

令和元年6月10日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06238

研究課題名（和文）機能性プラスチック導入による高温超伝導コイル耐クエンチ性向上と巻線部高電流密度化

研究課題名（英文）Increase of quench protection performance and high current density winding in HTS coils with new plastic material

研究代表者

高尾 智明（Takao, Tomoaki）

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：30245790

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、クエンチによる損傷を受けずに従来のHTSコイルの巻き線電流密度を倍程度に増す方法を明らかにすることを目的として行い、次のような成果を得た。1）HTSコイルの巻線のクエンチによる熱的振る舞いを解析、損傷が起きない条件を得るための基礎を作った。2）極低温域で優れた熱的特性を持つプラスチック材料について、その導入の有効性を示した。3）クエンチ検出の高感度化の検証を行った。4）複数の線を並列にした導体で、クエンチを起こさない条件を調べた。以上、得られた成果を組み合わせることにより、本研究の目的達成の道筋を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

HTSコイルのクエンチ保護条件の解析モデルについて、従来、明らかでなかった線の熱伝達特性のデータを実験により求め、解析によりクエンチ保護の指針を調べるための基礎を得た。また、プラスチック新材料の導入の有効性について実験的、解析的研究を行った。さらに先行研究で開発したクエンチ検出性能を改善する方法についてその有効性を検証した。複数線を束ねた導体の電磁氣的振る舞いを明らかにし、コイルの安定性を改善する方法を示した。以上の点で、本研究結果は学術的な意義がある。また、本研究結果により実用に耐えるHTSコイルシステム構成法を示すことが可能となり、HTS機器の実用化への道を拓いたことに社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）： Results of this research project are summarized as follows. 1) Thermal behaviors of HTS wires in quenched coils were analytically studied, and an analytical method to study on conditions to protect HTS coil from damages caused by a quench were obtained. 2) Effectiveness of use of plastic materials of high thermal conductivity and negative thermal contraction co-efficient in the HTS coils was experimentally demonstrated. 3) A quench detection method was studied to increase the sensitivity of quench protection and its effectiveness was demonstrated. 4) Stability of HTS coil wound with conductors composed of multiple wires were investigated, and conditions of quench free were obtained.

Based on the above results, the methods to increase the winding-pack current density of the HTS coils were indicated.

研究分野：超電導工学

キーワード：超電導コイル クエンチ保護 クエンチ検出

1 . 研究開始当初の背景

HTS コイルの巻線部の電流密度はクエンチ保護特性に強く依存している。HTS コイルは低温超伝導 (LTS) に比べ運転温度が高く、線材の熱容量が大きいためクエンチに至る擾乱のエネルギー (クエンチエネルギー) が 3 桁以上大きい。このため、従来 LTS コイルのような微小な擾乱による予期しないクエンチは発生しないと考えられ、クエンチ保護対策は軽視されてきた。しかし、実際にはクエンチが起き、コイルが焼損・破壊する事故が公表例は少ないが各所で起きており、このため近年、巻線部の高電流密度化のためにはクエンチ保護技術の研究の重要性が指摘されてきている。

2 . 研究の目的

高温超伝導 (HTS) コイルを応用した産業・電力機器や医療応用機器の実用化にはコイル巻線部の高電流密度化が重要課題である。実用機器ではクエンチによる損傷に対する保護対策が必須で、その制約により、線材の高臨界電流密度化だけではこの課題は解決できない。本研究では、i) 熱伝導率が従来のコイル構成材である GFRP に比べ 1 桁大きく、負の熱膨張係数を持つ機能性プラスチックを巻線構造に導入し、コイルの抜熱特性を高めてジュール発熱領域の集中を抑え、ii) さらに、クエンチの高感度検出法を工夫し、iii) コイル線の大電流容量化の研究を行うことにより、課題解決を目指す。

以上により、コイルの用途に合わせて研究結果を組み合わせ、クエンチの損傷を受けず従来の巻線部電流密度の限界 (150-200A/mm² 程度) を倍に増す方法を明らかにすることを目的とする。

3 . 研究の方法

(1) HTS 線のクエンチによる熱的振る舞いの解析モデル作成： HTS コイル内の線のクエンチによる熱的振る舞いを解析、損傷が起きない条件を明らかにするための解析モデルを作る。特に、従来データが不足している HTS コイル内の線の線間および線と冷却基板との熱伝達特性を測定し、このデータを基に解析モデルを完成する。

