

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：12614

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21044

研究課題名（和文）船舶推進用超電導同期電動機の界磁極に最適な着磁技術の開発

研究課題名（英文）Development of optimum magnetizing technology for field poles of superconducting synchronous motors for ship propulsion

研究代表者

井田 徹哉（Ida, Tetsuya）

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：80344026

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、船舶推進用超電導バルク電動機の高性能を担保しながら実運用へ供するためにパルス着磁技術の確立を目的とする。界磁極を模した3個のGdBCOバルクから構成したアレイに対して、液体窒素温度で渦巻型銅コイルによるパルス着磁を試みた。バルクに対向配置した3つのコイルを直列接続したところ、静磁場による着磁と同様の磁束密度分布が得られた。

3個のバルクへ順にパルス磁場を印加したところ、互いの磁場による干渉のために隣接するバルクの中心部では最大12%の捕捉磁束密度の減少が観測された。しかし、順次着磁を行う際の条件を工夫することで、直列接続したコイルによる着磁と比べて捕捉磁場分布を改善することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温超電導バルク材料は永久磁石の数倍を超える強磁場を発生する磁石として、船舶推進器や発電機の小型化、効率化を果たす可能性を持つ。しかし、現在のところ大型で高品質な材料を製造することは技術的に困難であり、大出力を扱うために総磁束を増やすためには複数の材料を集積して界磁極を構成する必要がある。本研究はそのように集積した高温超電導バルク材料に強磁場を捕捉させて使用するために必要な手法を模索したものである。本研究の成果は高温超電導バルク材料の搭載による小形/高出力・高効率な船用推進機のみならず、海洋エネルギーを含む発電機の実現に向けて先鞭を付けたものである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to establish a pulse magnetization technique to ensure high performance of superconducting bulk motors for ship propulsion in actual operation. Pulse magnetization using vortex-type copper coils was attempted at liquid nitrogen temperature on an array consisting of three GdBCO bulks that imitate field poles. When the three coils placed opposite each other in the bulk were connected in series, a flux density distribution similar to that obtained by magnetization in a static magnetic field was obtained. When pulsed magnetic fields were applied to the three bulks in sequence, a reduction of up to 12% of the trapped flux density was observed in the center of the adjacent bulk due to interference from each other's pulsed magnetic field. However, by devising the conditions for sequential magnetization, it was possible to improve the magnetic flux density distribution compared to magnetization using coils connected in series.

研究分野：電子工学

キーワード：パルス着磁 高温超電導バルク 超電導同期電動機 船舶推進器 超電導界磁極 超電導同期発電機

### 1. 研究開始当初の背景

申請者らは、スーパーエコシップや全自動化船といった次世代船舶の次のあり方として、小形高効率な推進機関を有する電気推進船が最も望ましい形であろうとの考えに至り、2003年頃から超電導磁石を利用した小形/高出力・高効率な船舶用推進機の研究開発を始めた。最新の研究では、回転界磁極に永久磁石ではなく超電導バルク磁石を用いて、一般的に実用事例の多いラジアルギャップ型(回転力を生み出す界磁極の磁場の向きが回転軸と垂直な配置)の電動機を開発している。MRIやJRのリニアモーターカーで用いられる超電導線材は応力や磁場・温度変化によって超伝導性を損ね易いが、超電導バルク磁石は安定しており信頼性の必須な船舶推進機に最適である。電動機の出力は界磁極の性能に大きく依存する。ところが界磁極に永久磁石を用いたとき、電子スピン配列によって生じる磁束密度は例外なく1.5T程度で飽和し、磁石の大型化は磁気抵抗の大きな磁気回路の形成に直結し平均磁束密度を減少させるため、界磁極の強磁場化や大型化による電動機の性能向上は難しい。電磁石を界磁極へ用いた場合も同様に、発熱の増加を抑えるために強磁場化が難しく、平均磁束密度も減少する。界磁極の磁束密度を増加できないため、大出力の電動機を構成するためには出力に対する容積の比較的過剰な増加を必要とする。一方、超電導バルク磁石は磁束のピン止め効果によって磁場を捕捉し、それは電子スピン配列に起因する限界と無関係なため、永久磁石の10倍を超える最大捕捉磁束密度を実現可能である。実用に耐える品質を持つ超電導バルク磁石の大型化は直径150mmまでに留まるため、申請者らは複数の超電導バルク磁石を集積して大型の界磁極を構成した。永久磁石や電磁石を集積しても、個々の磁石の間に逆磁場が発生して磁場分布は一体化することなく孤立し、さらに磁石が相互に磁場を弱め合う。しかし集積した超電導バルク磁石は全体で一体化した磁場を発することが申請者らや横浜国立大学の山岸による実験で示されており、複数の超電導バルク磁石の集積体だけが1個の大きな強磁場磁石として使用することが可能である。申請者らは電動機の高性能を担保するために図1に示す15個の超電導バルク磁石を集積した界磁極を試作し、極めて良好な出力性能を示す船舶推進用超電導同期電動機の開発に成功した。しかし集積超電導バルク磁石に関する先行研究は存在せず、これを効率良く着磁して強力な界磁極として使用するための技術の確立は先進的な推進機として超電導同期電動機を実用化することの成否を決める鍵である。

