

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 21 日現在

機関番号：82658

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24300185

研究課題名(和文)超伝導バルクマグネットによる小型NMR(MRI)の開発

研究課題名(英文)Development of a compact NMR(MRI) system using 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) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：小型・高分解能のNMR(MRI)に対する需要が昨今高まってきている。本研究では、これらの社会的背景のもとで、高温超伝導バルク材を用いた、ポータブルNMR(MRI)システムの構築に向けた基盤技術の構築を目指した。その結果、樹脂含浸処理を施した外径87mm、内径47mm、高さ22mmのリング状超伝導バルク体を組み合わせ、超伝導バルクマグネットを構成し、バルク体の配置の最適化による磁場均一性の向上、運転温度低下に伴う磁場強度の増強に成功した。また磁場補正用のシムコイルを試作した。

研究成果の概要(英文)：In recent years, demand for a compact and high resolution NMR(MRI) system will further increase. Our groups have aimed at construction of fundamental technology for a portable NMR(MRI) system using high temperature superconducting bulk magnets in the social backgrounds. We have developed a superconducting bulk magnet system with REBa₂Cu₃O_y bulk annuli immersed in molten epoxy resin (47 mm in inner diameter, 87 mm in outer diameter, and 22 mm in height) that prepared by the top-seeded melt-growth technique. As a result, it was clarified that it can be reinforced the magnetic field uniformity by optimization of arrangement of the bulk magnets and the magnetic field strength by operating in a lower the temperature. Furthermore, prototype shim coils were made for magnetic field correction, and it was found that it could generate a gradient magnetic field proportional to current.

研究分野：医用システム

キーワード：超伝導バルクマグネット 超伝導材料 磁場補正 NMR MRI 超伝導マグネット バルク材 樹脂含浸

1. 研究開始当初の背景

小動物を用いた疾患の基礎研究、がんの摘出病変の検査、医薬品の開発研究に利用可能な、小型・高分解能の NMR(MRI)に対する需要が昨今高まっている。従来動物用 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・低分解能の装置とに二極化している。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。金属系超伝導磁石を用いた装置は、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で導入は比較的容易だが、0.2 T から 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、これらの社会的背景のもとで、世界トップクラスの超伝導バルク体の製作技術を生かし、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小型 NMR(MRI)装置の実現に向け、超伝導マグネットの開発を行う。超伝導バルク材料の製作と性能向上技術を更にステップアップするだけでなく、周辺の要素技術と融合開発させることによって、NMR(MRI)向けの開発を進める。システム設計では、NMR(MRI)の精密磁場の発生において逆電流コイル、シムコイルなどの設置による技術を取り入れる。

本研究の成果が基盤技術となる、高分解能小型 NMR(MRI)が実現した場合、医療分野を中心にエネルギー分野等にもインパクトをもたらすことが期待できる。医療分野では、これまで主に金属系超伝導磁石の NMR(MRI)を使って行われていた疾患モデル動物実験、新薬の開発・動態評価などが、高温バルク超伝導磁石の MRI を用いて行われるようになる。金属系超伝導磁石の NMR(MRI)は、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)は低コストで、実験室の片隅に設置できるような扱いの容易さが特徴であり、認知症や生活習慣病をはじめとした種々の疾患の基礎研究や、新薬の開発を加速するのに寄与するものと思われる。またエネルギー分野での磁場応用技術においても、超伝導バルク材料の NMR(MRI)への応用が他の応用に比べ最も均一発生磁場における要求が厳しいので、本研究の成果によって、電力貯蔵

用フライホイール、磁気分離装置、超伝導モーター等の超伝導機器で、細かい磁場制御が可能となり、ブレイクスルーを起こすと考えられる。

3. 研究の方法

超伝導バルク材の発生磁場は NMR(MRI)機器の性能値に直接的に関わることから、超伝導バルク材の製作と要素技術の研究が必要となる。バルク材料の開発、製造からバルク強化のための樹脂含浸技術、マグネット製作、着磁、磁場発生、NMR(MRI)のための磁場評価まで、基礎から応用に至る一貫した研究を進める。そのため NMR(MRI)のための磁場評価で得られた実験データは、バルク材料製作へフィードバックされ、機器に適用した材料製作を繰り返し行う。

