

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420253

研究課題名(和文) 高磁場・高精度磁場を指向した高温超伝導マグネット設計に関する研究

研究課題名(英文) Study on design of high-temperature superconducting magnet generating high field and high-accuracy field

研究代表者

植田 浩史 (Ueda, Hiroshi)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：10367039

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：次世代NMR/MRI用超伝導マグネットや加速器用マグネットへのREBCO超伝導線材の適用を想定し、高磁場・高精度磁場発生マグネット設計に必須である巻線内電流分布を3次元電磁場解析により検討した。REBCO超伝導マグネットでは、遮蔽電流による不整磁場が問題となる。そこで、遮蔽電流の抑制手法について、マルチコイルの励磁順の影響、オーバーシュート法による時間的安定性、細線化による遮蔽電流磁場の低減効果を評価した。これらの成果から、高磁場・高精度磁場を指向した高温超伝導マグネット設計の際に、遮蔽電流磁場を数値計算によって予測し、抑制あるいは補正する手法の検討に情報を提供することが可能になった。

研究成果の概要(英文)：Toward the applications of REBCO superconducting coil to the high field magnets for NMR, MRI, accelerator and so on, the current distribution in REBCO winding were investigated by using the three-dimensional electromagnetic simulation. In these application, the magnets need to create highly homogeneous and temporally stable field. However, the screening currents lead to the serious problem in REBCO magnets for the applications required very high field quality. The reduction methods of screening current such as the overshoot method with transporting the current, the sequence of excitation in multiple REBCO coil, and the effect of screening current-induced field in copper-plated multifilamentary REBCO tape were evaluated. This work contributes to the prediction and reduction of screening current-induced field and the design of high temperature superconducting magnet generating high field and high-accuracy field.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導マグネット 遮蔽電流 電磁界解析 オーバーシュート マルチフィラメント

## 1. 研究開始当初の背景

核磁気共鳴 (NMR), 核磁気共鳴イメージング (MRI) 用超伝導マグネットにおいて, 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ためには, 発生磁場の高磁場化が必要となる。このような高磁場は常伝導体 (銅やアルミ) と鉄心を使った電磁石や永久磁石では発生できず, 現在は NbTi や Nb<sub>3</sub>Sn といった低温金属系超伝導線材 (LTS 線材) を使ったマグネットを利用している。これら LTS 線材は通常液体ヘリウム (大気圧下沸点約 4 K) を用いて冷却されるが, ヘリウムは希少な資源であり, かつ需要が急激に増加しているため, その市販価格は年々高くなっている。そこで今後は, 多量の液体ヘリウムを必要としない冷凍機伝導冷却超伝導マグネットが必要となると考えられ, 高温超伝導線材 (HTS 線材) を利用したマグネットの開発が期待されている。また, 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いため, 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 HTS 線材の利用が有効である。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。

HTS 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) 超伝導線材の 2 種類が挙げられる。今日では市販されるようになり, 応用機器の開発段階に入った。特に, RE 系超伝導線材は機械強度が高く, よりコンパクトな伝導冷却・高磁場マグネットの実現の可能性があるため, High Field Magnet や NMR, 加速器への適用が試みられている。これら NMR/MRI 用超伝導マグネットあるいは加速器用マグネットでは, 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<sup>-4</sup>) が要求される。このような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 (screening current-induced field) がある。RE 系超伝導線材はテープ形状を有しており, このようなテープ線を用いて超伝導マグネット RE 系線材はテープ形状であるため, テープ面に垂直な磁場により遮蔽電流が顕著に誘導されてしまう。この遮蔽電流によりテープ幅方向の電流分布は不均一となり, 結果としてマグネット中心部の磁場の不均一性が非常に大きくなる。また, 遮蔽電流は磁束クリープなどによって時間とともに変化するため, 磁場の分布は時間的にも変化する。このように HTS 線材から成る超伝導コイルでは, 中心磁場の低下, 磁場の空間均一性や時間的安定性の低下が発生することが知られている。しかし, この遮蔽電流を抑制する根本的な解決策は見出されておらず, 高磁場・高精度磁場マ

