

令和 3 年 8 月 24 日現在

機関番号：82658

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H01860

研究課題名(和文) REBCO/MgB2超伝導バルクマグネットによるコンパクトNMR/MRIの開発

研究課題名(英文) Development of a compact NMR(MRI) system using REBCO/MgB2 superconducting bulk magnets

研究代表者

富田 優 (TOMITA, MASARU)

公益財団法人鉄道総合技術研究所・研究開発推進部・担当部長

研究者番号：40462915

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,600,000円

研究成果の概要(和文)：コンパクトかつ高分解能のNMR/MRIに対する需要が昨今高まってきている。本研究は、これらの社会的背景のもとで、超伝導バルク磁石を用いた、ポータブルNMR/MRIシステムの構築を目指し、研究を行った。超伝導バルク磁石の磁場均一性および熱的特性の向上、並びに補正コイルの開発を行った。作製した超伝導バルク磁石とシムコイル、ならびにポータブル小型冷凍機を用いて、可搬可能な小型超伝導マグネットを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ネオジウム(Nd-Fe-B)磁石の10倍の磁力を持ち、かつ液体ヘリウムフリーの軽量小型超伝導バルク磁石を用いたコンパクトNMR/MRI装置を構築した。金属系超伝導磁石NMR/MRIは重量が大きく、導入・維持ともに大きなコストを要することから必ずしも広く普及するに至っていないが、高温超伝導バルク磁石のNMR/MRIは低コスト・軽量で、非専用の室内に容易に設置できると期待される。

研究成果の概要(英文)：Demand for compact high-resolution NMR / MRI has been increased recently. Under such social backgrounds, this study aimed at constructing a portable NMR / MRI system using superconducting bulk. Magnetic field uniformity and thermal property of superconducting bulk were improved and a shim coil was developed. Then a portable superconducting magnet was constructed using the prepared superconducting bulk, the shim coil, and a portable refrigerator.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導材料・素子 材料加工・処理 結晶成長 セラミックス システム工学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

従来の動物用 NMR/MRI は、金属系超伝導体の磁石を用いた大型・高分解能の装置と、永久磁石を用いた小型・低分解能の装置に二極化している。NMR/MRI の磁場強度は、顕微鏡における倍率に相当し、強力な磁場を発生できる磁石を用いるほど高分解能の NMR/MRI となる。金属系超伝導コイルを用いた装置は、最高で 20 T (テスラ) 程度の強磁場を発生し、高分解能 (数十 μm) の画像取得が可能であるが、人体用 MRI に匹敵する装置規模と高価格のため、限られた研究施設のみに設置されている。永久磁石を用いた装置は低価格のため導入は比較的容易だが、0.2~1.0 T 程度の磁場強度にとどまり、空間分解能は 500 μm 程度である。臓器の内部を詳細に観察するために必要な空間分解能が達成できないため、永久磁石を用いた装置の用途は極めて限定されている。小動物を用いた疾患の基礎研究や、がんの診断、医薬品の開発には、高い分解能を持ち、小型で低価格の NMR/MRI が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、高温超伝導バルク磁石 (レアアース系、ニホウ化マグネシウム) の作製技術を生かし、当該研究においては、高温超伝導バルク磁石を用いたコンパクト NMR/MRI 装置を試作し、実用化に向けた基盤技術を構築することを目的とする。具体的には、超伝導バルク磁石の高磁場化を図るとともに、解析モデルを構築し、機器設計に不可欠な熱的・機械的安定性を評価し、着磁技術を確立する。さらに磁場均一性を向上させるための補正コイルを組み込み、小型・高分解能、かつ低侵襲で高機能な分子イメージングが可能な超伝導バルク磁石によるコンパクト NMR/MRI 装置の実現に向けた基本技術の構築を目指す。

3. 研究の方法

超伝導バルク磁石の発生磁場は NMR/MRI 機器の性能値に直接的に関わることから、高性能な超伝導バルク磁石の開発が必要となる。バルク磁石の作製からバルク強化のための含浸技術、マグネット作製、着磁、NMR/MRI のための磁場評価までに至る研究を進める。