本研究は NMR(MRI)応用に向け、発生磁場の高磁場化と均一性の向上の両立に重点を置いた研究を進める。NMR(MRI)の精密磁場の発生においては、超伝導体の配置方法の検討による均一磁場の発生や冷凍機冷却による高磁場の発生を試みるとともに、磁石以外の NMR 構成要素であるシムコイルなどの製作・実装を進め、ポータブル NMR(MRI)システムの構築に向けた基盤技術の構築を目指す。

4. 研究成果

樹脂含浸処理を施した外径 87 mm、内径 47 mm、高さ 22 mm のリング状超伝導バルク体を組み合わせ、超伝導バルクマグネットを製作した。特性が異なる 10 個のリング状超伝導バルク体を用いて、バルク体同士の配列を変化させることで、異なるタイプの磁場発生源を考案した(図 1)。超伝導バルク体の配列により、パターン の強磁場タイプとパターン の均一磁場タイプを構成可能である。超伝導バルク体の構成次第で、目的に応じた磁場を得ることができる(図 2、図 3)。

リング状超伝導バルク体の磁場強度を向上させる手法の一つとして、より低温で超伝導バルク体を運用する方法がある。より低い温度で磁場を捕捉できるように、図 4 に示す冷凍機システムを製作し、内部に超伝導バルク体を配置して冷却試験を行った。その結果、超伝導バルク体の底面と上面で比較的均等に冷却できることが分かった。磁場分布測定を行った結果、超伝導バルク体内部の中心位置で 50 K において、液体窒素温度(77 K)の捕捉磁場値の 4 倍以上の磁場値を発生できることが分かった(図 5)。

また超伝導バルクマグネットの磁場均一度向上を目的とし、リング状超伝導バルク体 2 つを対向型に組み合わせ、その間のギャップを最適化することで、磁場均一性の向上を目指した。シミュレーションにより、最も磁場均一度が高かった 13 mm をギャップ長として超伝導バルクマグネットを構成し(図 6)、磁場測定を行った結果、高さ方向において

2%程度の数値範囲に誤差を抑えることができた(図7)。

次に、更なる超伝導バルクマグネットの磁場均一度向上を目指し、磁場補正用のシムコイルを試作した。シムコイルの構成として、動径方向(x)の補正にはゴレイ型コイルを、高さ方向(z)の補正にはマクスウェルペア型コイルを用いた。それぞれ $\phi 30$ mm、 $\phi 26$ mm の円筒に銅線を100ターン巻きつけ、コイルを製作した(図8)。製作したシムコイルに対し、1~3 Aの電流を通電し、傾斜磁場の測定を行った。各シムコイルに対し、コイル中心において、通電電流に比例した磁場勾配が得られることを確認した(図9、図10)。

