

令和元年9月14日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18068

研究課題名(和文)次世代MRI/NMR用無絶縁高温超伝導コイルのためのクエンチ検出と保護技術の開発

研究課題名(英文) Study on Quench Detection and Protection Technologies of No-Insulation HTS Magnet for Next-Generation MRI and NMR

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：我々はメーター級大口径MRI用無絶縁コイルシステムの基礎特性を解析可能なコードを開発した。それを用いて、励磁時におけるコイルシステムの常電導転移及び電流特性を解明した。また、コイルシステムにおける子コイルの電流の振る舞いを解明し、そしてその電流の振る舞いを影響する要素を抽出した。更に、メーター級大口径MRI用マグネットへ適用することに目指し、無絶縁コイルシステムが励磁可能となる条件、すなわち、自己インダクタンスと接触抵抗の比について数値解析で計算した。最後に、メーター級大口径MRI用無絶縁コイルシステムの励磁時における発熱を評価し、各子コイルに必要な冷却負荷について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有限要素法及び分布常数回路網解析に基いてメーター級大口径MRI用無絶縁コイルシステムの基礎特性を解析可能なコードを開発した。この解析コードを用いて、従来困難となる無絶縁コイルシステムの設計及び特性評価ができるようになった。また、銅ピックアップコイルと可変抵抗に基いた常電導転移検出及び保護法は、常電導転移事故時に超伝導コイルシステム内に蓄えた電磁エネルギーの引出しを制御できるようになった。

研究成果の概要(英文)：We developed a program for analyzing the basic behaviors of no-insulation coil-system applied in MRI and NMR. Using this analysis program, the behavior of local normal-state transition and the current characteristic in the coil-system were clarified. According to the clarification of the behavior of the current distribution inside the sub-coil in the coil-system during charging, the discussion on the factors influencing the current distribution was conducted. Moreover, in order to meet the application requirement of the magnet in meter-class bore MRI, the numerical investigation on the ratio between self-inductance and turn-to-turn contact resistivity was conducted, which is an important condition influenced the charging process. Finally, the necessary cooling load of sub-coil was discussed based on evaluating the Joule-heat generation of the NI magnet.

研究分野：超電導応用工学

キーワード：無絶縁コイルシステム クエンチ検出 コイル保護 高温超伝導

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、高齢化社会の進展と、地域医療の高度化の要請から死亡率の最も高いガンを早期に発見し治療を施すための、先進生命基礎科学研究用NMRと早期・高精度診断を可能とするMRI装置の高度化・高性能化が強く望まれている。そしてNMRやMRIに用いられる超電導コイルの高磁場化(NMR用:24T以上、MRI用:7T以上)による機器の小型・高性能化が求められている。そのような状況のもと、近年進展著しい高温超電導 (HTS) 技術を活用した高磁場発生用コイルの研究開発が内外で活発となっているが、経済性や利便性に課題があり、現状では普及・拡大が難しい状況にある。従って、次世代先進生命科学研究・医療用MRI/NMRの普及拡大を実現すべく、それを構成するREBCO高温超電導コイルシステムにおける高信頼化・小型化技術の開発が期待されている。高温超電導コイルシステムの高信頼化・小型化に向けてはFig.1に示す諸開発課題を克服しなければならない。これまで部分要素等価回路(以下、PEECと称する)に基づいた電流分布解析と有限要素法に基づいた温度分布解析の連成解析プログラムを開発した。その解析プログラムを用いて、本研究では、従来層間絶縁の高温超電導コイルにおいてはクエンチの検出と保護は極めて困難な課題を解決する、無絶縁巻線方式を用いた高信頼・高安定化の高温超電導コイルシステムに対して局所的クエンチの検出 (Fig.3) 及び保護技術 (Fig.4) の両方を取り込んだインテリジェンスな動的保護システムの開発を目指し、コイルシステムを工業製品とする高信頼化を達成することを目的とした。

