

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889005

研究課題名(和文) 温度分布可視化による高温超伝導コイルのクエンチ耐性の改善

研究課題名(英文) Quench protection of high temperature superconducting coil by thermography

研究代表者

土屋 雄司 (TSUCHIYA, Yuji)

東北大学・金属材料研究所・研究支援者

研究者番号：50736080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導REBCO線材を用いた無冷媒超伝導マグネットの開発に向けて、低温での局所的発熱(ホットスポット)可視化技術の開発を行った。

2014年度は、低温強磁場中蛍光分光測定により蛍光材料Eu-TFCが低温強磁場中での温度可視化に適応可能であることを明らかにした。また、低温強磁場大電流温度分布可視化装置の立ち上げを行った。

2015年度は、REBCOテープとREBCOコイルにおけるホットスポットの観察をおこなった。ヒーターによりREBCOテープ内に強制的にホットスポットを発生させ常伝導伝播を可視化した。また、劣化したREBCOコイルにおける劣化箇所の温度分布による可視化に成功した。

研究成果の概要(英文)：We developed the cryogenic thermography for magnet application of the high temperature superconducting tapes to solve the local heating (hotspot) problem.

On the first year, Eu-TFC is revealed to be applicable for cryogenic thermography by using fluorescent spectroscopy at low temperature and high field. In parallel, a cryostat with an imaging system for the cryogenic thermography with a high field and a large current capacity was developed.

On the second (last) year, hotspots in REBCO tapes and a REBCO coil were observed using the cryostat. The normal zone propagation was visualized in the REBCO tapes. Finally, the hotspot the degradation area in the REBCO coil was identified at the overcorrect state by using the cryogenic thermography.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導コイル クエンチ保護 温度イメージング 可視化技術 強磁場

1. 研究開始当初の背景

(1) 概要

近年の高温超伝導線材の実用化以降、無冷媒超伝導マグネットの開発が急務である。その実現には、高温超伝導コイルにおけるホットスポット発生による高温超伝導線材の劣化を防止することが必要不可欠である。

(2) 学術的背景

近年、強磁場発生装置の開発とともに強磁場中での物性測定・材料合成に関する研究が盛んになってきている。その際に必要となる定常強磁場を発生させるため、高い電流・磁場特性から高温超伝導線材が注目を集めている。特に、近年商品化された高温超伝導体 RE (Rare-Earth) $Ba_2Cu_3O_7$ (REBCO) 線材を用いた超伝導マグネットの開発が国内外で精力的に行われており、現状では、米国立強磁場研究所において冷媒を用いた 32 T 超伝導マグネット、東北大学のグループでは無冷媒 25 T 超伝導マグネットなどの研究開発が進められている。特に、冷凍機を用いて冷却する無冷媒超伝導マグネットはコンパクト化に優れ、電力のみで運用可能であることから、省エネルギー、ヘリウム枯渇問題を解決する技術として注目を集めている。しかし、REBCO 線材を超伝導マグネットへ応用する際、熱伝導率が低いことから、クエンチ時のホットスポット (局所的な温度上昇) 発生による線材の劣化が問題となる。クエンチ回避のために十分な電流マージンをとって運用している現状に比べ、REBCO 線材におけるホットスポットの抑制に成功すれば、飛躍的に磁場強度を増加させることが可能となる。ホットスポットの抑制には、コイル内の熱伝導経路や発熱箇所を特定する必要がある。しかし、現状では、シミュレーションによって温度分布が予測されているが、十分な位置・時間分解能を持った実験が行われていない。そこで、高温超伝導コイルにおけるクエンチ時の温度分布を可視化することにより、劣化による発熱箇所や熱伝導の経路を明らかにすることにより、ホットスポットの抑制により高温超伝導線材のクエンチ耐性を改善することに着目した。