具体的には、まず NMR/MRI 装置の高分解能化に向け、超伝導バルク磁石の高磁場化を目指す。原料粉末の粒径制御を行うことで、高い磁場強度を有する超伝導バルク磁石の開発を行う。

次に、作製した超伝導バルク磁石について効率良く磁場を発生できるように、着磁法についてシミュレーションによる解析検討を行う。また、超伝導バルク磁石への着磁後に、高い磁場値を維持できるように、磁場安定性の向上を目指して金属含浸を行う。含浸法として、合金溶射法と真空含浸法の 2 つの方法により超伝導バルク磁石の熱的特性の改善を試みる。

さらに、超伝導バルク磁石が発生する磁場の均一度向上を目指し、NMR/MRI 装置へ組み込みが可能な磁場補正用のコイルの開発を行う。最後に開発した成果をとりまとめ、超伝導バルク磁石とシムコイル、ならびに冷凍機を用いて、小型超伝導マグネットの構築を行い、NMR/MRI 装置に向けた基本技術の構築を行う。

4. 研究成果

MgB_2 は結晶粒界がピンニングセンターとして寄与することから、生成する MgB_2 の粒径が小さくできれば、磁場強度の向上が期待できる。そこでボールミルにより原料粉末の粒径制御を行い、それを用いて MgB_2 超伝導バルク磁石 (30 mm \times 10 mm) を作製した。外観を図 1 に示すが、クラック等は確認されず、磁石として使用できるバルク磁石が作製できていることが分かる。作製したバルク磁石について、ホール素子を用いて捕捉磁場の温度依存性を評価した。その結果を図 2 に示す。28 K 以下で粒径を制御した試料の磁場強度が大きく、20 K においては、2 T を超える磁場強度を達成した。

超伝導バルク磁石の磁場中冷却による着磁法の数値解析に向け、解析モデルとシミュレーション法、および解析パラメータについて検討を進めた。解析ソフトウェア COMSOL Multiphysics を用い、材料の導電率の数値が解析の収束性に影響することを確認し、それらの関係性を評価すると共に、磁場中冷却の着磁解析を実施し、超伝導バルク磁石の電流密度分布や発生磁場の磁束密度分布を評価した。

超伝導バルク磁石は昇温とともに捕捉磁場が小さくなり、ある温度以上では失われてしまうことが知られており、外乱に伴う局所的な発熱が原因となり同現象が生じることも観測されている。そのため、超伝導バルク磁石の放熱特性向上を目的とし、熱伝導の良い合金で含浸することで熱はけを向上し、局所的な発熱を即座に冷却することを考案し、合金溶射法による金属皮膜処理を行った。合金溶射法は、合金を加熱して溶融し、対象物に吹き付けることで金属皮膜を形成する方法である。作製した RE 系超伝導バルク磁石に対し、低融点合金を用いて合金溶射法を行った。溶融した合金が RE 系超伝導バルク磁石に衝突し、比熱の差から急冷、凝固されることで表面に金属皮膜が形成されることを確認した。この合金溶射法を繰り返した超伝導バルク磁石を観察した結果を図 3 に示す。合金溶射法を繰り返すことで、バルク磁石の表面に金属皮膜が形成された。また、バルク磁石に対し液体窒素中にてヒーターにより熱を加えた結果、合金溶射法を行ったバルクは温度上昇が小さいことを確認した。このことから、合金溶射法によってバル

ク磁石の放熱特性を改善できていることが分かった。さらに別の手法として、真空含浸法により金属含浸を行った。真空含浸法は、空隙の多い材料に対し、熔融させた金属や樹脂などを真空下で含浸させる方法である。作製した MgB_2 バルク磁石に対し、真空含浸法により低融点合金を含浸させた。低融点合金を含浸させた MgB_2 バルク磁石を図 4 に示す。平均空孔直径は $50\ \mu m$ 程度しかない試料に対し、表面 $2\ mm$ 程度までに金属が浸透していることが確認でき、着磁時の熱はけの向上が予想された。これら合金の含浸により放熱特性を改善し、振動などの外乱の影響にも強く、高い磁場安定性が見込まれる。

