

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02326

研究課題名(和文) 粒子線がん治療用回転ガントリーを目指した高温超伝導電磁石の高精度磁場発生技術

研究課題名(英文) Generation of precise magnetic fields using high-temperature superconductor magnets for rotating gantry of hadron therapy

研究代表者

雨宮 尚之 (Amemiya, Naoyuki)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10222697

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)：回転ガントリーが炭素線がん治療において期待されている。高温超伝導ビーム偏向電磁石は、比較的高い温度(20 K程度)で大きな温度マージンをもって運転でき4-6 Tの高磁界を発生できるので、回転ガントリーの小型・軽量化に寄与し得るが、テープ形状をした高温超伝導線の反磁化による磁場精度劣化を克服する必要がある。実験と数値解析によって、高温超伝導電磁石における電磁現象を明らかにし、反磁化が高温超伝導電磁石の磁場精度に与える影響の抑制法を提案した。設計した高温超伝導ビーム偏向電磁石の磁場を計算し、これをもとに回転ガントリーのビーム軌道計算を行い、十分なビーム誘導性能を持っていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温超伝導電磁石は高い温度で安定に運転できる点は魅力的であるが、テープ形状をした高温超伝導線の反磁化が磁場精度を劣化させるという問題点がある。複雑な時間パターンで励磁した際の高温超伝導線内部の電磁現象ならびにその磁場精度への影響を明らかにし、高精度な磁場を発生する手法を明らかにした点に本研究の学術的意義がある。また、炭素線がん治療のさらなる普及のために重要な回転ガントリーの格段の小型・軽量化を可能とする技術基盤を構築した点で、その社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：Rotating gantry is needed for carbon cancer therapy. HTS beam-bending magnets, which can generate high magnetic field (4 - 6 T) at relatively high operating temperature (around 20 K) with large temperature margin, enable compact and light-weight rotating gantry. However, we have to suppress the influence of large demagnetization of HTS tapes on the field qualities of magnets. We revealed the electromagnetic phenomena in HTS tapes in magnets through experimental and numerical approaches and clarified how to suppress the influence of magnetization on the field qualities of HTS magnets. We calculated the magnetic field generated by a designed beam-bending magnet, considering the demagnetization of HTS tapes. Based on the calculated magnetic field, we carried out beam-tracking simulation of a rotating gantry consisting of HTS magnets. It showed excellent beam-guiding performance.

研究分野：電気工学

キーワード：電気機器 超伝導電磁石 磁場精度 遮蔽電流 反磁化 粒子線がん治療 回転ガントリー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

粒子線がん治療の中でも、炭素線がん治療には、臓器の温存、照射部位に限定された副作用、病巣への線量集中、正常組織への影響抑制といった利点があるが、精密な治療を可能とする任意の角度からの照射の実現が大きな課題とされている。回転ガントリー(図1)は回転構造体にローレンツ力により粒子線を偏向誘導する電磁石群を搭載し、任意の角度からの照射を可能にする装置で、陽子線では実用化されている。炭素イオンは質量が大きく、磁場が1.5 T程度に制約され偏向角が小さい銅電磁石で回転ガントリーを実現しようとすると巨大なものになってしまう(唯一のドイツの例で重量600 t)。最近、日本で低温超伝導線を用いた回転ガントリーが建設されたが、低い臨界温度に起因する小さな温度マージンなどのため磁場は3 T以下で、十分な小型化はできていない(重量300 t以上)。高温超伝導線を用いれば、高い臨界温度・臨界磁場を活用し、高磁場(4-6 T)を発生し、高い温度(20K)で、大きな温度マージンで運転できるビーム偏向電磁石が実現でき、回転ガントリーの格段の小型化が可能になり、その広範な普及の道が拓ける。

高磁場が発生できる高温超伝導ビーム偏向電磁石による超小型炭素線回転ガントリー実現が研究の全体構想である。薄膜線材による3次元巻線、超伝導状態保持と常伝導転移時の電磁石保護、交流損失低減と冷却なども重要な課題であるが、本研究がねらう反磁化(図1)の影響克服による高精度磁場発生は、全体構想実現のための最重要課題である。

### 2. 研究の目的

高温超伝導線内部のミクロスケールの電磁現象の解明に立脚して、高温超伝導線のテープ形状に起因する大きな反磁化の影響を克服し、回転ガントリーで要求される複雑な励磁パターン(図2)のもとで、高温超伝導電磁石により、精密に形状・時間制御された高磁場を発生する方法を明らかにすることが本研究の目的である。さらに、適切なビーム光学設計のもと、回転ガントリーの電磁石群を構成する各々の電磁石で必要な磁場を発生し、炭素イオンビームを精密に誘導する方法を明らかにすることが本研究の目的である。