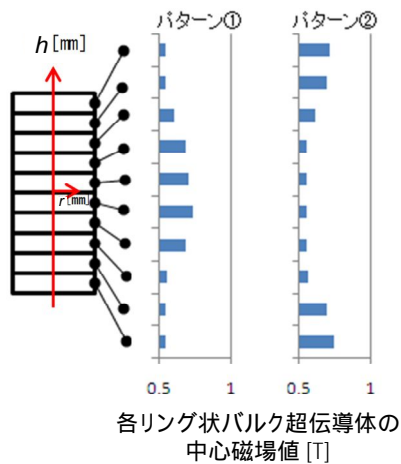


図1 磁場タイプの使い分けによる超伝導バルク体の配置 パターン①：強磁場タイプ、パターン②：均一磁場タイプ

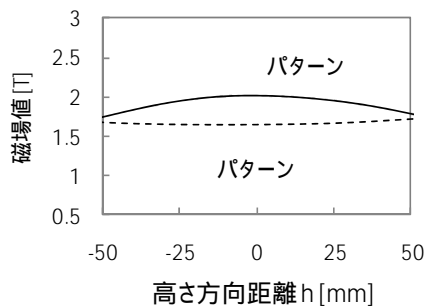


図2 超伝導バルクマグネットから発生する磁場値の高さ方向依存性

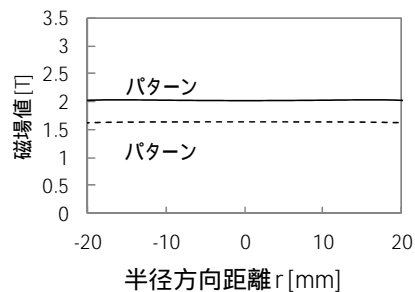


図3 超伝導バルクマグネットから発生する磁場値の半径方向依存性

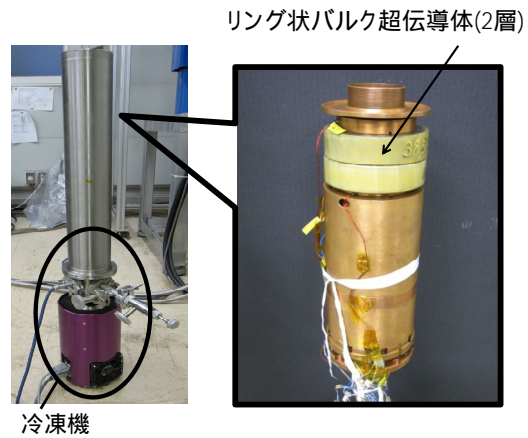


図4 冷凍機システムによる冷却試験

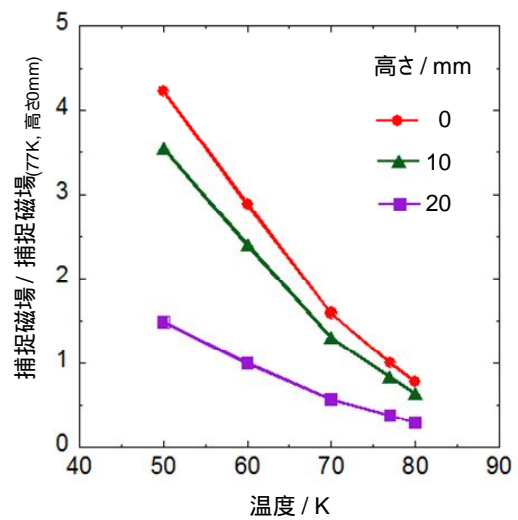


図5 冷凍機冷却下における捕捉磁場特性

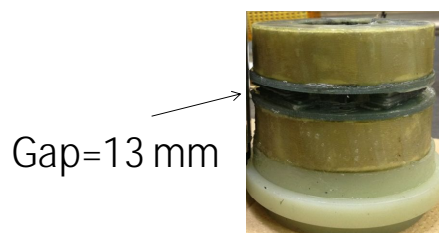


図6 ギャップを設けて配置した超伝導バルク体

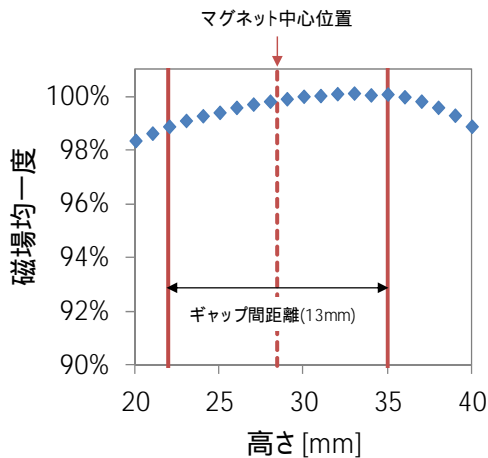


図7 超伝導バルク体から発生する磁場の均一度の高さ方向依存性



図8 左: x, yシムコイル(円筒巻き付け前) 右: zシムコイル(円筒巻き付け後)

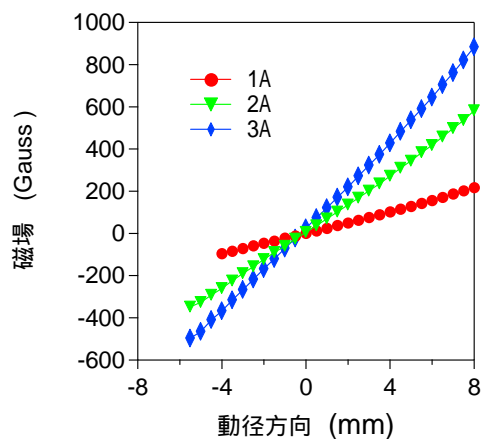


図9 x, yシムコイルの測定結果

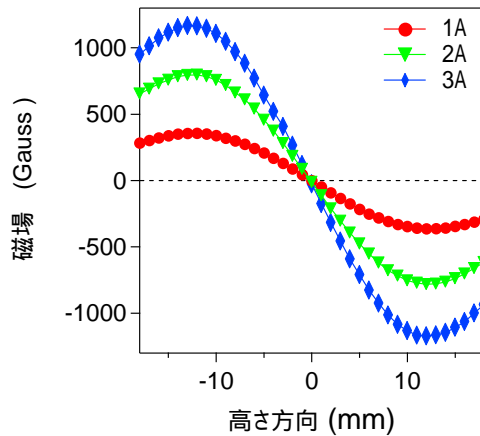


図10 zシムコイルの測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 18 件)