### 2. 研究の目的

本研究は、スーパーエコシップや全自動化船といった次世代船舶が将来的に搭載すべき小形高効率な電気推進機として期待されている船舶推進用超電導バルク電動機の回転力を生み出す界磁極について、その高性能を担保しながら実運用へ供するために必須のパルス着磁技術を確立することを目的とする。超電導バルク磁石は永久磁石や電磁石よりも一桁大きな磁場から生み出す強力な電磁力と、超伝導線材と比べて高い信頼性を持つことから、従来よりも小形/高出力・高効率な船舶用推進機を実現可能な材料として期待されている。超電導を含む電磁石あるいは永久磁石は外周端の磁場が強くなる性質を持つため、MW級の定格出力を備えた電動機を開発する際、その高出力に伴って大型化した界磁極の平均磁束密度が低下することから電動機の体格・重量に対する発電量の減少を招く。一方、超電導バルク磁石は中心部分の磁場が最も強くなる性質を持つことが知られており、複数のバルク磁石の集積体が全体で1個の大型磁石として振る舞い、かつ高い磁束密度を保つことが近年の研究で明らかとなった[1,2]。今後、超電導バルク電動機の実証機、実用機の開発には、その高出力を確保するため集積超電導バルク磁石を用いた界磁極の搭載が期待される。しかし、集積超電導バルク磁石に関する先行研究がほぼ存在しないため、その物理的特性を明らかにして設計へフィードバックを掛けて電動機の実用化を目指す必要がある。

超電導バルク磁石の発する強磁場は、永久磁石と同様に、あらかじめ外部から磁場を印加する着磁過程を経て捕捉される。一般的に、この着磁過程は静磁場を数時間印加して行われるもので、図1に界磁極の概要を示した超電導同期電動機にもその着磁装置が備え付けてある。この超電導電磁石は極めて高価で、界磁極の10倍を超える体積と重量を持ち、推進機の始動前に使われるだけで駆動自体には何ら関与しないことから、安価で小型軽量の金属コイルを使用したパルス着磁技術を超電導電動機のために実用化することが強く望まれる。わずか1秒程度で着磁を完了するパルス着磁が静磁場着磁と同様の捕捉磁場を得ることは困難であり、先行研究がほとんど無い超電導バルク磁石を対象として効果的なパルス着磁のための技術の確立するためには、試行錯誤を重ねる挑戦的な研究の遂行が必要となる。

### 3. 研究の方法

本研究では、我々が開発した高温超電導電動機の界磁極の構造を模した配置について実験を行うために、50mm幅の3個の角形高温超電導バルク材料を集積したバルクアレイを試料とし、比較的安価なパルス着磁電源装置を接続した銅コイルによって高い磁場を捕捉させ、かつ良好な磁束密度分布を得ることを目的に研究を行った[1,2]。最初の試みとして、COMSOL

Multiphysics®を用いた有限要素法電磁界解析による数値シミュレーションを実施して着磁条件を把握し、パルス磁場の印加によってバルクアレイを適切に着磁する方法を検討した。バルクのモデル化にはH-formulationを用い、バルクの周囲と着磁コイルはA-formulationによってモデル化した[3, 4]。そして、これら2つのモデルをニューマン境界条件によって結合した[5]。解析に必要な臨界電流にはKimモデルを用いた[6]。我々は50mFの静電容量に最大25kJのエネルギーを蓄えることのできるパルス着磁電源装置をSPICEによって再現し、着磁コイルへ接続した(図1)。