2. 研究の目的

本研究課題では、次世代普及型MRI用m級高温超電導コイルシステムへの応用を考慮した無絶縁コイルにおけるインテリジェンスな動的保護システムの開発のための最もコアの部分であるクエンチの検出・保護抵抗の動的制御・保護技術の確立を目指す。従って、以下の研究課題について研究期間内で解明する予定である。1)インテリジェンスな動的保護システムに対して、PEECに基づく電流分布解析、ピオ・サバル法に基づく磁場分布解析と有限要素法に基づく温度解析の連成解析が可能で数値解析プログラムを確立する(Fig.4)。2)その数値解析プログラムにより、局所的常伝導転移時における磁場の時間的変化を精度よく検出できるピックアップコイルを設計する。3)層間接触抵抗率と、熱擾乱などによる局所的超伝導特性低下率をパラメータとしたピッ

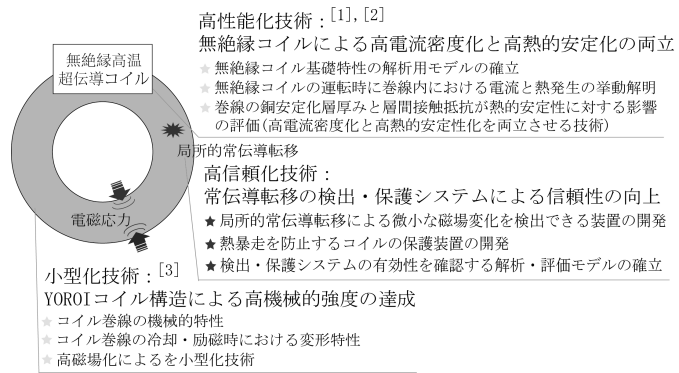


Fig.1 高信頼・高性能・小型化の高温超電導コイルシステムの開発課題

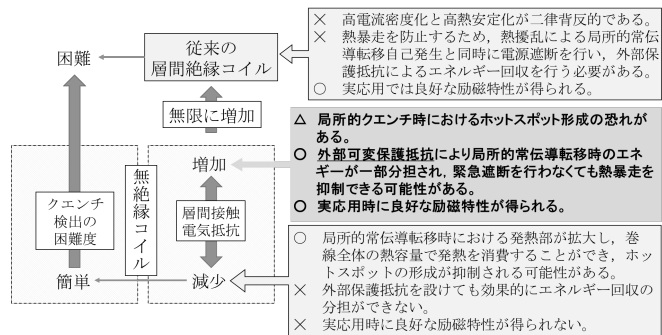


Fig.2 無絶縁コイルと絶縁コイルにおける局所的クエンチの検出およびコイル保護

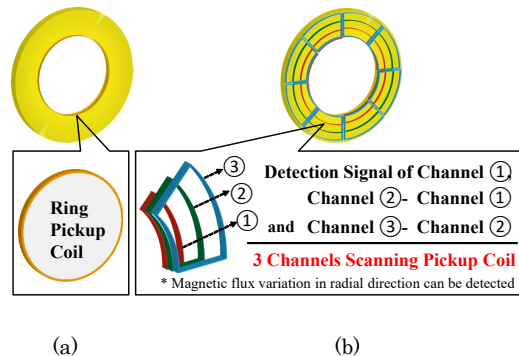


Fig.3. ピックアップコイルに基づく常伝導転移検出法: (a) 円型ピックアップコイル; (b) スキャンングピックアップコイル

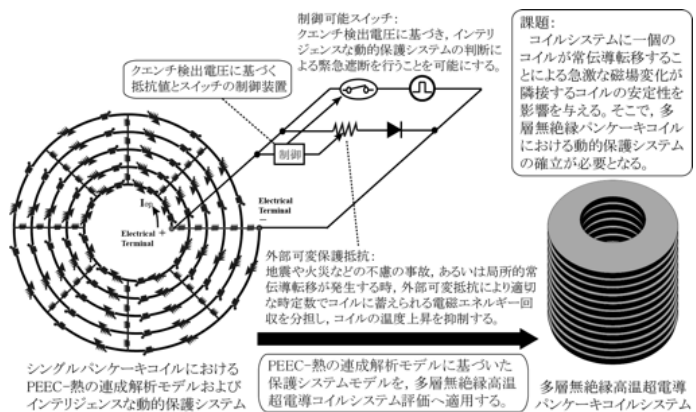


Fig.4. インテリジェンスな動的保護システムの概略図および将来的な応用

の連成解析が可能で数値解析プログラムを確立する(Fig.4)。2)その数値解析プログラムにより、局所的常伝導転移時における磁場の時間的変化を精度よく検出できるピックアップコイルを設計する。3)層間接触抵抗率と、熱擾乱などによる局所的超伝導特性低下率をパラメータとしたピッ