グネット応用の最大の障害として研究者の間で認識されている。

## 2. 研究の目的

高精度磁場が必要となる高温超伝導マグネットの開発では, 1) 巻線精度, 2) 冷却・励磁における熱応力・電磁応力による巻線の変形, 3) 超伝導線材内の遮蔽電流分布の影響を定量的に評価する必要がある。本研究では, 遮蔽電流の影響に焦点を当て, 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への RE 系超伝導線材の適用を想定し, コイル化された線材内の電流分布を 3次元電磁場過渡解析により詳細に検討し, 高精度・高磁場発生用の高温超伝導マグネット設計で必須となる遮蔽電流を抑制する方法を考える。これらの成果を踏まえ, NMR/MRI 用超伝導マグネット, 加速器用マグネットのような高磁場・高精度磁場を指向した高温超伝導マグネット設計の際に, 遮蔽電流磁場を数値計算によって予測し, 抑制あるいは補正する手法の検討に情報を提供する。

## 3. 研究の方法

私は, 2008~2009 年度科研費・若手研究(B)「超伝導応用機器の特性評価のための 3 次元高速数値解析手法に関する研究」において, 超伝導の非線形特性を考慮した 3 次元過渡電磁場解析シミュレータを開発し, 2011~2012 年度科研費・若手研究(B)「マルチスケール電磁場解析を用いた高温超伝導コイル設計の高精度化に関する研究」において, 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電磁場分布を求め, 高温超伝導コイルの磁場精度を評価することが可能になっている。そこで本研究は, これまでに開発した「3次元電磁場過渡解析手法 (有限要素法・境界要素法・高速多重極法)」や「高温超伝導マグネットの高精度磁場解析」を基に実施した。具体的には, これまでに開発した超伝導線材の非線形特性を考慮した電磁場解析シミュレータを用いて, 遮蔽電流の抑制法の検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) マルチコイルの励磁順の影響評価

NMR・MRI や加速器のような応用機器では, 複数のコイルにより構成されるマルチコイル構造で製作される。このようなマルチコイルにおいては, コイルを励磁する際, 各コイルでの発生磁場が相互に影響し合い遮蔽電流がより複雑に誘導されてしまう。そのため, 様々な励磁条件での遮蔽電流の振る舞いを調査し, 明らかにすることが求められている。そこで, 様々な励磁条件において REBCO 線材を用いたマルチモデルコイルの遮蔽電流による不整磁場 (以下, 遮蔽電流磁場) を測定し, 三次元電磁場解析を用いて遮蔽電流磁場の解析も行った。なお, 実験結果は連携研究者の石山敦士教授 (早稲田大学) から提供していただいた

いたものである（以降の実験も同様である）。

実験で用いた REBCO モデルコイルはコイル 6 個を重ねて構成しており、概形を図 1 に示す。各コイルは、内径 100 mm、外径 125.8-127.3 mm で巻数は 110 または 111 である。線材幅は 4 mm で厚さは 100  $\mu\text{m}$  である。今回、REBCO 線材は SuperPower 社製のものを用いた。モデルコイルを構成するコイルを、SP1 と SP2（SP:シングルパンケーキ）をスプリットコイル A、SP3 と SP4 をスプリットコイル B、DP1 と DP2（DP:ダブルパンケーキ）をスプリットコイル C として、構成するコイルの励磁順を変えて 3 通りの実験（Case I：同時励磁、Case II：Coil B,C を励磁後、Coil A を励磁）を行った。

本研究において、遮蔽電流磁場解析は超伝導特性を考慮した三次元非線形有限要素法を適用した。この解析の妥当性は様々な REBCO コイルにおける励磁条件により示されている。電磁場解析は未知数を電流ベクトルポテンシャルの定義として、オームの法則、ファラデーの電磁誘導の法則、ビオ・サバルの法則に薄膜近似を適用してしたがって導かれた以下のような支配方程式をもとにしている。

$$\begin{aligned} & \{\nabla \times \rho(\nabla T \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n} \\ & + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla T' \times \mathbf{n}') \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS' \quad (1) \\ & = -\frac{\partial B_0}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \end{aligned}$$

$T$  と  $T'$  はそれぞれ観測点とソース点におけるテープ面垂直方向の電流密度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面法線垂直方向の単位ベクトルである。 $\mathbf{R}$  はソース点から観測点への方向ベクトル、 $B_0$  は外部磁場、 $\rho$  は超伝導体の抵抗率、 $\mu_0$  は真空中の透磁率、 $d$  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。このとき超伝導体の電気抵抗率  $\rho$  は式(2)で示される。

