

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05240

研究課題名（和文）着磁磁場よりも大きな磁場を持続的に発生できる新規の超電導バルク磁石レンズ

研究課題名（英文）A Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML): concept and realization

研究代表者

藤代 博之 (Fujishiro, Hiroyuki)

岩手大学・学長・副学長等・理事

研究者番号：90199315

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：REBaCuO系超電導バルク磁石は、「磁束ピン止め効果」を用いてバルク中に磁場を捕捉し、20 T級の捕捉磁場を実現できる。一方、「磁気シールド(収束)効果」を用いて磁束線を収束し、印加磁場以上の強磁場を実現できる。本研究は「磁束ピン止め効果」と「磁気シールド効果」を組み合わせ、着磁磁場より強磁場（7 T着磁で9.8 T発生）を持続的に発生するハイブリッド型超電導バルク磁石レンズ（HTFML）を実現した。さらに、新しい高磁場勾配型超伝導バルク磁石（HG-TFM）の提案とシミュレーション解析を行い、磁気力場 $-1930\text{ T}^2/\text{m}$ の確認実験と金属Bi粒子や水滴の浮上デモによりその有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微小重力環境を実現する国際宇宙ステーション(ISS)の利用は2024年までとされている。本研究で開発したハイブリッド型超電導バルク磁石レンズ（HTFML）及び、高磁場勾配超電導バルク磁石（HG-TFM）は、原理的に汎用の10 T級超電導マグネットのおよそ8-16倍となる3000-6000 T^2/m という非常に大きな勾配磁場による擬似微小重力環境を地上で構築できる。これらの装置を用いて、重力による自然対流の抑制による結晶欠陥が少ない大型結晶を用いた高分解能結晶構造解析や、容器壁面に制約されない三次元細胞培養を実現し、研究進展が急がれる生命・医科学分野の課題を解決できる可能性が高い。

研究成果の概要（英文）：REBaCuO superconducting bulk magnet can trap magnetic field higher than 20 T by “flux pinning effect”. The magnetic lens fabricated by superconducting bulk can concentrate the magnetic flux by “magnetic shielding effect”, in which the magnetic field higher than the applied field can be generated. In this study, by combining two effects, a hybrid trapped field magnet lens (HTFML) made by an all-REBaCuO bulks has been realized experimentally, in which 9.8 T was concentrated from 7 T external field. A new concept of a high-gradient trapped field magnet (HG-TFM) has been proposed and analyzed numerically. The higher magnetic field gradient product of $BzdBz/dz = -1930\text{ T}^2/\text{m}$ was confirmed and the magnetic levitation of bismuth particles and water drop was demonstrated.

These devices are applicable in scientific research fields, for example, in the life/medical sciences for protein crystallization as a quasi-microgravity space without natural convection due to gravity.

研究分野：応用物理学

キーワード：超伝導バルク磁石 磁束ピン止め効果 磁気収束効果 擬似微小重力環境 ライフサイエンス応用

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

「RE-Ba-Cu-O系超電導バルク磁石」(RE:希土類元素またはY:超電導転移温度 $T_c = 92$ K)は、磁場中冷却着磁(Field-Cooled Magnetization, FCM)により「磁束ピン止め効果」を用いてバルク中に磁場を捕捉し、Nd-Fe-B系永久磁石の30倍以上強力な疑似永久磁石を実現しており、2014年に世界記録(17.6 T)が樹立されている。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、超電導コイル磁石など)では実現できない磁場範囲と価格・サイズを有し、磁気分離等の環境資源分野、小型高効率モーター等のエネルギー分野や、核磁気共鳴(NMR)装置等の医療分野などへの新しい応用が始まっている。超電導バルクの臨界電流密度(J_c)特性からは更に大きな捕捉磁場が予測されるが、脆性セラミックス材料である超電導バルクの機械的強度が最高捕捉磁場の値を制限している。

一方で、超電導コイル磁石が作る磁場を、「磁気収束効果」を用いて内部に設置する超電導バルクで作製された磁気レンズにより磁束線を収束し、磁場増幅率(印加磁場に対する発生磁場の比)が1.5~2.5程度の強磁場を実現する磁場収束レンズの研究が行われている。現状では外部磁場8 Tのもとで、超電導バルク磁気レンズ内で12.4 Tの磁場収束が実現しているが、外部磁場をゼロにすると磁気レンズ効果は失われる欠点がある。