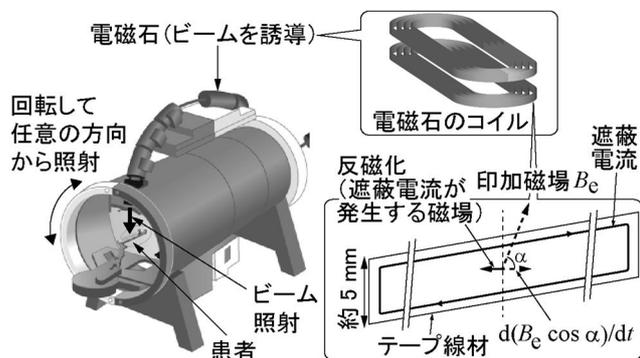


図1 回転ガントリーと遮蔽電流が発生する磁場(反磁化)

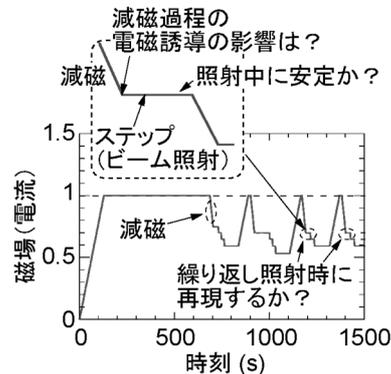


図2 回転ガントリー用電磁石の複雑な励磁パターン

### 3. 研究の方法

「研究の目的」を達成するために、以下の計画・方法で研究を行う。

1. 変動励磁電磁石の磁場測定と電磁現象シミュレーションを組み合わせ、励磁パターンが線材内部のミクロスケール電磁現象に与える影響を明らかにする。
2. 電磁現象シミュレーションにより、反磁化の影響を織り込んだ回転ガントリー用ビーム偏向電磁石単体を設計し、安定で、再現性があり、高い形状精度の高磁場を発生する方法を明らかにする。
3. 回転ガントリーを構成する電磁石群のビーム光学設計を行い、それを踏まえて、反磁化を考慮した磁場をもとにマトリクス法によるビーム軌道計算を行い、炭素イオンビームを精密に誘導する磁場発生法を明らかにする。
4. 反磁化抑制のために魅力的なマルチフィラメント薄膜高温超伝導線の電磁現象を明らかにし、その電磁石への適用性を評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 励磁パターンが線材内部のミクロスケール電磁現象に与える影響の解明

小型高温超伝導電磁石を繰り返し変動励磁した場合の発生磁場を磁場測定によって評価し、多極磁場成分が変動励磁によって受ける影響を調べた。測定対象の小型電磁石は高温超伝導線単線で巻かれたレーストラックコイルを4個組み合わせて構成されており、運転温度は30 Kに固定した。この小型電磁石を図2に示すような回転ガントリー用電磁石の励磁パターンの特徴を抽出した励磁パターンを繰り返し、電磁石の多極磁場成分がどのような振る舞いを示すかを実験的に評価した。

測定で使用した励磁パターン(パターンA)を図3に示す。フラットトップ、各ステップの持続時間は10 sとし、50 Aまで減磁した。また、比較のために100 Aまで減磁した励磁パターン(パターンB)で測定した。このときの電流値100 Aのステップにおける電流で規格化した2極磁場成分及び6極磁場成分の2極磁場成分に対する相対値を図4に示す。この結果から、2極磁場成分の変化は励消磁の繰返し回

数(サイクル数)によって決まっていることが明らかになった。一方、6 極磁場成分については最小の電流値が影響を与えていることが確認された。また、100 A まで励磁し長時間保持した場合(パターン C)と、150 A まで励磁した後 100 A まで減磁し長時間保持した場合(パターン D)と比較した結果を図 5 に示す。この結果から、繰返し励磁開始時の多極磁場成分はパターン D に近いが、一方でその後の時間変化はパターン D よりも大きくなることが明らかになった。また、パターン C とパターン D で多極磁場成分の時間的振る舞いが大きく異なる原因は高温超伝導線内部の電流分布が励磁履歴によって異なるためであることを電磁現象シミュレーションによって確認した。