(3) 着想に至った経緯

高温超伝導コイルのホットスポットを抑制しクエンチ耐性を改善するには、ホットスポットの発生箇所を特定することが重要である。そのため、クエンチを抵抗・温度測定によりモニターする必要がある。けんきゅう代表者のグループでは、無冷媒 25 T 超伝導マグネットに用いる REBCO 超伝導コイルの抵抗上昇を測定し、ホットスポットの発生する条件を明らかにしてきた。しかし、高温超伝導コイルにおけるホットスポットは、抵抗・温度測定では発生箇所が特定できない。ホットスポットの発生箇所を

特定するには、温度分布観察など位置分解能がより高い測定方法が求められる。我々のグループでは今までに、蛍光強度に温度依存性を持つ蛍光物質 Eu-TFC を用いて、温度分布を可視化する技術を開発している。

クエンチ時の温度分布が可視化されれば、クエンチ耐性を改善しホットスポットが発生しにくいコイル構造の指針を示すことにより飛躍的に強磁場を発生させることが期待される。また、低温光学観察装置による温度分布可視化技術は、コイルに電圧端子や温度計などを接触させる必要がないため、実際の使用状況に即した環境で温度分布を測定できるという利点がある。また、測定位置を固定することなくクエンチの発生を温度の上昇から検知できるため、位置分解能を持ったクエンチ検出器として使用することも期待される。また、現在線材の熱伝導改善に用いられているエポキシに蛍光物質を混合させることで、超伝導コイル内の温度分布を測定することが可能である。

2. 研究の目的

本研究では、高温超伝導コイルのクエンチ耐性を向上させるため、高温超伝導コイルにおけるクエンチ時の温度分布を可視化することによりホットスポット発生箇所・熱伝導経路を明らかにし、ホットスポットを抑制するコイル構造を提案する。

3. 研究の方法

(1) 蛍光塗料の低温強磁場中蛍光分光測定

温度イメージングに用いる蛍光塗料について蛍光スペクトルの磁場・温度依存性を明らかにするため、遷移金属有機化合物蛍光塗料の低温強磁場中の分光測定を行った。蛍光塗料として、トリフルオロユウロピウム (III) トリス [3-(トリフルオロメチルヒドロキシメチレン)-D-カンフォラト] (Eu-TFC) 1.7w%、PMMA 3.2w% をアセトン溶媒に溶かした。Eu-TFC 蛍光塗料を石英ガラス基板上にスピコートし、大気環境 125°C 中で 30 分間ベーキングした。365 nm LED 紫外光源 (Thorlab 社製光ファイバー接続 LED 紫外光源 M365F1) を励起光とし、分光器 (HORIBA 社製 iHR550) を用いて磁場 0-14 T、温度 10-273 K における透過分光測定を行った。

(2) 蛍光による低温強磁場中温度イメージング装置の開発

図 1 に、低温強磁場温度可視化装置の模式図を示す。500 A までの電流容量を持つ高温超伝導リードと石英光学窓を持つ冷凍機超伝導冷却クライオスタットを作製した。このクライオスタットを東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの $\Phi 220$ 大口径 5T 無冷媒超伝導マグネットに内挿した。さらに、365 nm LED 紫外光源 (LEDEngin LZ1-10UV00-0000) を入射紫外励起光として、16bit-sCMOS カメラ (Andor Zyla-5.5)、560 nm

ロングパスフィルター、紫外光除去フィルター付き対物レンズ(Kowa LM35XC2)を用いて、560 nm以上の赤外蛍光イメージング装置を作製した。これらの装置を組み合わせることで、低温強磁場蛍光分布可視化装置を立ち上げた。測定条件として、最低安定温度 10 K、最高安定温度 95 K、最大磁場 5 T、最大電流 500 A、最高解像度での最大時間分解能 25 ms、最大試料サイズ $\Phi 180$ mmである。

