

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00245

研究課題名（和文）重粒子線がん治療用高速変動高磁界スキャンニング電磁石を実現するための高温超伝導技術

研究課題名（英文）High-temperature-superconductor technology toward high-speed and high-field beam scanning magnets for heavy-ion cancer 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） 34,400,000円

研究成果の概要（和文）：重粒子線がん治療用スキャンニング電磁石に適用可能な高速変動高磁界電磁石の概念設計を行った。

マルチフィラメント化し銅分流層を複合した薄膜高温超伝導線を円形コアに多層巻きしたSCSCケーブルを用いてコイルを巻くことにより、磁界変動時の磁束量子の出入りに伴う交流損失、テープ形状に起因する大きな反磁化による磁界精度劣化、大きな鎖交磁束と高い周波数に起因する高い端子電圧というボトルネックの解決をはかった。実験と電磁界解析を組み合わせたアプローチにより、SCSCケーブルで巻いたコイルと鉄ヨークにより構成した電磁石の電磁現象を解明し、交流損失・遮蔽電流磁界低減指針を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線をスパイラル状に巻いた導体であるSCSCケーブルを用いて高速変動高磁界電磁石技術の構築をはかるという独自性の高い研究である。また、周波数200 Hz、磁束密度1 Tの高速変動高磁界を大空間に発生する技術は存在せず、これまでほぼ直流の応用に限定されていた超伝導電磁石の応用領域を200 Hzという高速変動高磁界の発生に大きく広げる可能性を秘めた成果であり、本研究の研究成果の学術的意義は大きい。

さらに、本研究の成果をもとに回転ガントリーの格段の小型化を通して重粒子線がん治療の普及が進むことが期待され、健康長寿社会に貢献するという大きな社会的意義をもつ。

研究成果の概要（英文）：We have developed a conceptual design of high-speed and high-field beam scanning magnets for heavy-ion cancer therapy.

By winding coils using SCSC cables, in which multifilamented and copper-plated high-temperature superconducting coated conductor are multilayered wound around a circular core, we have solved the following bottlenecks: ac loss due to the movement of fluxoids during magnetic field changing, deterioration of magnetic field accuracy due to large antimagnetization caused by the tape shape of the coated conductors, and high terminal voltage due to large interlinkage flux and high frequency. Through a combined approach of experiments and electromagnetic field analyses, we clarified the electromagnetic phenomena of magnets composed of coils wound with SCSC cables and iron yokes, and established guidelines for reducing ac losses and shielding-current-induced fields.

研究分野：応用超伝導

キーワード：超伝導 電磁石 加速器 がん治療 交流 交流損失 遮蔽電流磁界

1. 研究開始当初の背景

最新の重粒子線がん治療では、粒子ビームを上下左右に 200 Hz 程度で高速スキャンし腫瘍を塗りつぶすように照射する(図1)。しかし、銅コイルを用いた高速スキャン電磁石では 0.3 T 程度以下の磁界しか発生できないためビームを振れる角度が小さく、スキャン電磁石から腫瘍までの距離が大きくなってしまい、重粒子線を任意の方向から照射する回転ガントリーの小型化を妨げるなど、治療装置への実装上、大きな制約が生じている。

