

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820101

研究課題名(和文)高電流密度・高熱的安定性が両立する高温超伝導コイルシステムの開発

研究課題名(英文)Development of a High-Tc Coil-system possesses high current density and high thermal stability

研究代表者

王 韜 (Wang, Tao)

早稲田大学・理工学術院総合研究所(理工学研究所)・その他(招聘研究員)

研究者番号：60707818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：NMR, MRIと医療用加速器において高磁場化による小型・高機能化が進められている。しかし、高磁場を達成するための高電流密度・高熱的安定性および高信頼性を同時に実現する必要があり、次世代コイル化技術において極めて重要な課題となっている。本研究は、部分的要素等価回路に基づく回路解析と有限要素法に基づく温度解析の連成数値解析プログラムを確立し、近年提案された“無絶縁高温超伝導巻線技術”の有効性と成立性を検証・評価しながら、目標である電流密度500A/mm<sup>2</sup>、励磁速度数十秒、および“Defect Irrelevant”効果を同時に満足する3T級MRI用高温超伝導コイルの設計に成功した。

研究成果の概要(英文)：Recent achievements in high-temperature superconducting (HTS) coil technologies have enabled high performance and compactness in next-generation high-field magnetic resonance imaging (MRI) and particle cyclotron systems that require magnetic fields above 7 T and 6 T, respectively. However, the realization of high-current density, high thermal stability and high operation reliability particularly under a high magnetic field environment, is very crucial to accomplish the miniaturization of the HTS coil. In this study, an analysis coupling with a current analysis based on Partial Element Equivalent Circuit (PEEC) and a thermal analysis based on FEM was created for proving and evaluating the validity of the recently proposed “No-insulation HTS winding Technology”. Meanwhile, the research goal, which was set to simultaneously achieve 500A/mm<sup>2</sup> of current density, tens of second of charging speed, and the characteristic of “defect Irrelevant” in a HTS magnet applied in 3 T grade MRI.

研究分野：超伝導応用工学

キーワード：高温超伝導 超伝導マグネット 高磁場化 回路解析 熱伝導解析 電磁場解析 マグネット技術

## 1. 研究開始当初の背景

生命・基礎科学研究用 NMR, 医療用 MRI, 医療用加速器において高磁場化(NMR 用:24T 以上, MRI 用:7T 以上, 加速器用:6T 以上。)による小型・高機能化が進められている。このような背景のもと、近年進展著しい高温超伝導技術を活用した高磁場発生用コイルの早期実用化が急務となっている。しかし、高温超伝導コイルの先進生命科学・医療用機器への応用は経済性(線材コスト)や利便性(冷却装置の扱いや、励磁・減磁速度の制限など)などにより世の中への普及がなかなか困難であると指摘されてきた。従って、次世代普及型の高精度・高安定・高効率・小型の先進生命科学・医療用機器の実現に向けて、低価格で信頼性の高い高温超伝導コイルシステムの開発が期待されている。また、高温超伝導コイルは、従来の常伝導コイルでは達成不可能な高磁場を少ない電力で大空間に発生できるという特長を持つ。加速器応用を考えた場合、鉄心を用いて磁路を形成する必要がないため、機器内の空間自由度を最大限に活かすことが可能となる。そしてイットリウム系線材(臨界温度:約 95K)のような高温超伝導線材を用いて 20K 以上の温度領域で運転することを想定した場合、線材、コイル構造材の熱容量が従来の低温金属系コイル(液体ヘリウム温度 4.2K での運転)に比べ 1 桁以上大きくなるため、超伝導コイルの熱的安定性が向上することになる。しかし、現状では高温超伝導線材の価格が高いため、コイルの高磁場化・小型化を実現できる技術の確立が急務となっている。

