規磁石材料研究の基礎研究の現状と磁石化の可能性	14		
4.2 ThMn ₁₂ 型 Sm-Fe 系急冷薄帯磁石の磁気特性	19		
4.3 Ca-La-Co 系 M 型フェライトの高性能化に向けた研究	21		
4.4 レーザ蒸着法を用いた厚膜磁石の開発	26		
4.5 希土類複合コンパウンドを用いた圧縮成形磁石の開発	31		

高性能永久磁石における研究開発動向 調査専門委員会委員

委員長	杉本 諭(東北大学)	委員	福田 方勝(三菱製鋼(株))
幹事	中野 正基(長崎大学)		福永 博俊(長崎大学)
	西内 武司(日立金属(株))		藤崎 淳(富士通(株))
幹事補佐	小原 学(明治大学)		藤原 照彦((株)トーキン)
委員	有泉 豊徳(東英工業(株))		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点)
	井上 宣幸((株)イノウエ磁研)		堀田 勝喜(日本工業大学名誉教授)
	大橋 健(信越化学工業(株))		堀 充孝(日本電磁測器(株))
	小川 和宏(日産自動車(株))		町田 憲一(大阪大学)
	奥村 邦夫(東京マグネットエンジニアリング(株))		松田 秀樹(住鋳国富電子(株))
	片山 信宏(戸田工業(株))		三嶋 千里(愛知製鋼(株))
	北川 功((株)日立製作所)		山岡 武博((株)日立ハイテクサイエンス)
	後藤 龍太((株)三徳)		山田 修(ミネベアミツミ(株))
	小林 久理真(静岡理科大学)		山本 日登志((株)K R I)
	齋藤 哲治(千葉工業大学)		山元 洋(明治大学 名誉教授)
	桜田 新哉((株)東芝)		
	佐々木 信生((株)玉川製作所)		
	島田 宗勝(元 弘前大学)		
	島村 正彦((社)日本電気計測器工業会)	途中退任委員	入山 恭彦(大同特殊鋼(株))
	白井 照光(日本電気計器検定所)		上原 裕二(富士通(株))
	諏訪 建一郎(T D K (株))		大村 正志(T D K (株))
	竹澤 昌晃(九州工業大学)		日高 徹也(T D K (株))
	谷川 茂穂(高効率モータ用磁性材料技術研究組合)		森本 耕一郎(戸田工業(株))
	徳永 雅亮(元 日立金属(株))		山本 和彦((株)三徳)
	中村 元一(並木精密宝石(株))	協力者	大橋 正広(日立金属(株))
	西尾 博明(磁気物性評価法研究所)		小林 義徳(日立金属(株))
	橋野 早人((株)ダイドー電子)		長谷部 寿郎(東芝インフラシステムズ(株))
	長谷部 章雄(JM エナジー(株))		中村 元(信越化学工業(株))
	広沢 哲(物質・材料研究機構 元素戦略磁性材料研究拠点)		森本 茂雄(大阪府立大学)

1. はじめに

永久磁石は、家電製品、情報・通信機器、音響・映像用部品など、数多くの応用分野で利用されている。中でも強力な Nd-Fe-B 系磁石は、自動車関連部品、とくにハイブリッド自動車（以下 HEV）や電気自動車（以下 EV）の駆動用モータ、携帯電話等のスピーカーや振動モータ、空調機（エアコン）などのコンプレッサ、などでその需要が増大している。また、今後は自然エネルギーである風力発電用ジェネレータ等における大量使用も期待されている。

従来、Nd-Fe-B 系焼結磁石では、HEV などの用途において高温の使用温度でも十分な保磁力を維持するため、Dy（ジスプロシウム）などの重希土類元素が添加されてきた。しかし、Dy は資源的に少なく、また産出国も限られるため、リスクを抱えた元素であった。自動車メーカならびに磁石製造メーカは、いち早くそのリスクに対処してきたが、2010 年の尖閣諸島問題に端を発して希土類資源の価格が 2011 年には暴騰し、日本国内を席卷する話題となった。このような背景から Dy の使用量を削減する技術が研究され、今日までの期間で発展してきている。

磁石メーカが独自に開発してきた粒界拡散法は、その最たる成果であり、すでに各社において高保磁力 Nd-Fe-B 系磁石の量産技術として確立している。一方、2007 年度から経済産業省と文部科学省が連携して進めてきた「希少金属代替材料開発プロジェクト」、「元素戦略プロジェクト」でも、結晶粒微細化などの作製プロセス技術の発展など 2011 年度までに大きな成果を挙げた。続けて 2012 年度から両省が進めている元素戦略磁性材料研究拠点（ESICMM）や未来開拓研究「次世代自動車向け高効率モータ用磁性材料技術開発プロジェクト」（MagHEM）、2010 年度～2013 年度に本学会内設置された調査専門委員会「超高性能永久磁石の研究および応用動向調査専門委員会」が中心となり、本学会から推薦した科学技術振興機構（JST）の産学共創プロジェクト（革新的次世代高性能磁石創製の指針構築）も進行中で、Dy に依存しない Nd-Fe-B 系磁石の高保磁力化技術がさらに進展してきている。米国内、欧州（EU）内でもいくつかの同様な研究プロジェクトが進行しており、永久磁石に関連した技術の研究開発は、国際的な広がりを見せている。