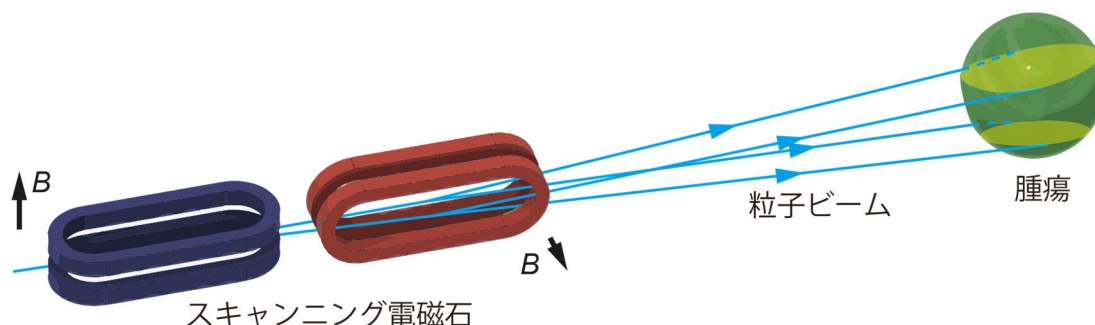


図1 スキャンニング電磁石による重粒子線のスキャン

高い温度で運転できるため使いやすく、高い磁界のもとでも臨界電流が大きい希土類系薄膜高温超伝導線(以下、「薄膜高温超伝導線」)を用いれば、銅線に比べて格段に高い電流密度により電磁石を高磁界下でき、ビームを大きく振れるスキャン電磁石を実現できる可能性がある。しかし、薄膜高温超伝導線によってスキャン電磁石のような高速変動高磁界電磁石を実現するためには、テープ形状に起因する大きな交流損失、テープ形状に起因する大きな遮蔽電流磁界(反磁化)、磁界化に伴う電磁石端子電圧の上昇といったボトルネックが存在する。

研究では、銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線を円形コアの周りにスパイラル状に巻き付け、結合電流ループを短くした SCSC ケーブル(Spiral Copper-plated Striated Coated-conductor cable)(図2)を用いて電磁石のコイルを巻くことでボトルネックの解決を目指す。結合時定数は結合電流ループの2乗に比例することがわかっているので、これにより結合時定数が小さくなるはずであり、また、SCSC ケーブルでは複数本の線を多層に巻き付け集合化することで大電流化が可能でインダクタンスも軽減できる。しかし、SCSC ケーブルで構成したコイルはモノフィラメント線単線で巻いた通常のコイルに比べてずっと複雑な構造をしており、さらに電磁石には非線形な磁気特性をもった鉄ヨークも存在する。従って、SCSC ケーブルで構成した電磁石の電磁現象は複雑で、それが交流損失や遮蔽電流磁界に与える影響は未知であり、これを明らかにすることが必要である。



図2 SCSC ケーブルの概念図

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究の目的として以下の二つを設定した。

目的1. SCSC ケーブルで巻いたコイルと鉄ヨークにより構成した電磁石の電磁現象解明

目的2. 重粒子線がん治療用スキャン電磁石(図3)に適用可能な高速変動高磁界電磁石技術の構築: 周波数 200 Hz、磁束密度 1 T、磁界精度 $\pm 0.2\%$ を目標

目的1については、マルチスケールの電磁現象を解明して、その解明に基づく交流損失・遮蔽電流磁界低減指針の構築を目指した。

目的2については、スキャン電磁石実機の製作は行わないものの、要素技術についての実験研究を踏まえた周波数 200 Hz、磁束密度 1 T、磁界精度 $\pm 0.2\%$ の高速変動高磁界スキャン電磁石の概念設計を提示することを目指した。

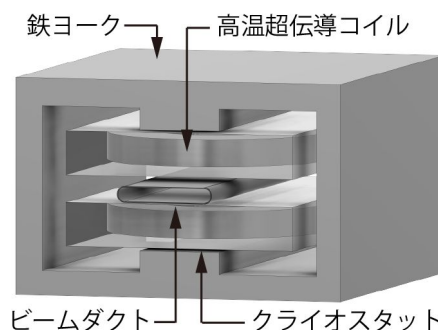


図3 スキャン電磁石の概念図

3. 研究の方法

上述の二つの研究目的に対して、(1)～(4)の4項目の研究を実施した。以下に、各研究項目における研究方法の詳細について説明する。

(1) 高速変動高磁界スキャンニング電磁石への SCSC ケーブル適用性評価

SCSC ケーブルを試作し、結合損失が支配的となる小振幅磁界下の磁化損失 Q_m の周波数 f 依存性を測定し、 Q_m - f 曲線のピークを与える特性周波数 f_c から結合時定数 τ_c を求めるという方法で、本研究で狙う周波数 200 Hz の高速変動電磁石に応用する上で必要と考えられる、特性周波数 2 kHz 以上が実現可能かを評価した。

(2) 集合導体で構成した高速変動電磁石の電磁現象解明

SCSC ケーブルならびに比較用のモノフィラメント線によるケーブルで構成した電磁石を変動励磁したときの電磁界解析を行った。超伝導体の非線形な導電特性と電磁石を構成する鉄ヨークの非線形な磁気特性を考慮した。並行して、電磁石内を模擬した環境下(交流磁界下での交流電流)でケーブル短尺試料の交流損失測定を行った。電磁界解析結果と実験結果を比較検討し、超伝導線内部の電磁現象(電流分布・磁束分布の時間変化)、超伝導線群の電磁現象(線間の電流分布)、超伝導コイルと鉄ヨークの相互作用(鉄の磁化と磁化損失、鉄の磁化による超伝導線の経路する磁界の変化)を解明した。