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left( \frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1} \quad (2)$$

$J_c$  は臨界電流密度、 $E_c$  は臨界電流の定義電界である。REBCO 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。したがって、微視的な構造を考慮する必要があり、解析時間が膨大となる。高速多重極法、反復法を積分項に適用することでメモリの容量の節約、計算の高速化を可能にしている。

図 1 に示した 5 ヶ所の磁場計測点における Case I, II での遮蔽電流磁場の実験と解析の結果のグラフを図 2 に示す。プロットは実験値、実線は解析値を表している。図 2 より、定量的な差は見られるものの、本解析により遮蔽電流の振舞いを再現できていることがわかる。

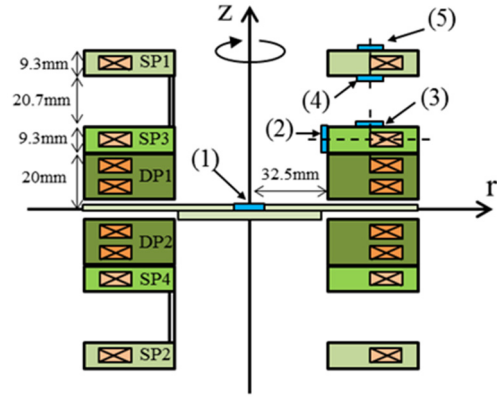
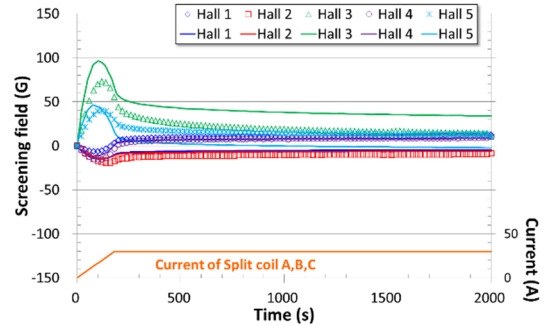
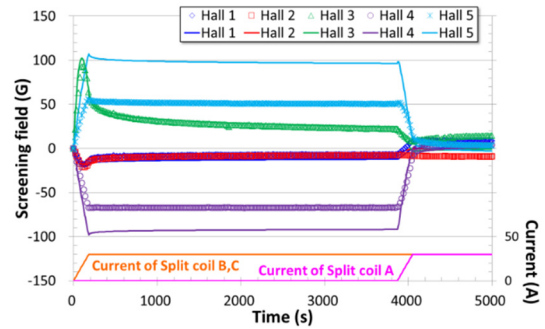


図 1 実験装置の概略図と磁場計測点



(a) Case I



(b) Case II

図 2 実験結果と解析結果

巻線断面の電流密度分布を解析により求めた結果を図 3 に示す。

Case I：図 2 (a) より、ホール素子 1, 2 と 4 は負の値を示しているのに対して、3, 5 は正の値を示している。ホール素子 3, 5 はそれぞれ SP3 と SP1 の内径の上部に設置している。図 3(a) から、励磁中、線材の上端に電流分布が大きく偏るため、ホール 3, 5 はこの影響を大きく受け、正の値を示したと考えられる。

Case II：図 2(b) において、1 回目の励磁の際、励磁していないコイル付近の磁場計測点では、遮蔽電流磁場がほぼ線形に増加していることがわかる。これは自己磁場による遮蔽電流や通電電流による影響がないためと考えられ、図 3(b) も見ると、励磁していないコイルではテープの端の遮蔽電流が徐々に増加していることから理解できる。1 回目の励磁から 1 時間ほど経過した 2 回目の励磁付近を見ると、図 2(b) において、ホール素子 4, 5 での遮蔽電流磁場は SP1 の通電電流が増加するにつれて、急激に減少している。これは、SP1 では、通電

