

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04646

研究課題名(和文) MgB₂超電導バルク磁石の熱的安定化と強磁場捕捉を実現するパルス着磁技術の開発研究課題名(英文) Development of pulsed field magnetization technique for MgB₂ superconducting bulk

研究代表者

藤代 博之 (Fujishiro, Hiroyuki)

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：90199315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：MgB₂やREBaCuO系超電導バルク磁石は、従来型の磁石では実現できない新しい応用が始まっている。本研究では3つの着磁における課題に取り組み、新たな知見を得た。第1に、高性能な大型MgB₂バルクの作製技術を確立し、パルス着磁により世界最高となる16 Kで1.1 Tの捕捉磁場を達成した。第2に、着磁時における応力解析の手法を確立し、電磁応力や金属リング補強の効果の検証を行った。第3に、REBaCuO磁気レンズとMgB₂バルク磁石円筒を組み合わせたハイブリッド型超電導バルク磁石装置(HTFML)の提案を行った。これらの成果は32件の学術論文、57件の学会発表、1件の特許出願に至った。

研究成果の概要(英文)：The trapped field magnet using MgB₂ and REBaCuO superconducting bulks has been intensively investigated for the practical applications. In this study, we have performed the three studies for magnetizing subjects. First, the fabrication techniques of the high-quality large MgB₂ bulk was established and a record-high trapped field of 1.1 T at 16 K was achieved.

Second, the simulation techniques for the mechanical stress during magnetizing process have been established and hoop stress of the disk bulk reinforced by metal ring was calculated to prevent the mechanical fracture.

Third, a new concept of a hybrid trapped field magnet lens (HTFML) was proposed, in which REBaCuO magnetic lens and MgB₂ (case-1) cylinder or REBaCuO (case-2) cylinder were used. As a result, the HTFML could reliably generate a concentrated magnetic field $B_c=4.73$ T with the external magnetizing field $B_{app}=3$ T in the 'case-1', and a higher $B_c=13.49$ T with higher $B_{app}=10$ T in the 'case-2', respectively.

研究分野：応用物理学

キーワード：バルク超電導体 着磁現象 機械的強度 シミュレーション 磁気レンズ 捕捉磁場

1. 研究開始当初の背景

近年、真空容器表面で 5 T(テスラ)を越える「REBaCuO 系超電導バルク磁石」(RE:希土類元素;超電導転移温度 $T_c = 90$ K)が実現している。この強力な疑似永久磁石は従来型の磁石(永久磁石、電磁石、超電導コイルなど)では実現できない磁場範囲と価格・サイズを有し、磁気分離や核磁気共鳴(NMR)装置などへの新しい応用が始まっている。

超電導体の塊(バルク)を着磁する方法として、磁場中冷却着磁(FCM)の他に、ミリ秒程度のパルス強磁場を印加して磁束線をピン止め中心に高密度に捕捉させるパルス着磁(PFM)が盛んに研究されている。しかし、PFMは磁束線が超電導体内を急激に運動するために大きな発熱が起こるため、2003年以前のPFMによるREBaCuO系超電導バルクへの捕捉磁場の最高値は 3.80 T であった。

本研究グループは、パルス着磁における発熱現象を理解するために温度測定の重要性を指摘し、研究の中から新しい2段階パルス着磁法(MMPSC法)を提案し、2005年にGdBaCuO系バルクに 5.20 TのPFMによる世界最高の捕捉磁場を実現した。その後、さらなる捕捉磁場向上の実験的検討や電磁界・温度シミュレーション解析などを行い、多くの研究成果を発表している。

一方、 MgB_2 超電導体($T_c = 39$ K)は、希少な希土類元素を用いず、軽量で機械的強度が高く、コヒーレンス長が長いために多結晶体での大型バルク磁石が実現できるなど、来たるべき水素社会の中でREBaCuO系バルクに置き換わる可能性を有している。しかし、 MgB_2 バルク材料は熱的不安定性によるflux jumpの発生や磁場中での臨界電流密度 $J_c(B)$ が低いため、2014年現在で報告されている最高の捕捉磁場は、FCM着磁で 5.4 T(at 13 K)、PFM着磁で 0.81 T(at 14 K)と低く、熱的安定性と捕捉磁場特性の向上が望まれていた。また、本研究グループは、 MgB_2 バルクを熱間等圧力(HIP)下で作製することで充填率を 90%以上に向上させ、さらにTiなどのピン止め中心導入により、FCMにより単体バルクで 3.6 T(at 14 K)、バルクペア間で 4.6 Tと、いずれのこの時点での世界最高の捕捉磁場を達成した。

