

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23513

研究課題名（和文）高温超伝導マグネットの変動励磁時の発生磁界の測定と電磁界解析の比較

研究課題名（英文）Comparison of measurements and electromagnetic field analyses of time-changing magnetic field of an HTS magnet

研究代表者

曾我部 友輔（Sogabe, Yusuke）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：40847216

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：高温超伝導線で巻かれたコイルから構成される小規模の高温超伝導マグネットを対象とし、粒子加速器用マグネットに要求される運転パターンを模擬した複雑な変動励磁パターンのもとで実験的に磁界測定を行った。

さらに、別途構築された精密な電磁界解析モデルを適用し、高温超伝導マグネットを構成する高温超伝導線内部の電磁現象である遮蔽電流の変動励磁時の振舞いを可視化した上で、それが高温超伝導マグネットの発生磁界に与える影響を明らかにし、実験により得られた発生磁界と比較した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高温超伝導技術を加速器用マグネットに応用する際に問題となる変動励磁時の高温超伝導マグネットの発生磁界の実験的・解析的評価は世界初の試みであり、本研究の成果は、将来的な高温超伝導技術の高エネルギー物理学用加速器や医療用加速器への応用の足掛かりとしての学術的意義をもつ。高エネルギー物理学用加速器への高温超伝導マグネットの適用は素粒子研究をさらに進展させるために必要不可欠とされており、医療用加速器への高温超伝導マグネットの適用は重粒子線がん治療をさらに普及させるための必要条件と位置付けられており、本研究は高温超伝導マグネットの特性に関する基礎研究という意味での社会的意義をもつ。

研究成果の概要（英文）：A small-scale high-Tc superconducting magnet consisting of coils wound with coated conductors was experimentally measured under repeated excitations, which simulate the operation pattern required for particle accelerator magnets.

In addition, a precise electromagnetic field analysis model was applied to visualize the behavior of the shielding current, which is an electromagnetic phenomenon inside the coated conductors, during repeated excitations, and to clarify the influence of the shielding current on the magnetic field quality of the magnet. The results were compared with the experimentally measured magnetic field.

研究分野：応用超伝導

キーワード：高温超伝導 マグネット 磁界精度 磁界測定 電磁界解析

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導マグネットのシンクロトロンなどの粒子加速器への応用を目指した研究は、国内外の様々な研究機関で進められている。応用の目標とされている粒子加速器の多くは高エネルギー物理学や重粒子線がん治療用であり、高温超伝導技術の適用によってビームを偏向させるマグネットを高磁界化し、粒子ビームの高エネルギー化、粒子加速器システム全体の小型化を実現することを目的としている。

高温超伝導技術の粒子加速器用マグネットへの応用を実現する上で、遮蔽電流と呼ばれる現象が課題となる。現在市販されている高温超伝導線のほとんどは、幅数 mm の金属テープ上に厚さ 1-2 μm の高温超伝導層を形成した薄膜高温超伝導線である。超伝導線に変動磁界が印加されると電磁誘導により渦電流（遮蔽電流）が誘導され、超伝導線内に不均一な電流密度分布が生じる（図 1）。この遮蔽電流の減衰は極めて遅く、超伝導線の反磁化として残り続けるため、マグネットの磁界精度を悪化させる要因となる。遮蔽電流によって発生する付加的磁界を遮蔽電流磁界と呼ぶ。遮蔽電流は超伝導線に通電されている電流、超伝導線位置での磁界の強度・印加角度などに依存するため、加速器用マグネットの内部でもその分布は一樣ではない上に、例えば図 2 に示すような変動励磁中の各時刻においてもその振舞いは異なる。これは、変動励磁に伴いマグネットを構成する高温超伝導線に通電されている電流値が変化すること、ならびに高温超伝導線が感じる磁界が変化し誘導電圧が発生することに伴う過渡的現象が生じることに起因する。このような複雑な運転パターンにおいて、発生磁界を空間的・時間的に安定に発生することが求められる中で、遮蔽電流磁界は極めて重要な課題となっている。