超伝導バルク磁石が発生した磁場の均一度を高めるため、3 軸シムコイルの試作と性能評価を行った。三次元構造を有する磁場補正用シムコイルは、従来は樹脂材料を NC 旋盤などで削り出しする必要があったが、汎用的な 3D プリンターでポビン(図 5)の作製を行った。2 個積層したバルク超伝導体を想定し、実測された磁場の均一度をもとに、シムコイルの設計を行い、設計通りの勾配が出力されることを、数値解析によって確認した。また、シムコイルの作製を行い、磁場分布の測定を行った。さらに、鉄の薄片をマグネットの内面に配置して磁場の均一度を高める手法についても検討を行い、数値解析によって有効性を示した。

作製した超伝導バルク磁石とシムコイル、ならびにポータブル小型冷凍機を用いて、可搬可能な小型超伝導マグネットを構成した(図 6)。高温超伝導バルク磁石の NMR/MRI は低コスト・軽量で、非専用の室内に容易に設置でき医療分野などへの応用が期待できる。



図 1 粒径制御により作製した MgB_2 バルク磁石

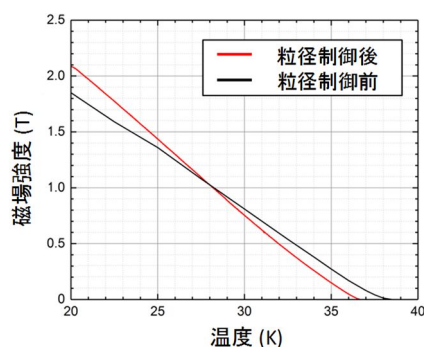


図 2 捕捉磁場の温度依存性

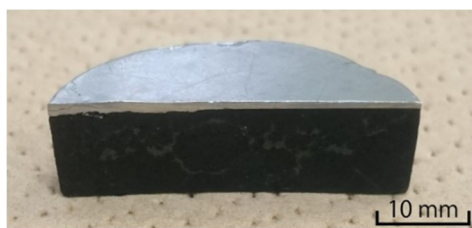


図 3 合金溶射法を行った RE 系超伝導バルク磁石

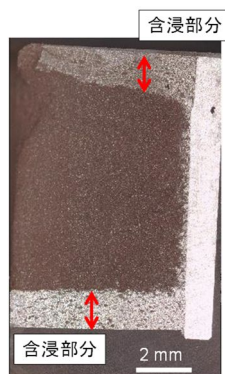


図 4 真空含浸法を行った MgB_2 超伝導バルク磁石の断面図

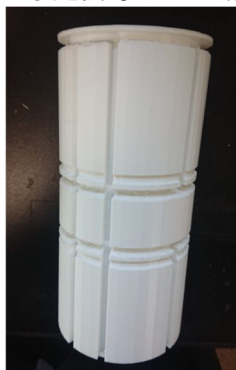


図 5 作製した磁場補正用シムコイルのポビン

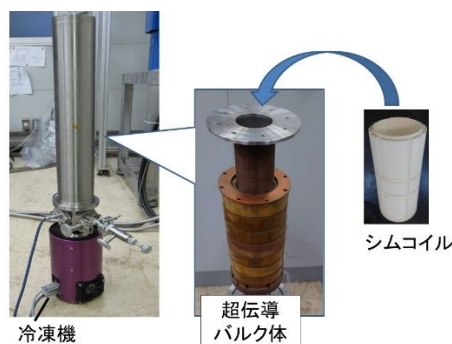


図 6 小型超伝導マグネットの構成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Atsushi Ishihara, Tomoyuki Akasaka, Masaru Tomita, Kohji Kishio	4. 巻 30
2. 論文標題 Superior homogeneity of trapped magnetic field in superconducting MgB ₂ bulk magnets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 035006 ~ 035006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6668/30/3/035006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 石原篤、赤坂友幸、恩地太紀、富田優、岸尾光二、紀井俊輝
2. 発表標題 MgB ₂ 超電導バルク体の磁化特性評価（3）
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原篤、赤坂友幸、恩地太紀、紀井俊輝、関野正樹、大崎博之、岸尾光二、富田優
2. 発表標題 MgB ₂ 超電導バルク体の磁化特性評価（2）
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原篤、赤坂友幸、恩地太紀、関野正樹、大崎博之、岸尾光二、富田優
2. 発表標題 リング状超電導バルク磁石の高特性化
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原篤、赤坂友幸、恩地太紀、富田優、岸尾光二、紀井俊輝
2. 発表標題 MgB2超電導バルク体の磁化特性評価(3)
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原篤、赤坂友幸、恩地太紀、紀井俊輝、関野正樹、大崎博之、岸尾光二、富田優
2. 発表標題 MgB2超電導バルク体の磁化特性評価(2)
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石原篤、赤坂友幸、恩地太紀、関野正樹、大崎博之、岸尾光二、富田優
2. 発表標題 リング状超電導バルク磁石の高特性化
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoyuki Akasaka, Atsushi Ishihara, Taiki Onji, Masaki Sekino, Hiroyuki Ohsaki, Kohji Kishio, Toshiteru Kii, Masaru Tomita
2. 発表標題 Development of MgB2 Superconducting Bulk for Magnetic Field Generation
3. 学会等名 10th ACASC/2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富田 優, 恩地 太紀, 赤坂 友幸, 石原 篤, 福本 祐介, 関野 正樹, 大崎 博之, 岸尾 光二
