

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760260

研究課題名(和文) マルチスケール電磁場解析を用いた高温超伝導マグネット設計の高精度化に関する研究

研究課題名(英文) High Accuracy Computation for Design of High Temperature Superconducting Magnet using Multiscale Electromagnetic Analysis

研究代表者

植田 浩史 (Ueda, Hiroshi)

大阪大学・核物理研究センター・特任助教

研究者番号：10367039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、高温超伝導コイルを応用した加速器やNMR、MRIといった機器の開発研究が盛んに行われている。しかし、コイルに巻線する超伝導線材がテープ形状であるため、遮蔽電流による不整磁場がコイル設計磁場の時間的安定性や空間的均一性を乱すことになる。そこで、3次元有限要素法および高速多重極法を組み合わせ、非線形な超伝導特性を考慮可能な電磁場数値解析プログラムを開発した。また、実験と数値計算によって、不整磁場の影響の定量的な評価を行い、遮蔽電流の振舞いを明らかにした。

本成果は、遮蔽電流の影響を軽減し、空間均一・時間安定磁場を発生する高温超伝導コイル設計の検討を可能にするものである。

研究成果の概要(英文)：In recent years, the research and development on the applications of REBCO superconducting coil to the high field magnets (e.g. accelerator, NMR, and MRI) attract considerable attention. In REBCO coil, large screening currents are induced in the winding tape by the radial component of the magnetic field. As a result, the irregular field generated by the screening currents affects the high-accuracy magnetic field distribution spatially and temporally. In this study, we developed a novel numerical simulation based on the finite element method, boundary integral equation, and fast multipole method. And, we numerically and experimentally evaluated the irregular field generated by screening currents in REBCO coil. We clarify the effect of the screening currents on the magnetic field distribution.

This work contributes to the design of high temperature superconducting magnet with reduction of field generated by screening current, the homogeneity and temporal stability of field.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：高温超伝導コイル 遮蔽電流 不整磁場 磁場均一性 磁場時間安定性 電磁場解析

1. 研究開始当初の背景

核磁気共鳴 (NMR)、磁気共鳴イメージング (MRI) 用超伝導マグネットにおいて、発生磁場の高磁場化は測定速度および測定対象となる核種の同定感度を向上させる。このような磁場は常伝導体 (銅やアルミ) を使った電磁石や永久磁石では発生できず、現在は金属系の低温超伝導線を使ったマグネットにより発生している。世界では 30 T 超の高磁場を用いた 1.3 GHz NMR の検討が行われているが、30 T 超の高磁場では金属系の低温超伝導線は超伝導性を示さなくなってしまうため、このような超高磁場 NMR マグネットの実現には、高磁場中でも優れた超伝導性を示す高温超伝導線の利用が有効とされている。また、加速器用マグネットにおいても、発生磁場の高磁場化はコンパクトな設計を可能にし、高温超伝導化により運転温度を高く設定 (20~40K) できることから、高効率・高安定性が期待できる。

以上のような高磁場化を指向した次世代 NMR/MRI 用超伝導マグネットあるいは加速器用マグネットに用いる高温超伝導線材として、長尺化の進展が著しいビスマス系 (以下、Bi 系) 超伝導線材と希土類系 (以下、RE 系あるいは REBCO) 超伝導線材の 2 種類が挙げられる。特に RE 系超伝導線材は低温超伝導材料 (金属系超伝導材料) に比べて極めて高い優位性 (機械的特性、熱的安定性など) を持つものであり、次世代超伝導材料として、日米などを中心に熾烈な開発競争が展開されている。これまでの国内外の REBCO 超伝導線材のマグネット応用の研究開発は電力機器応用として SMES コイルにおいて進展しているが、今後は産業用・医療用マグネット応用へ展開していくものと考えられる。その際、従来の電力応用にはない課題が「磁場精度」である。SMES 用超伝導コイルの開発では、磁場はエネルギーの蓄積を目的としているため「高磁場・コンパクト」なコイルの技術開発に主眼がおかれ、空間的・時間的な磁場精度は要求されなかった。一方、NMR や MRI、加速器用マグネットの発生磁場は空間的・時間的に極めて高い均一度 (NMR : ~ppm, 加速器 : ~ 10^{-4}) が要求される。しかし、REBCO 超伝導線材はテープ形状を有していることから、マグネットの励磁・減磁の際、テープ面に対して垂直な磁界がもたらす線材中の遮蔽電流は輸送電流が発生させる磁場分布を変化させる。また、遮蔽電流は磁束クリープによって時間とともに変化するため、磁界の分布は時間的にも変化する。このように磁界分布の変化はテープ線材から成る超伝導コイルにおいて磁場の空間均一性、時間的安定性を低下させることが問題となっている。