これらの結果から、励磁パターンやコイル形状が線材内部のマイクロスケール電磁現象に与える影響を解明した。

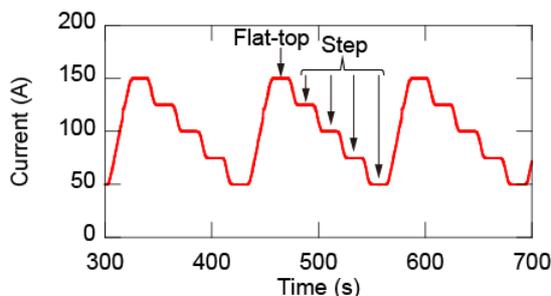


図 3 測定で使用した励磁パターン

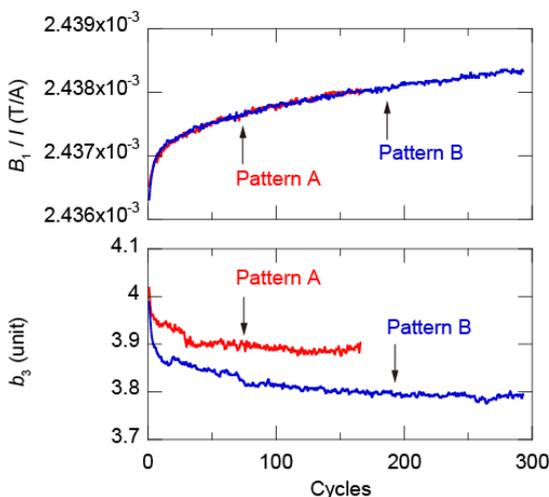


図 4 繰返し励磁回数に対する多極磁場成分の変化

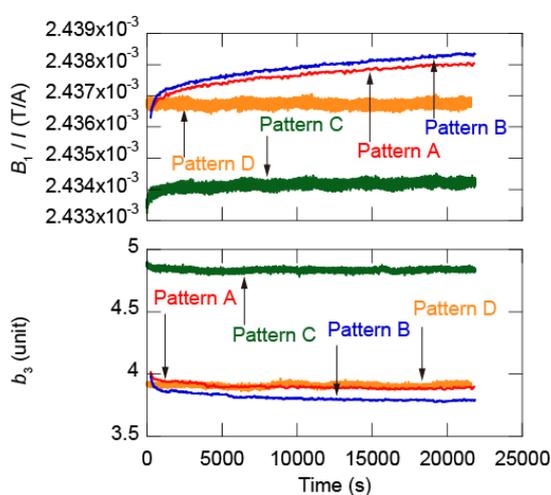


図 5 繰返し励磁時と電流長時間保持時の多極磁場成分の比較

## (2) 電磁石単体による形状・時間制御された磁場発生法の解明

回転ガントリ用ビーム偏向電磁石に要求される仕様を満たした高温超伝導電磁石を設計し、超伝導線の反磁化が発生磁場精度に与える影響を電磁現象シミュレーションによって明らかにした。また、これらの結果から安定で再現性があり、高い形状精度の磁場を発生する方法を明らかにした[1]。

検討対象とした高温超伝導電磁石の外観と諸元を図 6 に示す。この電磁石は鞍型形状をもつ直線状電磁石であり、断面形状は Cosine-theta 型と呼ばれる形状をもつ。高温超伝導電磁石の外側には鉄ヨークが存在する。磁場発生領域中心での発生磁場は定格電流値 200 A において約 3.09 T である。また、反磁化の影響を評価するための電磁現象シミュレーションでは高温超伝導線の導電特性を定式化して用いる必要があるが、ここには SuperPower 社製高温超伝導線の 30 K における電圧-電流密度特性の磁場強度・印加角度依存性を考慮した定式化結果を用いた。なお、電磁現象シミュレーションにあたっては、大規模・高速な数値解析を可能にする階層型行列法を適用した[2]。

図 7 に電磁現象シミュレーションで用いた励磁(通電)パターンを示す。これは図 2 に示した回転ガントリ用電磁石の励磁パターンの特徴を抽出し、単純化したものである。FT、RU、S1、S2 はそれぞれ、フラットトップ、ランプアップ、ランプダウン中一回目のステップ、ランプダウン中二回目のステップを表す。FT、S1、S2 における電流値はそれぞれ 200 A、150 A、100 A であり、FT の持続時間は 300 秒、S1、S2 の持続時間はともに 10 秒である。また、マグネットの励磁、消磁速度はいずれも 2 A/s である。