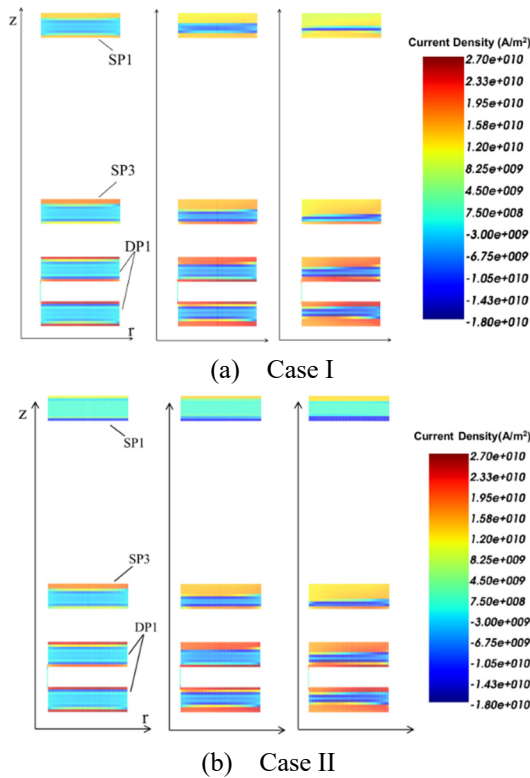


図3 実験結果と解析結果

電流が増加したために、1 回目の励磁による遮蔽電流が減衰し、そして電流分布が均一に近づいていくためと考えられる。

以上のように、マルチコイルで構成されるマグネットシステムにおいては、コイルの励磁順によって、遮蔽電流磁場の振舞いが著しく異なる。これは、コイル巻線内の電流分布を詳細に解析することで説明ができ、これらの成果は、遮蔽電流磁場を抑制する方法をコイル設計の際に考慮する一助となる。

(2) オーバーシュート法による時間的安定性の評価

使用した REBCO 線材は、幅 5mm、厚さ 0.11-0.13mm である。マルチコイルは内径 100mm、外径 129-132mm、巻き数 100-109 のシングルパンケーキコイル(SP)4 つ、ダブルパンケーキコイル(DP)2 つを積み重ねて作製した。外部磁場も考慮したマルチコイル全体の  $I_c$  値は約 75A である。また磁場計測点として 5 つのホール素子を中心とコイル付近に設置した。マルチコイルの概略図と磁場計測点を図 4 に示す。Case I では、マルチコイルの運転電流を 60A としてオーバーシュートを行わずに励磁し、その後 1 時間電流を保持 (以下、ホールド) した。Case II では、運転電流に対して 8.3% のオーバーシュートした後、1 時間ホールドした。なお、全ての実験は液体窒素中で行い、Sweep Rate は 10A/min とした。

オーバーシュートなしの結果を図 5(a)に、オーバーシュートの結果を図 5(b)に示す。ここで、プロットは実験値、実線は解析値である。図 5(a)より遮蔽電流磁場は励磁完了後徐々に減少し、時間的変化が生じていること

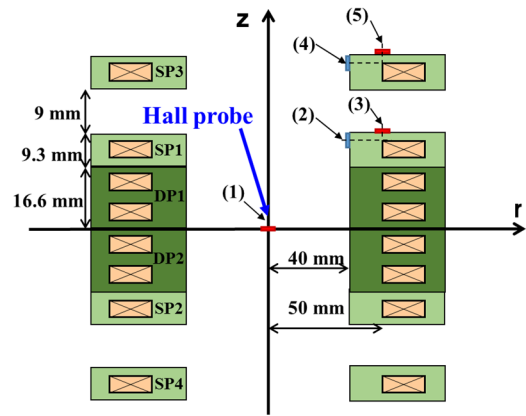
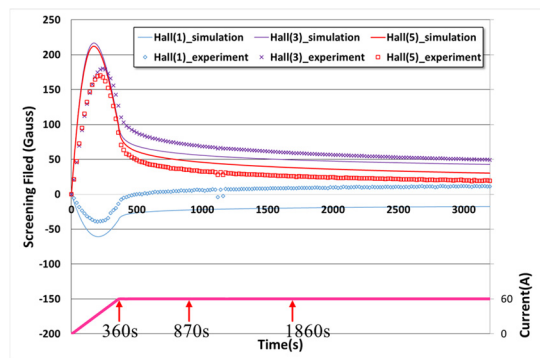
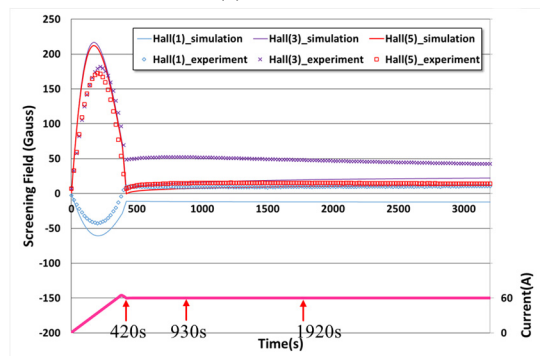