2. 研究の目的

本研究では以下の3つの目的で実験と解析を実施した。

- (1) 高性能な大型 MgB_2 バルクの作製技術を確認し、パルス着磁条件の最適化により捕捉磁場の向上を実現する。
- (2) 超電導体バルクを着磁時における応力解析を行い、金属リング補強の効果の検証と最適設計を行う。
- (3) これまでの研究から、超電導バルク磁気レンズと超電導バルク磁石円筒を組み合わせた新しいハイブリッド型超電導バルク磁石装置(HTFML)の提案を行う。

3. 研究の方法

(1) MgB_2 バルクのパルス着磁特性

HIP法で作製したTi-doped MgB_2 バルク(直径 22 mm, 厚さ 15 mm, FCMでの $B_c = 2.23$ T at 16 K)を図1のようにCu製ホルダーにマウントし、冷凍機を用いて 20 K以下に冷却した。液体窒素冷却したsplit型コイル(内径 72 mm, 外径 124 mm, 厚さ 35 mm)のボアには一対の軟磁鉄ヨークを挿入し、コンデンサバンクからパルス電流を流して最大 3 Tのパルス磁場を印加した。バルク表面のホール素子により、捕捉磁場 B_c と磁場の時間変化 $B_c(t)$ を、またCu製ホルダーに貼り付けた温度計により温度の時間変化 $T(t)$ を測定した。さらに、有限要素法によりPFMにおける捕捉磁場と温度変化のシミュレーションを行った。

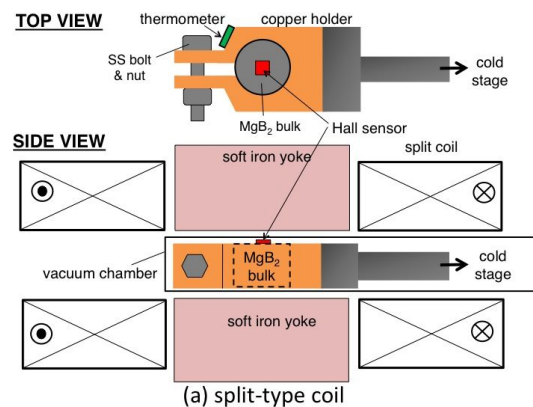


図1 split coilを用いた MgB_2 バルクのパルス着磁の実験配置

(2) 磁場中冷却着磁における応力解析

REBaCuO系超電導リングバルク(外径 64 mm, 内径 40 mm)をsolenoid型コイル(外径 150 mm, 内径 100 mm)を用いたFCM着磁について、図2に示す3つのモデルについてシミュレーション解析を行った。(a)は、無限長コイルを用いて無限長リングバルクをFCM着磁する場合、(b)は有限長バルク(厚さ 20 mm)を無限長コイルでFCM着磁する場合、(c)は有限長バルク(厚さ 20 mm)を有限長コイル(高さ 100 mm)でFCM着磁する場合である。それぞれのバルクの外周に厚さ 5 mmの金属リング(アルミ合金)を装着した。バルクの超電導特性は $J_c = 4.8 \times 10^8$ A/m²一定とするBean modelを仮定した。印加磁場 $B_{ex} = 4.7$ Tと 9.4 Tとし、10ステップでゼロになるFCM着磁を行い、捕捉磁場と超電導電流の分布を計算した。応力解析では、バルク及び金属リングの力学パラメータ(ヤング率、ポアソン比)を代入し、電磁氣的節点力からフープ応力 σ_0^{FCM} 、radial 応力 σ_r^{FCM} の分布を計算した。またFCM着磁では、バルクと金属リングの熱収縮係数の違いにより室温からFCM温度までの冷却による熱的フープ応力 σ_0^{cool} も印加されるため、実際に印加されるフープ応力 $\sigma_0 (= \sigma_0^{FCM} + \sigma_0^{cool})$ も計算した。