2. 研究の目的

研究代表者は、着磁用超電導コイル磁石と超電導バルクレンズの間に、性質の異なる超電導バルク円筒を挿入し、「バルク円筒による磁場の捕捉現象」と、「バルクレンズによる磁気収束効果」を組み合わせ、着磁磁場より大きな磁場を、しかも持続的に発生できる全く新しい超電導バルク磁石装置(ハイブリッド型バルク磁石レンズ:HTFML)を2018年に提案した¹⁾。本研究では、第一にその実証研究を行う。このHTFML装置は単に2つの効果を組み合わせただけではなく、これまでの着磁研究の経験と実績から新たに導かれ、バルクレンズやバルク円筒の形状や着磁条件の最適化により、提案論文¹⁾よりもさらに大きな磁場を空間に持続的に実現出来る可能性がある。さらに、高磁場勾配を有する新しいハイブリッド型超伝導バルク磁石(HG-TFM)を提案し、シミュレーションと実証研究を行うことを第二の目的とする。本研究の推進により、上記記載の応用の他、基礎研究におけるコンパクトな定常強磁場源として、さらに、高磁場勾配を用いて地球上で疑似微小重力環境を実現し、宇宙に行かずとも、タンパク質の単結晶作成や3次元細胞培養などライフサイエンスへの応用を目指す。

3. 研究の方法

(1) 電磁界及び応力解析シミュレーションによる構造の最適化

これまでに確立した電磁界のシミュレーション手法を用いて、磁気レンズ効果を最大限に発揮する超電導レンズ部分の構造の最適設計を行った。さらに、着磁中の超電導体の電磁応力破壊を防ぐ機械的補強の最適化設計を応力解析シミュレーションにより行い、実証実験のための準備を行った。

(2) GdBaCuO レンズと MgB₂ 円筒を用いた場合の HTFML 実証実験

外部発注したGdBaCuOレンズ及びMgB₂バルク円筒を用い、10 K冷凍機のcold stageにGdBaCuOレンズ部とMgB₂円筒部をセットして冷却し、所定の手順で温度と外部磁場を制御して着磁を行い、HTFMLの実証(着磁磁場より大きな磁場を持続的に発生)を行った。

(3) 1台の冷凍機でGdBaCuO レンズと GdBaCuO 円筒の温度を独立制御した場合の検証実験

GdBaCuOレンズとGdBaCuO円筒からなるHTFMLを1台の冷凍機で実現するには、両者の温度をある程度独立に制御しなければならない。本研究ではまず「熱リーク構造」の可能性の検討を行い、熱抵抗の違いを用いてGdBaCuOレンズとGdBaCuO円筒の温度を独立制御した場合の実験を行った。さらに、「loose contact method」を開発し、極低温で高性能なHTFML装置の実現を実施した。

(4) 新しい高磁気勾配型超電導バルク磁石(HG-TFM)の提案と実証実験

GdBaCuO円筒とスリット入りGdBaCuO円筒(円筒を2分割したバルク)を積層したHG-TFMを新たに提案し、積層界面での磁気力場がHTFML構造よりも大きく、水滴の浮上も可能なことをシミュレーションにより確認した。実験によりシミュレーションと同等の磁気力場を実現し、金属Bi粒子や水滴の浮上実験を行った。

4. 研究成果

(1) 電磁界及び応力解析シミュレーションによる構造の最適化

既存の内径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、これまでに確立した電磁界のシミュレーション手法を用いて、図1に示すように、GdBaCuO円筒(外径60 mm、内径36 mm、高さ60 mm)に対して、磁気レンズ効果を最大限に発揮するGdBaCuOレンズの構造(H1, H2, D1, D2)の最適設計及び、着磁中の超電導バルクに印加される電磁応力のシミュレーション解析を行った²⁾。その結果、最適化されたレンズ構造で、 $B_{app} = 10$ T着磁で B_c

= 12.8 Tが捕捉され、135 MPaの最大引張応力がGdBaCuO円筒部分の外周部に印加されることが分かった。この最大引張応力の値はGdBaCuOバルクの破壊強度(50~70 MPa)を大きく超えており、機械的補強の必要性を強く示唆した結果である。従って、実証実験ではこれまで発表した論文を参考に³⁾、ステンレススチール(SUS)構造物による機械的補強を行った。