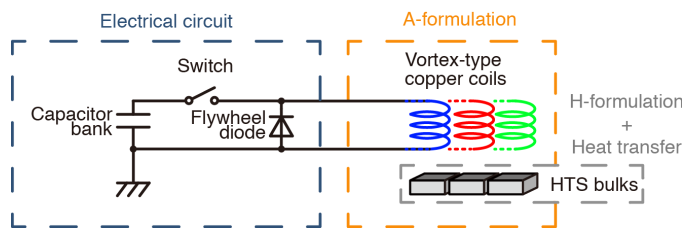


図1. 着磁回路モデル。

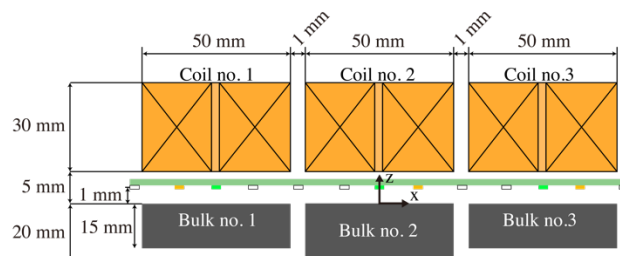


図2. 実験配置、Antomne A. Causes, et al., Superconductivity 5 (2023) 10041. より引用し一部抜粋。

次に、GdBCO (日本製鉄製 QMG) 高温超電導バルクを3個用意し、それらを集積したバルクアレイを液体窒素浸漬によって77Kへ冷却してパルス磁場を印加し、高温超電導バルクアレイに対するパルス着磁の手法を検討した。以前開発した高温超電導同期電動機の界磁極に合わせて、実験試料として50mm×50mmの正方形のバルクを用い、20mm厚の中央のバルクと、15mm厚の左右のバルクは1mmのギャップを設けて集積されている[1, 2]。このバルクアレイに対する着磁は個々のバルクの表面から5mm上に配置した3つの小さな渦巻型銅コイルによって行った。渦巻型銅コイルは円錐分布の磁場を印加し、ソレノイド型コイルよりも少ないエネルギーでパルス着磁による高い捕捉磁束密度が得られる[7]。コイルの厚さは30mm、外径は50mm、内径は6mmであった(図2)。

#### 4. 研究成果

図3は、有限要素法電磁界解析によって、3つの銅製コイルを用いて、77K (a) と40K (b) でパルス着磁を行った際の捕捉磁束密度分布を示している。ここでは、各コイルを個別に使用してパルス磁場を印加し、各パルス間に60秒の冷却期間を設けている。

それぞれの着磁順は以下の通り:

- 1) Coil 1, coil 3, coil 2
- 2) Coil 2, coil 1, coil 3
- 3) Coil 1, coil 2, coil 3

各コイルを個別に使用した場合、最初に印加したパルス磁場で着磁されたバルクは2回目の印加パルス磁場によってある程度減磁され、3回目のパルス着磁の際にそれ以前に着辞されたバルクをある程度減磁することがわかった。この減磁現象は、77Kと40K共に、どのような着磁順であっても同様の傾向が見られた。そのうち、条件1)において最もおおきな減磁現象が見られ、3回目に中央のバルクに着磁した後に、左右のバルクは負の捕捉磁束密度を示した。3つのコイルを直列に接続した場合は、77Kでは、サイドバルクでは捕捉された磁束密度の振幅が小さいものの、センターバルクでは捕捉された磁