(2) クエンチ保護条件とホットスポット温度の限界値の調査： HTS コイルがクエンチにより損傷を受けるのは、線の局所的な発熱部における温度 (ホットスポット温度) が限界を超えるためであることを実験的に明らかにし、ホットスポット温度の限界値とクエンチ保護条件との関係を実験的に検討する。

(3) 機能性プラスチック材料の導入効果： プラスチック材料として、極低温域で熱伝導率が優れ、負の熱膨張係数を持つものを選び、その特性データを取得し、HTS 線の発熱による温度上昇が抑制される様子を実験的に調べる。

(4) クエンチ検出の高感度化の検証： 先行研究により開発した、銅テープを HTS 線に沿わせて巻く共巻きクエンチ検出方法の高感度化の検証を、小型モデルコイルを用いて行う。

(5) 並列導体を用いたコイルの安定性： 複数の線を並列にし電流容量を増やすとともに、クエンチを起こさない条件を調べ、巻線の電流密度を増す方法を研究する。

4 . 研究の成果

(1) HTS 線のクエンチによる熱的振る舞いの解析モデル [論文]

熱平衡方程式を立ててクエンチ解析を行うにあたり、線材の両側の層への熱伝達率、線材の巻線パックの底面と冷却プレートとの間の熱伝達率は解析的に求めることができず、

測定例もないため本研究で測定を行なった。カプトンテープで絶縁された Bi 銀シース線束ねた巻線パックの間にヒータとしてハステロイテープを挟んだ図 1-1 のような構成の測定装置を作成した。測定はヒータに電流を流し、Bi 銀シース線の温度上昇を測った。図 1-2 に線の層間の熱伝達係数の測定結果を示す。巻線パック底面と冷却基板との熱伝達係数は、図 1-2 のデータと底面冷却による線の温度上昇の測定値に基づき、熱的な等価回路を用いて求めた。

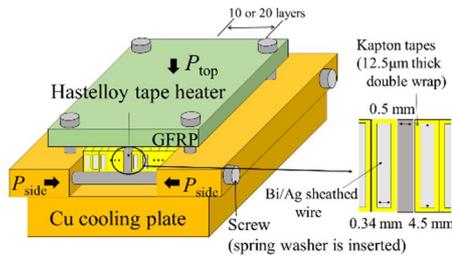


図 1-1 熱伝達測定装置

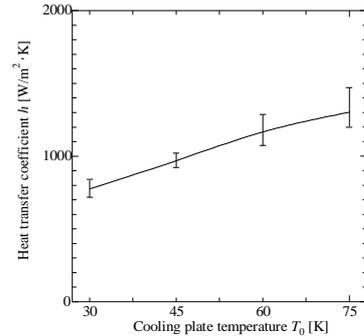
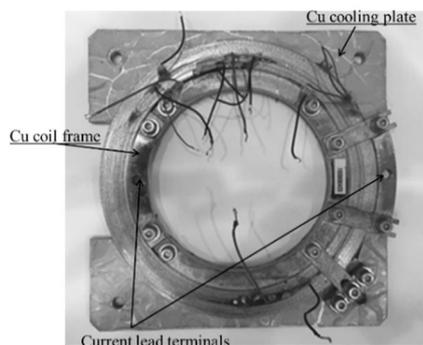


図 1-2 線の層間の熱伝達係数

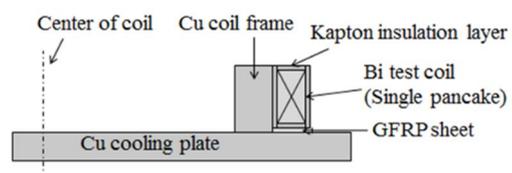
(2) クエンチ保護条件とホットスポット温度の限界値の調査 [論文]