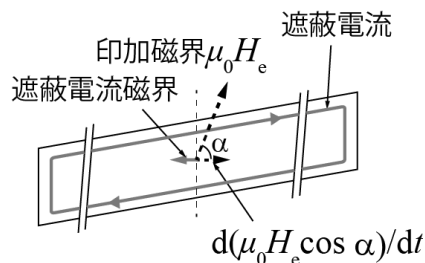


図 1 薄膜高温超伝導線における遮蔽電流及び遮蔽電流磁界

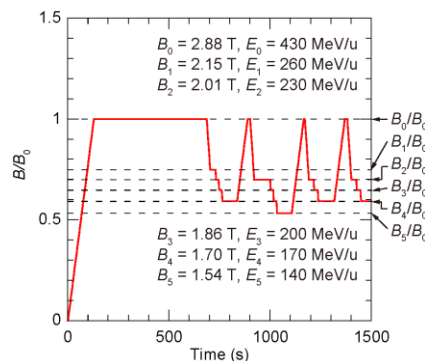


図 2 加速器用マグネットの運転パターン（変動励磁）の一例

2. 研究の目的

粒子加速器用高温超伝導マグネットにおける遮蔽電流磁界の振舞いの予測、抑制を可能とするために、変動励磁された高温超伝導マグネットにおける磁界測定および電磁界解析による知見の蓄積が必要である。本研究では、高温超伝導マグネットを粒子加速器用マグネットに要求される運転パターンで運転した場合の遮蔽電流磁界の振舞いを、小規模の高温超伝導マグネットを対象とした磁界測定によって明らかにすること、並びに比較のための電磁界解析を実施し、実験では直接観測することのできない高温超伝導線内部の現象である遮蔽電流の振舞いを可視化し、高温超伝導マグネット各位置における遮蔽電流が遮蔽電流磁界にどのように寄与するかについての理解を深め、粒子加速器用高温超伝導マグネットにおける遮蔽電流磁界の抑制方法確立につなげることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

2. に示した目的に向け、目標 A、目標 B を達成する。

目標 A 小型の高温超伝導マグネットを変動励磁した場合に遮蔽電流磁界が空間的・時間的磁界精度に与える影響の実験的測定

目標 B 実験で使用した変動励磁パターンに基づいた電磁界解析の実施

目標 A については、小型の高温超伝導マグネットを変動励磁した場合の多極磁界成分測定を行い、磁界精度を評価する。目標 B については、目標 A における測定対象の小型高温超伝導マグネットを対象とした電磁界解析を行い、超伝導線内部の遮蔽電流が磁界精度に与える影響を可視化する。

4. 研究成果

(1) 小型高温超伝導マグネットを変動励磁した場合の磁界精度測定

重粒子線がん治療に用いる回転ガントリーに搭載されるマグネットの運転パターンを意識した繰り返し変動励磁パターンを設定し、小型高温超伝導マグネットをこの励磁パターンに沿って運転した場合の磁界精度測定を行った。このとき、特に一定磁界を発生する変動励磁でない場合との違い、及び変動励磁中の再現性及び安定性に着目した。

ここでは、以下の5種類の異なる運転パターンを設定した。

- A. 100 Aまで励磁、10時間保持（一定励磁）
- B. 150 Aまで励磁後、100 Aまで減磁、6時間保持（一定励磁）
- C. 0 Aから150 Aまで励磁した後、50 Aまで25 Aごとに10秒間電流を保持するステップを設けながら減磁、再度150 Aまで励磁後10秒保持してからステップを設けながら減磁を繰り返す（変動励磁）
- D. 0 Aから150 Aまで励磁した後、100 Aまで25 Aごとに10秒間電流を保持するステップを設けながら減磁、再度150 Aまで励磁後10秒保持してからステップを設けながら減磁を繰り返す（変動励磁）
- E. 0 Aから150 Aまで励磁した後、50 Aまで25 Aごとに10秒間電流を保持するステップを設けながら減磁、再度150 Aまで励磁後60秒保持してからステップを設けながら減磁を繰り返す（変動励磁）

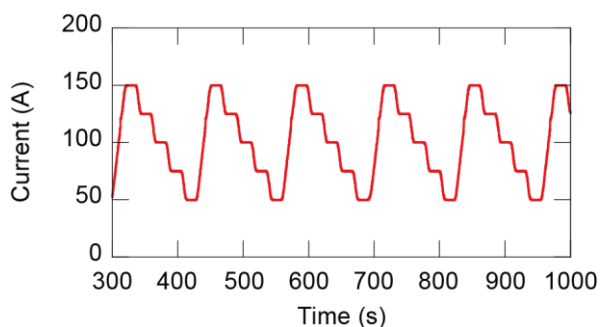


図3 変動励磁の例（運転パターンC）

全ての運転パターンについて、電流のランプアップまたはランプダウン速度は5 A/sとした。

測定対象のマグネットおよび測定システムの外観図を図4に示す。また、測定対象のマグネットの諸元を表1に示す。磁界測定は回転ピックアップコイル法を用いて行い、多極磁界成分を測定する。ピックアップコイルが磁界中を回転することによりコイルに電圧が誘導され、その電圧をフーリエ展開することによって多極磁界成分が得られる。回転ピックアップコイルは3つのコイルから構成され、二つのコイルを逆直列に接続したコイルによって二極磁界成分を打ち消し、高次多極磁界成分のみを測定する。残りの一つのコイルによって二極磁界成分を測定する。