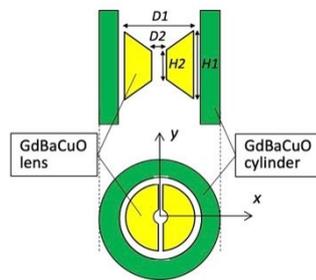


図1 ハイブリッド型バルク磁石レンズ(HTFML)の構造

(2) GdBaCuO レンズ、MgB₂ 円筒を用いた場合の HTFML 実証実験

冷凍機の cold stage に設置した GdBaCuO レンズ及び MgB₂ 円筒を用いて、HTFML 効果の実証実験を行った⁴⁾。図2に着磁シーケンスを示す。GdBaCuO レンズ及び MgB₂ 円筒を 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($T_c = 39$ K)は常電導状態である。その時、外部磁場をゼロから B_{app} まで増磁するが、この状態では GdBaCuO レンズはゼロ磁場中冷却着磁(ZFC)されてレンズ効果を示し、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。GdBaCuO レンズ及び MgB₂ 円筒の温度を MgB₂ の T_c 以下の 20 K に冷却する。外部磁場を B_{app} からゼロに減磁する。その結果、GdBaCuO レンズ中心には、着磁磁場 B_{app} より大きな磁場 B_c が持続的に発生する超電導バルク磁石 HTFML が実現する。

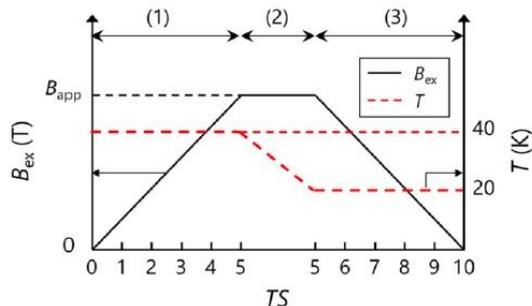


図2 GdBaCuO レンズ、MgB₂ 円筒を用いた場合の HTFML 着磁シーケンス

図3に HTFML の中心における発生磁場 B_c のステップ依存性を $B_{app} = 1\sim 3$ T について示す。 $B_{app} = 1$ T, 2 T ではそれぞれ $B_c = 1.99$ T, 3.55 T の磁場が捕捉され HTFML 効果を確認されたが、 $B_{app} = 2.5$ T, 3 T では磁束が温度上昇によって GdBaCuO レンズ内に侵入したため HTFML 効果が低減した。バルクの $J_c(B, T)$ に依存して HTFML 効果が最大となる B_{app} が存在する事が分かった。

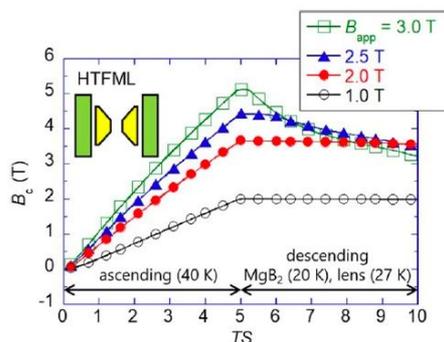


図3 HTFML 中心における発生磁場 B_c のステップ依存性

(3) 1台の冷凍機で GdBaCuO レンズと GdBaCuO 円筒の温度を独立制御した場合の検証実験

臨界電流密度 J_c の大きな GdBaCuO バルクをレンズと円筒の両方に用いる事により HTFML 効果を最大化できることがシミュレーションから予測された。液体窒素を用いて GdBaCuO レンズと GdBaCuO 円筒を独立に冷却することで、HTFML 効果を確認することができたが、動作温度が 77 K での J_c が小さいので、HTFML 効果は非常に小さかった⁵⁾。そこで1台の冷凍機で GdBaCuO レンズと GdBaCuO 円筒を極低温まで冷却することを検討し、新たに「熱リーク構造」を提案(特許出願)し、実現可能性の検討を行った⁷⁾。熱リーク構造とは、GdBaCuO 円筒と冷凍機の cold stage 間に熱伝導率の小さなシートを挿入することで、GdBaCuO レンズよりも GdBaCuO 円筒の冷却速度を遅らせる方法である。しかし有限の冷凍能力を有する冷凍機では最低到達温度が予想よりも低下せず、この方法では実現が困難であることが実験的に明らかになり、「熱リーク構造」による実験を断念した。

そこで新たに "loose contact method" を提案して、その実証を行った⁸⁾。図4にこの方法の着磁シーケンスを、図5に実験の概略図を示す。図5(a)において水平に置かれた冷凍機の cold stage には GdBaCuO レンズはタイトに、GdBaCuO 円筒は緩く(looseに)接続する。熱接触の違いにより、GdBaCuO 円筒は GdBaCuO レンズよりゆっくりと冷却される。GdBaCuO レンズが約 20 K に冷却され、一方、GdBaCuO 円筒は依然とし T_c 以上となるタイミングで、図5(b)に示すように冷凍機を立てて GdBaCuO 円筒の熱接触を向上させ冷却を加速するとともに、図5(c)に示すように HTFML 装置を着磁マグネットに挿入して増磁を行い、最高磁場 B_{app} に到達した後、減磁を行うという方法で着磁を実施する。