図 2-1 に示すような、小型の Bi 銀シース線で巻いたパンケーキコイルコイル(内径 120mm、外径 150mm、巻数 35 ターン)を作り、クエンチ保護条件とホットスポット温度の関係を測定し、ホットスポット温度の限界値を求めた。測定にあたっては、コイルに一定の通電電流を流し、コイル中に挿入したヒータテープに電流を流し局所的に線を加熱しクエンチを起こさせ、コイル端子間に生じた抵抗電圧を検出し、その値が閾値 V_{qCWs} を超えるとクエンチが起きたと判断し、コイルの通電電流を時定数 で減衰させた。その間にヒータに近接する線のホットスポット温度を記録した。図 2-2 は $V_{qCWs} = 100mV$ とした時の実験結果である。同図より の値が大きくなるにつれてホットスポット温度は上昇し、ホットスポット温度が 460 ~ 490K でコイルの損傷が起きることが分かった。

また、コイルの損傷の原因を確かめるため、コイルに用いた Bi 銀シース線の短尺片に室温で電流を流しジュール加熱し、後に液体窒素中で臨界電流の劣化を測定し、加熱温度と劣化程度の関係調べた。その結果、線の熱的劣化が起きる領域は 540K 程度以上であることが分かった。これから、損傷の原因はホットスポットにおける過熱による線の特性劣化でなく、ホットスポット領域において、線が温度上昇により局所的に膨張し、圧縮応力を受け、バックリングを起こしたために機械的に損傷を受けたものと考えられる。実際、図 2-3 の写真が示すように線にバックリングにより曲げ歪みができていた。



(a) 試験用パンケーキコイル



(b) 試験コイルの断面図

図 2-1 試験用パンケーキコイルの構造

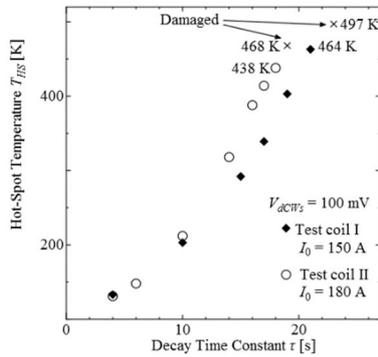


図 2-2 ホットスポット温度とコイル損傷の有無（○◇：再通電可能、×：低電流で抵抗発生）

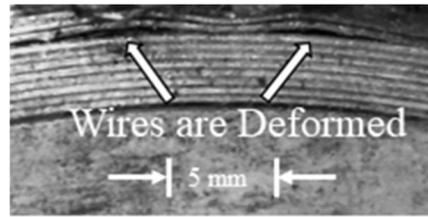


図 2-3 劣化が起きたコイルの巻線形状（線に波状になっている）

（ 3 ）機能性プラスチック材料の導入効果 [論文、学会]

本研究では熱伝導率が従来のコイル構成材であるガラス繊維強化プラスチック（GFRP）に比べ1桁以上高く、また低温で負の熱膨張係数を持つ機能性プラスチックを高温超伝導コイルの巻線構造に導入した。熱的安定化の向上に関しては、構造材が膨張してコイル巻線との接触が良好になり構造材への伝熱が増加するため、安定性方策として有効であることを評価した。まず極低温領域にて熱伝導率を実測すると数 W/mK であり、これは GFRP の熱伝導率よりも 20 倍以上高い。次に機能性プラスチックを室温から液体窒素温度まで冷却させた際の熱膨張係数を実測すると、 $4,000\mu\epsilon$ 近く膨張する結果が得られた。同条件で GFRP の熱膨張係数も測定したが $2,000\mu\epsilon$ 近い収縮であった。そして、コイル巻線構造を模擬した試験装置により伝熱特性を評価し、これをモデル化して 3D 有限要素法を用いて伝熱を数値的にシミュレーションした結果、構造材である機能性プラスチックとコイル巻線との接触面圧が増加するため、両者の接触熱抵抗が約 35 ~ 40% 低減した。これらの結果より、この機能性プラスチックの使用はクエンチ保護策として有効であることを明らかにした。

（ 4 ）クエンチ検出の高感度化の検証

先行研究で、絶縁銅テープを HTS 線に沿わせてコイルに共巻きし、銅テープコイルに発生する電圧と、HTS コイルに発生する電圧との差を取ることで誘導雑音の影響を相殺し、高感度でクエンチを検出する方法を開発した。本方法を図 2-1 に示した試験コイルに適用し、 $V_{dCWs} = 1\text{mV}$ 以下でも誤動作なしにクエンチの検出ができることを確かめた。