2. 研究の目的

背景で述べたように高温超伝導マグネットの高精度磁場を実現する際の問題として、

遮蔽電流により誘導される磁場 (以下、遮蔽電流磁場) がある。高温超伝導線材はテープ形状を有していることからテープ面に対して垂直方向の磁場によって長時定数の遮蔽電流が誘導される。マグネットでは、テープ面がマグネットの発生中心磁場方向と平行になるように巻かれるため、マグネットの上下端部ではテープ面を貫く磁場が大きく、遮蔽電流が顕著に誘導され、それによって生じる磁場がマグネットの設計磁場に影響を及ぼし、発生磁場の空間的均一性や時間的安定性を損なう可能性がある。しかし、この超伝導線材内部のミクロスケールの電磁現象を直接実験的に測定することは不可能である。また、数値解析においても、従来の有限要素法 (FEM)、境界要素法 (BEM)、差分法 (FDM、FDTD) といった数値計算手法をそのまま適用した場合、1) REBCO 超伝導線材が持つ高いアスペクト比 (10 mm 幅に対して、超伝導層の厚さは 0.5~2.0 μm 程度) によりモデルが大規模化し、数十万元の連立方程式を解く必要がある、2) 超伝導体の抵抗は完全には零でなく、電流密度が臨界電流密度に近づく、ゆるやかに抵抗が発生するという高温超伝導体固有の特性があり、非常に非線形性が強い、非線形計算の反復計算に時間がかかる、などが問題となる。本研究ではミクロレベルの現象である超伝導線材内の電流分布からマクロレベルの現象であるマグネットの電磁場分布まで対象にし、高温超伝導マグネットの遮蔽電流の影響を評価する。

3. 研究の方法

計算科学における新たな理論開発と計算機科学による高速化・並列化のための実装とを組み合わせるにより、超伝導マグネット設計においても FEM、BEM といった数値計算手法が広く活用されるようになってきた。しかし、高温超伝導マグネットの研究開発はまだ緒に就いたばかりで、従来の低温超伝導マグネット設計の延長線上で議論されている。前述したように、高温超伝導マグネットでは遮蔽電流磁場が顕著に現れることが最大の問題となるが、この現象を予測し、マグネット設計に取り込むまでには至っていない。これは、超伝導線材内の電流がマイクロオーダーの空間に分布するため、精密な磁場解析が難しいためである。本研究では、これまで筆者が開発した「電磁界解析手法 (有限要素法・境界要素法・高速多重極法)」を元に、超伝導特性や電流分布といった線材のミクロレベルと巻線やコイルなどのマクロレベルの特性を対象に解析を行い、実際の高温度超伝導コイルへの適用し問題の解決を図った。

4. 研究成果

(1) 解析手法およびプログラムの開発
① 薄膜超伝導線材の電磁場解析の定式化
REBCO 超伝導線材は高いアスペクト比を

持つため、コイル巻線は薄い線材と絶縁材や含浸材の多重積層構造になる。このような積層構造を持つコイルの高精度磁場解析においては、微視的な構造を考慮する必要がある。このような積層構造を忠実にメッシュ分割した場合、要素数は膨大となり、消費メモリや計算時間の観点で実用的な解析は困難である。そこで、必要な精度を確保しつつ、効率よく計算するため、積分方程式、高速多重極法や超伝導特性を考慮可能な非線形有限要素法を組み合わせた数値解析プログラムを開発した。数値計算において REBCO テープは、テープ幅広面に平行な向きに電流だけを考慮する薄膜近似を用いる、コイル巻線は 3 次元形状を考慮する、テープ間の磁気的結合を考慮する、といった点を考慮して定式化した。