クアックコイルの検出電圧の感度解析、および検出電圧に基づく外部可変保護抵抗値の最適化計算(収束条件が温度上昇)により、ピックアップコイルの検出電圧と最適な外部保護抵抗値の間の伝達関係を明らかにする。4)不慮の事故による緊急遮断時および局所的常伝導転移発生時に無絶縁コイルの温度上昇の抑制に対する成立性と有効性について、数値解析プログラムおよびモデルコイルを用いた検証実験の両面で検討・評価を行う。

### 3. 研究の方法

本研究は次世代先進生命科学研究・医療用MRI/NMRの無絶縁高温超伝導コイルシステムの高信頼化を実現するためのクエンチ検出とコイルの保護技術について提案を行うことにした。先行研究では、小型無絶縁コイルの遮断時および局所的常伝導転移発生時におけるコイルの自己保護(self-protection)、すなわち、層間接触抵抗によるコイルに蓄えられるエネルギー回収について実験と解析で検証を行ったが、励磁特性を向上するために層間接触抵抗を増加すると、無絶縁コイルでも局所的常伝導転移時におけるホットスポットを形成する恐れがある。そこで、申請者は先行研究で用いられた無絶縁モデルコイル(層間接触抵抗率:  $70 \mu\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 巻数: 60 ターン)を使用し、Fig.5 に示した簡易回路に基づいた回路解析および遮断実験を行った結果、Fig.5 に示した外部保護抵抗が無絶縁コイルの遮断時におけるエネルギー分担の知見を得た。その結果は、外部保護抵抗を制御することにより遮断時のコイルの温度上昇を許容される範囲に抑えることができると示している。従って、局所的常伝導転移を検出する電圧を用いて外部可変保護抵抗を制御することにより無絶縁コイルの自己保護特性を活かしながら安定性を維持する制御システムが図れる。この新たな発想およびこれまでの成果を踏まえて、高電流密度と高熱的安定性を両立する無絶縁高温超伝導コイルシステムに対するインテリジェントな動的保護システムを実現するためのコア技術を確認する。