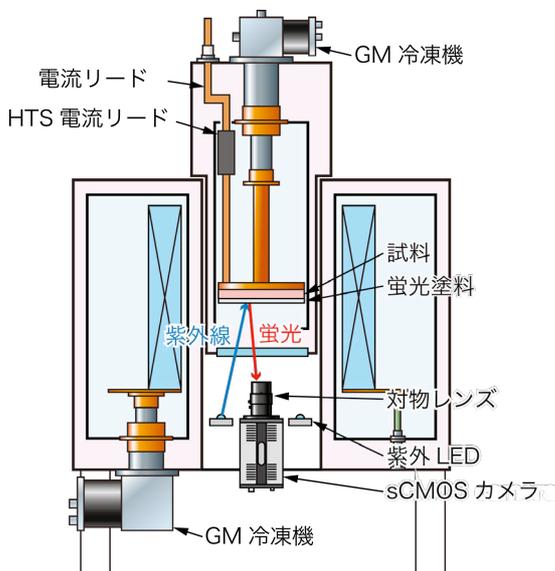


図 1. 低温強磁場蛍光分布可視化装置の模式図。

(4) 超伝導線材のホットスポット観察

Superpower 社製 REBCO 線材におけるホットスポット発生と常伝導伝播の温度分布可視化測定を行った。図 2 のように、REBCO 線材を試料ホルダー上に FRP 板を用いて固定し、REBCO 線材中央に NiCr ヒーターをワニスによって固定した。温度 77 K、ゼロ磁場、バイアス電流 31 A ($I/I_c = 81\%$) 下で 0.5 s 間のヒーター加熱により常伝導領域を発生させ、常伝導伝播 (NZP) の可視化測定を行った。



図 2. NiCr ヒーター付き超伝導線材の光学像。

(4) 超伝導コイルのホットスポット観察

劣化したフジクラ社製 REBCO 線材を用いたエポキシ樹脂含浸シングルパンケーキコイルにおけるホットスポットの可視化を行った。線材は、100 μm 厚の安定化銅層をはんだにより張り合わせたフジクラ社製 GdBCO 線材を用いた。図 3 (a) に示すように、アルミ板を通して伝導冷却し、20 K、5 T でコイル I_c 以上まで複数回通電を行い、特性劣化を確認した。コイル I_c が劣化した REBCO コイルに対して、複数の電圧端子をはんだ付けにより設置し、低温蛍光サーモグラフィーを用いてコイル内の局所的劣化箇所を可視化した。77 K、

ゼロ磁場で、分割電圧とサーモグラフィーを同時に行い、劣化後のコイル I_c にてホールドした後、 $1.9I_c$ で再びホールドした。

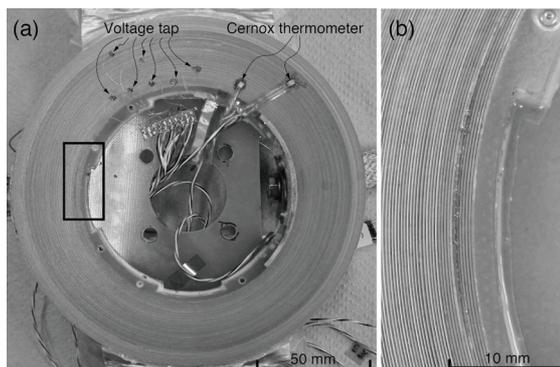


図 3. REBCO シングルパンケーキコイルの (a) 全体 (b) 劣化箇所周辺の光学像。

4. 研究成果

図 4 に、強磁場中透過分光測定によって得られた Eu-TFC 蛍光塗料の 10 K における 615 nm 蛍光メインピーク強度の磁場依存性を示す。内挿図に、各磁場におけるスペクトル強度を示す。分光測定の結果から、10 K において 615 nm 蛍光強度の磁場依存性がないことが明らかになった。