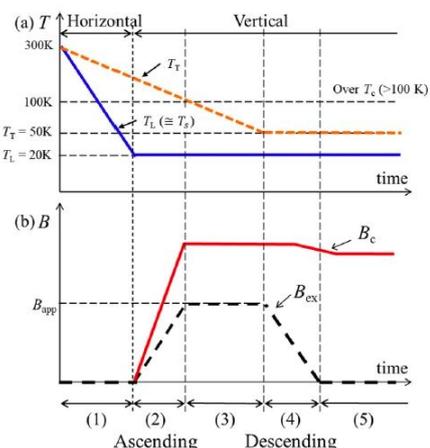


図4 "loose contact method" による着磁シーケンス

図6に最大磁場 $B_{app} = 3\sim 10$ T の場合の印加磁場 B_{ex} と HTFML 中心での発生磁場 B_c の関係を示す。 $B_{app} = 3$ T, 5 T, 7 T での最終的な B_c は、それぞれ 5.5 T, 7.9 T, 9.8 T であり、レンズと

円筒ともに GdBaCuO バルクを用いた HTFML を実現した。しかし、 $B_{app} = 10 \text{ T}$ では増磁時に $B_c = 14 \text{ T}$ を確認したが、減磁の途中で GdBaCuO 円筒の破壊が起こり、 10 T を越える最終捕捉磁場は実現できなかった。本実験により機械的補強の見直し等を行うことで十分に大きな HTFML 効果が実現できるめどが立った。また、HTFML はレンズ中心から数 mm 離れた位置で非常に大きな磁気勾配を有することをシミュレーションから明らかにし、HTFML は強磁場発生以外に、高磁場勾配を用いて磁気分離などの応用の展開の可能性を明らかにした⁹⁾。

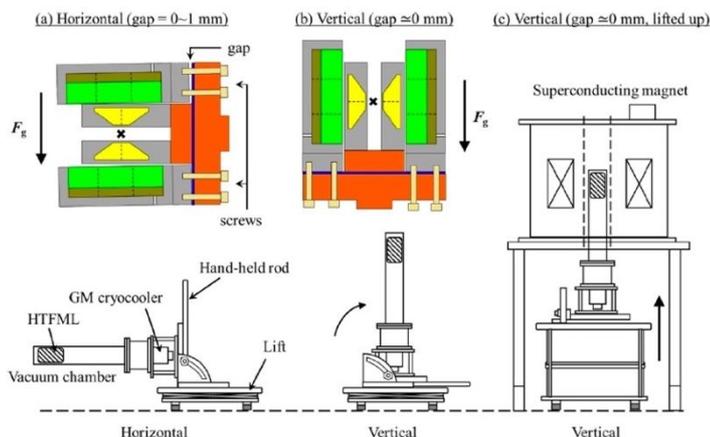


図5 “loose contact method” による all-GdBaCuO HTFML の実験概要

(4) 新しい高時期勾配型超伝導バルク磁石 (HG-TFM) の提案と実証実験

研究を進める中で、GdBaCuO 円筒と GdBaCuO スリット入り円筒 (円筒を2分割したバルク) を積層した界面に発生する高磁気勾配を利用する超伝導バルク磁石 (HG-TFM) を新たに提案し、特許出願とシミュレーション結果の論文発表を行った^{10, 11)}。

図7に実証実験の結果を示す。外径 60 mm、内径 36 mm の GdBaCuO 円筒とスリット入り GdBaCuO 円筒を積層し、 $B_{app} = 8.6 \text{ T}$ で着磁した結果、直径 25 mm の室温ポア内で磁気力場 $B_z dB_z/dz = -1930 \text{ T}^2/\text{m}$ の発生を確認した。得られた磁気力場の値はシミュレーションの結果と良く一致した。さらに、重力と釣り合う磁気力場において、金属 Bi 粒子や水滴の浮上を確認した¹²⁾。これらの結果は、地球上で擬似微小重力環境をバルク磁石で実現でき、宇宙に行かずとも、タンパク質の単結晶作成や3次元細胞培養などライフサイエンスへの応用の可能性を示した。