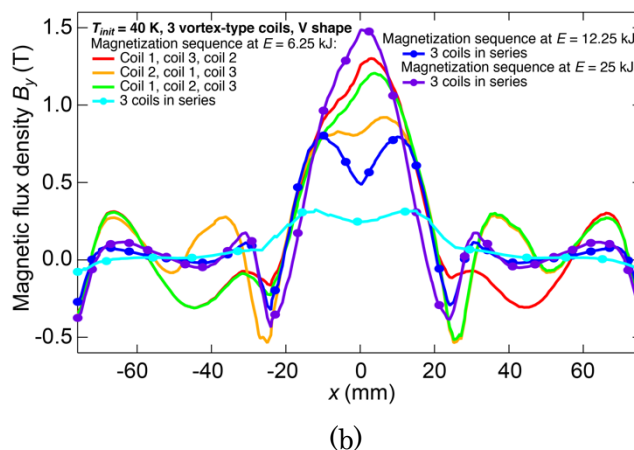
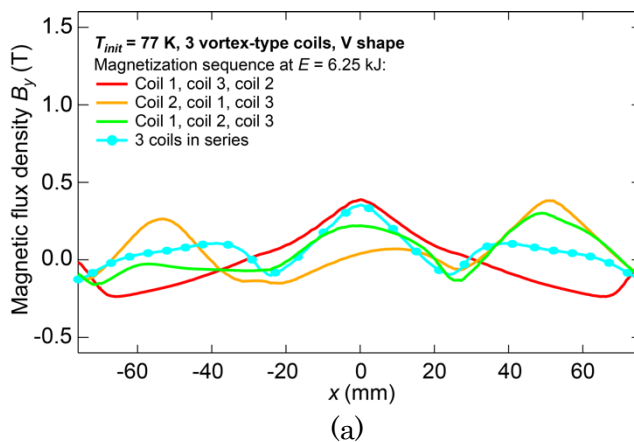


図3. バルク上面から2mmの位置で数値的に求めた、3つの渦巻型コイルによる3つのバルクの捕捉磁束密度。(a) 77Kで得られたデータ (b) 40Kで得られたデータ。

束密度の分布が良好であった。これは、3つのコイルを直列に配置したことで、インダクタンスと抵抗が増加し、パルス電流と印加磁場が低下したためと考えられる。

40Kでは、2回目以降の着磁において減磁が発生した結果、3つのバルク間で捕捉された磁束密度の分布が不均一になっていることがわかった。この温度域では、臨界電流密度が高くなり、着磁中のスクリーニング電流が大きくなるため、磁束がバルクを貫通するためには、より高い印加磁場が必要になる。6.25kJのエネルギーで着磁を行うと、3つのコイルを直列に使用した場合、捕捉された磁束密度は低くなった。エネルギーを12.25kJに増加させると、捕捉された磁束密度が高くなり、特にバルクの中央部で落ち込みが見られた。これは侵入磁束密度が不足していたことを示しており、これを受けてエネルギーを25kJに上げると捕捉磁束密度が増加した。

有限要素放電磁界解析による予備的な実験を元に着磁条件を見直し、実際のバルク試料に対して77Kでパルス着磁実験を行った。まず、3つの銅コイルをそれぞれ使用して、バルク1、次にバルク2、次にバルク3を着磁した。バルク1の捕捉磁束密度分布が円錐形状となるようにコイル1を使用して着磁を行った。この際、バルク2は、 $x = -12.5$  mmに配置されたホール素子が  $E = 1.5$  kJの着磁エネルギーに対して  $-0.05$  Tの捕捉磁束密度を示したことから、最初のパルス磁場の影響を受けたことが示された。ただし、着磁エネルギーが低い場合には、バルク2において  $x = 0$  および  $x = 12.5$  mmでの捕捉磁束密度は無視できる程度に低かった。従って、隣接するバルクに印加される逆極性の磁場による減磁の影響は限定的と言える。2回目のパルス着磁はコイル2を使用し行われ、バルク2は十分に着磁され、捕捉磁束密度分布が円錐形を示した。この2回目のパルス印加磁場がバルク1に及ぼす影響を見ると、1.5kJの着磁エネルギーにおいて、最初のパルス着磁の後の捕捉磁束密度  $0.58$  Tが2回目のパルス着磁の後には  $0.53$  Tに減少した。この段階では、バルク3の捕捉磁束密度は低く、1回目のパルス着磁によるバルク2の捕捉磁場と同程度であった。3回目の最後のパルス着磁では、バルク2が部分的に減磁し、バルク3は適切に着磁された。