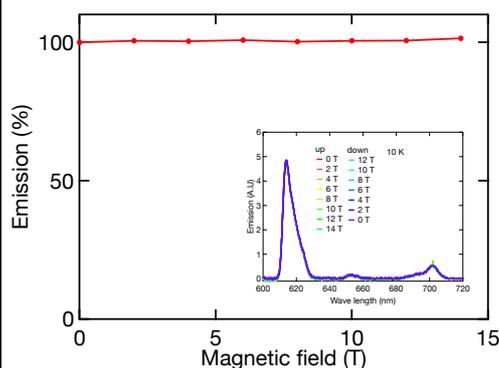


図 4. Eu-TFC の 10 K における透過蛍光スペクトルの磁場依存性。

図 5 に、強磁場中透過分光測定によって得られた Eu-TFC 蛍光塗料の 0 T における 615 nm の蛍光ピーク強度の温度依存性を示す。内挿図に、各温度における蛍光スペクトル強度を示す。低温の蛍光強度温度依存性が確認された。これは、Eu-TFC 蛍光塗料が磁場中温度分布可視化に適応可能であることを示している。

図 6 に、Superpower 社製 REBCO テープにおける 0 T、77 K 中 NZP 時の各分割セクションにおける電場の時間発展を示す。ヒーターをオフにした時間を 0 s とした。セクションはそれぞれ図 2 の左側から順に名付けられている。0 s 以降、ヒーターのあるセクション 3 から電圧が発生し、2 s 後にセクション 2 と 4、2.5 s 後にセクション 1 と 5 から電圧が発生した。このことから、常伝導伝播速度 (NZPV) は高温超伝導テープで典型的な 10

mm/s 程度であることが確認された[8]。

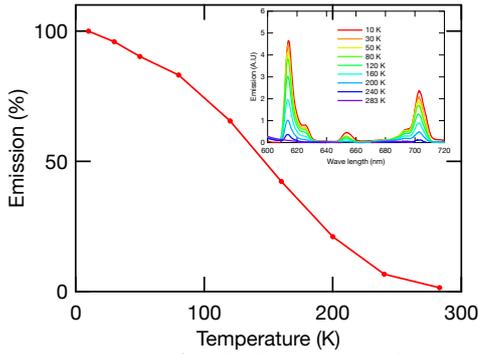


図 5. Eu-TFC のゼロ磁場におけるピーク発光強度の温度依存性。

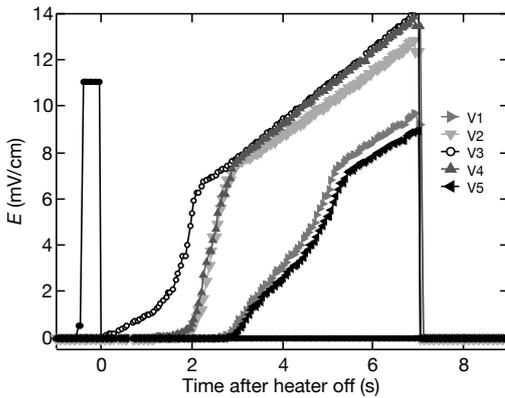


図 6. 常伝導伝播時の電圧の時間発展。

NZP の電圧測定と同時にを行った温度分布イメージングの結果を示す。図 7 は、テープ中心部の長手方向温度プロファイルの時間発展を示している。0 s はヒーターをオフにした時間とした。-20 s ほどの温度上昇は、0.45 W にてヒーターに電流を流した時の温度上昇を示しており、常伝導領域が現れているが、伝播せずに消滅したことを示している。このことから、最小クエンチエネルギーは 0.22 J 程度であると見積もられた。次に、最小クエンチエネルギーを超えたエネルギーを導入した場合の 0 s 以降のホットスポットについて、図中に点線で示したように、10 mm/s 程度で常伝導領域が広がっていることが明らかとなった。電圧、温度測定によって決めた NZPV はよく一致し、10 mm/s と典型的であることが確認された。