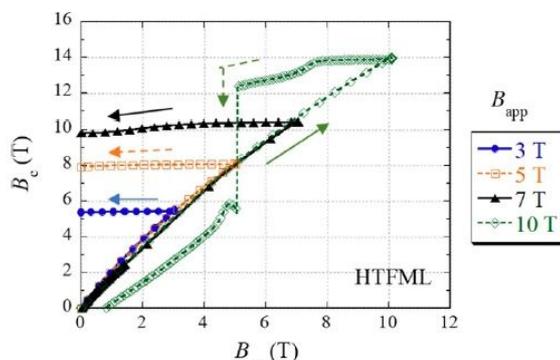


図6 $B_{app} = 3 \sim 10 \text{ T}$ の場合の印加磁場 B_{ex} と HTFML 中心での発生磁場 B_c の関係

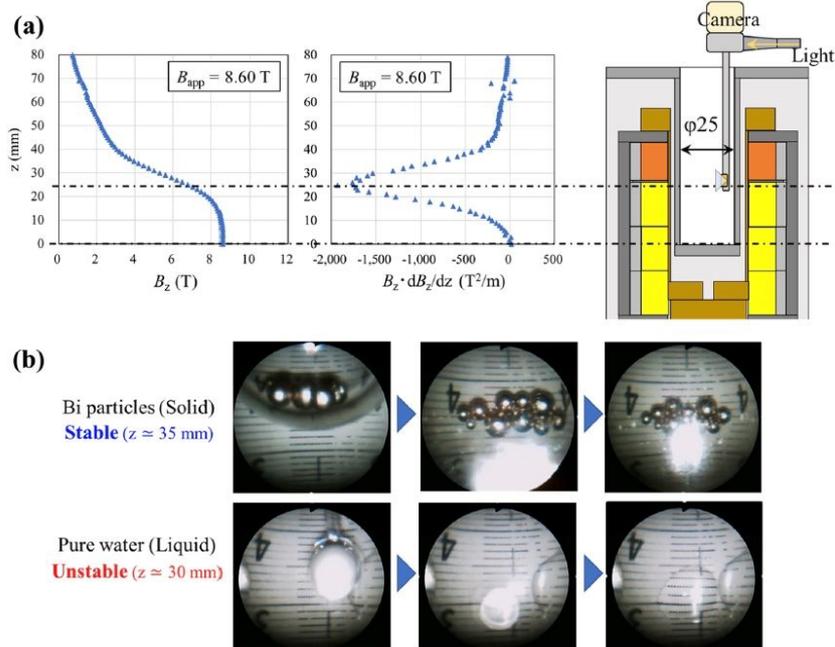


図7 (a) $B_{app} = 8.6 \text{ T}$ で着磁した場合の捕捉磁場 B_z と磁気力場 $B_z dB_z/dz$ の分布。(b) 金属 Bi 粒子及び水滴の浮上の確認

参考文献

- 1) K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie, *Supercond. Sci. Technol.* **31** (2018) 044005
- 2) S. Namba, H. Fujishiro, M. D. Ainslie, K. Takahashi, T. Naito, Devendra K. Namburi, and Difan Zhou, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** (2019) 6801605
- 3) H. Fujishiro, T. Naito, Y. Yanagi, Y. Itoh and T. Nakamura, *Supercond. Sci. Technol.* **32** (2019) 065001
- 4) Sora Namba, Hiroyuki Fujishiro, Tomoyuki Naito, Mark D Ainslie, Keita Takahashi, *Supercond. Sci. Technol.* **32** (2019) 12LT03
- 5) S. Namba, H. Fujishiro, T. Naito, M. D. Ainslie and D. Zhou, *J. Phys. Conf. Series* **1559** (2020) 012079
- 6) Sora Namba, Hiroyuki Fujishiro, Tatsuya Hirano, Tomoyuki Naito and Mark D Ainslie, *Physica C* **575** (2020) 1353690
- 7) 「ハイブリッド型超電導バルク磁石装置とその着磁方法」出願日：2019/11/28 (特願 2019-214998) (特開 2021-86927) 発明者：藤代博之、出願人：国立大学法人岩手大学
- 8) K. Takahashi, H. Fujishiro, S. Namba and M. D. Ainslie, *Supercond. Sci. Technol.* **34** (2021) 05LT02
- 9) K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie, *J. Appl. Phys.* **127** (2020) 185106
- 10) 「高磁気勾配型超電導バルク磁石装置」出願日：2020/10/28、(特願 2020-180228) 発明者：高橋圭太、藤代博之、出願人：国立大学法人岩手大学
- 11) K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie, *Supercond. Sci. Technol.* **34** (2021) 035001
- 12) K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie, *Supercond. Sci. Technol.* **35** (2022) 054003