順次パルス着磁を行った後に測定した捕捉磁束密度を図4に示す。以前に着磁されたバルクの減磁率は最大約12%であり、エネルギーの大小にかかわらず同様の傾向を示した。バルク1の場合、2回目のパルスで約10%の減磁が見られるが、3回目のパルスではほとんど減少していない。従って、一連の着磁は、着磁されているバルクに隣接するバルクの捕捉磁場に負の影響を与え、隣接して配置されていないバルクに対してはほとんど影響を与えないことが示された。

最後に、バルクアレイに高温超電導電動機の界磁として望ましい磁場分布としてバルク2の捕捉磁束密度を最大にすることを期待して、着磁の順序を変えることで減磁効果を低減することを試みた。その結果、バルク1、次にバルク3、最後にバルク2を磁化した際に、バルク2の部分的な減磁を回避して、中心部で高い捕捉磁束密度が得られた。3回目の着磁がバルク1と3の捕捉磁場に影響を与えたことに対して、2回目のパルス印加磁場はバルク2の捕捉磁場に影響を与えなかった。

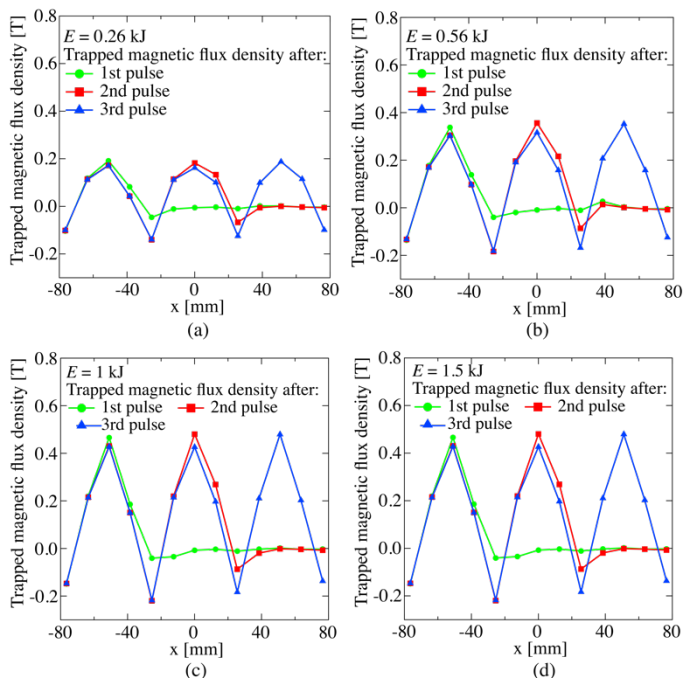


図4. 順次パルス着磁を行った後に測定したバルクアレイの捕捉磁束密度、Antomme A. Causes, et al., Superconductivity 5 (2023) 10041. より引用。

#### <引用文献>

[1] M. Watasaki *et al.*, “Stability model of bulk HTS field pole of a synchronous rotating machine under load conditions,” *Supercond. Sci. Technol.*, **34**[3] (2021) Art. no. 035015.  
 [2] E. Shaanika *et al.*, “Core Loss of a Bulk HTS Synchronous Machine at 2 and 3 T Rotor Magnetisation,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **30**[1] (2020) Art. no. 2927587.  
 [3] R. Brambilla, F. Grilli and L. Martini, “Development of an Edge-Element Model for AC Loss Computation of High-Temperature Superconductors,” *Supercond. Sci. Technol.*, **20**[1] (2006) pp. 16-24.  
 [4] S. Stavrev *et al.*, “Comparison of numerical methods for modeling of superconductors,” *IEEE Trans. Magn.*, **38**[2] (2002) pp. 849-852.