## 2. 研究の目的

高温超伝導コイルの高精度化・高安定化・高効率化・小型化(高磁場化・高電流密度化)に向けて、1) 高機械的強度、2) 高精度磁場発生、3) 高磁場発生、4) 高電流密度および 5) 高熱的安定性を達成しなければならない。これらの課題の中、高温超伝導コイルの普及のためのコイルの高効率化・小型化においては、超伝導コイルの高い信頼性、すなわち高電流密度励磁時における高い熱的安定性が求められる。高電流密度化と高熱的安定化は、本来二律背反の関係にあるが、高温超伝導コイルの高効率化と小型化を結びつけるために、この二律背反の課題を解決する必要がある。そこで、本研究では、近年 MIT (米国) で提案されてきた「無絶縁高温超伝導巻線技術(以下、無絶縁コイルと略す。)」を用いて高温超伝導マグネットシステムの高性能化と高信頼化の両方を達成することを考える。無絶縁コイルとは、従来の高温超伝導コイルと違い、各ターン間に絶縁を施さない巻線方式である。その中心思想は、超伝導層の抵抗より十分大きい銅層を絶縁として考える。その結果、遮断や常伝導転移時において、電流がターン間に分流できるので、コイルの自己保護が図れる可能性があると考えられる。

無絶縁コイルには以下に挙げる特長がある。1) 超伝導線材間の銅安定化層が共有できることから、必要となる安定化層の必要量を削減でき、また同時に、同等の磁場発生のために必要となる巻線長を削減できるため、コイルの高電流密度化を図ることができる; 2) 局所的常伝導転移が発生すると、電流は巻線間の電氣的接触を通して自動的に常伝導転移部を回避し、超伝導特性が壊されていない隣接線材に迂回できる; 3) 常伝導転移時のジュール発熱密度が低減できる。そしてジュール発熱を巻線内の広い範囲での熱容量で許容・分担することにより、ホットスポットの形成が抑制できる; 4) 絶縁を施さないのでテープ線材の厚みのばらつきが少なく、高精度磁場発生用コイルへの応用に適している。しかし、無絶縁コイルの巻線内の電磁的・熱的振舞いは極めて複雑であることから、コイルの基礎特性を正確に解析できる適切な数値解析モデルの開発が必要となる。これにより、無絶縁コイルの層間接触抵抗、安全運転基準値などを含む設計・検討ができるようになる。

## 3. 研究の方法

無絶縁コイルの成立性と有効性を検証するために、本研究では、世界中で解明されていなかった無絶縁コイルの電磁的・熱的振舞いに対して、部分要素等価回路解析(PEEC)に基づいた電流解析と有限要素法に基づいた温度解析の連成数値解析プログラムを確立し、そして、先行研究で取得した無絶縁コイルの運転時(励磁、遮断、過電流)における基礎実験データと比較しながら数値解析プログラムの妥当性を確認した。

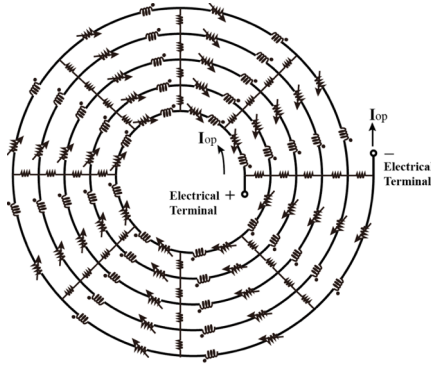
また、開発した無絶縁コイルの基礎特性解析用プログラムを利用し、無絶縁コイルにおける 1) 励磁・減磁、遮断、過電流および常伝導転移時の電流・温度分布の過渡的特性評価; 2) 励磁遅れの発生要因の抽出; 3) クエンチ特性の解明; 4) “Defect Irrelevant”効果(常伝導転移部の回避)の解明; 5) メーター級大口径無絶縁コイルの安全運転に達成する基準値の分析について検討・評価を行った。

## 4. 研究成果

## 4.1 無絶縁コイルの基礎特性解析用プログラムの開発

## (1) 部分要素等価回路(PEEC)に基づく電流分布解析

本研究では、Fig.1 に示した部分要素等価回路モデル(PEEC モデル)を用いた解析モデルを採用した。PEEC モデルは、層間接触電気抵抗、REBCO 超伝導テープ線材の I-V 特性、および巻線の自己・相互インダクタンスを考慮したモデルであり、従来提案されてきたモデルに比べて、コイル内の局所電磁現象をより正しく再現できるモデルであると考えられる。PEEC では、無絶縁コイル内の各層の巻線を周方向に  $n$  個のセグメントに分割し、Kirchhoff 第一と第二法則に従って回路解析モデルを構築した。回路方程式は以下となる。



- Local Contact Resistance between the Turn-to-turn Windings,  $R_c$
- Resistance of Local REBCO Winding due to  $I$ - $V$  characteristic,  $R_{sc}$
- Self and Mutual Inductances of Local Winding,  $L, M$