本研究で開発した温度分布測定装置は、対物レンズに依るが 50 μm 程度の空間分解能を持ち、0.5 K/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 程度の温度時間分解能を持つ。これは、クエンチ検出に対して十分な空間・温度分解能を持つと考えられる。

77 K, 0 T, 31.5 A (75% I_c)

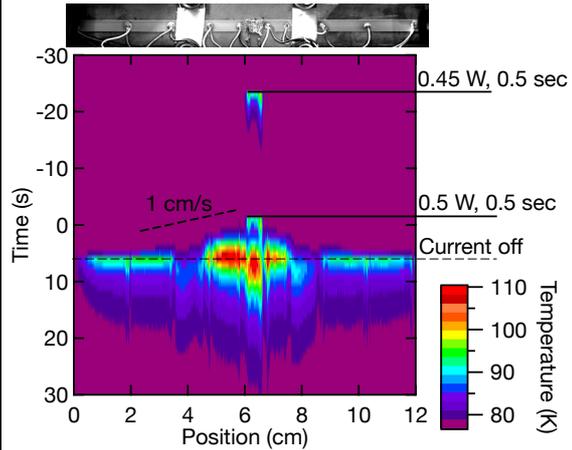


図 7. REBCO 線材における常伝導伝播時の温度プロファイルの時間発展。

特性劣化後の REBCO コイルについて、図 3 (b) に示すように、劣化していると考えられる箇所では、エポキシが溶け出した。よって、過電流通電時のホットスポットでは少なくとも 200 $^{\circ}\text{C}$ 以上まで温度上昇したと考えられる。図 8 に、劣化後、77 K、ゼロ磁場下での通電試験の結果を示す。コイル I_c でホールドした際、熱暴走は起こらなかった。励磁過程においては、コイル電圧と分割電圧には誘導電圧の差があった。一方、1.9 I_c で再びホールドした時、熱暴走が起こり、コイル電圧は 4-10 ターンの分割電圧にほぼ一致した。よって、劣化は 4-10 ターンに起こっていることが確認され、図 3 (b) で光学観察された箇所と一致した。図 9 にサーモグラフィーによって得られた電源遮断直前(170 s)の REBCO コイルにおける温度分布像を示す。0.5 K 程度の温度上昇が確認され、光学観察した劣化箇所と一致した。以上から、非破壊での劣化箇所特定に成功したと考えられる。

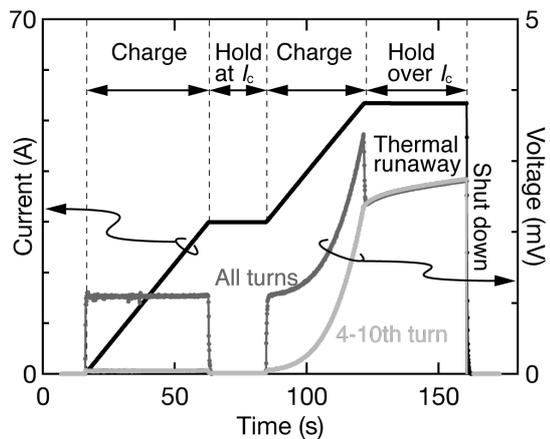


図 8. REBCO コイルにおける 77 K ゼロ磁場下での通電試験における電流電圧プロファイル。

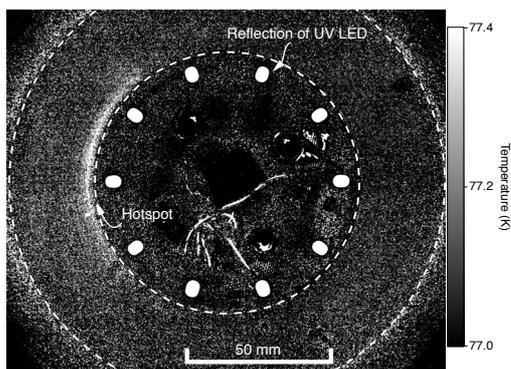


図9. 電流ホールド時のREBCOコイル表面における温度分布イメージング像。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

[1] Y. Tsuchiya, S. Muto, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka, M. Daibo, Y. Iijima, “Study on Normal Zone Characteristics in a REBCO Insert Coil Induced by Quenches in an LTS Outsert Coil”, IEEE Trans. on Supercond. 26, 4601704 (2016)., 査読有.