運転パターンAからEまでの100 Aにおける多極磁界成分測定結果を図5に示す。なお、二極磁界成分 B_1 は通電電流で規格化しており、六極磁界成分は二極磁界成分で規格化し、10,000倍している。運転パターンCからEまでの変動励磁の結果については、複数回の減磁中の100 Aステップにおける平均値を、各ステップの時刻に対してプロットしている。この結果から、一定励磁と変動励磁を比較した場合、変動励磁した場合の方が磁界の変動が大きいことが確認された。これは、変動励磁によって超伝導線に侵入した磁束の線材中心への拡散が加速されるためであると考えられる。ただし、今回対象としたマグネットでの多極磁界成分の変動は発生二極磁界成分の0.1%以下であり、回転ガントリー用マグネットに要求される磁界精度という観点では基準を満たしている。

次に、変動励磁である運転パターンCからEについて、励消磁の繰り返し回数に対する二極磁界成分の変化を図6に示す。ここでは、減磁中の100 Aのステップにおける平均値の変化を示している。運転パターンCとDはよく一致しているが、運転パターンEはオフセットが重畳している。これは、毎回の測定の前後で行っていたマグネットの熱サイクルによるコイル変形の影響と考えられ、オフセットを除去す

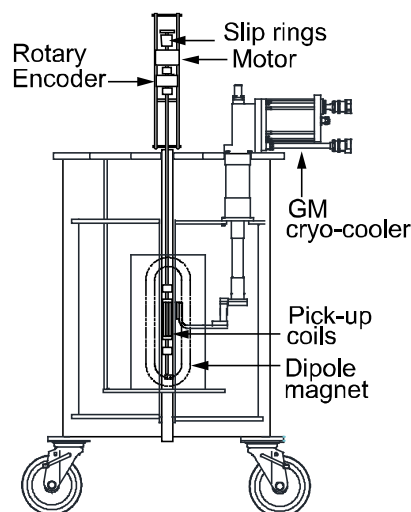


図4 測定システムの外観図

表1 測定対象のマグネットの諸元

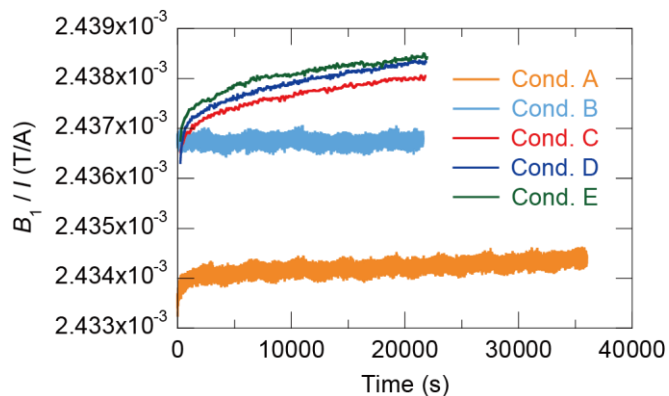
マグネット	
コイル形状	積層レーストラックコイル
直線部長さ	250 mm
コイル内径	96 mm
ターン数 / コイル	110
極間距離	55.4 mm
二極磁界成分	250 mT @ 100 A
運転温度	30 K（伝導冷却）
超伝導線	
製造者	SuperPower 社
線材幅	4 mm
線材厚さ	0.093 mm
超伝導層厚さ	1.7 μ m

ば運転パターン C から E は極めてよく一致することが確認された。このことから、繰り返し変動励磁に伴う遮蔽電流磁界の時間変化は、繰り返しの回数に強く依存しており、運転サイクルのパターン（電流最低値、フラットトップ区間の長さ）の影響は小さいということが明らかになった。すなわち、図 5 の結果からも指摘されたように、変動励磁ごとに発生する高温超伝導線内の磁束の拡散が、変動励磁に伴う遮蔽電流磁界の時間変化を支配していることが、この結果からもわかる。

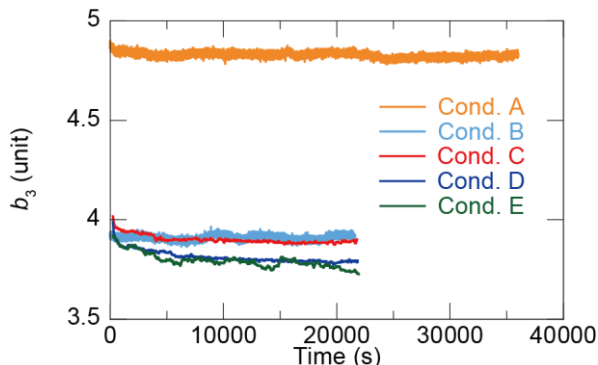
(2) 小型高温超伝導マグネットを対象とした電磁界解析

(1) で確認された変動励磁に伴う遮蔽電流磁界の時間変化が数値電磁界解析においても再現されることを確認するため、大規模電磁界解析を実施した。解析においては電流ベクトルポテンシャル T を変数とする T 法を薄板近似と合わせて用い、マグネット全体の三次元形状を考慮するため階層型行列法を採用した。超伝導線の導電特性は、マグネットの巻線に使用した実際の高温超伝導線の電界-電流密度特性の測定結果を定式化して用いた。