図 8 にマグネット全体における、積分磁場の多極成分へ反磁化が及ぼす影響(以下 SCIF と呼ぶ)を示す。 $\Delta b_n$  ( $n = 1, 3, 5, \dots$ ) は、 $\Delta B L_n$ (SCIF をビーム進行方向(z 軸方向)に積分した、積分 SCIF の多極成分)を  $B L_{1,d}$  すなわち設計積分磁場の二極成分の各時刻における値で規格化した積分遮蔽電流の多極係数であり、 $n = 1$  のとき二極磁場係数、 $n = 3$  のとき六極磁場係数を表し、以降同様である。

回転ガンテリ用マグネットとしては、あらゆる時刻で $\Delta b_l < 1 \times 10^{-3}$ を満足することが磁場精度の観点から要求される。積分磁場計算の際には、マグネット長よりも長い $z = -600 \text{ mm} \sim 600 \text{ mm}$ の領域で積分した。1回目ランプアップ中は $\Delta b_l$ が非常に大きい値を取っているが、実際の運転の際にはこのような条件では使用しないため、以降の議論ではこれを無視する。この結果から、SCIFによって二極及び六極が磁場精度の指標を満足できなくなっていることが確認された。一方、十極及びより高次の成分に関しては磁界精度の指標を満足しているため、以降の議論ではSCIFの二極及び六極への影響の補正方法について議論する。

まず、二極磁場成分の補正については、 $\Delta b_l$ が $10^{-2}$ オーダであることから、通電電流を数%調整することによる実現が可能である。そのためには、事前の電磁現象シミュレーションをもとにした通電電流の決定が必要である。図XXで得られたSCIFを含む二極磁場成分と所望の二極磁場成分の比を各時刻に対して計算し、これと各時刻の電流値から通電電流値を調整した通電パターンを得る。SCIFが磁場精度に与える影響は電流に対して線形ではないため、得られた通電パターンでシミュレーションを行い、シミュレーション結果をもとに磁場精度を満足するまで通電電流値の調整を繰り返す。これにより、電流値の調整による二極磁場成分の補正が可能となる。

次に、六極磁場成分の補正については、電磁石の通電電流の調整による補正は有効ではないため、電磁石形状を変更する必要がある。本研究では、偏向電磁石と独立な通電パターンを設定可能とするため、補正用六極コイルと偏向電磁石の組合せについて電磁現象シミュレーションを行った。補正用六極コイルは偏向電磁石と同じ超伝導線で作られたレーストラックコイルで構成されており、通電電流値は図8の $\Delta b_l$ を打ち消すように設定した。電磁現象シミュレーションの結果、補正用六極コイルにおける反磁化の影響はコイル形状の影響で小さいことが確認され、ほぼ設計通りの六極磁場を発生し偏向電磁石のSCIFの六極磁場成分を補正することが可能であることが明らかになった。

通電電流の調整及び補正用六極コイルとの組合せを行った場合の偏向電磁石の発生磁場の多極成分を図9に示す。この結果、以下が達成できる程度までの、電磁石単体による形状・時間制御された磁場発生法を解明した。

- ・ 磁場形状精度: 高次多極磁場(誤差磁場)が二極磁場の0.1%以下      ビームスポット変形抑制
- ・ 磁場安定性: 二極磁場の相対変動0.1%以下(10 s間)      照射中のビームスポット移動抑制
- ・ 磁場再現性: 二極磁場の繰返し励磁時の偏差0.1%以下      繰返し照射時の再現性確保