図4 実験装置の概略図と磁場計測点



(a) Case I



(b) Case II

図5 実験結果と解析結果

がわかる。一方、図 5(b)ではオーバーシュート後、時間的安定性が向上し、磁場の値がほぼ一定になっている。解析結果でも、オーバーシュートの効果が再現されている。これらの成果から、マグネット設計の際に適切なオーバーシュート量の設定が可能となる。

(3) 細線化による遮蔽電流に起因する不整磁場の低減効果

遮蔽電流磁場の低減法の一つとして、線材を細線化することにより、遮蔽電流磁場が低減することが確かめられている。しかしスクライビング (細線化) 処理により、線材強度の低下や線材の歩留まり率の低下といった問題が生じる。そこでスクライビングした後、銅メッキを施した線材の遮蔽電流磁場の解析評価を行った。

解析モデルとした REBCO コイルの諸元を表 1 に示す。4mm 幅の REBCO 線材を 50 ターン巻いた内径 50 mm のパンケーキコイルを

6 個積層した。細線化モデルについては、幅 4.0mm のテープをカットし、幅 2.0mm のテープ 2 本並列で配置するとした。そして細線化した線間の溝が絶縁されている場合と、溝が銅で埋められていると仮定した場合について解析を行った。このとき、銅の低効率の影響も解析・評価した。また、細線化の効果を確かめるため、細線化していない線材(4mm幅)についても解析を行った。励磁条件については励磁速度 1 A/s で 150 A まで励磁し、その後ホールドするものとした。

全コイルが中心につくる遮蔽電流磁場の時間変化を図 6 に示す。今回の解析モデルにおいては、まず、線材間が電氣的に絶縁されたモデルでは、遮蔽電流磁場の低減効果が現れている。一方、溝が銅で埋められたモデルでは、励磁中の低減効果はほとんど見られないが、電流ホールド後、徐々に絶縁モデルの結果に漸近していつている。そして、銅の電気抵抗が大きいほど早く近づいている。図 7 に、励磁直後の巻線の電流密度分布(長手方向)の展開図を示す。図 7(a)はフィラメント間が完全に絶縁されているモデル、図 6(b)は、フィラメント間の抵抗率が  $10^{-6} \Omega\text{m}$  のモデルの結果である。図 6(a)では、テープ端部から巻線中心までスリット部に磁束侵入していることがわかる。このため、図 6 のように遮蔽電流磁場が低減される。図 7(b)を見ると、テープ端部から巻線中心までスリット部に磁束侵入していないことがわかる。結合電流のため、2-filament(isolated)とは違う分布となり、遮蔽電流の低減効果が低くなる。励磁完了後は、時間経過とともに、テープ端部からのスリット部に磁場が拡散・侵入するので、遮蔽電流磁場の減衰し、2-filament(isolated)に近づく。

#### (4) まとめ

高精度・高磁場発生用の高温超伝導マグネット設計で必須となる遮蔽電流の抑制手法について、マルチコイルの励磁順の影響、オーバーシュート法による時間的安定性、細線化による遮蔽電流磁場の低減効果を評価した。これらの成果から、高磁場・高精度磁場を指向した高温超伝導マグネット設計の際に、遮蔽電流磁場を数値計算によってできるだけ正確に予測し、抑制あるいは補正する手法の検討に情報を提供することが可能になった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① K. Nakazono, H. Ueda, A. Ishiyama, S. Noguchi, H. Miyazaki, T. Tosaka, T. Kurusu, S. Nomura, S. Urayama, H. Fukuyama, “Numerical Evaluation on Irregular Field Generated by Screening Current in High-Field REBCO Coil for Whole-Body MRI”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.27, no.4 (2017) 4400405, DOI: 10.1109/TASC.2016.2645839, 査読有
- ② H. Ueda, Y. Imaichi, T. Wang, A. Ishiyama, S.