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 21件 / うちオープンアクセス 15件）

1. 著者名 Motoki Shinden, Hiroyuki Fujishiro, Keita Takahashi and Mark D Ainslie	4. 巻 35
2. 論文標題 Possibility of mechanical fracture of superconducting ring bulk due to thermal stress induced by local heat generation during pulsed-field magnetization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 045015(1)-(10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ac5785	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 該当する
1. 著者名 K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie	4. 巻 35
2. 論文標題 Validation of a desktop-type magnet providing a quasi-microgravity space in a room-temperature bore of a high-gradient trapped field magnet (HG-TFM)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 054003(1)-(11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ac5fe3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 K Takahashi, H Fujishiro and M. D. Ainslie	4. 巻 34
2. 論文標題 A conceptual study of a high gradient trapped field magnet (HG-TFM) providing toward a quasi-zero gravity space on Earth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 035001(1)-(13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abd386	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 K. Takahashi, H. Fujishiro, S. Namba and M. D. Ainslie	4. 巻 34
2. 論文標題 Experimental realization of an all-(RE)BaCuO hybrid trapped field magnet lens generating a 9.8 T concentrated magnetic field from a 7 T external field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 05LT02(1)-(9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abeb01	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Cientanni, M. D. Ainslie, H. Fujishiro, K. Takahashi	4. 巻 34
2. 論文標題 Modelling higher trapped fields by pulsed field magnetisation of composite bulk MgB2 superconducting rings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 114003(1)-(13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ac2621	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie	4. 巻 35
2. 論文標題 Validation of a desktop-type magnet providing a quasi-microgravity space in a room-temperature bore of a high-gradient trapped field magnet (HG-TFM)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 054003(1)-(11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ac5fe3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie	4. 巻 127
2. 論文標題 Simulation study for magnetic levitation in pure water exploiting the ultra-high magnetic field gradient product of a Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 1353690(1)-(11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0005356	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 該当する

1. 著者名 Sora Namba, Hiroyuki Fujishiro, Tatsuya Hirano, Tomoyuki Naito and Mark D Ainslie	4. 巻 575
2. 論文標題 Optimized performance of an all-REBaCuO hybrid trapped field magnet lens (HTFML)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica C	6. 最初と最後の頁 1353690(1)-(8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physc.2020.1353690	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 該当する

1. 著者名 Tatsuya Hirano, Yuhei Takahashi, Sora Namba, Tomoyuki Naito and Hiroyuki Fujishiro	4. 巻 33
2. 論文標題 A record-high trapped field of 1.61 T in MgB2 bulk comprised of copper plates and soft iron yoke cylinder using pulsed-field magnetization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 085002(1)-(10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab9542	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 該当する

1. 著者名 F. Shimoyashiki, H. Fujishiro, T. Hirano, T. Naito and M. D. Ainslie	4. 巻 1559
2. 論文標題 Simulation of mechanical stress in REBaCuO disk bulk magnetized by pulsed-field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Series	6. 最初と最後の頁 012029(1)-(8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1559/1/012029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S Namba, H Fujishiro, T Naito, M D Ainslie and D Zhou	4. 巻 1559
2. 論文標題 Realisation of Hybrid Trapped Field Magnetic Lens (HTFML) consisting of REBCO bulk lens and REBCO bulk cylinder at 77 K	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Series	6. 最初と最後の頁 012079(1)-(10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1559/1/012079	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Hirano, H. Fujishiro, T. Naito and M. Ainslie	4. 巻 1559
2. 論文標題 Simulation of mechanical stresses in reinforced REBaCuO ring bulks during pulsed-field magnetization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Series	6. 最初と最後の頁 012027(1)-(10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1559/1/012027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Motoki Shinden, Sora Namba, Tatsuya Hirano, Hiroyuki Fujishiro, Tomoyuki Naito, and Mark D. Ainslie	4. 巻 1590
2. 論文標題 Numerical Simulation of a Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML) Magnetized by Pulsed Fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Conf. Series	6. 最初と最後の頁 012048(1)-(9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1590/1/012048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 D. K. Namburi, K. Takahashi, T. Hirano, T. Kamada, H. Fujishiro, Y-H. Shi, D. A. Cardwell, J. H. Durrell and M. D. Ainslie	4. 巻 33
2. 論文標題 Pulsed-field magnetisation of Y-Ba-Cu-O bulk superconductors fabricated by the infiltration growth technique	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 115012(1)-(13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abb590	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K Takahashi, H Fujishiro and M. D. Ainslie	4. 巻 34
2. 論文標題 A conceptual study of a high gradient trapped field magnet (HG-TFM) providing toward a quasi-zero gravity space on Earth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 035001(1)-(14)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abd386	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Takahashi, H. Fujishiro, S. Namba and M. D. Ainslie	4. 巻 34
2. 論文標題 Experimental realization of an all-(RE)BaCuO hybrid trapped field magnet lens generating a 9.8 T concentrated magnetic field from a 7 T external field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 05LT02(1)-(9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abeb01	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 H. Fujishiro, T. Naito, Y. Yanagi, Y. Itoh and T. Nakamura	4. 巻 32
2. 論文標題 Promising effects of a new hat structure and double metal ring for mechanical reinforcement of REBaCuO ring-shaped bulk during field-cooled magnetization at 10 T without fracture	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 065001(1)-(12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab0bed	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 該当する