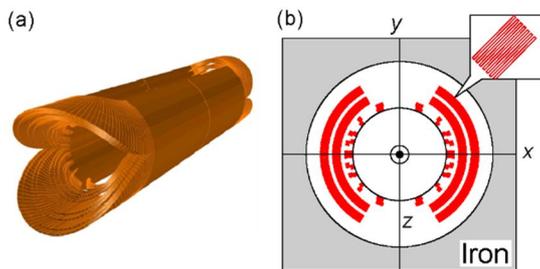


図6 検討対象の高温超伝導電磁石

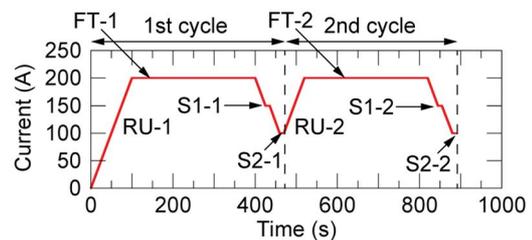


図7 解析で使用した励磁パターン

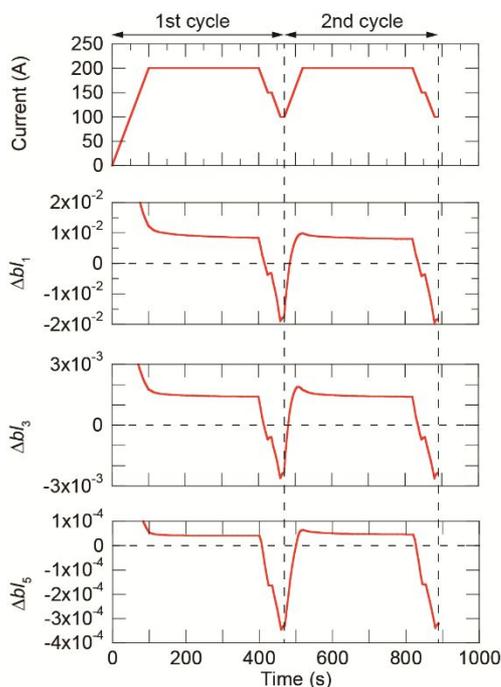


図8 積分SCIFの多極磁場成分の時間変化

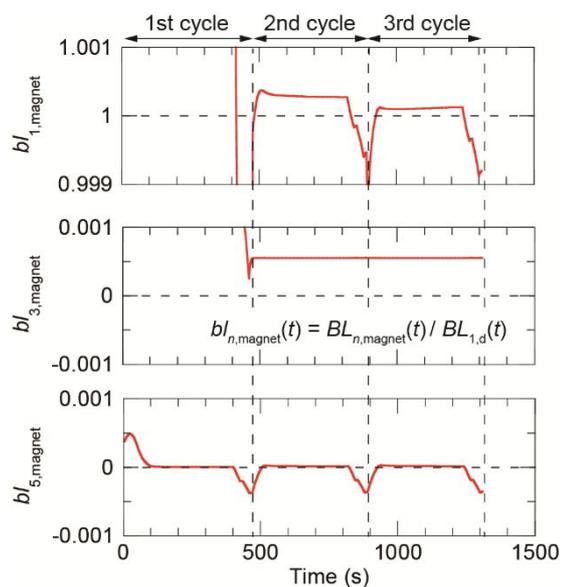


図9 補正後の多極磁場成分

### (3) 回転ガントリーの磁石群全体炭素イオンビームを精密に誘導する磁場発生法の説明

(2)で実現した電磁石単体での磁場の形状・時間制御は、電磁石のビーム進行方向に積分した磁場を対象とした。この電磁石を用いて回転ガントリーを構成した場合に炭素イオンビームがどのように誘導されるかをビームトラッキングによって評価した。

図 10 に電磁石の配置図を示す。これは、[3]に示されている回転ガントリーの電磁石配置を単純化したものである。図 10 中の各電磁石は(2)で実現した磁場制御された電磁石であり、マグネットのビーム進行方向の長さは 1 m、偏向角は 22.5 度である。実際の回転ガントリーにおいてはビーム照射位置を制御するためのスキャンング電磁石が存在し、そのためにビーム終着方向では電磁石のボア径並びに電磁石の有効長が大きくなるが、本計算ではこれは無視し、全て同一の大きさ、発生磁場の電磁石を使うものとした。また、ビームトラッキングでは、電磁石のビーム進行方向における多極磁場成分の分布を考慮して計算している。

ビームトラッキングでは、炭素イオンビームのエネルギーを 430 MeV/u、半径 5 mm のビームスポット内に均一に炭素イオンが分布するビーム(ペンシルビーム)として計算した。計算されたビーム照射位置でのビーム分布を図 11 に示す。黄色の点が一つ一つの炭素イオンビームを示している。この条件では、想定される照射位置からのビーム位置ずれはほぼ発生しないことが確認された。また、入射時には半径 5 mm の円形であったビームスポットは六極磁場成分の影響を受けて変形するものの、最もビーム中心から外れる粒子の中心からの位置が約 6 mm となっており、ビームスポットの変形率は 20%以下であった。

以上の結果から、(2)に示した高精度な磁場発生法を適用することによって、ビーム位置ずれ 0.2 mm 以下、ビームスポット変形率 20%以下の照射を可能にする程度までの、回転ガントリーの電磁石群全体で炭素イオンビームを精密に誘導する磁場発生が可能であることが確認された。