(3) 高速変動高磁界スキャンニング電磁石の設計

コイルの運転温度で決まる超伝導線の臨界電流密度、コイル中の超伝導線の占積率からコイルの起磁力を設定し磁界解析を行い、1 T、200 Hz の磁界を発生する電磁石を設計した。超伝導化で起磁力を大きくすることにより、可能な限り鉄を減らしたスキャンニング電磁石構成法を追求した。

(4) スキャンニング電磁石の交流損失・磁界精度評価

(3)で設計したスキャンニング電磁石を(2)で電磁現象を解明した SCSC ケーブルで構成するものとしてコイル構造の詳細設計を行い、(2)と同様な電磁界解析によって、スキャンニング電磁石の交流損失、遮蔽電流磁界を考慮した磁界精度を評価した。交流損失が、設定した温度において現実的な冷却システムで冷却できるかどうか、磁界精度 0.2% が達成できるかどうかを検討した。

4. 研究成果

研究の方法で述べた研究項目ごとに、得られた研究成果をまとめる。

(1) 高速変動高磁界スキャンニング電磁石への SCSC ケーブル適用性評価

SCSC ケーブルによって交流損失や遮蔽電流磁界を減らせるかどうかを調べるために、SCSC ケーブルモデルを構築するマルチフィラメント薄膜高温超伝導線ならびに SCSC ケーブルモデルについての、高速変動高磁界スキャンニング電磁石への SCSC ケーブル適用に向けた要件・課題の抽出を行った。図 4 に、コア径 3 mm、線材幅 2 mm、10 フィラメント、銅分厚層厚さ 10 μm の場合の小振幅外部磁界下での磁化損失特性を示す。このときの磁化損失のピークを与える周波数は約 5.45 kHz であり、SCSC ケーブルにおけるマルチフィラメント薄膜高温超伝導線のスパイラル化により、マルチフィラメント薄膜高温超伝導線のフィラメント間の電磁結合が数百 Hz の周波数でも十分解けることを確認した。また、上記の実験結果に基づく解析式により結合損失を、臨界電流に基づく解析式によりヒステリシスを計算し、その和として、周波数 200 Hz、振幅 1 T の磁界下における様々な諸元の SCSC ケーブルの交流損失を評価した。SCSC ケーブルの適用性を評価する目的で、ケーブルの交流損失を積算し、発生磁界 1 T、幅 110 mm、長さ 330 mm の電磁石のコイルの交流損失を評価し、約 1.2 kW という値を得た。

このように、種々のマルチフィラメント薄膜線材の臨界電流・結合時定数・結合損失形状因子の測定結果を用いた解析式によって、スキャンニング電磁石の運転条件における SCSC ケーブルの交流損失を計算することを可能にした。

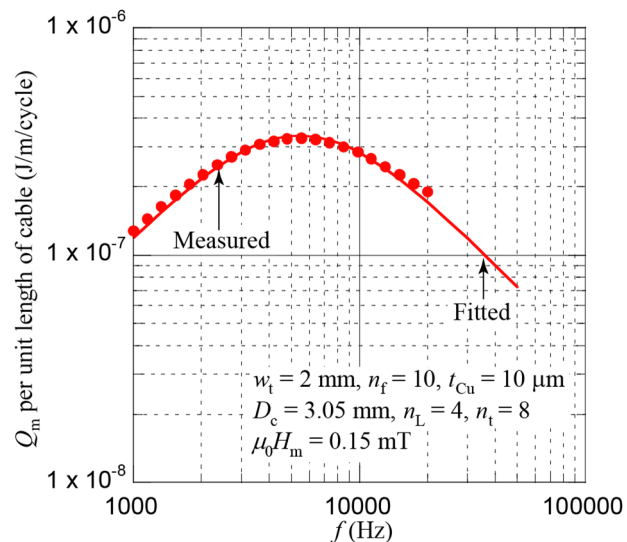


図 4 SCSC ケーブルの結合時定数測定結果

(2) 集合導体で構成した高速変動電磁石の電磁現象解明

別途開発を進めている電磁界解析アルゴリズムを適用して、集合導体で構成した電磁石の電磁現象解明を行うための方法の検討を行った。まず、マルチフィラメント化されていないスパイ