電流ベクトルポテンシャルの定義、Ohm の法則、Faraday の法則、Biot-Savart の法則に従って、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{T} \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbf{B}_{\text{eddy}}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t} \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_{\text{ex}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J}' \times \mathbf{R}}{R^3} dV' \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{J} 、 \mathbf{T} 、 \mathbf{E} および ρ はそれぞれ電流密度、電流ベクトルポテンシャル、電界、超伝導層の抵抗率である。また、 \mathbf{B} 、 \mathbf{B}_{eddy} および \mathbf{B}_0 はそれぞれ、正味の磁場、渦電流による磁場、外部磁場である。 \mathbf{R} はソース点から観測点へ方向へのベクトルである。式(1)~(4) および線材厚み方向で電磁界が一様であることから、以下の支配方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & \{\nabla \times \rho(\nabla \mathbf{T} \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n} \\ & + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla \mathbf{T}' \times \mathbf{n}') \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS' \\ & = -\frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 d は超伝導層の厚みである。 \mathbf{T} と \mathbf{T}' はそれぞれ観測点とソース点におけるテープ幅広面垂直方向の電流ベクトルポテンシャル成分、 \mathbf{n} と \mathbf{n}' はそれぞれ観測点とソース点のテープ幅広面垂直方向の単位ベクトルである。 d は超伝導層の厚みである。積分範囲 S は超伝導体の全領域である。

超伝導の電流-電圧特性は n 値モデルを用いた。

$$\mathbf{E} = E_c \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c} \right)^n \frac{\mathbf{J}}{|\mathbf{J}|} \quad (6)$$

J_c は臨界電流密度を意味し、 E_c は臨界電流の定義電界である。式(6)より、超伝導層の抵抗

ρ は次のように書ける。

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c} \right)^n \frac{J}{|\mathbf{J}|} \quad (7)$$

超伝導の電流-電圧特性については、他のモデル（ビーンモデル、パーコレーションモデル）も対応可能である。超伝導特性は非常に強い非線形性を示すため、ニュートンラフソン法では反復回数が増加し、場合によっては収束しない可能性がある。そこで、直線探索を含むニュートンラフソン法を用いることで、収束特性を改善した。

②高速多重極法の適用

式(5)の定式化では、超伝導線材外の空間領域は、積分方程式を利用しているため、要素分割は不要であり、精度良く計算が可能である。しかし、左辺第 2 項の積分範囲は解析領域全体に亘るため、境界要素法と同様な計算手順が必要になる。筆者は、多体間の相互作用の近似値を高速計算する手法として研究されてきた高速多重極法（FMM: Fast Multipole Method）を式(5)の積分計算に適用した。高速多重極法は分割統治アルゴリズムと場の多重極/局所展開を利用して、必要な精度を確保しつつ、多体間の相互作用の近似値を高速計算する手法である。例えば、多重極法によってある点でのポテンシャルを評価する場合、評価点の近傍にある粒子からの寄与とそれ以外の粒子からの寄与との二つに分ける。近傍からの寄与は直接計算し、その他の粒子からの寄与は多重極展開を用いて効率よく計算する。3 次元の場合、近傍であるか否かを定めるために、全ての粒子を含む立方体を考え、それを順次分割して得られるセルを作るツリー構造を利用する。式(5)の積分方程式に高速多重極法を用いることで、積分計算でメモリ容量を節約し、高精度かつ高速に計算できる。

(2) 精度の確認

コイルのパンケーキ巻構造を考慮して高速多重極法で計算した磁場分布から求めた結果と実際の巻線と同じようにテープ線材を離散配置して、線材に一様電流が流れているとして Biot-Savart の法則で計算した結果を比較することにより、 10^{-4} の精度で計算されることを確認した。

(3) 変動磁場試験と解析と比較

本研究で開発した数値解析プログラムの妥当性を評価するために、実験との比較を行った。実験結果については、早稲田大学石山敦士教授のご好意により提供して頂いた。

①REBCO モデルコイル

遮蔽電流磁場の計測に用いたコイルは REBCO テープにより製作したダブルパンケーキコイルである。REBCO コイルの写真を図 1 に示す。上下のパンケーキコイル巻数はそれぞれ 34 ターンずつであり、内径 219 mm、外径 240 mm である。1 nV/cm 基準、液体窒