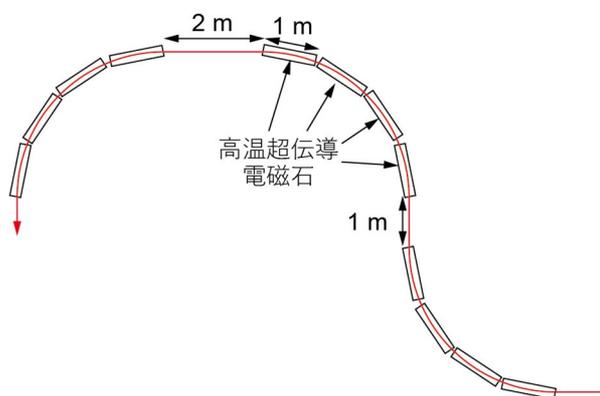


図 10 ビームトラッキング時に想定した電磁石配置

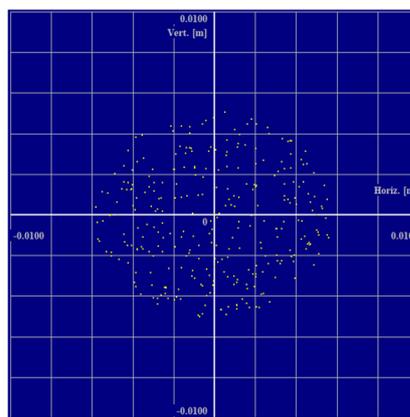


図 11 ビームスポット形状

### (4) マルチフィラメント薄膜高温超伝導線の電磁現象説明

(1)-(3)においては、幅 4 mm 程度のモノリシックな超伝導層を持つ超伝導線で作られた電磁石を対象としたが、線材の反磁化自体を小さくできる可能性があるマルチフィラメント薄膜高温超伝導線の電磁現象を実験的に明らかにした。励磁速度が遅い回転ガントリー用電磁石においては、マルチフィラメント薄膜高温超伝導線の適用により反磁化の影響を抑制できる可能性がある。

#### [参考文献]

- [1] 曾我部 友輔、雨宮 尚之、低温工学、55 巻、2 号、p. 109-116、2020
- [2] T. Mifune, et. al., Superconductor Science and Technology, Vol. 32, No. 9, Art. No. 094002, 2019.
- [3] Y. Iwata, et al., Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams, Vol. 15, Art. No. 044701, 2012.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Mifune Takashi, Tominaga Naoki, Sogabe Yusuke, Mizobata Yudai, Yasunaga Masahiro, Ida Akihiro, Iwashita Takeshi, Amemiya Naoyuki                               | 4. 巻<br>32                    |
| 2. 論文標題<br>Large-scale electromagnetic field analyses of coils wound with coated conductors using a current-vector-potential formulation with a thin-strip approximation | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Superconductor Science and Technology  | 6. 最初と最後の頁<br>094002 ~ 094002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6668/ab1d35   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Amemiya Naoyuki, Sogabe Yusuke, Yamano Satoshi, Sakamoto Hisaki  | 4. 巻<br>32                    |
| 2. 論文標題<br>Shielding current in a copper-plated multifilament coated conductor wound into a single pancake coil and exposed to a normal magnetic field                   | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Superconductor Science and Technology  | 6. 最初と最後の頁<br>115008 ~ 115008 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6668/ab3f1c   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Amemiya Naoyuki, Sogabe Yusuke, Takayama Shigeki, Ishii Yusuke, Ogitsu Toru, Iwata Yoshiyuki, Noda Koji, Yoshimoto Masahiro                                    | 4. 巻<br>30                    |
| 2. 論文標題<br>Ac Loss and Shielding-Current-Induced Field in a Coated-Conductor Test Magnet for Accelerator Applications under Repeated Excitations                         | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Transactions on Applied Superconductivity   | 6. 最初と最後の頁<br>1-5             |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/TASC.2020.2980508  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Li Yang, Tominaga Naoki, Sogabe Yusuke, Kikuchi Takashi, Wimbush Stuart, Granville Simon, Amemiya Naoyuki  | 4. 巻<br>28                    |
| 2. 論文標題<br>Influence of E-J Characteristics of Coated Conductors and Field Ramp-Up Rates on Shielding-Current-Induced Fields of Magnet                                   | 5. 発行年<br>2018年               |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Transactions on Applied Superconductivity   | 6. 最初と最後の頁<br>1~5             |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/TASC.2017.2785817  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Tominaga Naoki, Mifune Takeshi, Ida Akihiro, Sogabe Yusuke, Iwashita Takeshi, Amemiya Naoyuki                             | 4. 巻<br>28        |
| 2. 論文標題<br>Application of Hierarchical Matrices to Large-Scale Electromagnetic Field Analyses of Coils Wound With Coated Conductors | 5. 発行年<br>2018年   |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Transactions on Applied Superconductivity  | 6. 最初と最後の頁<br>1~5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/TASC.2017.2780821   | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>-         |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Amemiya Naoyuki, Tominaga Naoki, Toyomoto Ryuki, Nishimoto Takuma, Sogabe Yusuke, Yamano Satoshi, Sakamoto Hisaki   | 4. 巻<br>31                    |
| 2. 論文標題<br>Coupling time constants of striated and copper-plated coated conductors and the potential of striation to reduce shielding-current-induced fields in pancake coils | 5. 発行年<br>2018年               |
| 3. 雑誌名<br>Superconductor Science and Technology   | 6. 最初と最後の頁<br>025007 ~ 025007 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6668/aa9d24  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                  |