表 1 REBCO コイルの諸元

Tape width	4 mm
Thickness of REBCO layer	1 $\mu\text{m}$
Inner diameter	50 mm
Number of turns	50
Number of pancake	6
Operating current	150 A
Ramp rate	1 A/s
Central field	0.825 T

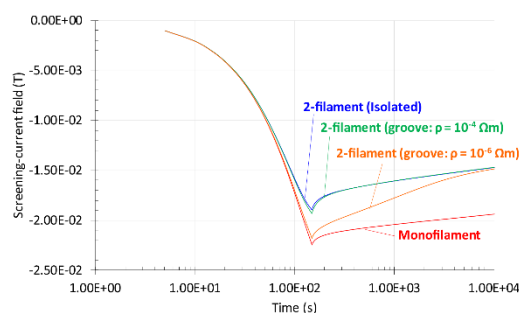
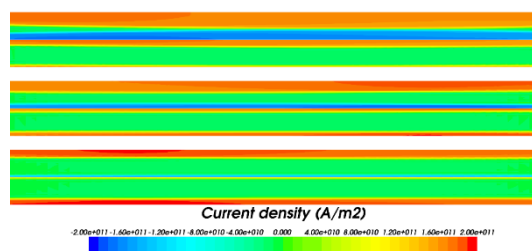
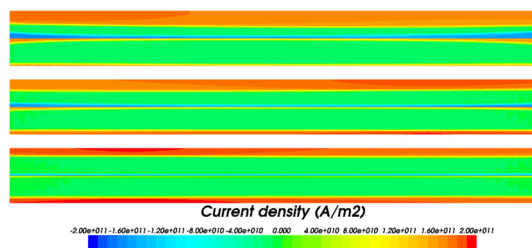


図 6 マルチフィラメント REBCO 線材の遮蔽電流磁場の時間変化



(a) 2-filament (isolated)



(b) 2-filament (groove:  $\rho=10^{-6} \Omega\text{m}$ )

図 7 励磁直後の巻線の電流密度分布(長手方向)の展開図

- Noguchi, S. Iwai, H. Miyazaki, T. Tosaka, S. Nomura, T. Kurusu, S. Urayama, H. Fukuyama, “Numerical Simulation on Magnetic Field Generated by Screening Current in 10-T-Class REBCO Coil”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.26, no.4 (2016) 4701205, DOI: 10.1109/TASC.2016.2535965, 査読有
- ③ A. Matsumi, H. Ueda, S. Noguchi, T. Wang, A. Ishiyama, H. Miyazaki, T. Tosaka, S. Nomura, T. Kurusu, S. Urayama, H. Fukuyama, “Evaluation of Irregular Magnetic Field Generated