素浸漬冷却 (77 K) 下におけるコイルの I_c 及び n 値はそれぞれ 100 A, 40 であった。REBCO テープの最大幅および最大厚みはそれぞれ 10.2 mm, 315 μm である。

②実験装置・方法

外部磁場を印加する際に用いた LTS マグネットと REBCO コイル, 磁場計測点の位置を図 2 に示す。遮蔽電流磁場はホール素子を用いて, 図 2 の(1)-(4)の 4 点で評価した。遮蔽電流磁場はテープ面に対して垂直成分の磁場変化によって誘導される。そこで, 自己磁場による垂直成分の磁場が大きい上段コイルの上部においてコイル軸方向成分(1)と径方向成分(2)を, 自己磁場による垂直成分の磁場が小さい上段コイルの下部においてコイル径方向成分(3)と軸方向成分(4)を磁場計測点とした。

本実験は, 経磁場の変化と遮蔽電流磁場の影響を評価するために, 変動磁場試験を行った。ただし, 磁場の向きは図 2 が示すように z 方向および r 方向の磁場を正とした。

③考察

図 2 で示した磁場計測点(3)(4)における外部磁場がない状態での変動磁場試験と解析結果および線材内電流分布をそれぞれ図 3, 図 4 に示す。また, 外部磁場を印加した状態での変動磁場試験と解析結果および線材内電流分布をそれぞれ図 4, 図 5 に示す。横軸に通電電流を, 縦軸に遮蔽電流磁場を取っており, 実験結果をプロットで, 解析結果を実線で示している。図 3, 5 とともにヒステリシス特性を示している。図 3 より, 電流を通電することによって磁場計測点(3)(4)では励磁磁場と逆方向の負の向きの遮蔽電流磁場が発生している。REBCO コイルに 0 A から +80 A を通電する際, 自己磁場の増加に伴い, 各磁場計測点で遮蔽電流磁場が増加し, 50-60 A で遮蔽電流磁場は飽和した。飽和後は電流通電とともに遮蔽電流磁場が減少している。次に, REBCO コイルの通電電流を +80 A から 0 A へ減少させた際, 50 A 付近で遮蔽電流磁場の値が 0 Gauss を通過し, 遮蔽電流磁場の向きが反転した。その後, 通電電流が 0 A になっても, 遮蔽電流が存在するため, 遮蔽電流磁場は残っている。REBCO コイルへの励磁初期は径方向磁場がテープ線材両端から磁場侵入が起こり, 図 4 のように通電電流および遮蔽電流がテープの両端で流れる。通電電流の増加とともに, 径方向磁場が線材の内側へと徐々に侵入していく。一方, テープ内で通電電流が流れる領域が増加し, 遮蔽電流が流れる領域が減少していき, 結果として遮蔽電流磁場が飽和する。減磁については, 励磁の際と逆向きに遮蔽電流が流れることで説明できる。遮蔽電流磁場が 0 Gauss になったところは, 減磁による遮蔽電流磁場が支配的になった点であるといえる。