2. 発表標題 M0センサーによる高温超電導バルク磁石の捕捉磁場分布評価
3. 学会等名 2017 年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 石原 篤, 福本 祐介, 関野 正樹, 大崎 博之, 岸尾 光二, 富田 優
2. 発表標題 超電導バルク体の磁気光学像評価
3. 学会等名 2017年度秋季応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 紀井 俊輝, 岸尾 光二, 富田 優
2. 発表標題 MgB2超電導バルク体の磁化特性評価
3. 学会等名 2017年度秋季応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 石原 篤, 福本 祐介, 関野 正樹, 大崎 博之, 岸尾 光二, 紀井 俊輝, 富田 優
2. 発表標題 M0センサーによる高温超電導バルク磁石の捕捉磁場分布評価(2)
3. 学会等名 2017年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 紀井 俊輝, 岸尾 光二, 富田 優
2. 発表標題 半円状MgB2超電導バルク磁石の磁場特性評価
3. 学会等名 2017年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 福本 祐介, 富田 優, 関野 正樹, 大崎 博之, 岸尾 光二, 紀井 俊輝
2. 発表標題 Development of RE123 and MgB2 Superconducting Bulk Magnets
3. 学会等名 30th International Symposium on Superconductivity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 富田 優, 岸尾 光二
2. 発表標題 MgB2バルク磁石の捕捉磁場の試料密度依存性
3. 学会等名 2016年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 富田 優, 福本 祐介, 石原 篤, 赤坂 友幸, 大崎 博之, 関野 正樹, 岸尾 光二
2. 発表標題 Homogeneity evaluation of magnetic field in bulk superconductor annuli
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 石原 篤, 福本 祐介, 富田 優, 関野 正樹, 大崎 博之, 岸尾 光二
2. 発表標題 リング状バルク超電導体の空間磁場分布評価
3. 学会等名 2016年第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 富田 優, 岸尾 光二
2. 発表標題 MgB2バルク磁石の超電導特性の試料密度依存性
3. 学会等名 2016年第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石原 篤, 赤坂 友幸, 恩地 太紀, 富田 優, 岸尾 光二
2. 発表標題 MgB2超電導バルク体の磁化緩和特性
3. 学会等名 2017年第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	大崎 博之 (Ohsaki Hiroyuki) (10203754)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	関野 正樹 (Sekino Masaki) (20401036)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	村垣 善浩 (Muragaki Yoshihiro) (70210028)	東京女子医科大学・医学部・教授 (32653)	
研究分担者	福本 祐介 (Fukumoto Yusuke) (30426093)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・主任研究員 (82658)	
研究分担者	石原 篤 (Ishihara Atsushi) (00568347)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・副主任研究員 (82658)	
研究分担者	赤坂 友幸 (Akasaka Tomoyuki) (30621700)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・副主任研究員 (82658)	
研究分担者	岸尾 光二 (Kishio Kohji) (50143392)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・名誉教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------