運転パターン C 及び D での、減磁中の 100 A のステップにおける二極磁界成分の平均値の解析結果を図 7 に示す。解析に要する時間の観点から、磁界測定時ほどの繰り返し回数を対象とした解析は実現できなかった。この結果から、解析結果においても実験結果と類似する時間変化の傾向が表れていることが確認されたが、運転パターン C と D での一致はそれほど顕著ではなかった。実験では、解析において考慮されていない要素として、変動励磁に伴うマグネット内の局所的な温度変化が生じている可能性があり、将来的に伝導冷却下での変動励磁中におけるマグネット内温度分布に関する検討が必要であると考えられる。また、各ステップの 10 秒間における磁界の安定度を数値電磁界解析で評価したところ、発生二極磁界成分に対して 10^{-4} 程度の変化しか発生していないことが明らかになった。これは全てのステップに対して言えることであり、繰り返し変動励磁に伴う遮蔽電流磁界の時間変化は、励消時を繰り返すことに伴ってステップ中の安定性が改善したことによるものではないことが確認された。



(a) 二極磁界成分



(b) 六極磁界成分

図 5 全条件の 100 A における磁界の時間変化比較

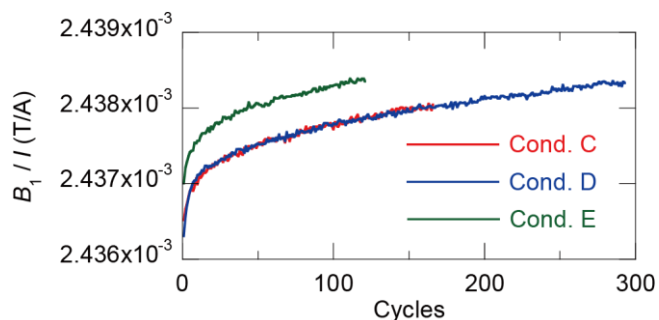


図 6 繰り返し励消磁回数に対する二極磁界成分の変化の測定結果

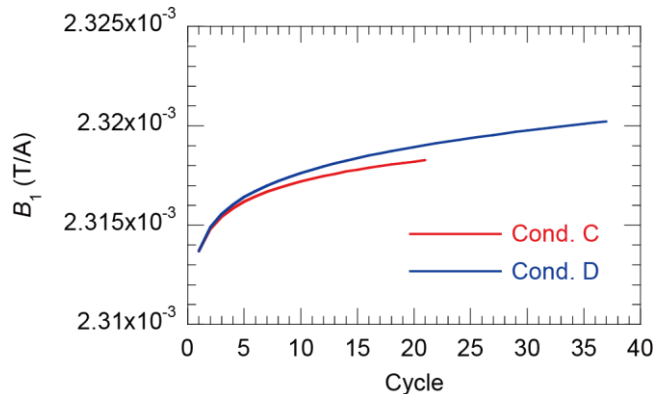


図 7 繰り返し励消磁回数に対する二極磁界成分の変化の解析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yusuke Sogabe and Naoyuki Amemiya
2. 発表標題 Behavior of shielding-current-induced field in a small HTS magnet under time-dependent field generating operation
3. 学会等名 Joint KU - VUW Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Sogabe, Koki Wakabayashi, and Naoyuki Amemiya
2. 発表標題 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 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 2020年

1. 発表者名 K. Wakabayashi, Y. Sogabe, and N. Amemiya
2. 発表標題 Measured and calculated magnetic field of a small dipole magnet wound with coated conductors during repeated ramping up/down operation
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 曾我部友輔, 若林洸希, 雨宮尚之
2. 発表標題 伝導冷却された小型高温超伝導二極マグネットの変動励磁下での発生磁界測定
3. 学会等名 第99回2020年度春季低温工学・超電導学会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 曾我部友輔, 若林洸希, 雨宮尚之
2. 発表標題 繰り返し変動励磁下での小型高温超伝導二極マグネットの発生磁場の実験及び解析による評価
3. 学会等名 第100回2020年度秋季低温工学・超電導学会講演会
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
---------	---------