図 5 より, 通電開始時点 (図中の start 点) において, 外部磁場印加により軸方向成分の磁場計測点(4)では励磁磁場と逆方向の負で



図 1 Y系コイル

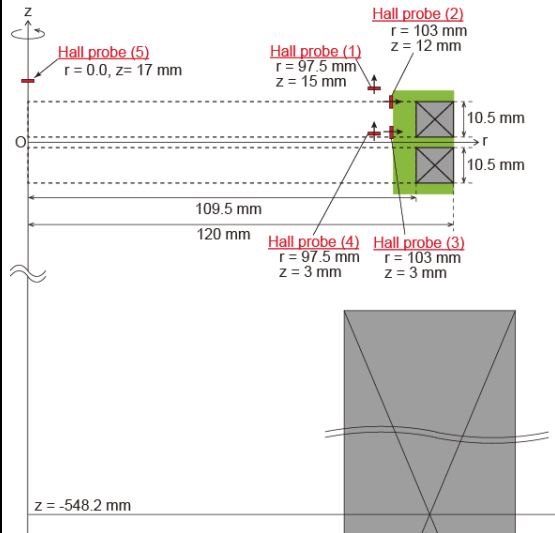
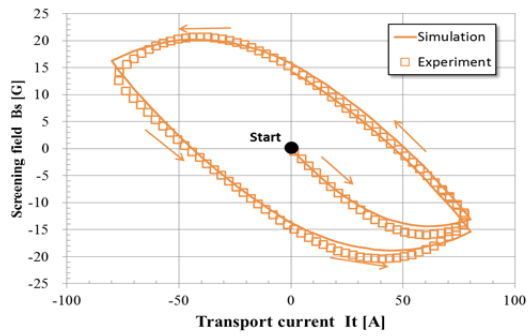
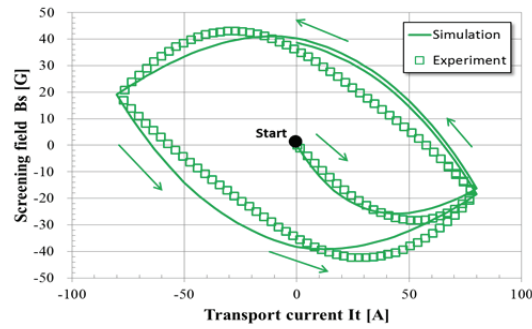


図 2 実験装置の概略図と磁場計測点

ある -8 Gauss の遮蔽電流磁場が, 径方向成分の磁場計測点(3)では励磁磁場と同じ方向の正である 12 Gauss の遮蔽電流磁場が存在していることがわかる。これは, 外部磁場による遮蔽電流磁場であり, 外部磁場の径方向成分が大きい, 磁場計測点(3)が最大となっている。磁場計測点(3)において, 0 A から +80 A へ通電する際, 外部磁場がない状態での変動磁場試験の時と同様に自己磁場の増加に伴い, 各磁場計測点で遮蔽電流磁場が増加し, 60 A 付近で遮蔽電流磁場は飽和, その後は減少していった。+80 A から 0 A を通電する際, 磁場計測点(4)では 40 A で遮蔽電流磁場の値が 0 Gauss を通過し, 遮蔽電流磁場の向きが反転した。一方, 磁場計測点(3)では 0 A から +80 A へ通電する際, 飽和することなく, 通電電流とともに遮蔽電流磁場は減少していった。通電電流を +80 A から 0 A へ減少させた際も同様に飽和しなかった。磁場計測点(4)では三角波の通電前後において, 遮蔽電流磁場の値がそれぞれ 10 Gauss から 40 Gauss, -10 Gauss から 30 Gauss と大きくなっているのに対し, 磁場計測点(3)では, それぞれ -18 Gauss から -12 Gauss, 30 Gauss から 24 Gauss へと小さくなっていることがわかる。また, 磁場計測点(3)において, 三角波 1 波形目と 2 波形目によるヒステリシスカーブが異なる軌跡を描いている。

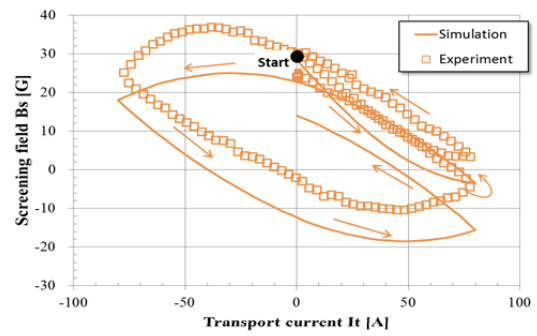


(a) 磁場計測点(3)

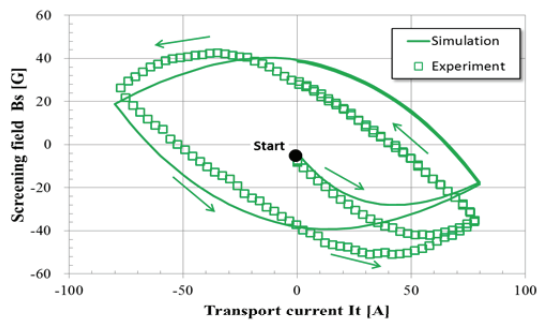


(b) 磁場計測点(4)

図 3 自己磁場のみによる変動磁場試験結果および解析結果



(a) 磁場計測点(3)



(b) 磁場計測点(4)