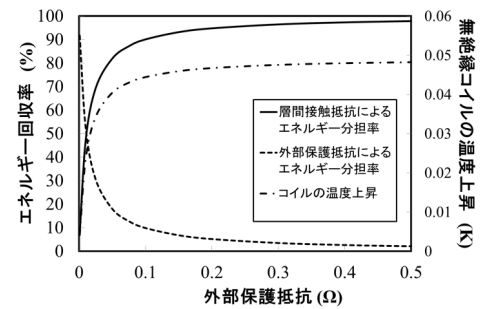


Fig.5. 外部保護抵抗が無絶縁コイルの遮断時におけるエネルギー回収率とコイルの温度上昇に対する影響

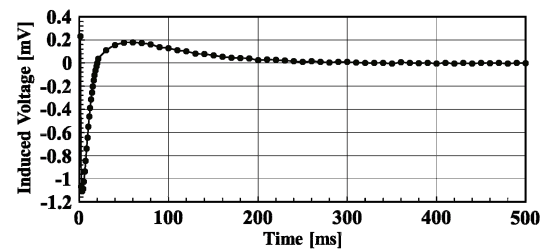


Fig. 6. 常電導転移発生時円型ピックアップコイルの検出信号

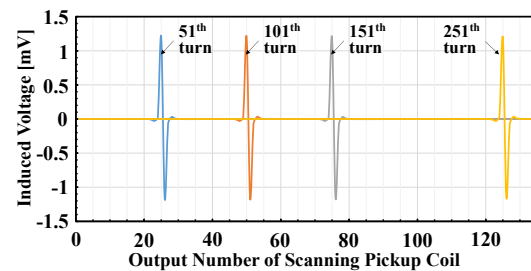


Fig. 7. 常電導転移位置特定時のスキヤニングピックアップコイルの検出信号

### 4. 研究成果

- 銅ピックアップコイルに基づいたメーター級大口径無絶縁コイルのクエンチ検出方法  
本節では、常電導転移時における中心ボアの磁束変化を検出できる円形ピックアップコイルと、巻線部の磁束変化を検出できるスキヤニングピックアップコイルの2種類を対象として、Fig. 3 に示した無絶縁コイル用常電導転移検出法としての有効性について検討・評価を行った。局所的常電導転移直後、径方向電流の電流転流により、常電導転移部を中心とする巻線の周方向電流が瞬間的に消失する。これによりコイル中心ボア(=円形ピックアップコイル検出領域)における鎖交磁束が瞬間的に減少する。結果的に、円形ピックアップコイルはその磁束変化を検出することになり、今回の場合、Fig. 6 に示したように、その最大値が10000ターンの円形ピックアップコイルでは1.2 mV程度となった。Fig. 7はその検出信号の解析結果を示す。解析では、51、101、151及び251ターンの常電導転移が発生したとすると、常電導転移発生後1 msのうち、最大1.3 mVの信号が検出でき、波形の位相は常電導転移発生場所に依存したことがわかる。その特性を利用して、大口径無絶縁コイルのクエンチ検出ができることと言える。
- 積層型無絶縁コイルシステムの設計および特性評価用数値解析技術  
本研究で検討する積層型高温超伝導コイルシステムモデルは、等価回路分析に基づく電流解析、ビオ・サバルに基づく磁場解析および温度解析で構成された。まず、電流解析では我々は簡易回路モデルと複雑電路網モデルを使用した。簡易回路解析は、Fig. 8 のように、積層型パンケーキコイルシステムを、垂直方向に若干個のサブコイルが直列した回路システムとして考えた。サブコイルに流す電流は、自己インダクタンス(L)だけではなく相互インダクタンス(M)にも影響されるとした。電気抵抗成分として、無絶縁コイルの層間接触

抵抗 ( $R_c$ ) およびサブコイルの超電導特性 ( $R_{I-V}$ : I-V 特性) を考慮した。そして、複雑回路網解析は積層型パンケーキコイルシステムに対して、多層 PEEC 回路モデルを開発した。次に、磁場解析では、磁場が回路方程式で求められた各サブコイルの電流を用いてビオ・サバル法により計算した。また、温度解析では、サブコイルの温度上昇が冷媒温度、温度依存性を考慮した比熱と REBCO 線材の密度、およびサブコイルの巻線体積を用いて求められた。最後に、磁場、温度、および磁場印加角度に依存するサブコイル全体の電気抵抗を求め、最初の回路方程式にフィードバックし、次ステップの電流と温度の計算に繰り返した。

開発した積層型高温超電導コイルシステムの特性解析用数値解析モデルを用いて、3-T 級 MRI 用メーター級大口径無絶縁高温超伝導コイルシステムの設計を行った。Fig.9 は常電導転移発生時ジュール発熱の銅安定化層厚み依存性を示す。その結果は、高温超伝導コイルシステムの製作時に超電導巻線の銅安定化層厚みが市販最薄の線材を使用しても良いと示唆した。結果から  $5 \mu\text{m}/\text{side}$  の銅安定化層を有した超伝導線材を用いて実現したコイルシステムの電流密度は  $692 \text{ A}/\text{mm}^2$ 、銅安定化層が  $15 \mu\text{m}/\text{side}$  以内の超伝導線材をコイルシステムに使用すれば、 $500 \text{ A}/\text{mm}^2$  の電流密度目標を実現する見込みがある。また、Fig. 10 は常電導転移発生時ジュール発熱の層間接触抵抗率依存性を示す。結果として、メーター級大口径無絶縁高温超伝導コイルシステムでは、巻線の銅安定化層厚みが常電導転移時のジュール発熱と無関係である。また、巻線層間接触抵抗率の増加は常電導転移時におけるジュール発熱の増加に影響を与えるが、Fig.11 に示したように層間接触抵抗率が  $7000 \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  まで増加されても、無絶縁高温超伝導コイルシステム内の最大温度上昇は  $22 \text{ K}$  に抑えられることができると明らかにした。

以上の結果に基づいて、高電流密度・高熱的安定性・低励磁遅れの高温超伝導コイルシステムを実現する技術的指標を作成することができ、諸元が Tab. 1 にまとめられた 3-T 級 MRI 用メーター級大口径無絶縁高温超伝導コイルシステムの設計することができた。