ラル導体である CORC®導体で構成されたコイルを対象として、数値電磁界解析における簡略化手法に関する検討を行った。例えば、スパイラル導体で巻いたコイルにおける隣接するスパイラル導体中の遮蔽電流を考慮しない簡略化を行い、その影響を評価した。図5に、9本の直線状 CORC®導体を並べることで模擬したコイル直線部を対象に、三種類の解析モデルで電磁界解析を行い交流損失を計算した結果を示す。Model 1は9本のケーブルをすべて解析対象としたモデル、Model 2は解析対象とする1本のみ遮蔽電流を考慮し、その他の導体における遮蔽電流を考慮しないモデル、Model 3は1本の導体のみを解析対象とし、周囲の導体は無視したモデルである。この結果から、スパイラル導体で構成されたコイルの交流損失の評価を行う上では、隣接スパイラル導体中の遮蔽電流を無視しても、その影響は小さいことが分かった。

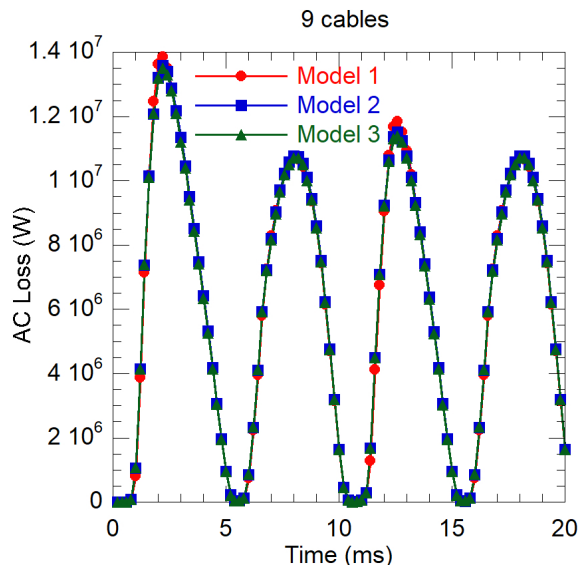


図5 CORC 導体で構成されたコイルにおける交流損失の解析結果のモデル間での差異

SCSC ケーブルを対象とした大規模数値電磁界解析プログラムを構築し、高速スキャンニング電磁石の仕様環境における SCSC ケーブルの全損失を評価した。この解析プログラムでは、大規模解析を行うために階層型行列法を適用し、線材内部における幅方向の周期的な導電率の変化に伴う収束性の悪化に対応するために AMG 法による前処理を適用している。素線幅 2 mm、フィラメント幅 0.2 mm、銅層厚さ 10 μm のマルチフィラメント線を用いたコア径 2.5 mm、層数 13 の SCSC ケーブルの交流損失は、磁界振幅 1 T、電流負荷率 0.5、周波数 200 Hz という使用条件で、モノフィラメント線ケーブルの約 1/10 であった。マルチフィラメント化によりヒステリシス損失は有効に低減され、結合損失も十分小さいことを確認できた。また、SCSC ケーブルの構成・形状、また、電流振幅や磁界振幅などの運転条件と全損失の関係について評価した。結果として、ケーブルの層数や層間距離は実用上問題となるような大きい振幅の外部磁界下では、マルチフィラメント線 1 本当り損失にはほぼ影響しないことが明らかになった。また、SCSC ケーブルの全損失は外部磁界によってほぼ支配され、実用的な高磁界下ではほぼ外部磁界振幅によって損失特性が決定されることを確認した。

また、汎用電磁界解析ソフトウェアによる近似的な方法で遮蔽電流磁界の大きさについて検討し、鉄ヨークがあるスキャンニング電磁石における遮蔽電流磁界は十分小さいことを確認した。図6に、超伝導コイルと鉄ヨーク及び鉄磁極を組み合わせた電磁石の磁界発生領域における磁界分布の計算結果を示す。超伝導コイルにおける遮蔽電流は電磁石の磁界発生領域においてほとんど差を生まないことが確認された。