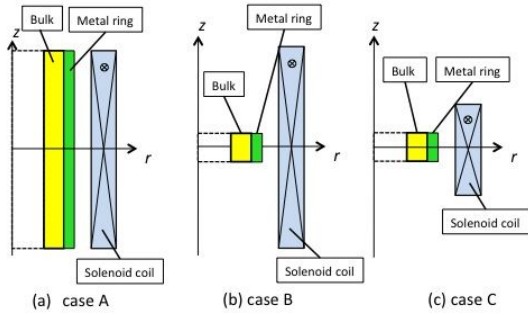


図2 FCM 着磁における電磁界・応力シミュレーション解析に用いた3つのモデル

(3) ハイブリッド型超電導バルク磁石装置 (HTFML)の提案

図3に解析に用いた HTFML の構造を示す。室温内径 100 mm の 10 T 超伝導コイル磁石を着磁マグネットに用いることを想定し、冷凍機のステージに GdBaCuO レンズ部と MgB₂ 円筒部をセットして冷却し、一例として図4に示すような(1)から(5)の手順で温度と外部磁場を制御して着磁する。

- (1) GdBaCuO レンズ及び MgB₂ 円筒を室温から $T_H = 40$ K に冷却する。この状態では GdBaCuO レンズは超電導状態であるが、MgB₂ 円筒は常電導状態である。
- (2) 外部磁場をゼロから B_{app} まで増磁する (1~5 step)。この状態では GdBaCuO レンズは ZFC (ゼロ磁場中冷却着磁) される。MgB₂ 円筒にはバルク内部に均一に外部磁場 B_{app} が進入している。
- (3) 温度を MgB₂ の $T_c (= 39$ K)以下の $T_L = 20$ K に冷却する。
- (4) 外部磁場を B_{app} からゼロに減磁する(6~10 step)。
- (5) その結果、着磁磁場 B_{app} より大きな中心磁場 B_c を持続的に発生できる超電導バルク磁石が実現する。

以上のプロセスをこれまで構築した電磁界のシミュレーション手法を用いて、中心磁場 B_c を解析した。

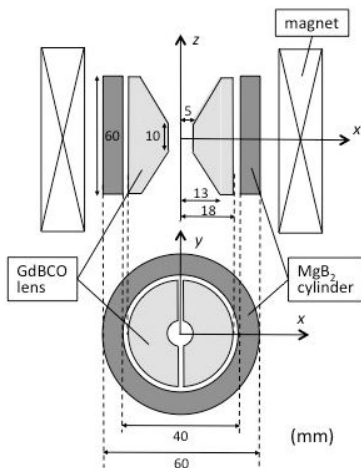


図3 ハイブリッド型超電導バルク磁石装置(HTFML)の構造

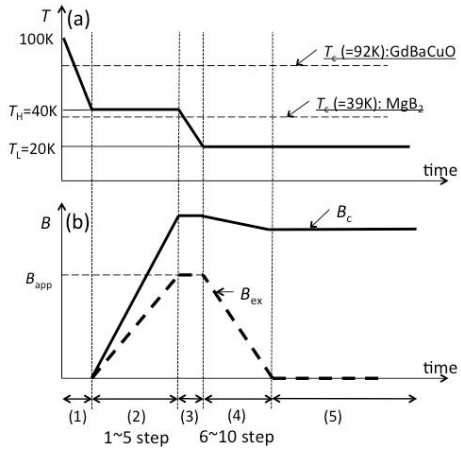


図4 HTFML 実現のための着磁条件 (GdBaCuO レンズと MgB₂ 円筒を用いた場合)