Fig. 1 部分要素等価回路 (PEEC)

$$\begin{aligned}
 R_{\theta}^{(i)} I_{\theta}^{(i)} + \sum_{j=1}^N M_{ij} \frac{dI_{\theta}^{(j)}}{dt} + R_{\theta}^{(i+1)} I_{\theta}^{(i+1)} \\
 = R_{\theta}^{(i+Div\theta)} I_{\theta}^{(i+Div\theta)} \\
 + \sum_{j=1}^N M_{(i+Div\theta)j} \frac{dI_{\theta}^{(j)}}{dt} \\
 + R_r^{(i)} I_r^{(i)} \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\theta}^{(i)} + I_r^{(i)} \\
 = \begin{cases} I_{op} & (i = 1) \\ I_{\theta}^{(i-1)} & (1 < i \leq Div\theta) \\ I_{\theta}^{(i-1)} + I_r^{(i-Div\theta)} & (Div\theta + 1 < i < N - Div\theta) \end{cases} \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

$$I_{\theta}^{(i)} = I_{\theta}^{(i-1)} + I_r^{(i-Div\theta)} \quad (N - Div\theta + 1 < i < N) \quad (4.3)$$

$$I_{\theta}^{(i)} + I_r^{(i-Div\theta+1)} = I_{op} \quad (i = N) \quad (4.4)$$

ここで、 $R_{\theta}(i)$ と  $R_r(i)$ はそれぞれ高温超電導線材の  $I$ - $V$  特性に基づいた各巻線セグメント長手方向の電気抵抗と層間接触電気抵抗を表す。 $Div\theta$  は周方向の分割数、 $N$  は周方向巻線の総分割数を表す。 $I_{\theta}(i)$ 、 $I_r(i)$ と  $I_{op}$  は各セグメントの周方向電流と径方向電流、およびコイルの運転電流を表す。 $M_{ij}$  は各セグメントの自己・相互インダクタンスマトリクスを表す。ただし、各セグメントの自己・相互インダクタンスは、以下のノイマン方程式により算出した。

$$\begin{aligned}
 M_{ij} \\
 = \frac{\mu_0 r_i r_j}{4\pi w^2} \int_0^w \int_{\theta_j}^{\theta_j+\Delta\theta} \int_0^w \int_{\theta_i}^{\theta_i+\Delta\theta} \frac{\cos(\theta - \theta)}{R_{ij}} d\theta dz d\theta dz \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

$$R_{ij} = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\theta - \theta) + (z - Z)^2}$$

(4.6)

ここで、 $r_i$ 、 $r_j$ 、 $\theta_i$ と  $\theta_j$ はセグメント  $i$ と  $j$  からコイル中心までの距離と、それぞれの回転角を表す。 $\Delta\theta$ と  $\Delta\theta$ はそれぞれセグメント  $i$ と  $j$  の角度間隔を表す。 $w$ は巻線の幅を表す。

(2) 有限要素法に基づく温度分布解析

本解析では、比熱と熱伝導率の温度依存性を考えた非線形過渡有限要素法解析である。基礎方程式は以下となる。

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x(T) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y(T) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q_J + Q_c \quad (4.7)$$

ただし、 $c(T)$ と  $\lambda(T)$ はそれぞれ温度に依存する高温超電導巻線の比熱と熱伝導率を表す。 $Q_J$ と  $Q_c$ はジュール発熱と冷却条件を表す。

巻線のジュール発熱は、径方向転流電流による銅安定化層の発熱と長手方向電流による超電導巻線の発熱の和とした。

$$Q_J = I_r^2 R_r^2 + I_{\theta}^2 R_{\theta}^2 \quad (4.8)$$

なお、冷却条件としては、簡単のため、ここでは巻線は断熱されていると仮定し、

$$Q_c = 0 \quad (4.9)$$

とした。

(3) 高温超伝導線材の  $I$ - $V$  特性

高温超電導体の電気抵抗値は完全にゼロではなく、実際は電流密度の増加に従い電界が発生・上昇する特性を有している。そこでここでは、この特性を表現するために、電界  $E$  が電流密度  $J$  の  $n$  乗で表される「 $n$  値モデル」を採用した。すなわち、

$$E = E_c \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (4.10)$$

ここで、 $E_c$  は、臨界電流を定義するための基準電界値 (通常  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ) であり、この時の電流密度を臨界電流密度  $J_c$  とする。また本解析では、REBCO 超電導テープ線材の電気抵抗を、以下の式により求めた。

$$V = V_c \left( \frac{I}{I_c} \right)^n = E_c \lambda^{(i)} \left( \frac{I}{I_c} \right)^n \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned}
 R^{(i)} &= \frac{\partial V}{\partial I} \\
 &= \frac{E_c \lambda^{(i)}}{n I_c^n} \cdot I^{n-1} \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