図 5 外部磁場印加後、自己磁場の変動磁場試験結果および解析結果

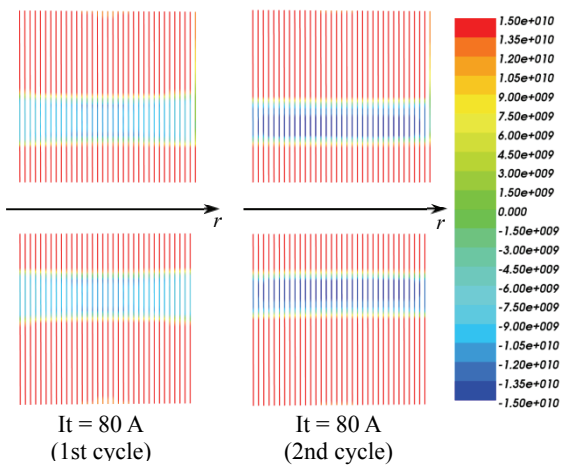


図 4 自己磁場のみによる変動磁場試験に対応する線材内電流分布 (ダブルパンケーキコイル断面)

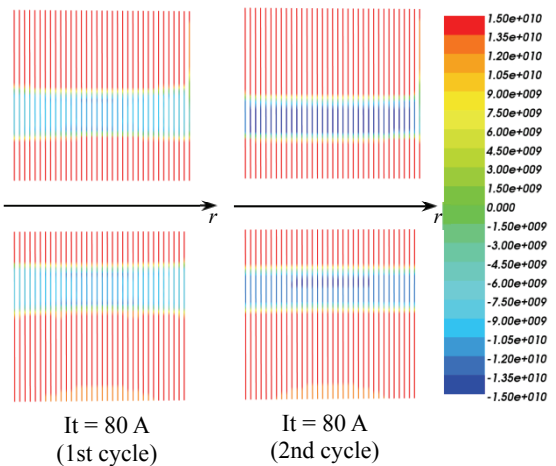


図 6 外部磁場印加後、自己磁場のみによる変動磁場試験に対応する線材内電流分布 (ダブルパンケーキコイル断面)

コイルの径方向の経験磁場を考慮すると、今回の実験では外部磁場よりも自己磁場による影響が大きいため、励磁・減磁の際の磁場侵入については概ね図 3 の自己磁場みの印加時の結果と同様となる。しかし、外部磁場はコイルの下端ほど、径方向成分が大きいため、磁場侵入はコイルの外側から対称的には侵入するのではなく、コイルの下端の方がより侵入しやすくなる。従って、図 6 のように電流分布はダブルパンケーキコイルの上下でミッドプレーンを挟んで、わずかであるが非対称になる。また、 $I_t = -80 \text{ A}$ のとき、外部磁場と自己磁場が最大で向きが同一方向になるため、コイルにも最大の磁場侵入が生じる。このため、2 周目では同じ通電電流で

も、外部磁場による電流の履歴がなくなり、図 4(a) のように 1 周目と 2 周目で差が生じたと考えられる。磁場計測点(4)では、自己電流を通電前(図中の start 点)に外部磁場により -8 Gauss の遮蔽電流磁場が発生しているが、図 3 より自己磁場のみでそれぞれ最大 40 Gauss と、外部磁場による遮蔽電流よりも自己磁場による遮蔽電流の影響が大きいため、1 周目と 2 周目で差が非常に小さくなったと考えられる。

(4) 励磁ホールド試験と解析と比較

外部磁場がない状態および外部磁場を印加した状態で励磁ホールド試験と解析の比較を行った。解析は、励磁後の遮蔽電流磁場の減

衰を再現し、実験結果と概ね一致していることが分かり、解析コードの妥当性が示された。

(5) まとめ

高温超伝導コイルの経線磁場の変化と遮蔽電流磁場の影響を調べるために、超伝導状態で変動磁場試験と、遮蔽電流磁場の時間推移を解明するためのホールド試験を対象に、本研究で開発した電磁場解析手法と比較検討を行った。そして、実験結果とシミュレーションによる定量的な評価を経て、遮蔽電流磁場の振舞いを説明した。