4. 研究成果

(1) split coil を用いた MgB₂ bulk の PFM で捕捉磁場 1.1 T の実現

図5にスプリット型コイルを用いて $T_s = 13$ K での印加磁場 B_{ex} と捕捉磁場 B_z の関係を示す。着磁後に軟磁鉄ヨークを取り除いた結果も示す。ヨークを挿入したスプリット型コイルでは印加磁場 $B_{ex} = 0.8$ T から磁束がバルク表面中心へ捕捉され始め、 B_{ex} の増加と共に捕捉磁場が増大し、最大捕捉磁場は 13 K では 1.1 T となり、この結果は MgB₂ バルクの PFM による捕捉磁場の最高値である。ヨークが無いスプリット型コイルでは、磁束がバルク中心に捕捉され始める印加磁場は異なるが、最大捕捉磁場はほぼ等しい。しかし、ソレノイド型コイルでは高磁場印加($B_{ex} = 2.2$ T)で flux jump が起こり、捕捉磁場が急激に減少するが、スプリット型コイルでは 3 T までの印加磁場で flux jump は発生しなかった。このように、split coil を用いた PFM 着磁は flux jump を抑制し、高い捕捉磁場を実現することが可能となった。

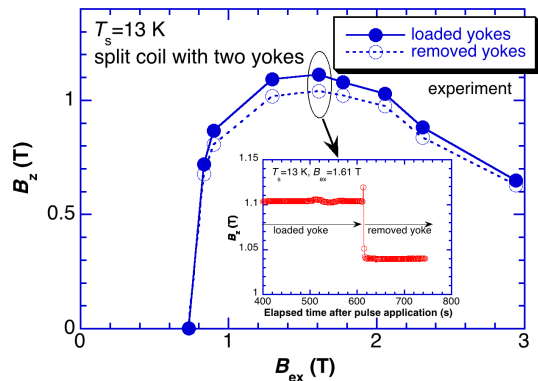


図5 $T_s = 13$ K における MgB₂ バルク表面での捕捉磁場の印加パルス磁場依存性

図6にバルク底面に1つのヨークが存在する solenoid coil と、ヨークを挿入した split coil の代表的な印加磁場 $B_{ex}(t)$ とバルク表面の

磁場 $B_z(t)$ の時間依存性を示す。 $B_{ex}(t)$ とバルクへの磁束の侵入挙動 $B_z(t)$ は 2 つのコイル系で異なり、ヨークを挿入した split coil では $B_{ex}(t)$ がゆっくりと立ち下がり、 $B_z(t)$ の最大値は $B_{ex}(t)$ とほぼ等しく、磁束のバルクへの侵入挙動がかなり異なることが分かる。これらの実験的な振る舞いは、有限要素法によるシミュレーションにおいても再現されており、軟磁鉄ヨークを挿入した split coil による PFM 着磁は MgB₂ バルク着磁に非常に有効である。

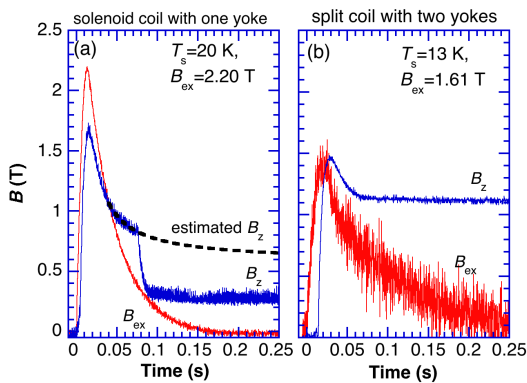


図6 MgB₂ バルク表面での捕捉磁場及び印加磁場の時間依存性。(a)は $T_s = 20$ K, $B_{ex} = 2.20$ T, (b)は $T_s = 13$ K, $B_{ex} = 1.61$ T の場合。

(2) 着磁時の応力解析と金属リングの補強効果の解析及び実験

図7に3つのケースにおいて、 $B_{ex} = 4.7$ T 印加の最大フープ応力 $\sigma_0^{FCM(max)}$ の FCM ステップ依存性を、アルミ合金リングがある場合(w/)と無い場合(w/o)について示す。リングバルクの場合、 σ_0^{FCM} は最内周表面($r = 20$ mm)で最大となり、外周方向に向かって小さくなる。case A~C のいずれの場合も、アルミ合金リングがある場合の方がバルクに加わる $\sigma_0^{FCM(max)}$ が約 20% 低下することが分かる。また $\sigma_0^{FCM(max)}$ の値は、有限長バルク(case B, C)の方が無限長バルク(case A)より大きく、ステップ依存性も異なるが、この原因は各ステップにおける捕捉磁場と電流分布の違いで説明することが出来る。