動的抵抗を測定するための実験装置を構築し、直線状・スパイラル状のモノフィラメント線・マルチフィラメント線の動的抵抗を測定し、SCSC ケーブルを模擬したスパイラル状マルチフィラメント線の動的抵抗が直線状モノフィラメント線の 10 分の 1 程度であることを明らかにした。

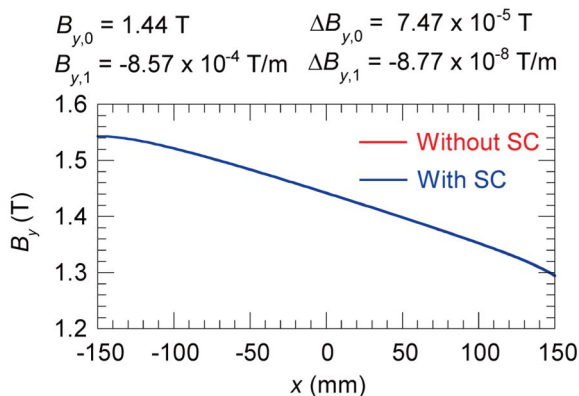


図6 鉄ヨークをもつ電磁石の磁界発生領域における磁界分布の例。遮蔽電流の有無で発生磁界にはほとんど差が見られない。

(3) 高速変動高磁界スキャンニング電磁石の設計

スキャンニング電磁石の概念設計を進め、現在実用化されている常伝導スキャンニング電磁石の諸元をもとに、より高磁界化した場合の磁界発生領域や磁極形状を決定し、汎用電磁界解析ソフトウェアを用いて電磁石の断面形状設計を行った。高温超伝導コイルを適用したスキャンニング電磁石の断面設計結果を図7に示す。このスキャンニング電磁石では、x方向偏向電磁石の磁界発生領域での磁界を 1 T、y方向偏向電磁石の磁界発生領域での磁界を 0.6 T としている。この発生磁界は、現在の常伝導スキャンニング電磁石の 0.3 T (x方向)、0.2 T (y方向) と比較して約 3 倍の磁界強度となっている。y方向偏向電磁石はx方向偏向電磁石の後段に配置されるため、磁極間の距離を大きくとる必要があり、x方向偏向電磁石と同じ磁界強度を発生しようとした場合コイル体格が極めて大きくなるため、y方向偏向電磁石のみ磁界強度を下げた設計を採用している。

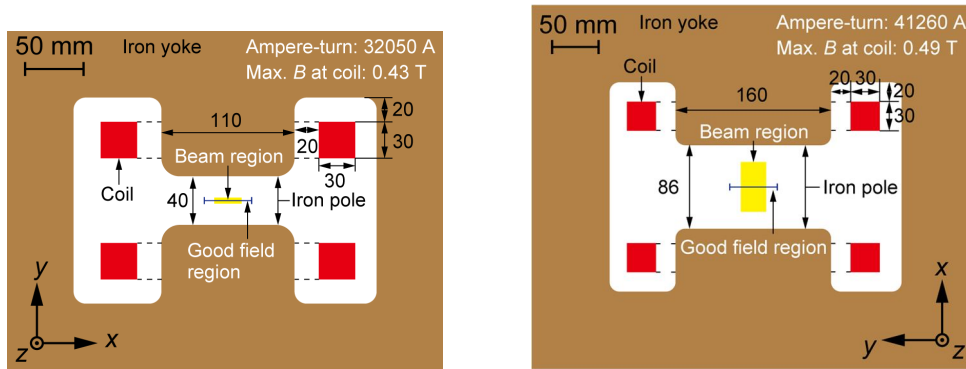


図7 スキャンング電磁石断面の設計結果（左） x 方向偏向電磁石（右） y 方向偏向電磁石

このスキャンング電磁石を採用した場合、照射システム全体が、現在の常伝導スキャンング電磁石を使用している場合と比較してどの程度小型化可能であるかの検討を行った。ビーム偏向電磁石の高磁界化と超伝導スキャンング電磁石の採用により、約40%の小型化が可能であることを示した。この場合、偏向電磁石の発生磁界強度を約70%増加させ、偏向電磁石の長さを約40%短縮する必要がある。