ただし、 $\lambda^{(i)}$ と  $R^{(i)}$ は各巻線セグメントの長さとして電気抵抗を示す。

(2) PEEC と熱の連成解析プログラムの妥当性確認

本研究で開発した PEEC と熱の連成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。なお、実験結果は、MIT のハングループおよび KEK の王助教授のご協力により頂いたものである。

(1) 実験による解析プログラムの妥当性確認  
本研究では、過電流通電特性、励磁特性お

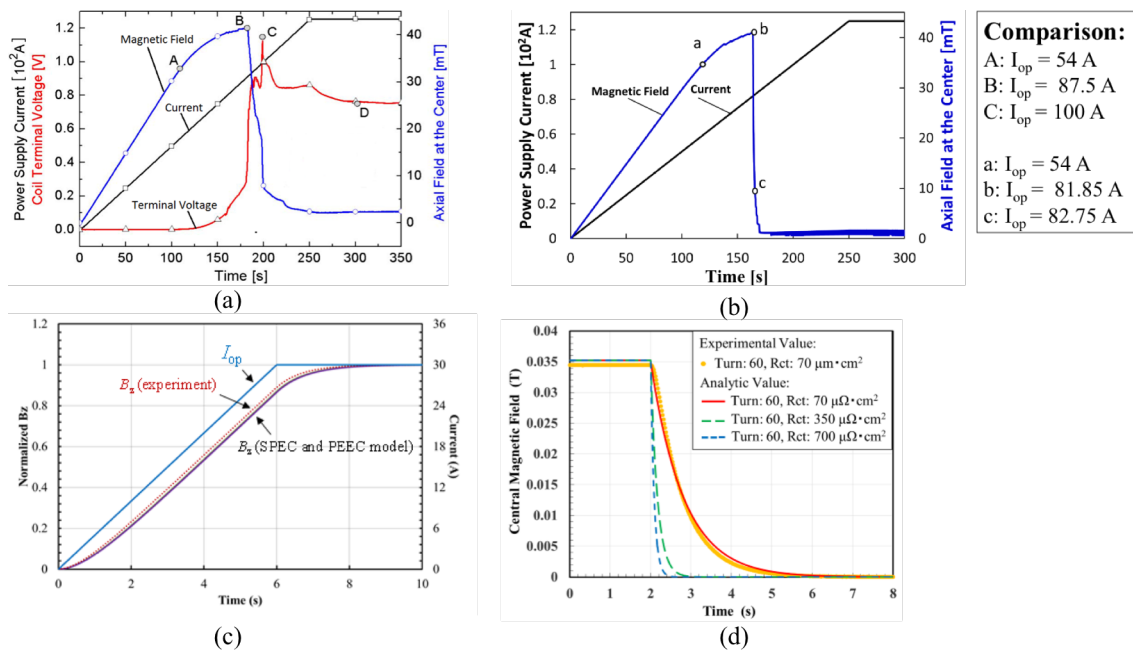


Fig. 2 PEECと熱の連成解析プログラムの妥当性確認: (a) 過電流通電試験の実験値; (b) 過電流通電特性に関する解析値と実験値の比較; (c) 励磁特性に関する実験値と解析値の比較; (d) 遮断特性に関する実験値と解析値の比較