〔学会発表〕(計11件)

[1] 土屋雄司、澤田裕也、木村尚次郎、淡路智、渡辺和雄、”クエンチ検出に向けた強磁場低温下での温度分布測定装置の開発”、低温工学会、2015年12月2-4日、姫路商工会議所(兵庫県姫路市)。

[2] 土屋雄司、”EUCAS/MT-24:HTS マグネット”、冷凍部会例会、2015年11月9日、KKR沼津はまゆう(静岡県沼津市)。

[3] Y. Tsuchiya, S. Muto, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka, M. Daibo, Y. Iijima, “Study on Normal Zone Appearance in a REBCO Insert Coil Induced by Quenches in an LTS Outsert Coil”, MT, 2015年10月18-23日、ソウル(韓国)。

[4] 土屋雄司、”BaHfO3 添加 SmBa₂Cu₃O_y 薄膜の磁束相図と磁束ピンニング特性”、応用物理学会、材料研究会、2015年10月8-9日、KKR山口あさくら(山口県山口市)。

[5] 土屋雄司、淡路智、渡辺和雄、三浦峻、一野祐亮、吉田隆、”BaHfO3 添加 SmBa₂Cu₃O_y 薄膜におけるナノロッド配向性と磁束ピンニング特性”、応用物理学会、2015年9月13-19日、名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)。

[6] Y. Tsuchiya, S. Muto, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka, M. Daibo, Y. Iijima, “Hotspot characteristics in a REBCO Insert Coil Induced by Quenches of an LTS Outer Coil”, EUCAS, 2015年9月6-10日、リヨン,(フランス)。

[7] 土屋雄司、武藤 翔吾、小黒 英俊、淡路

智、渡辺 和雄、宮崎 寛史、花井 哲、井岡 茂、大保 雅載、飯島 康裕、”内挿 REBCO コイルにおける外挿 LTS コイルのクエンチによる過電流誘起”、低温工学会、2015年5月27-29日、産総研共同講堂(茨城県つくば市)。

[8] 土屋雄司、淡路智、渡辺和雄、三浦峻、一野祐亮、吉田隆、”BaHfO3 添加 SmBa₂Cu₃O_y 薄膜の高温領域磁束相図とピンニング特性”、応用物理学会、2015年3月11-14日、東海大学(神奈川県平塚市)。

[9] Y. Tsuchiya, S. Muto, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka, M. Daibo, Y. Iijima, “Thermal runaway behavior of a REBCO inner coil induced by quenches of an LTS outer magnet”, ISS, 2014年11月25-27日、タワーホール船堀(東京都江戸川区)。

[10] 土屋雄司、武藤 翔吾、小黒 英俊、淡路 智、渡辺 和雄、宮崎 寛史、花井 哲、井岡 茂、大保 雅載、飯島 康裕、”外挿 LTS マグネットのクエンチに誘起された内挿 REBCO コイルにおける熱暴走”、低温工学会、2014年11月5-7日、コラッセふくしま(福島県福島市)。

[11] 土屋雄司、武藤 翔吾、小黒 英俊、淡路 智、渡辺 和雄、宮崎 寛史、花井 哲、井岡 茂、大保 雅載、飯島 康裕、”外挿 LTS コイルクエンチに対する内挿 REBCO コイルのクエンチ保護”、低温工学会、2014年11月5-7日、コラッセふくしま(福島県福島市)。

〔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

<http://www.hflsm.imr.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

土屋 雄司 (TSUCHIYA, Yuji)

東北大学・金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター・研究支援者

研究者番号：50736080