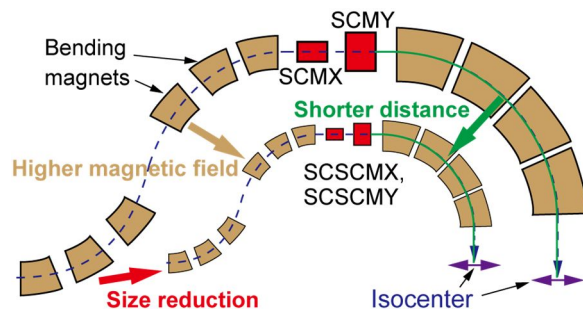


図8 超伝導スキャンング電磁石を採用した場合の照射システム全体の小型化の概念図

(4) スキャンング電磁石の交流損失・磁界精度評価

スキャンング電磁石の冷却方法について、

常圧の液体窒素、減圧した液体窒素、伝導冷却について検討し、発生する交流損失の大きさと超伝導線の臨界電流の点で、減圧した液体窒素による浸漬冷却（約65 K）が妥当であると判断した。

(1)で構築したSCSCケーブルの交流損失の解析式を用い、(3)で設計したスキャンング電磁石の交流損失を計算した。ここでは、コア径3 mm、構成超伝導線20本、テープ幅2 mm、10フィラメント、銅分流層厚さ10 μm のSCSCケーブルを想定し、ケーブル臨界電流が自己磁界下で4.79 kAであると仮定した。このときのコイル位置での通電電流最大時の平均磁束密度は約0.2 Tであり、ここから計算されるコイルでの発生交流損失は、 x 方向偏向電磁石で1.5 kW、 y 方向偏向電磁石で1.2 kWとなった。スキャンング電磁石の運転時間が1日当たり3.5時間であると仮定した場合、コイルの冷却のために消費される液体窒素の総量は、両電磁石合わせて1日当たり約220 Lであり、現実的な量であることを確認した。加えて、鉄ヨーク及び磁極において発生する鉄損は、 x 方向偏向電磁石で1.1 kW、 y 方向偏向電磁石で0.5 kWとなった。

マグネットのインダクタンスは、 x 方向偏向電磁石が0.88 mH、 y 方向偏向電磁石で1.70 mHであり、励磁時発生するコイル端電圧は、両者とも約1.1 kVとなり、コイルの耐電圧の観点からは妥当といえる。電源電圧の観点ではより発生電圧を低減する方が望ましいが、これはキャパシタを挿入することにより実現可能であると考えられる。