よび遮断特性の評価をそれぞれに行った。過電流通電特性評価実験で使用した無絶縁モデルコイルは内径 60 mm, 外径 66 mm, 高さ 4 mm であり, 巻数が 30 となる。モデルコイルが液体窒素温度での臨界電流は 54 とした。一方, 励磁と遮断特性の評価実験で用いた無絶縁モデルコイルは, 内径 60 mm, 外径 66 mm, 高さ 4 mm であり, 巻数が 60 となる。モデルコイルが液体窒素温度での臨界電流は 43 と測定されている。これらの実験では, ホールプローブを用いて, 励磁・遮断および過電流通電時におけるモデルコイル中心磁場の振る舞いを測定することを行った。それに対して, 筆者は開発した数値解析プログラムを用いて実験を再現した。解析条件として, 超電導特性として  $n$  値を 30 一定とした。そして, 層間接触電気抵抗は, 他の先行研究で得られた実測値 ( $70 \mu\Omega/\text{cm}^2$ ) を用いた。温度解析における境界条件 (冷却条件) は断熱条件を採用し, 径方向の熱伝導率は周方向の  $1/20$  と仮定した。また繰り返し計算の時間刻みは  $0.01$  秒とした。その結果は Fig. 2 に示す。

まず, Fig. 2(a) と (b) に示す過電流通電特性評価では, 解析プログラムが無絶縁コイルの複雑で特異な振舞いを (a~c 点) を定性的に再現したことがわかった。ところが, 誤差の主な原因としては, 解析で用いた材料特性が供試コイルそのものの特性ではなかったことと, 試験は液体窒素中で行われたが, 解析では断熱状態を仮定したこととの 2 点が挙げられる。

次に Fig. 2(c) に, 励磁速度が  $5$  A/s における無絶縁コイルの励磁特性の結果を示す。同図より, 励磁電流の増加に対して, 無絶縁コイルの中心磁場は遅れていることがわかったが, PEEC と簡易等価回路 (SPEC) の回路解析結

果は実験結果をよく再現している。

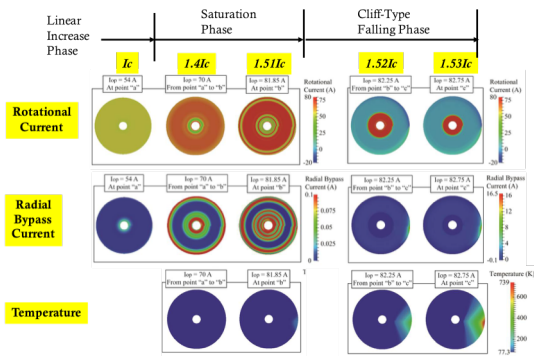
Fig. 3(d) に, 遮断特性から求められた層間接触電気抵抗値  $70 \mu\Omega/\text{cm}^2$  を PEEC モデルに基づいた回路解析に利用・代入して遮断特性を解析した結果を, Fig. 2(d) 中に赤色実線として示した。解析と実験 (黄色点線) の結果がよく一致している。

以上により, 本研究で確立した PEEC と熱の連成解析プログラムは, 無絶縁コイルの基礎特性解析に有効であることが確認された。

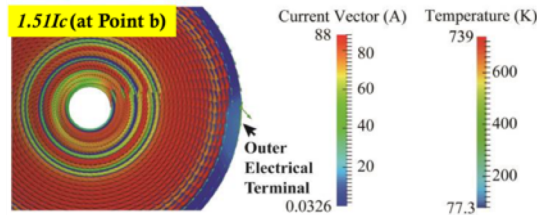
#### 4. 2 解析プログラムを活用して得られる成果

本研究で開発したプログラムにより, 励磁・遮断・過電流転移時に於ける無絶縁コイル内の電流や発熱・温度分布の時間変化を可視化することができ, 複雑な電磁的・熱的現象の把握ができるようになった (Fig. 3)。その結果に基づいて, 励磁・減磁時に於ける磁場遅れの原因を究明し, それを改善する対策として, 無絶縁高温超電導コイルの層間接触電気抵抗の向上が有効であることを定量的に示した。また, 巻線厚みのばらつきがある REBCO テープ線材で製作した無絶縁高温超電導コイルを対象として, 層間接触不良部分の占積率が遮断時における磁場減衰時定数, および巻線内の電流の偏りや集中に与える影響について検討した。それにより, 実規模の無絶縁パンケーキコイルの製作時における巻線層間の接触不良面積の許容値を提示することができた。