1. 著者名 F. Shimoyashiki, H. Fujishiro, T. Naito, and M. D. Ainslie	4. 巻 29
2. 論文標題 Trapped field properties of GdBaCuO superconducting bulk with various diameters magnetized by pulsed field using identical split coil	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 6802405(1)-(7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2901349	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 該当する

1. 著者名 Sora Namba, Hiroyuki Fujishiro, Tomoyuki Naito, Mark D Ainslie and Kai Y Huang	4. 巻 32
2. 論文標題 Electromagnetic strain measurements and bidirectional mechanical stress estimation for a REBaCuO ring bulk reinforced by a metal ring during field-cooled magnetization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 125011(1)-(12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab4a8b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sora Namba, Hiroyuki Fujishiro, Tomoyuki Naito, Mark D Ainslie, Keita Takahashi	4. 巻 32
2. 論文標題 Experimental realization of a Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML) using a GdB aCuO magnetic lens and MgB2 bulk cylinder	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 12LT03(1)-(7)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab5048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Naito, H. Fujishiro and S. Awaji	4. 巻 126
2. 論文標題 Field-cooled magnetization of Y-Ba-Cu-O superconducting bulk pair reinforced by full metal encapsulation under high magnetic fields up to 22 T	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 243901(1)-(8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5124010	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 -

1. 著者名 Tatsuya Hirano, Hiroyuki Fujishiro, Tomoyuki Naito and Mark D. Ainslie	4. 巻 33
2. 論文標題 Numerical simulation of flux jump behavior in REBaCuO ring bulks with an inhomogeneous Jc profile during pulsed-field magnetization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Supercond. Sci. Technol.	6. 最初と最後の頁 044003(1)-(11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/ab7297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計23件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 18件)