3) 可変抵抗に基づいたメーター級大口径無絶縁コイルの保護方法

本研究で検討する積層型無絶縁高温超電導コイルの保護回路モデルでは、簡易回路モデルと複雑回路網の両方を用いられた。解析では、Tab. 1 に示した  $20 \text{ K}$  運転中の 3-T MRI 用メーター級大口径高温超伝導コイルの電気遮断過程を模擬し、外部並列した可変抵抗を変化しながら、コイル内部の電流と温度を評価した。Fig. 12 は、層間接触抵抗率が  $7000 \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  とした時無絶縁高温超伝導コイル内の電流および温度変化の可変抵抗値依存性を示す。結果から、層間接触抵抗率が  $7000 \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  の無絶縁高温超伝導コイルにおいて、外部可変抵抗値はコイル内の周方向電流に影響する。それは、外部可変抵抗値の調整は、遮断時に無絶縁コイル内電流を分流することができることがわかる(Fig. 12(a))。その分流効果は遮断時の無絶縁コイルの温度上昇を抑制できる。Fig. 12(b)は外部可変抵抗値が  $1 \text{ m}\Omega$  にすれば、無絶縁コイルの遮断時温度上昇を  $3 \text{ K}$  以内に抑えることができると示唆している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

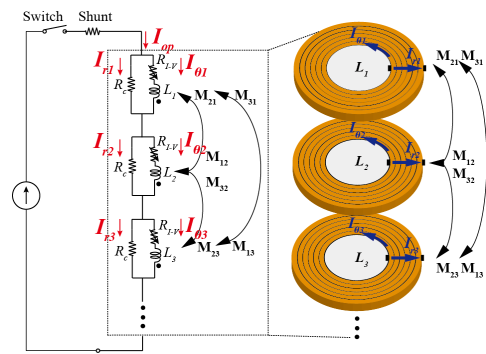


Fig. 8. 積層型高温超電導コイルシステムの回路モデル

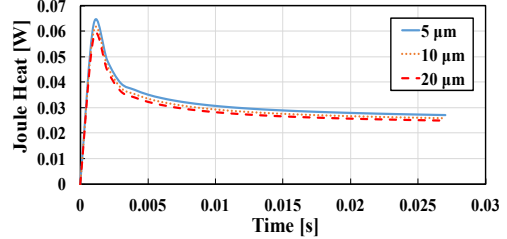


Fig. 9. 常電導転移発生時ジュール発熱の銅安定化層厚み依存性

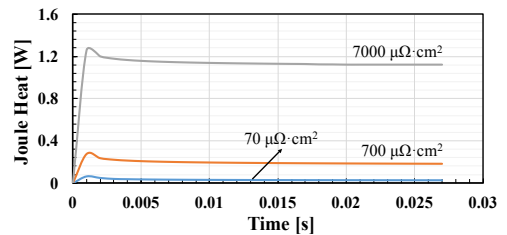


Fig. 10. 常電導転移発生時ジュール発熱の層間接触抵抗率依存性

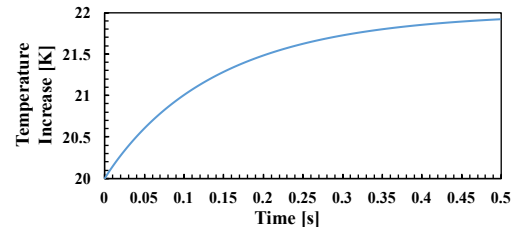


Fig. 11. 常電導転移発生時に層間接触抵抗率  $7000 \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$  の無絶縁高温超伝導コイルシステム内における最大温度上昇特性

- 1) **Tao Wang**, Kazuki Katsumata, Atsushi Ishiyama, and So Noguchi, "Detection Method for a Local Normal-State Transition in a No-Insulation REBCO Pancake Coil", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, Art. No. 0601206, 2017.

[学会発表] (計8件)