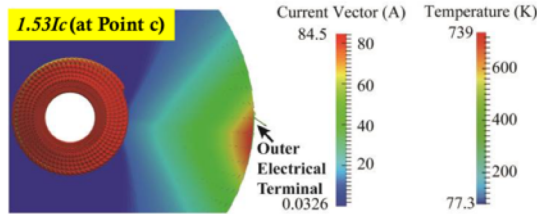
次に, 開発した PEEC モデルに基づく電流分布解析と有限要素法に基づく温度分布解析により, 常電導転移時の無絶縁コイルの巻線内の電流と熱的振舞いについて検討した。その結果と常電導転移時における層間絶縁コイ



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. 過電流時における無絶縁コイル内の過渡的電流と温度分布: (a) クエンチ特性の三段階; (b) 点bでの電流と温度分布; (c) 点cでの電流と温度分布

ル内の電流と熱的振舞いと比較した結果、無絶縁高温超電導コイルは従来の層間絶縁コイルより極めて高い熱的安定性を有することが確認できた(Fig. 4 と 5)。

また、無絶縁コイルの挙動解析用計算機プログラムを用いて、まず無絶縁高温超電導コイルの常電導転移発生時の過渡的な挙動を解析・評価し、局所的な温度上昇が従来の層間絶縁コイルに比べ大幅に抑制されるメカニズムを明らかにした。次に、3-T MRI用メーター級大口径無絶縁コイルを対象として、層間接触電気抵抗、銅安定化層の厚みや負荷率(運転電流とコイル臨界電流の比)が、局所的常電導転移発生時の熱的安定性に与える影響を解析・評価した。また、目標値とした  $500 \text{ A/mm}^2$  を達成するために必要となる銅安定化層厚みと負荷率の評価・決定法を提案した。さらに数十秒程度の励磁遅れを達成できるための層間接触電気抵抗を示した。以上の検討結果を利用して、本節で対象とした運転温度が  $20 \text{ K}$  のメーター級大口径無絶縁コイルの設計において、 $5 \mu\text{m}/\text{side}$  の銅安定化層厚み、 $70\%$  の負荷率、および  $7000 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$  の層間接触電気抵

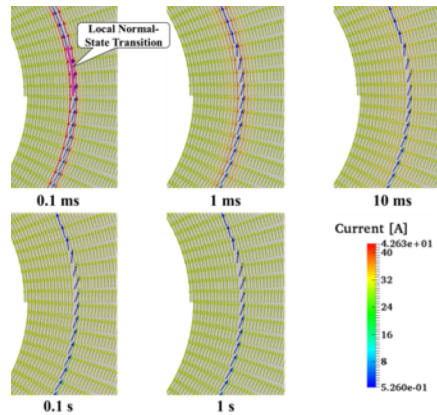


Fig. 4. 常伝導転移部付近の電流ベクトルの拡大図

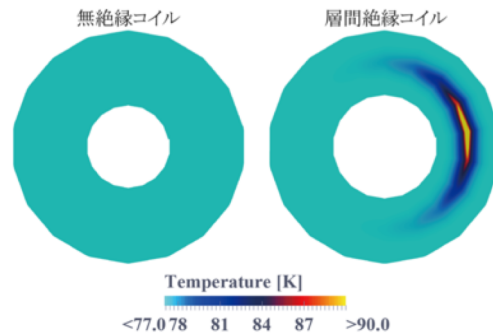


Fig. 5. 常伝導転移後 5 s 後における無絶縁コイルと層間絶縁コイルの温度上昇の比較

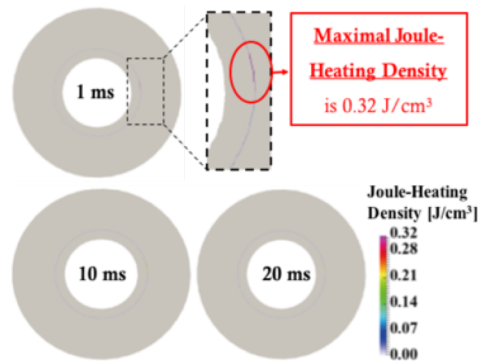


Fig. 6. 運転温度が  $20 \text{ K}$  の場合、 $5 \mu\text{m}/\text{side}$  の銅安定化層厚み、 $7000 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$  の層間接触電気抵抗、および  $70\%$  の負荷率を設定した時の 3-T 級 MRI 用メーター級無絶縁高温超電導コイルの常電導転移時における (a) 局所的ジュール発熱分布、および (b) 熱エネルギー密度分布