[学会発表] 計22件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 16件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>N. Amemiya, Y. Sogabe, S. Takayama, T. Ogitsu, Y. Iwata, and K. Noda   |
| 2. 発表標題<br>Ac losses and field quality of ramp-up and down magnets wound with RE-123 coated conductors for accelerator applications |
| 3. 学会等名<br>5th Workshop on Accelerator Magnets in HTS (WAMHTS-5) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>N. Amemiya, N. Wang, Y. Sogabe, S. Yamano, and H. Sakamoto   |
| 2. 発表標題<br>Magnetic field measurements of stack of double-pancake coils wound with striated and copper-plated coated conductors |
| 3. 学会等名<br>26th International Conference on Magnet Technology (MT-26) (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>N. Amemiya, Y. Sogabe, S. Takayama, Y. Ishii, T. Ogitsu, Y. Iwata, K. Noda, and M. Yoshimoto  |
| 2 . 発表標題<br>Ac loss and shielding-current-induced field in a coated-conductor test magnet for accelerator applications under repeated excitations |
| 3 . 学会等名<br>26th International Conference on Magnet Technology (MT-26) (招待講演) (国際学会)  |
| 4 . 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Y. Sogabe and N. Amemiya  |
| 2 . 発表標題<br>Comparison between measurements and calculations of shielding-current-induced field in a small dipole magnet wound with coated conductors |
| 3 . 学会等名<br>26th International Conference on Magnet Technology (MT-26) (国際学会)   |
| 4 . 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Y. Sogabe, K. Wakabayashi, and N. Amemiya   |
| 2 . 発表標題<br>Behavior of shielding-current-induced field in a small magnet wound with coated conductors under time-varying field generation operations               |
| 3 . 学会等名<br>10th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (ACASC), 2nd International Cryogenic Materials Conference in Asia (Asian ICMC) (国際学会) |
| 4 . 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>N. Wang, Y. Sogabe, N. Amemiya, S. Yamano, and H. Sakamoto   |
| 2 . 発表標題<br>Discussions on the temporary behavior of measured magnetic fields in stack of double-pancake coils wound with striated and copper-plated coated conductors |
| 3 . 学会等名<br>10th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (ACASC), 2nd International Cryogenic Materials Conference in Asia (Asian ICMC) (国際学会)    |
| 4 . 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>雨宮尚之   |
| 2. 発表標題<br>高温超電導線材に対する期待  |
| 3. 学会等名<br>電気学会 電力・エネルギーフォーラムおよび超電導機器研究会 / 第3回超電導応用研究会シンポジウム「超電導化に向かう円形加速器」<br>(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>N. Amemiya, N. Tominaga, T. Mifune, Y. Sogabe, Y. Mizobata, M. Yasunaga, A. Ida, and T. Iwashita   |
| 2. 発表標題<br>Progress of large-scale and fast electromagnetic field analyses of coils wound with coated conductors for ac loss and shielding current calculations |
| 3. 学会等名<br>6th International Workshop on Numerical Modelling of HTS (HTS 2018 Modelling) (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Sogabe, N. Amemiya, and Y. Iwata   |
| 2. 発表標題<br>Theoretical study on mitigation of shielding-current-induced fields in cosine-theta dipole magnets wound with coated conductors by using HTS correction coils |
| 3. 学会等名<br>2018 Applied Superconductivity Conference (ASC 2018) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>N. Amemiya, Y. Sogabe, Y. Mizobata, N. Tominaga, S. Yamano, and H. Sakamoto   |
| 2. 発表標題<br>Effect of striation of coated conductors to reduce shielding-current-induced fields in solenoid coils and pancake coils with/without copper terminals |
| 3. 学会等名<br>2018 Applied Superconductivity Conference (ASC 2018) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>溝端悠大, 富永直樹, 曾我部友輔, 雨宮尚之                                 |
| 2. 発表標題<br>マルチフィラメント薄膜線材で巻かれたダブルパンケーキコイルとソレノイドコイルの遮蔽電流磁場に与える銅端子の影響 |
