

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	Nd、Pr、DyおよびTb削減のためのNd-Fe-B焼結磁石における粒界相の微細構造設計
Title(English)	Microstructural design of grain boundary phases in Nd-Fe-B sintered magnets for Nd, Pr, Dy and Tb reduction
著者(和文)	榎戸靖
Author(English)	Yasushi Enokido
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11987号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:北本 仁孝,細田 秀樹,曾根 正人,三宮 工,進士 忠彦,杉本 諭
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11987号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	榎戸 靖	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	北本 仁孝	教授	進士 忠彦	教授
	審査員	細田 秀樹	教授	杉本 諭	教授 (東北大学)
		曾根 正人	教授		
	三宮 工	准教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は、「Microstructural design of grain boundary phases in Nd-Fe-B sintered magnets for Nd, Pr, Dy and Tb reduction (Nd, Pr, Dy および Tb 削減のための Nd-Fe-B 焼結磁石における粒界相の微細構造設計)」と題して英文で書かれ、5 章から構成されている。

Chapter 1「General introduction」では、Nd-Fe-B 磁石が誕生した背景、磁気特性発現原理、市場要求、そして希土類元素にまつわる社会的背景をまとめている。その中で様々な応用に供するに適した磁気特性、特に保磁力を発現するために必要な技術的課題を抽出して、それらを解決するための独自の解決手法を提案し、本研究の目的・意義を述べている。

Chapter 2「Microstructural design of Ga-added grain boundary phase for Dy and Tb reduction」では、Dy や Tb を使用しない Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力を粒界相の微細構造制御によって向上する目的で、Ga を添加した磁石の設計指針とその作製結果について述べている。Ga 添加によって、二粒子間の粒界に、従来知られている希土類リッチ相 (R-rich 相) に加えて Nd<sub>6</sub>Fe<sub>13</sub>Ga 相が形成されたことを見出している。また、この相が 0.05 T という R-rich 相に比べて非常に低い磁化を持つことをホログラフィー法及び STEM-Lorentz 法の二つの手法によって示し、高強度放射光を用いた高温 in situ XRD 測定により調べた結果、この相がアニール処理によって形成されたことを明らかにしている。さらに、この相が R-rich 相に及ぼす影響を調べ、Nd<sub>6</sub>Fe<sub>13</sub>Ga 相が保磁力を向上させる原因になっていると述べている。これら二粒子粒界の制御により、Dy 及び Tb を含まない Nd-Fe-B 磁石において 1,998 kA/m の保磁力を得ることに成功している。

Chapter 3「Microstructural design of Ce-added grain boundary phase for Nd and Pr reduction」では、Nd や Pr を半減し、Dy や Tb を含まない Nd-Fe-B 焼結磁石の保磁力を粒界相の微細構造制御によって向上する目的で設計した、Ce、Y を添加した Nd-Fe-B 焼結磁石について述べている。Nd 及び Pr の代替となる希土類元素を探索し組成設計する目的で、コンビナトリアルケミストリーの概念に基づいた High-throughput 薄膜磁石組成探索手法、及び微細領域の磁気特性測定手法を開発し、これらによって組成探索を行ったことを述べている。組成探索の結果に基づき、Nd 及び Pr を Ce 及び Y で置換した Nd-Fe-B 焼結磁石を作製し、その粒界解析を行っている。R-rich 相に加え、R<sub>6</sub>Fe<sub>13</sub>Ga 相の導入を試み、さらに Ce を添加した R<sub>6</sub>Fe<sub>13</sub>Ga 及び RFe<sub>2</sub>相の磁化と二粒子粒界構造について詳細に調査を行っている。これら粒界相の制御により、Nd 及び Pr を半減した Nd-Fe-B 磁石において 1,063 kA/m の保磁力を得ることに成功している。

Chapter 4「Grain boundary protection in near-net shaping」では、Nd、Pr、Dy 及び Tb 等の希少希土類元素の製造過程での廃棄を減らす目的で、前章までで設計・制御された粒界相の微細構造を損なうことなくニアネットシェイプ成形を行うために、顆粒工程の導入について述べている。粒界相の酸化及び炭化を防ぐために、高蒸気圧液体による液架橋力を利用した液体結合顆粒を新規に提案している。二液混合添加及び真空乾燥の手法を用いてターピネオールの低添加顆粒の作製を実現し、粒子間粒界相の保護に成功している。これにより高い保磁力と残留磁束密度を兼ねそろえた焼結磁石の作製に成功し、量産工程での検証を行っている。これにより、ニアネットシェイプ成形を行わない場合と比較して 99.3% に達する保磁力及び残留磁束密度を実現し、表面実装型 (SPM) モータ用円弧形磁石の製造工程において、Nd、Pr、Dy 及び Tb の廃棄量を 34-68% 削減することができたと述べている。

Chapter 5「General conclusions」では本研究で得られた知見とともに、本論文の結論を述べている。

以上を要するに本論文では、異方性エネルギーから理論的に設計される内因的な磁気物性を実際に発現させ、Nd、Pr、Dy 及び Tb の添加の依存度を下げるために、粒界相とその制御という外因的な手法による保磁力向上を試みている。そのため、粒界相の持つ磁化や微細構造と保磁力の関係を明らかにし、その知見を活用することにより、新たな粒界相や新たな工法などを用いた粒界相の設計・制御法を考案し、Nd-Fe-B 焼結磁石に用いられる主要 4 希土類元素である Nd、Pr、Dy 及び Tb を削減しながら保磁力を向上させる有用な知見を提供しており、工学上及び工業上貢献するところが大きい。よって本論文は、博士 (工学) の学位論文として十分価値があるものと認められる。

注意: 「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。