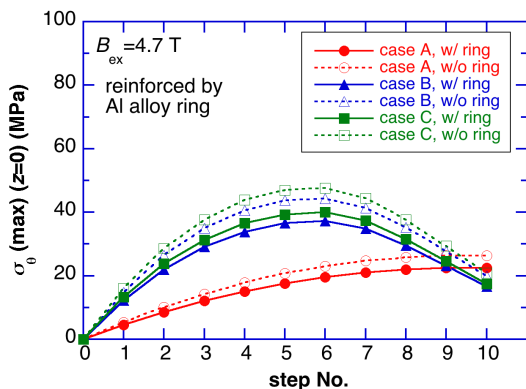


図7 金属リングの有無による3つのモデルに対する $B_{ex} = 4.7$ T の場合の最大電磁フープ応力 $\sigma_0^{FCM(max)}$ のステップ依存性。

図8にcase Cにおいてアルミ合金リングを装着したリングバルクを300 Kから50 Kに冷却した場合にバルク内に発生する熱的フープ応力 σ_0^{cool} の z 依存性を示す。 σ_0^{cool} は中心部($z = 0$)では大きな圧縮応力が加わるが、バルク表面に近づくにつれて圧縮応力が減少することが分かった。

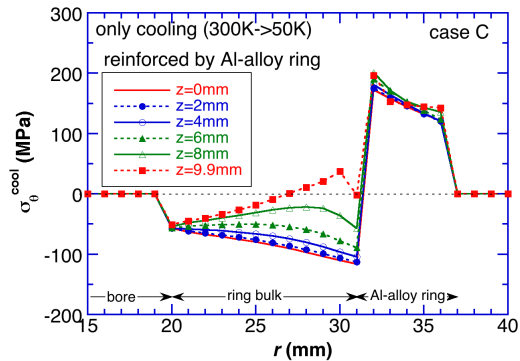


図8 金属リング装着時に300 Kから50 Kに冷却した際の熱的フープ応力 σ_0^{cool} の r, z 依存性

(3) HTFML の提案

図9に $B_{app} = 3$ T の場合の HTFML 及び、MgB₂ 円筒のみの場合の中心磁場 B_c のステップ依存性を示す。MgB₂ 円筒のみの場合には、最終的に $B_T = 3$ T が捕捉されるが、HTFML では増磁過程では通常の磁気レンズのように働き、最大6.0 Tまで増加するが、減磁過程で徐々に減少し最終的に $B_c = 4.73$ T が持続的に捕捉される(1.58 倍の磁場増幅率)。また、レンズ及び円筒の両方を GdBaCuO で作製し、 $B_{app} = 10$ T で各々の温度を独立に変化させた場合に、13.49 T が実現できることが明らかになった(1.35 倍の磁場増幅率)。現在、レンズの形状やサイズの最適設計を行っており、今後実証実験を行う予定である。最終的には、10 T の着磁マグネットで15 T を越える持続可能な磁気レンズを併用した超電導バルク磁石装置の実現を目指す。

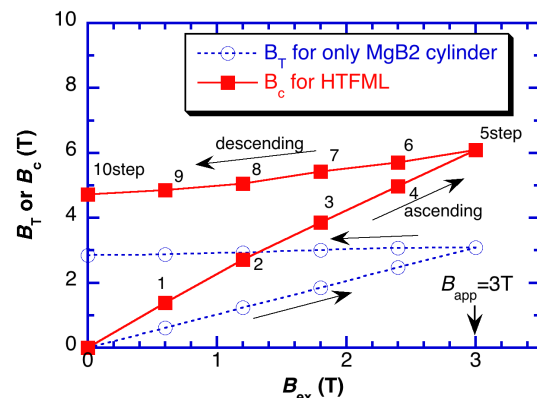


図9 $B_{app} = 3$ T の場合の HTFML 中心での磁場強度のステップ依存性。MgB₂ 円筒のみの結果も示す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 32 件)