| 3. 学会等名<br>第96回2018年度春季低温工学・超電導学会                                  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>曾我部友輔, 雨宮尚之   |
| 2. 発表標題<br>加速器用高温超伝導二極マグネットにおける遮蔽電流磁界の通電電流制御及び補正用六極コイルとの組み合わせによる低減 |
| 3. 学会等名<br>第97回2018年度春季低温工学・超電導学会                                  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>N. Tominaga, T. Mifune, A. Ida, Y. Sogabe, T. Iwashita, and N. Amemiya   |
| 2. 発表標題<br>Application of hierarchical matrices to large-scale electromagnetic field analyses of coils wound with coated conductors |
| 3. 学会等名<br>25th International Conference on Magnet Technology (MT-25) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Sogabe and N. Amemiya   |
| 2. 発表標題<br>Design of a cosine-theta dipole magnet considering influence of shielding-current-induced field on field quality |
| 3. 学会等名<br>25th International Conference on Magnet Technology (MT-25) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2017年   |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Y. Li, Y. Sogabe, T. Kikuchi, and N. Amemiya   |
| 2 . 発表標題<br>Influence of E-J characteristics of coated conductors and field ramp-up rates on the shielding-current-induced fields of magnets |
| 3 . 学会等名<br>25th International Conference on Magnet Technology (MT-25) ( 国際学会 )  |
| 4 . 発表年<br>2017年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Y. Mizobata, N. Tominaga, Y. Sogabe, and N. Amemiya   |
| 2 . 発表標題<br>Shielding-current-induced fields in coils with various shapes wound with striated coated conductors |
| 3 . 学会等名<br>13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2017) ( 国際学会 )                          |
| 4 . 発表年<br>2017年  |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>N. Amemiya, Y. Sogabe, N. Tominaga, X. Luo, S. Takayama, Y. Ishii, T. Ogitsu, Y. Iwata, K. Noda, and M. Yoshimoto |
| 2 . 発表標題<br>R&D toward HTS based accelerator magnets  |
| 3 . 学会等名<br>9th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics (ACASC2017) ( 招待講演 ) ( 国際学会 )                    |
| 4 . 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>李陽, 曾我部友輔, 菊池嵩, 雨宮尚之                       |
| 2 . 発表標題<br>薄膜高温超伝導線材のE-J 特性と磁場変化率が マグネットの遮蔽電流磁場に与える影響 |
| 3 . 学会等名<br>第94回2017年度春季低温工学・超電導学会                     |
| 4 . 発表年<br>2017年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>溝端悠大, 富永直樹, 曾我部友輔, 雨宮尚之                 |
| 2. 発表標題<br>コイル形状がマルチフィラメント薄膜高温超伝導線コイルの遮蔽電流磁場に与える影響 |
| 3. 学会等名<br>第95回2017年度秋季低温工学・超電導学会                  |
| 4. 発表年<br>2017年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>曾我部友輔, 雨宮尚之                                   |
| 2. 発表標題<br>高温超伝導線材で巻いた回転ガントリー用コサインシートマグネットの遮蔽電流磁界抑制手法の検討 |
| 3. 学会等名<br>第95回2017年度秋季低温工学・超電導学会                        |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Sogabe, T. Nakamura, and N. Amemiya  |
| 2. 発表標題<br>Evaluation of field quality of a cosine theta dipole magnet wound with coated conductors by using a 3D model for numerical electromagnetic field analyses |
| 3. 学会等名<br>2016 Applied Superconductivity Conference (ASC 2016) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2016年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Sogabe and N. Amemiya   |
| 2. 発表標題<br>Research on AC losses and field qualities of magnets wound with coated conductors by 3D electromagnetic field analyses |
| 3. 学会等名<br>2016 Joint KU-VUW Workshop (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2016年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                         | 備考 |
|-----------|--|---|----|
| 研究<br>分担者 | 美舩 健<br><br>(Mifune Takeshi)<br><br>(20362460)   | 京都大学・工学研究科・講師<br><br><br>(14301)              |    |
| 研究<br>協力者 | 曾我部 友輔<br><br>(Sogabe Yusuke)<br><br>(40847216)  | 京都大学・工学研究科・助教<br><br><br>(14301)              |    |
| 連携<br>研究者 | 岩田 佳之<br><br>(Iwata Yoshiyuki)<br><br>(60392213) | 量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所・室長<br><br><br>(82502) |    |