現在、工業的に最も注目される材料は、より少ない Dy 量で高保磁力、かつ使用上の要求特性を満足するような高耐熱仕様の Nd-(Dy)-Fe-B 系焼結磁石であるといっても過言ではない。しかし、Nd-Fe-B 系焼結磁石以外でも、結晶粒が微細で保磁力の温度係数も小さい Nd-Fe-B 系熱間加工バルク磁石が高保磁力化の観点から注目され、2016 年には重希土類フリー Nd-Fe-B 系磁石として HEV の駆動モータに採用されている。また、希土類ボンド磁石では、従来の Nd-Fe-B 系急冷（MQ）粉を用いた等方性ボンド磁石以外に、HDDR 法を適用した Nd-Fe-B 系異方性ボンド磁石、Sm-Fe-N 系ボンド磁石や低融点金属をバインダーとした Sm-Fe-N 系メタル

ボンド磁石なども着実に高性能化している。さらに、Nd-Fe-B 系磁石が発明されてから 35 年以上経過し、Nd-Fe-B 系磁石を超える新永久磁石材料出現への期待も高まり、Nd-Fe-B 系磁石よりも高い飽和磁気分極と異方性磁界をもつ Sm(Fe,M)₁₂ 系 Nd(Fe,M)₁₂N_x 化合物などの新しい希土類磁石化合物（M：遷移金属元素）の研究なども盛んになってきている。同時に現在でも最大の生産重量を誇り、広い応用分野をもつフェライト磁石においても、La-Co 系、Ca-La-Co 系 M 型フェライト磁石などの、高い残留磁束密度を示す新しい高性能フェライト磁石の研究も盛んになってきた。

一方で、Nd-Fe-B 系磁石における濡れ性を向上させ高保磁力を生み出す Nd-rich 相の開発、Dy 使用量を削減させる粒界拡散法や結晶粒微細化技術、などの材料創製プロセス技術に加え、これらのプロセス技術を高分解能電子顕微鏡、中性子や放射光などによって組織学的に検証する評価解析技術も大きく向上し、日々進歩している。これに大きく貢献しているのが、先に挙げた ESICMM や MagHEM という大型プロジェクトである。例えば、放射光を利用して、Nd-Fe-B 系焼結磁石の粒界相の構造と磁性、さらに同時に出現する酸化物の構造解析、Nd-Fe-B 系焼結磁石の磁界印加に伴う破断面や内部の磁区構造変化から磁化反転箇所の明確化、などが大きな成果として挙げられる。同時に大型計算機を利用したシミュレーションによって磁化反転機構を解明し保磁力メカニズムに結びつける試みや計算科学をもとに結晶構造と構成元素から磁気的性質を明らかにし、新しい磁石化合物を探索する試みもなされてきている。(Sm,Zr)(Fe,Co)₁₂ 化合物が Nd-Fe-B 系磁石の主相である Nd₂Fe₁₄B 化合物よりも高い飽和磁気分極と異方性磁界を有する化合物であることが予想され、薄膜や急冷薄帯にて確認されたことなどは大きな成果の一つとして挙げられる。

このような背景と現状をもとに「高性能永久磁石における研究開発動向調査専門委員会」では、前「超高性能永久磁石の研究および応用動向調査専門委員会」に引き続いて以下の項目に関して調査を行ってきた。

- (1) 希土類資源の開発と供給動向および磁石リサイクル技術の研究開発動向
- (2) 高保磁力 Nd-Fe-B 系磁石における Dy 添加量低減技術の開発動向
- (3) 新規磁石材料（例えば、Sm(Fe,M)₁₂ 系、NdFe₁₂N_x 化合物、Ca-La-Co 系 M 型フェライトなど）の開発動向
- (4) 永久磁石の評価解析技術と電子論・計算科学等に関する研究開発動向
- (5) 各種永久磁石モータ・発電機などの応用分野における磁石の必要性能と研究開発動向

本技術報告は、これらの調査を踏まえ高性能永久磁石の現状と動向についてまとめたものである。執筆下さった皆様に感謝するとともに、本技術報告が本学会会員だけでなく、永久磁石に関係する研究者ならびに技術者にとって有意義な報告となれば幸いである。