本成果は、高温超伝導線材を用いた加速器、MRI、NMR等の実現に向けて、高精度磁場、空間均一磁場、時間安定磁場を発生するため、遮蔽電流の影響を軽減できるコイル設計の検討を可能にするものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① H. Ueda, M. Fukuda, K. Hatanaka, K. Michitsuji, H. Karino, T. Wang, X. Wang, A. Ishiyama, S. Noguchi, Y. Yanagisawa, H. Maeda, "Measurement and Simulation of Magnetic Field Generated by Screening Currents in HTS Coil", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.24, no.3 (2014) 4701505, 査読有.
- ② H. Ueda, M. Fukuda, K. Hatanaka, T. Wang, A. Ishiyama, S. Noguchi, "Spatial and Temporal Behavior of Magnetic Field Distribution Due to Shielding Current in HTS Coil for Cyclotron Application", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol.23, no.3 (2013) 4100805, 査読有.

[学会発表] (計11件)

- ① 今市 洋平, 辻 義明, 持田 歩, 有谷 友汰, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士, 植田 浩史, 野口 聡 「YBCO パンケーキコイルにおける遮へい電流による不整磁場評価:解析」平成26年電気学会全国大会, 2014年3月18日, 松山
- ② 植田 浩史, 野口 聡, 道辻 健太, 有谷 友汰, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士 「REBCO 超伝導コイルにおける遮へい電流の影響評価」, 超伝導応用電力機器研究会, 2014年1月30日, 東京
- ③ 有谷 友汰, 齋藤 隼, 梅田 大貴, 狩野 開, 道辻 健太, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士, 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治, 野口 聡 「YBCO パンケーキコイルにおける遮へい電流磁場評価実験」, 秋季低温工学・超伝導学会, 2013年12月5日, 名古屋
- ④ 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治, 野口 聡, 齋藤 隼, 有谷 友汰, 狩野 開, 道辻 健太, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士 「高温超伝導コイルの遮蔽電流と磁場分布の測定実験および解析」, 超伝導応用電力機器研究会, 2013年9月25日, 神奈川

- ⑤ 植田 浩史 「超伝導材料・応用技術の最前線 (3) 「高温超伝導技術を用いた加速器応用」」, 低温工学・超伝導学会 東北・北海道支部 第18回超伝導・低温若手セミナー (招待講演), 2013年9月3日, 札幌
- ⑥ 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治, 齋藤 隼, 有谷 友汰, 狩野 開, 道辻 健太, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士, 野口 聡, 渡部 智則, 長屋 重夫 「Y系ダブルパンケーキコイルの遮蔽電流磁場解析」春季低温工学・超伝導学会, 2013年5月13日, 東京
- ⑦ 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治, 野口 聡, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士, 鹿島 直二, 長屋 重夫, 宮原 信幸 「次世代超伝導サイクロトロンの開発: 遮へい電流の影響の検討」秋季低温工学・超伝導学会, 2012年11月8日, 盛岡
- ⑧ 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治, 野口 聡, 石山 敦士 「加速器応用を想定した高温超伝導コイルの遮へい電流と磁場分布の空間的・時間的变化の3次元解析」超伝導応用電力機器研究会, 2012年6月21日, 三重
- ⑨ H. Ueda, M. Fukuda, K. Hatanaka, A. Ishiyama, S. Noguchi, "Spatial and Temporal Behavior of Magnetic Field Distribution by Shielding Current in HTS Coil for HTS Cyclotron application", 24th International Cryogenic Engineering Conference - International Cryogenic Materials Conference 2012, 2012年5月17日, 福岡
- ⑩ 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治, 石山 敦士 「次世代高温超伝導サイクロトロンのための高温超伝導コイルの遮へい電流による磁場の空間的・時間的变化 - (1) 3次元電磁場解析モデルおよび定式化 -」, 秋季低温工学・超伝導学会, 2011年11月9日, 金沢
- ⑪ 植田 浩史, 福田 光宏, 畑中 吉治, 石山 敦士 「次世代高温超伝導サイクロトロンのための高温超伝導コイルの遮へい電流による磁場の空間的・時間的变化 - (2) 計算例 -」, 秋季低温工学・超伝導学会, 2011年11月10日, 金沢

6. 研究組織

(1) 研究代表者

植田 浩史 (UEDA, Hiroshi)

大阪大学・核物理研究センター・特任助教
研究者番号: 10367039