（ 5 ）並列導体を用いたコイルの安定性 [学会]

並列導体を用いたコイルの安定性の基本特性を明らかにするため、150 ターンの単線で巻いた

Table 5-1. Specifications of HTS coils

| | |
|---|-----------------|
| coil inner/outer diameter [mm] | 500/614 |
| Tape thickness (Insulation/Non-insulation) ; width [mm] | 0.22/0.16 ; 5.0 |
| Inductance (single/ double layer) [μH] | 26.5/6.63 |
| Contact surface resistivity [μΩ·cm ²] | 71.3 |
| n value (1.0 μV/cm at 0 T, 77 K) | 33 |
| Number of turns (single/double layer) | 150/75 |

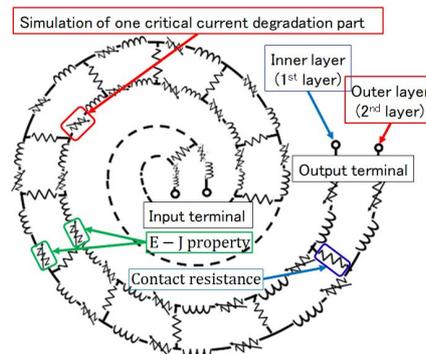


Fig. 5-1 Electric circuit model for current distribution analysis

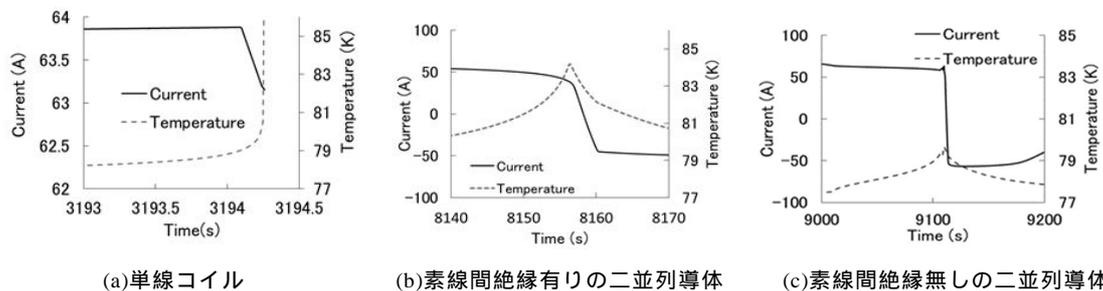


Fig. 5-2 電流遮断前後の劣化部に流れる電流と温度上昇

コイルと 75 ターンの 2 並列導体で構成されるコイルの検討を行った。2 並列導体は、内側の層を 1 層目とし、外側を 2 層目とする。Fig. 5-1 に電気回路モデルを示し、Tab. 5-1 にコイルの諸元を示す。臨界電流は、正常部 300A に対し、劣化部 50A とした。入力電流ならびに目標電流値を、単線コイルは 0.02A/s で 200A、2 並列導体は 0.04A/s で 400A とし、10000 秒間立ち上げ、目標値でホールドした。なお、劣化部における電圧が 4 mV に達した際に回路を遮断し、保護回路が動作するとした。温度分布解析は、2 次元円筒座標熱伝導方程式を用い、コイルを一体物として扱い、初期温度は 77 K とし、断熱条件とした。