また、磁界精度に関しては、(2)での議論と同様に、磁極が磁界分布成型に寄与しているため遮蔽電流磁界はほぼ影響しないことを確認した。

(3)で設計された電磁石に加え、より発生磁界を高くした場合、磁極がない場合についても、損失・磁界精度・照射システム全体のサイズについて検討した。損失・磁界精度に関しては鉄心付きかつ発生磁界の小さい設計が最も小さくなり、照射システム全体のサイズは鉄心付きかつ発生磁界の大きい設計が最も小さくなることを確認した。鉄磁極での鉄損を考えると、(3)で示した電磁石設計が最も現実的であるという結論に至った。磁極をなくした設計は、磁界精度の観点で課題が多いが、発生磁界をさらに高くできる可能性がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yang Li, Yusuke Sogabe, Yoshiyuki Iwata, Naoyuki Amemiya	4. 巻 33
2. 論文標題 Conceptual Design of Scanning Magnets Using HTS Coils Wound With Spiral Copper-Plated Striated Coated-Conductor (SCSC) Cables for Carbon-ion Radiotherapy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5 (4400405)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2023.3243874	査読の有無 無
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 Yang Li, Yusuke Sogabe, Naoyuki Amemiya	4. 巻 33
2. 論文標題 Influence of Shielding Currents in Coated Conductors on Field Quality of Iron-Dominated HTS Magnets Estimated by Numerical Analyses	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5 (8200205)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2023.3251300	査読の有無 無
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 Yusuke Sogabe, Koki Wakabayashi, Naoyuki Amemiya	4. 巻 32
2. 論文標題 Magnetic Field Drifts of Small HTS Dipole Magnet Under Repeated Excitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3141967	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 Yusuke Sogabe, Rikito Takahashi, Naoyuki Amemiya	4. 巻 32
2. 論文標題 Simplified Numerical Electromagnetic Field Analysis Method of Coils Wound With Spiral Coated-Conductor Cables	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.2022.3141974	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18件(うち招待講演 1件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 本多 尚, 江崎 友哉, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之
2. 発表標題 銅複合多芯薄膜高温超伝導線における動的抵抗の数値解析
3. 学会等名 低温工学・超電導学会 第5回超電導応用研究会/電気学会 超電導機器 金属・セラミック合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上垣 柗季, 平野 貴之, 福井 聡, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之
2. 発表標題 磁性体と組み合わせたHTSコイルの交流損失測定法に関する検討
3. 学会等名 第106回2023年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Sogabe, S. Honda, N. Amemiya
2. 発表標題 Numerical electromagnetic field analyses of SCSC cables carrying dc current under ac magnetic fields aiming to flux pump applications
3. 学会等名 The 36th International Symposium on Superconductivity (ISS 2023 (国際学会))
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 N. Amemiya
2. 発表標題 Fabrication, characterizations, and design studies of SCSC cables
3. 学会等名 International Workshop on Coated Conductors for Applications (CCA 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 Y. Li, Y. Sogabe, Y. Iwata, N. Amemiya
2 . 発表標題 Conceptual design of scanning magnets using HTS coils wound with spiral copper-plated striated coated-conductor (SCSC) cables for carbon-ion radiotherapy
3 . 学会等名 2022 Applied Superconductivity Conference (ASC 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Li, Y. Sogabe, N. Amemiya
2 . 発表標題 Influence of shielding currents in coated conductors on field quality of iron-dominated HTS magnets estimated by numerical analyses
3 . 学会等名 2022 Applied Superconductivity Conference (ASC 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Sogabe, T. Hattori, N. Amemiya
2 . 発表標題 Large-scale electromagnetic field analysis for a finite-long spiral copper-plated striated coated-conductor cable without translational symmetry and its applications
3 . 学会等名 2022 Applied Superconductivity Conference (ASC 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 M. Shigemasa, A. Takahashi, Y. Sogabe, N. Amemiya
2 . 発表標題 AC loss measurements of copper-plated multifilament coated conductors carrying ac transport current and exposed to ac magnetic field
3 . 学会等名 2022 Applied Superconductivity Conference (ASC 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Sogabe, N. Amemiya
2. 発表標題 Experiments and numerical analyses of dynamic resistivities in copper-plated multifilament coated conductors
3. 学会等名 2022 Applied Superconductivity Conference (ASC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李陽, 曾我部友輔, 岩田佳之, 雨宮尚之
2. 発表標題 SCSC ケーブルで構成されるスキャニング電磁石の概念設計
3. 学会等名 第103回2022年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 曾我部友輔, 陳妙しん, 雨宮尚之
2. 発表標題 銅分流層複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線の動的抵抗測定
3. 学会等名 第103回2022年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 陽, 曾我部 友輔, 雨宮 尚之
2. 発表標題 遮蔽電流が鉄支配型高温超伝導マグネットの発生磁界に与える影響の解析的評価
3. 学会等名 第104回2022年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mao Shigemasa
2. 発表標題 Magnetization loss measurements of various copper-plated multifilament coated conductors
3. 学会等名 The 15th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Sogabe
2. 発表標題 Numerical electromagnetic field analyses and measurements field quality of HTS dipole magnets under repeated excitation
3. 学会等名 The 15th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yusuke Sogabe
2. 発表標題 Simplified numerical electromagnetic field analysis method of coils wound with spiral coated conductor cables
3. 学会等名 The 15th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 曾我部 友輔
2. 発表標題 CORC 導体で構成されるコイルを対象とする数値電磁界解析における簡略化手法に関する検討
3. 学会等名 第101回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 Y. Sogabe, M. Yasunaga, Y. Li, Y. Ishi, and N. Amemiya
2. 発表標題 Comparison of AC loss of superferric magnets consisting of HTS coils wound with stack cables and wound with CORC wires by using 3D electromagnetic field analyses
3. 学会等名 2020 Applied Superconductivity Conference (ASC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Sogabe and N. Amemiya
2. 発表標題 A quasi-3D model for SCIF calculations of accelerator magnets wound with CORC wires
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Superconductivity (ISS 2020) (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
研究 分担者	曾我部 友輔 (Sogabe Yusuke) (40847216)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

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
---------	---------