- by Screening Current in REBCO Coils for High Accuracy Field”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.26, no.4 (2016) 4702305, DOI: 10.1109/TASC.2016.2535966, 査読有
- ④ A. Mochida, H. Ueda, S. Noguchi, T. Wang, A. Ishiyama, H. Miyazaki, T. Tosaka, S. Nomura, T. Kurusu, S. Urayama, H. Fukuyama, “Evaluation of Magnetic Field Distribution by Screening Current in Multiple REBCO Coils”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.26, no.4 (2016) 4702805, DOI: 10.1109/TASC.2016.2542980, 査読有
- ⑤ H. Ueda, A. Ishiyama, Y. Ariya, T. Wang, X. Wang, K. Agatsuma, H. Miyazaki, T. Tosaka, S. Nomura, T. Kurusu, S. Urayama, H. Fukuyama, “Evaluation of Magnetic-Field Distribution by Screening Current in Multiple REBCO Coils”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.25, no.3 (2015) 4700705, DOI: 10.1109/TASC.2014.2371133, 査読有
- ⑥ H. Ueda, J. Saito, Y. Ariya, A. Mochida, T. Wang, X. Wang, K. Agatsuma, A. Ishiyama, “Reduction of Irregular Magnetic Field Generated by Screening Current in REBCO Coil”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.25, no.3 (2015) 6603205, DOI: 10.1109/TASC.2014.2375953, 査読有
- [学会発表] (計 38 件)
- ① 武藤優真, 中園浩平, 小曾根裕一, 石山敦士, 植田浩史, 「REBCO 線材における細線化による遮蔽電流に起因する不整磁場の低減」, 電気学会全国大会, 富山, 2017 年 3 月 15 日-2017 年 3 月 17 日
- ② H. Ueda, T. Koizumi, SB. Kim, S. Noguchi, A. Ishiyama, “Electromagnetic Analysis on Screening Current Distribution in REBCO Coil”, 1st Asian ICMC - CSSJ 50th Anniversary Conference, Kanazawa, Japan, 2016.11.7-2016.11.10
- ③ Y. Ozone, K. Nakano, T. Wang, A. Ishiyama, H. Ueda, S. Noguchi, H. Miyazaki, T. Tosaka, S. Nomura, T. Kurusu, “Reduction method of Irregular Magnetic Field Distribution Generated by Screening Currents in Multiple REBCO Coils”, 1st Asian ICMC - CSSJ 50th Anniversary Conference, Kanazawa, Japan, 2016.11.7-2016.11.10
- ④ H. Ueda, SB. Kim, A. Ishiyama, “Electromagnetic Analysis on Irregular Magnetic Field and Screening Current Distribution in HTS Coil”, International Workshop on HTS Application for Medical, Biomagnetic Field, and Energy, Boston, USA, 2016.9.10-2016.9.11
- ⑤ H. Ueda, Y. Imaichi, T. Wang, A. Ishiyama, S. Noguchi, S. Iwai, H. Miyazaki, T. Tosaka, S. Nomura, T. Kurusu, S. Urayama, H. Fukuyama, “Numerical Simulation on Magnetic Field generated by Screening Current in 10-T class REBCO Coil”, 24th International Conference on Magnet Technology, Seoul, Korea, 2015.10.18-2015.10.23
- ⑥ A. Mochida, H. Ueda, S. Noguchi, T. Wang, A. Ishiyama, H. Miyazaki, T. Tosaka, S. Nomura, T. Kurusu, S. Urayama, H. Fukuyama, “Evaluation of Magnetic Field Distribution by Screening Current in Multiple REBCO Coils”, 24th International Conference on Magnet Technology, Seoul, Korea, 2015.10.18-2015.10.23
- ⑦ 持田 歩, 松見 絢子, 今市 洋平, 齋藤 隼, 有谷 友汰, 王 韜, 石山 敦士, 植田 浩史, 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努, 浦山 慎一, 福山 秀直, 「高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(14 年秋) - REBCO マルチコイルにおける遮蔽電流による不整磁場の評価試験と解析-」, 2014 年度秋季低温工学・超電導学会, 福島, 2014 年 11 月 5 日-2014 年 11 月 7 日
- ⑧ 持田 歩, 今市 洋平, 齋藤 隼, 有谷 友汰, 王 韜, 石山 敦士, 植田 浩史, 戸坂 泰造, 宮崎 寛史, 野村 俊自, 来栖 努, 「REBCO マルチコイルにおける遮蔽電流による不整磁場の評価」, 超電導応用電力機器研究会, 日立, 2014 年 9 月 18 日-2014 年 9 月 18 日
- ⑨ H. Ueda, A. Ishiyama, J. Saito, T. Wang, X. Wang, K. Agatsuma, “Reduction of Irregular Magnetic Field generated by Screening Current in REBCO Coil”, Applied Superconductivity Conference 2014, Charlotte, USA, 2014.8.10-2014.8.15
- ⑩ 植田 浩史, 齋藤 隼, 有谷 友汰, 梅田 大貴, 道辻 健太, 狩野 開, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士, 福田 光宏, 畑中 吉治, 野口 聡, 「REBCO コイルの遮蔽電流磁場の低減に関する検討」, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 名古屋, 2013 年 12 月 4 日-2013 年 12 月 6 日
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
植田 浩史 (UEDA, Hiroshi)  
岡山大学・自然科学研究科・准教授  
研究者番号: 10367039
- (2) 連携研究者  
石山 敦士 (ISHIYAMA Atsushi)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号: 00130865