- [5] R. Brambilla *et al.*, “A Finite-Element Method Framework for Modelling Rotating Machines With Superconducting Windings”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **28**[5] (2018) Art. no 2812884.
- [6] Y. B. Kim, C. F. Hempstead, and A. R. Strnad, “Flux-Flow Resistance in Type-II Superconductors”, *Phys. Rev.*, **139**[4A] (1965) pp. A1163-A1172.
- [7] T. Ida *et al.*, “Magnetization properties for Gd-Ba-Cu-O bulk superconductors with a couple of pulsed-field vortex-type coils”, *Physica C*, **412-414** (2004) pp. 638-645.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Caunes Antomne A., Tsuchiya Mizuki, Imamichi Hayato, Kawasumi Nagisa, Izumi Mitsuru, Ida Tetsuya	4. 巻 5
2. 論文標題 Pulsed field magnetization of multiple bulks used as field pole of a high-temperature superconducting rotating machine	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Superconductivity	6. 最初と最後の頁 100041
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.supcon.2023.100041	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 -
1. 著者名 Caunes Antomne, Imamichi Hayato, Kawasumi Nagisa, Izumi Mitsuru, Ida Tetsuya	4. 巻 32
2. 論文標題 Simulation of the Waveform Control Pulse Magnetization of a High-Temperature Superconducting Bulk With Negative Feedback	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3138835	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 Caunes Antomne A., Imamichi Hayato, Kawasumi Nagisa, Izumi Mitsuru, Ida Tetsuya	4. 巻 32
2. 論文標題 Waveform Control Pulse Magnetization of GdBaCuO Bulk Near Operating Temperature of Our Superconducting Rotating Machine	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3162809	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 Antomne A. Caunes, Masahiro Watasaki, Mitsuru Izumi and Tetsuya Ida	4. 巻 31
2. 論文標題 Waveform control pulsed magnetization of GdBaCuO bulk using negative feedback at 60 K	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 8200205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3064545	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10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 井田 徹哉, 今道 颯人, 土屋 美月, Antomne Alexandre Caunes, 川澄 渚, 和泉 充
2. 発表標題 侵入磁場を元に波形を制御した単一パルス磁場による高温超電導バルク材の着磁技術
3. 学会等名 令和 5 年度電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川澄 渚, 今道 颯人, 土屋 美月, Antomne Alexandre Caunes, 井田 徹哉
2. 発表標題 高温超電導バルク材料の着磁過程における磁束密度分布
3. 学会等名 令和 5 年度電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Antomne Alexandre Caunes, Hayato Imamichi, Nagisa Kawasumi, Mitsuru Izumi and Tetsuya Ida
2. 発表標題 Magnetization of the Field Pole of a High-temperature Superconducting Motor Constituted of Multiple Bulks
3. 学会等名 International Forum on Applied Superconductivity and Magnetism (IFASM Oceania 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Antomne Alexandre Caunes, Hayato Imamichi, Nagisa Kawasumi, Mitsuru Izumi and Tetsuya Ida
2. 発表標題 Pulse field magnetization of multiple high-temperature superconducting bulks
3. 学会等名 The 35th International Symposium on Superconductivity (ISS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Antonne Alexandre Caunes, Hayato Imamichi, Nagisa Kawasumi, Mitsuru Izumi and Tetsuya Ida
2. 発表標題 Waveform Control Pulse Magnetization of GdBaCuO Bulk near Operating Temperature of Our Superconducting Rotating Machine
3. 学会等名 15th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Antonne Alexandre Caunes, Hayato Imamichi, Nagisa Kawasumi, Mitsuru Izumi and Tetsuya Ida
2. 発表標題 Simulation of the waveform control pulse magnetization a high temperature superconducting bulk with negative feedback
3. 学会等名 15th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Antonne Alexandre Caunes, Hayato Imamichi, Nagisa Kawasumi, Mitsuru Izumi and Tetsuya Ida
2. 発表標題 Numerical modeling of the pulse field magnetization of the bulk array used as the field poles of a superconducting machine
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 Antonne Alexandre Caunes, Tetsuya Ida, Masahiro Watasaki and Mitsuru Izumi
2. 発表標題 Waveform control pulse magnetization of GdBaCuO bulk using negative control feedback at 60K
3. 学会等名 電気学会研究会「超電導バルクの産業応用」
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Antomne Alexandre Caunes, Shunnya Watanabe, Masahiro Watasaki, Mitsuru Izumi and Tetsuya Ida
2. 発表標題 Magnetization of GdBaCuO bulk below 70K using waveform control pulse magnetization
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (ASC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Antomne Alexandre Caunes, Tetsuya Ida, Masahiro Watasaki and Mitsuru Izumi
2. 発表標題 Investigating the Flux Jump Behavior During Single Waveform Control Pulsed Field Magnetization of GdBaCuO Superconducting Bulk
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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

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