- H. Fujishiro, K. Takahashi, T. Naito, Y. Yanagi, Y. Itoh and T. Nakamura, “New proposal of mechanical reinforcement structures to annular REBaCuO bulk magnet for compact and cryogen-free NMR spectrometer”, *Physica C* **550** (2018) 52-56. [査読あり]
(<https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.04.012>)
- K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie, “A new concept of hybrid trapped field magnet lens (HTFML)”, *Supercond. Sci. Technol.* **31** (2018) 044005. [査読あり]
(<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aae94>)
- H. Fujishiro, M. D. Ainslie, K. Takahashi, T. Naito, Y. Yanagi, Y. Itoh and T. Nakamura, “Simulation studies of mechanical stresses in REBaCuO superconducting ring bulks with infinite and finite height reinforced by metal ring during field-cooled magnetization”, *Supercond. Sci. Technol.* **30**, 085008 (2017). (12 pages) [査読あり]
(<https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa76a2>)
- H. Fujishiro, H. Mochizuki, M.D. Ainslie and T. Naito, “Trapped field of 1.1 Tesla without flux jumps on high- J_c MgB₂ bulk during pulsed field magnetization using split coil with soft iron yoke”, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 084001 (10 pages) [査読あり]
(doi:10.1088/0953-2048/29/8/084001)
- T. Naito, A. Ogino and H. Fujishiro, “Potential ability of 3 T-class trapped field on MgB₂ bulk surface synthesized by the infiltration-capsule method”, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 115003 [査読あり]
(doi:10.1088/0953-2048/29/11/115003)
- H. Fujishiro, H. Mochizuki, T. Naito, M. D. Ainslie and G. Giunchi, “Flux jumps in high- J_c MgB₂ bulks during pulsed field magnetization”, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 034006 (7 pages) [査読あり]
(doi:10.1088/0953-2048/29/3/034006)
- T. Naito, H. Mochizuki, H. Fujishiro and H. Teshima, “Trapped magnetic-field properties of prototype for Gd-Ba-Cu-O/MgB₂ hybrid-type superconducting bulk magnet”, *Supercond. Sci. Technol.* **29** (2016) 034005 (8 pages) [査読あり]
(doi:10.1088/0953-2048/29/3/034005)
- H. Fujishiro, T. Naito, T. Ujiie, T. Mochizuki, T. Yoshida, “Recent progress of MgB₂ bulk magnet magnetized by pulsed field”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** (2015) 6800104 [査読あり]

(doi: 10.1109/TASC.2014.2359544)

- T. Naito, T. Yoshida and H. Fujishiro, “Ti-doping effects on magnetic properties of dense MgB₂ bulk superconductors”, *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 095008 (8 pages) [査読あり]
(doi:10.1088/0953-2048/28/9/095009)
- H. Fujishiro, Y. Itoh, Y. Yanagi and T. Nakamura, “Drastic improvement of the trapped field homogeneity in a superconducting hollow bulk by the insertion of a high- J_c superconducting cylinder for NMR bulk magnets”, *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 095018 (8 pages) [査読あり]
(doi:10.1088/0953-2048/28/9/095018)
- H. Mochizuki, H. Fujishiro, T. Naito, A. Figini Albisetti and G. Giunchi, “Trapped field properties of concentric circle MgB₂ bulk composite magnetized by pulsed field and field cooling”, *Supercond. Sci. Technol.* **28** (2015) 105004 (7 pages) [査読あり]
(doi:10.1088/0953-2048/28/10/105004)

[学会発表](計 57 件)