赤坂友幸, 多層リング状バルク超伝導体における磁場補正, 第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016/3/19-22, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区)

赤坂友幸, リング状バルク超伝導体における磁場補正評価, 第92回2015年度秋季低温工学・超伝導学会, 2015/12/2-4, 姫路商工会議所(兵庫県姫路市)

富田優, Evaluation of temperature dependence of magnetic field distributions of bulk superconductor annuli, MT 24 conference, 2015/10/18-23, ソウル(韓国)

赤坂友幸, 多層リング状バルク超伝導体の磁場均一性評価, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 2015/9/13-16, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

富田優, Evaluation of the magnetic field characteristics of bulk superconductor annuli, M2S 2015 Conference, 2015/8/23-28, ジュネーブ(スイス)

石原篤, リング状バルク超伝導体における空間磁束密度分布の温度依存性評価, 第91回2015年度春季低温工学・超伝導学会, 2015/5/27-29, 産業技術総合研究所(茨城県つくば市)

赤坂友幸, 冷凍機冷却による多層リング状バルク超伝導体の性能評価, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015/3/11-14, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

横山悠介, バルク超伝導体のパルス着磁特性改善のための数値解析による検討, 第23回MAGDAコンファレンス, 2014/12/4-5, サンプオートホール高松(香川県高松市)

横山悠介, バルク超伝導体のパルス着磁特性の向上に関する数値解析に基づく検討, 第90回2014年度秋季低温工学・超伝導学会, 2014/11/5-7, コラッセ福島(福島県福島)

市)

赤坂友幸, 冷凍機冷却による大型リング状バルク超電導体の性能評価, 第 90 回 2014 年度秋季低温工学・超電導学会, 2014/11/5-7, コラッセ福島(福島県福島市)

富田優, 積層したリング状バルク超電導体における磁束密度分布評価, 2014 年 第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会, 2014/9/17-20, 北海道大学札幌キャンパス(北海道札幌市)

富田優, Trapped field properties of ring-shaped bulk annuli for NMR application, ICEC 25 -ICMC 2014 conference, 2014/7/7-11, オーフアールセル州(オランダ王国)

福本祐介, リング状バルク超電導体における空間磁場分布評価, 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 2014/5/26-28, タワーホール船堀(東京都江戸川区)

横山悠介, 均一組成バルク超電導体の電磁特性評価法の検討, 第 26 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2014/5/21-23, 岩手県民情報交流センター(岩手県盛岡市)

富田優, 大型リング状バルク超電導体の捕捉磁場特性, 第 61 回応用物理学学会春季学術講演会, 2014/3/19, 青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県相模原市)

富田優, 大型リング状バルク超電導体における捕捉磁場特性評価, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 2013/12/5, 名古屋キャッスルプラザ(愛知県名古屋市)

大浦雄紀, リング状バルク超電導体による均一磁界生成のための検討, 第 25 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム(SEAD25), 2013/5/17, 箱根ホテル小涌園(神奈川県足柄下郡箱根町)

大浦雄紀, リング状バルク超電導体による均一磁場空間生成のための条件最適化, 2012 年度秋季低温工学・超電導学会, 2012/11/7, いわて県民情報交流センター(岩手県盛岡市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富田 優 (TOMITA, Masaru)

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

(2) 研究分担者

大崎 博之 (OHSAKI, Hiroyuki)

東京大学大学院・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号: 10203754

関野 正樹 (SEKINO, Masaki)

東京大学大学院・工学系研究科・准教授

研究者番号: 20401036

村垣 善浩 (MURAGAKI, Yoshihiro)

東京女子医科大学・医学部・教授

研究者番号: 70210028

Muralidhar Miryala

芝浦工業大学, 工学部, 教授

研究者番号: 90415951

(H26 年度 削除)

(3) 連携研究者

福本 祐介 (FUKUMOTO, Yusuke)

鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・副主任研究員

研究者番号: 30426093

石原 篤 (ISHIHARA, Atsushi)

鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・副主任研究員

研究者番号: 00568347

赤坂 友幸 (AKASAKA, Tomoyuki)

鉄道総合技術研究所・材料技術研究部・研究員

研究者番号: 30621700