Fig. 5-2 に、単線コイル、二並列導体絶縁有り、ならびに二並列導体絶縁無し劣化部電圧が 4 mV の達した際の電流・温度時間変化について示す。単線コイルでは、3194.1 秒後（63.9A 到達時）に回路が遮断され、コイルに流れる電流値は減少するものの、温度上昇が止まらず 3150.1 秒時に熱暴走することが分かった。これは、インダクタンスが並列導体と比較して大きいため、電流の減少が遅れるためである。素線間絶縁有りの二並列導体では、8157 秒後（326.8A 到達時）に劣化部電圧が 4 mV に到達し回路が遮断され、熱暴走は発生しなかった。しかし、劣化部温度は最大 84.17 K と、初期温度から 7.17 K 上昇していることが分かる。素線間絶縁無しの二並列導体では、通電開始から 9109 秒後（364.4A 到達時）に劣化部電圧が 4 mV に達し遮断が行われたが、その時の温度上昇は 2.61 K と、絶縁有りの場合と比較して大幅に抑制できていることが分かった。二並列導体の劣化部でのトータル臨界電流値は 350A（劣化部 50A、正常部 300A）であるが、素線間絶縁有りの並列導体では、トータル臨界電流値以下の通電電流で閾値電圧が発生するが、素線間絶縁無しの並列導体ではトータル臨界電流値以上流れて閾値電圧が発生することから、導体のもつ臨界電流値特性まで、安定性を損なうことなく通電できることがわかった。さらに、素線間絶縁無しの四並列導体においても検討を行い、劣化部を含むトータル臨界電流値までは、熱暴走を生じる事無く通電が可能であることを明らかにした。以上より、素線間絶縁無しの並列導体をコイルの巻線に用いることで、電流容量を大きくすることでインダクタンスを小さくできるため、遮断時の電流減衰を速く行うことで熱暴走を抑えることができる。さらに、素線に局所的な劣化部が存在しても並列導体の他の素線がその位置では健全であることから、4 並列導体において、ある素線が 50%劣化部を有していても並列導体全体では 87.5%の通電容量を確保できるため、素線間絶縁無しの並列導体がコイルの安定性に非常に有効であることを明らかにした。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 3 件）

T. Takao, S. Suga, T. Takano, K. Kuboki, A. Yamanaka, "Influence of High-Thermal-Conductivity Plastic with Negative Thermal Expansion Coefficient on Cooling Performance in

Conduction-Cooled HTS Coils," IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol. 28, Issue 4, DOI 10.1109/TASC.2017.2777837 (2018). (査読あり)

R. Matsuo, N. Matsuda, Y. Fuchida, A. Kojima, A. Nomoto, T. Takao, K. Nakamura, O. Tsukamoto, "Study on Hot-Spot Temperature Limits of Epoxy-Impregnated Coil Wound With Bi/Ag Sheathed Wire to be Safe From Damage Caused by Quenches," IEEE Trans. Applied Supercond., Vol. 28, Issue 4, DOI 10.1109/TASC.2018.2811960, Art No. 4703605 (2018). (査読あり)

T. Ariyama, N. Matsuda, R. Matsuo, Y. Fuchida, A. Kojima, T. Takao, O. Tsukamoto, T. Yamaguchi, T. Kato, "Study on Heat Transfer Characteristics HTS Tapes of Epoxy-Impregnated Conduction-Cooled Coils Using Winding Pack Model," IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol. 27, Issue 4, DOI 10.1109/TASC.2016.2646324, Art No. 8800106 (2017). (査読あり)

〔学会発表〕 (計 4 件)

D. Miyagi, T. Nishioka, M. Tsuda, T. Takao, O. Tsukamoto, "Stability with respect to local critical current degradation in HTS pancake coil wound with insulated conductor composed of non-insulated multiple tape wires," 2018 Applied Superconductivity Conference, 発表番号 4L0r2B-05, Seattle, USA (2018).

菅, 高野, 窪木, 高尾, 山中, HTS コイル用機能材料に向けた高熱伝導プラスチックの低温基礎特性, 電気学会, 超電導機器研究会, 発表番号 ASC-18-019, 東京(2018).

窪木, 菅, 高野, 高尾, 山中, HTS コイル用機能材料に向けた高熱伝導プラスチックの低温基礎特性 (その 2), 電気学会全国大会, 発表番号 5-154, 福岡(2018).

西岡, 宮城, 津田, 高尾, 塚本, 素線絶縁のない複数のテープ線で構成される導体を用いた高温超電導パンケーキコイルの局所的 I_c 低下に対する安定性, 2018 年度春季低温工学・超電導学会, 発表番号 3B-a06, 東京(2018).

〔図書〕なし

〔産業財産権〕なし

〔その他〕なし

6 . 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：宮城 大輔

ローマ字氏名：MIYAGI Daisuke

所属研究機関名：東北大学大学院

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁) : 10346413

研究分担者氏名：塚本 修巳

ローマ字氏名：TSUKAMOTO Osami

所属研究機関名：上智大学

部局名：理工学部

職名：客員教授

研究者番号 (8 桁) : 30017975

(2) 研究協力者 なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。