- H. Fujishiro, K. Takahashi, T. Naito, Y. Yanagi, Y. Itoh, T. Nakamura and M. D. Ainslie, “Mechanical reinforcement of REBaCuO bulk during field-cooled magnetization ---road to achieve trapped field higher than 20 T ---”, 10th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials (PASREG2017) (Invited: oral presentation), 2017.12.12 (Tokyo, Japan)
- H. Fujishiro, K. Takahashi, T. Naito, Y. Yanagi, Y. Itoh, T. Nakamura: Simulation studies of mechanical stresses and trapped field in annular REBaCuO superconducting bulk magnet for NMR spectrometer during field-cooled magnetization, 25th International Conference on Magnet Technology, 2017.8.27 (Amsterdam, The Netherlands)
- 藤代博之, 高橋圭太, 内藤智之, 柳陽介, 伊藤佳孝, 仲村高志, 「磁場中冷却着磁中の有限長超電導リングバルクにおける応力解析 -無限長バルクとの比較と金属リングの補強効果-」, 2017年度春季低温工学・超電導学会, 2017.5.2, (タワーホール船堀(東京都江戸川区))
- K. Takahashi, M.D. Ainslie, H. Fujishiro, Y.H. Shi, D. Cardwell and T. Naito, “Trapped field properties of a RE-Ba-Cu-O bulk using pulsed field magnetization with a split coil with iron yokes of various geometries and magnetic properties”, 1st Asian ICMC - CSSJ 50th Anniversary Conference, 2016.11, (Kanazawa, Japan)

H. Fujishiro, K. Takahashi, M. D. Ainslie, H. Mochizuki, T. Naito, “Suppression of flux jumps and enhancement of trapped field on high- J_c MgB₂ bulk using split-type coil with soft iron yoke during pulsed field magnetization”, 2016 Applied Superconductivity Conference (ASC’16), 2016.9.8, (Denver, USA)

藤代博之、望月豪彦、内藤智之、M. D. Ainslie, 「スプリットコイルを用いた MgB₂ バルクのパルス着磁による捕捉磁場 1.1 T の実現」, 第 93 回 2016 年度春季低温工学・超電導学会, 2016.5.30 (タワーホール船堀)

高橋圭太、藤代博之、内藤智之、M. D. Ainslie, 「ソレノイド型とスプリット型コイルを用いた超電導バルクのパルス着磁とシミュレーション」, 第 93 回 2016 年度春季低温工学・超電導学会, 2016.5.30 (タワーホール船堀)

望月豪彦、内藤智之、藤代博之、Y.-h. Shi, M. D. Ainslie, 「Gd-Ba-Cu-O 超電導バルクにおけるソレノイドコイルとスプリットコイルを用いたパルス着磁特性」, 2015 年度秋季低温工学・超電導学会, 2015.12.4 (姫路商工会議所：兵庫県姫路市)

Y. Endo, T. Naito, H. Fujishiro, “Enhancement of trapped field on MgB₂ superconducting bulks using fine MgB₂ raw powder”, 14th International Union of Materials Research Societies-International Conference on Advanced Materials, 2015.10.29 (International Convention Center, Jeju, Seogwipo, Korea)

H. Fujishiro, Y. Yanagi, Y. Itoh and T. Nakamura, “Improvement of trapped-field homogeneity in REBaCuO hole bulk by the insertion of cylinder wound by HTS tape for NMR bulk magnet”, International Conference on Magnet Technology (MT24), 2015.10.20 (Seoul, Korea)

H. Fujishiro, “Pulsed field magnetization for (RE)BCO and MgB₂ superconducting bulks and their applications”, (9th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials (PASREG), 2015.9.2-4 (Liège, Belgium) (Invited: oral presentation)

H. Fujishiro, “Magnetizing process and trapped field of REBaCuO and MgB₂ superconducting bulks”, 2015 Joint UK-Japan Workshop on Physics and Applications of Superconductivity, 2015.4.13-15, (Kings College, University of Cambridge) (Invited: oral presentation)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：ハイブリッド型超電導バルク磁石装置
発明者：藤代博之、高橋圭太
権利者：国立大学法人岩手大学
種類：特許
番号：特願 2018-005677
出願年月日：2018 年 1 月 17 日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等
<http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤代 博之 (FUJISHIRO HIROYUKI)
岩手大学・工学部・教授
研究者番号：90199315

(2) 分担研究者

内藤 智之 (NAITO TOMOYUKI)
岩手大学・工学部・准教授
研究者番号：40311683

(4) 研究協力者

Mark D. Ainslie
Cambridge 大学研究員