1. 発表者名 新田基己、藤代博之、内藤智之
2. 発表標題 内径拡大させた中空円筒型REBaCuO超伝導バルク体のパルス着磁特性
3. 学会等名 2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Vito Ciantanni, Mark Ainslie, Hiroyuki Fujishiro, Keita Takahashi
2. 発表標題 Modelling the record trapped field by pulsed field magnetisation of a composite bulk MgB2 superconducting ring
3. 学会等名 EUCAS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Shinden, D. K. Nambri, K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie
2 . 発表標題 Pulsed field magnetization of GdBaCuO superconducting bulks with high magnetization efficiency using split type coil with soft iron yoke
3 . 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Shinden, K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie
2 . 発表標題 The influence of local heat generation in REBaCuO ring bulk with large bore on the mechanical fracture during pulsed-field magnetization
3 . 学会等名 7th International Conference on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Takahashi, H. Fujishiro and M. Ainslie
2 . 発表標題 Validation of a high-gradient trapped field magnet with an open bore providing a quasi-micro gravity space on Earth and its application for magnetic levitation
3 . 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 K. Takahashi, H. Fujishiro and M. Ainslie
2 . 発表標題 The hybrid trapped field magnet as a desktop-type magnetic field source providing a quasi-microgravity space on Earth: concept and validation
3 . 学会等名 34th International Symposium on Superconductivity (ISS2021) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takahashi, H. Fujishiro and M. D. Ainslie
2. 発表標題 Validation of a quasi-microgravity space exploiting a high-gradient trapped field magnet (HG-TFM) as a desktop-type magnetic field source
3. 学会等名 International workshop on processing and applications of superconducting bulk materials (PASREG2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Fujishiro, K. Takahashi, S. Namba and M. D. Ainslie
2. 発表標題 Experimental validation of a Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML) using all-REBaCuO bulks
3. 学会等名 International workshop on processing and applications of superconducting bulk materials (PASREG2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 難波 空, 藤代博之, 内藤智之, AINSLIE Mark
2. 発表標題 ハイブリッド型超電導バルク磁石レンズ(HTFML)の実証実験
3. 学会等名 2019年度春季(第98回)低温工学・超電導学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野達也, 藤代博之, 内藤智之, AINSLIE Mark
2. 発表標題 パルス着磁におけるREBaCu0リングバルク及びディスクバルクにおける応力解析シミュレーション
3. 学会等名 2019年度春季(第98回)低温工学・超電導学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤代博之
2. 発表標題 着磁磁場よりも大きな磁場を持続的に発生できるハイブリッド型超電導バルク磁石レンズ(HTFML)の実現
3. 学会等名 応用物理学会 (超伝導分科会 第59回研究会) (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fujishiro, T. Naito, M.D. Ainslie, Y. Yanagi, Y. Itoh, T. Nakamura, and S. Awaji
2. 発表標題 A new mechanical reinforcement structure for REBaCuO bulks during field-cooled magnetization to achieve higher trapped fields without fracture
3. 学会等名 11th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting Bulk Materials (PASREG2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hirano, H. Fujishiro, T. Naito, and M.D. Ainslie
2. 発表標題 Flux jumps and stress concentration in REBaCuO ring bulks with inhomogeneous $J_c(B, T)$ profiles during pulsed-field magnetization
3. 学会等名 11th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting Bulk Materials (PASREG2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Namba, H. Fujishiro, M.D. Ainslie, T. Naito, and Y. Yanagi
2. 発表標題 A Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML) consisting of an MgB ₂ cylinder and GdBaCuO magnetic lens
3. 学会等名 11th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting Bulk Materials (PASREG2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Fujishiro, M. Ainslie, S. Namba, T. Naito, K. Takahashi, and D. Zhou
2 . 発表標題 Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML): concept and realization
3 . 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Namba, H. Fujishiro, M. Ainslie, T. Naito, D. Zhou and Y. Yanagi
2 . 発表標題 A Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML): proof of concept
3 . 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Hirano, H. Fujishiro, T. Naito, and M.D. Ainslie
2 . 発表標題 Simulation of mechanical stress in REBaCuO ring bulk magnetized by pulsed-field
3 . 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 F. Shimoyashiki, H. Fujishiro, T. Hirano, T. Naito, and M.D. Ainslie
2 . 発表標題 Simulation of mechanical stress in ReBaCuO disk bulk magnetized by pulsed-field
3 . 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 M D Ainslie, D K Namburi, H Fujishiro, S Namba, Y-H Shi, A R Dennis, J H Durrell
2. 発表標題 A Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML): concept and realization
3. 学会等名 26th International Conference on Magnet Technology (MT-26) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Fujishiro, M. Ainslie, S. Namba, T. Naito, K. Takahashi, D. Zhou and Y. Yanagi
2. 発表標題 A Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML): concept and experimental realization
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (ISS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mark D Ainslie, Yeekin Tsui, Dominic A Moseley, Anthony R Dennis, Hiroyuki Fujishiro, Vito Ciantanni, Ewan Laidlaw, Keshav Manju, Devendra K Namburi, Yunhua Shi, David A Cardwell, John H Durrell
2. 発表標題 Portable high-field magnet systems using bulk high-temperature superconductors
3. 学会等名 2nd International Symposium on Superconductivity (ISS2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Shinden, S. Namba, T. Hirano, H. Fujishiro, T. Naito, and M.D. Ainslie
2. 発表標題 Numerical Simulation of a Hybrid Trapped Field Magnet Lens (HTFML) Magnetized by Pulsed Fields
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity (ISS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 圭太, 藤代 博之, 難波 空, 新田 基己, Mark D Ainslie
2. 発表標題 超高磁気勾配を実現するハイブリッド超電導バルク磁石 (HTFML) の開発
3. 学会等名 第 67 回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Mark D. Ainslie and Hiroyuki Fujishiro	4. 発行年 2019年
2. 出版社 IOP Publishing, Bristol, UK	5. 総ページ数 121
3. 書名 Numerical Modelling of Bulk Superconductor Magnetization	

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 超伝導バルク磁石装置	発明者 高橋圭太	権利者 学校法人学習院
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-33288	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 高磁気勾配型超電導バルク磁石装置	発明者 高橋圭太、藤代博之	権利者 国立大学法人岩手大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-180228	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 ハイブリッド型超伝導バルク磁石装置とその着磁方法	発明者 藤代博之	権利者 国立大学法人岩手大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-214998	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

藤代・内藤研究室HP
<http://ikebehp.mat.iwate-u.ac.jp>

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	内藤 智之 (Naito Tomoyuki) (40311683)	岩手大学・理工学部・教授 (11201)	

	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
研究協力者	エイズリー マーク (Ainslie Mark)	ケンブリッジ大学	

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		
英国	University of Cambridge		
中国	Shanghai University		