- 1) Tao Wang, Atsushi Ishiyama and So Noguchi, "Protection for Meter-Class No-Insulation REBCO Pancake Coil using a Parallel Resistance during a Discharging.", *1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference*, Nov. 7<sup>th</sup> - 10<sup>th</sup>, 2016, Kanazawa, Japan.
- 2) Tao Wang, Atsushi Ishiyama, So Noguchi, Hahn Seungyong and Iwasa Yukikazu, "Electromagnetic and Thermal Behaviors in No-Insulation REBCO Pancake Coil", *1st Asian ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference*, Nov. 7<sup>th</sup> - 10<sup>th</sup>, 2016, Kanazawa, Japan.
- 3) Tao Wang, Kazuki Katsumata, Atsushi Ishiyama, and So Noguchi, "Detection Method for a Local Normal-State Transition in a No-Insulation REBCO Pancake Coil", *Applied Superconductivity Conference 2016*, Sep. 4<sup>th</sup> - Sep. 6<sup>th</sup>, 2016, Denver, the U.S.A.
- 4) 王韜, 杜双松, 丁開忠, 「無絶縁巻線技術に基づく積層型高温超電導コイルシステムの設計: 工学設計用数値解析技術」, 日本低温工学・超電導学会, 2017年。
- 5) 王韜, 杜双松, 丁開忠, 「無絶縁巻線技術に基づく積層型高温超電導コイルシステムの設計: 非対称に分割されたコイル巻線の局所的インダクタンス計算法」, 日本低温工学・超電導学会, 2017年。
- 6) 王韜, 杜双松, 丁開忠, 「無絶縁巻線技術に基づく積層型高温超電導コイルシステムの設計: メーター級大口径MRIへの応用に伴う技術的課題と解決方策」, 日本低温工学・超電導学会, 2017年。
- 7) Tao Wang, Kaizhong Ding, Shuang song Du and Chunlong Zhou, "Conceptual Design of a No-Insulation Pancake Coil-System for Next-Generation Meter-Class Bore High-Field MRIs", *Applied Superconductivity Conference 2018*, Oct. 28<sup>th</sup> - Nov. 2<sup>th</sup>, 2018, Seattle, the U.S.A.
- 8) Tao Wang, Kaizhong Ding, Shuang song Du and Chunlong Zhou, "Numerical Investigation of a Dynamic Protection Method for Meter-Class REBCO No-Insulation Pancake Coils", *Applied Superconductivity Conference 2018*, Oct. 28<sup>th</sup> - Nov. 2<sup>th</sup>, 2018, Seattle, the U.S.A.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

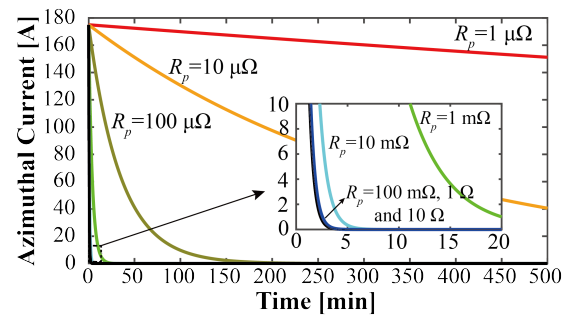
ホームページ等: なし

## 6. 研究組織

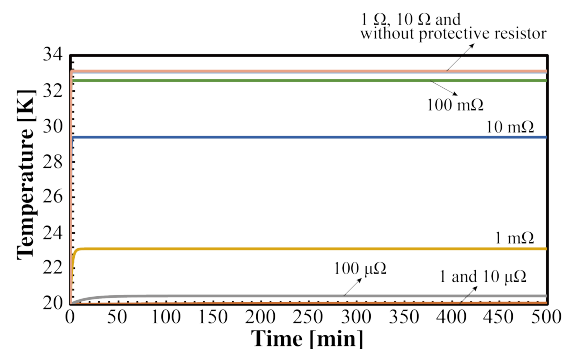
(1) 研究分担者 なし

Tab. 1. 3-T MRI用メーター級大口径無絶縁高温超伝導コイルシステムの諸元

Parameter	Value
<b>Tape Specification</b>	
Type	SuperPower® C4050
Thickness of Stabilizer (μm/side)	5
Thickness of Tape (μm)	65
<b>Coil-System Specifications</b>	
Inner diameter; outer diameter; height (m)	1.0; 1.035; 0.235
Number of sub-pancake coil	47
Number of turns per sub-pancake coil	270
Operation temperature (K)	20
Coil $I_c$ operation current (A)	250; 175
Turn-to-turn contact resistivity (μΩ·cm <sup>2</sup> )	7000
Inductance (H)	231.7 (204.8 mH per sub-coil)



(a)



(b)

Fig. 12. 外部可変抵抗が変化した時, 層間接触抵抗率が7000 μΩ·cm<sup>2</sup>の無絶縁高温超伝導コイル内部の変化: (a) 周方向電流; (b) コイルの温度上昇