抗値を採用すると、常電導転移時に巻線内の発熱が、従来の絶縁高温超電導コイルの最小クエンチエネルギーに比較して十分小さく、ホットスポットの形成の可能性がほとんどないことがわかった。その設計により、無絶縁コイル巻線方式を採用することにより、設計目標に掲げた高電流密度・高励磁特性・高熱的安定性という 3 つの課題を解決できる可能性があることを示すことができたと考える (Fig. 6)。

最後に、無絶縁コイルの局所的常電導転移発生時の巻線内の電流分布変化に伴う発生磁

場の変化に着目し、これをピックアップコイルにより検出する方法の有効性を数値解析により検証した。すなわち、60 ターン小型 (m 級) 無絶縁 REBCO パンケーキコイルを対象に、これまで開発した PEEC モデルに基づいて求めた常電導転移発生後の無絶縁コイル巻線内の電流により発生する変動磁場を計算し、円形ピックアップコイルについて誘導される電圧を解析・評価した。その結果、円形ピックアップコイルを用いて、局所的常電導転移を十分検出可能であることが示された (Fig. 8(a))。一方、従来のコイル両端電圧による局所的常電導転移の検出は極めて困難であることが示された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Takahiro Oki, Aika Ikeda, Tao Wang, Atsushi Ishiyama, So Noguchi, Katsutoshi Monma, Tomonori Watanabe, and Shigeo Nagaya, “Evaluation on Quench Protection for No-Insulation REBCO Pancake Coil.”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 26, no. 4, Art. No. 4702905, 2016.
- ② Tao Wang, So Noguchi, Xudong Wang, Issei Arakawa, Katsuhiko Minami, Katsutoshi Monma, Atsushi Ishiyama, Seungyong Hahn, and Yukikazu Iwasa, “Analysis on Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coil during Over-Current and Sudden Discharging”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 25, no. 3, Art. No. 4603409, 2015.
- ③ Xudong Wang, Tao Wang, Erika Nakada, Atsushi Ishiyama, Ryusei Itoh, and So Noguchi, “Charging Behavior in No-Insulation REBCO Pancake Coils,” IEEE Trans. Appl. Supercond., 査読有, vol. 25, no. 3, No. 4601805, 2015.

[学会発表] (計 4 件)

- ① (Invited Presentation) Tao Wang, Atsushi Ishiyama, So Noguchi, Seungyong Hahn, Yukikazu Iwasa, “Electromagnetic and Thermal Behaviors in No-Insulation REBCO Pancake Coil.”, 3C-a03, 1<sup>st</sup> Asian ICMC and CSSJ 50<sup>th</sup> Anniversary Conference, Kanazawa Kageki-za (Kanazawashi, Ishikawaken, Japan), Nov. 10<sup>th</sup>, 2016.
- ② Tao Wang, Atsushi Ishiyama, So Noguchi, Katsutoshi Monma, Tomonori Watanabe, Shigeo Nagaya, “Detection Method of Local Normal-State Transition in No-Insulation REBCO Pancake Coil.”, P07, The 8<sup>th</sup> Asian Conference on Applied Superconduct-

ivity and Cryogenics, Zhejiang University (Hangzhou, Zhejiang Province, China), Nov. 23<sup>th</sup>, 2015.

- ③ 王 韜, 池田 愛花, 大木 隆宏, 賈 昀 昊, 石山 敦士, 野口 聡, 門馬 克敏, 渡辺 智則, 長屋 重夫, 「無絶縁 REBCO パンケーキコイルの局所的常電導転移時における銅安定化層厚が熱安定性に対する影響」, 3A-a04, 2015 年度春季低温工学・超電導学会, 産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂 (茨城県つくば市), 2015 年 5 月 29 日.
- ④ 王 韜, 池田愛花, 大木隆宏, 王旭東, 石山敦士, 野口聡, HAHN Seungyong, 岩佐幸和, 「無絶縁 ReBCO 線材を巻線したパンケーキコイルの過電流通電特性に関する数値解析・評価」, 2A-a10, 2014 年度春季低温工学・超電導学会, タワーホール船堀 (東京都江戸川区), 2014 年 5 月 27 日.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

王 韜 (WANG Tao)

早稲田大学, 理工学術院総合研究所, 招聘  
研究員

研究者番号 : 60707818