

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820107

研究課題名(和文)次世代超伝導コイル機器の超高電流密度化を実現する熱暴走フリー運転技術の構築

研究課題名(英文)Thermal runaway-free operation technology for next-generation superconducting coil systems operated at high current density

研究代表者

柳澤 吉紀 (Yanagisawa, Yoshinori)

国立研究開発法人理化学研究所・ライフサイエンス技術基盤研究センター・基礎科学特別研究員

研究者番号：60638691

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)：近年実用フェーズへと移行しつつあるREBCO高温超伝導線材を使用すれば、超伝導コイル機器を従来よりもはるかに高い電流密度で運転できる。しかし、高電流密度で運転するREBCO高温超伝導コイルは熱暴走によってコイルの焼損が起こるため、これを解決しなければ実用化はできない。本研究では、REBCO高温超伝導コイルの熱暴走の対策技術として、非絶縁方式の効果を実験的に研究し、明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The REBCO high-temperature superconductor, which has been progressed towards practical use, enables superconducting coil systems with very high current density. Such a high-current density REBCO coil, however, can be damaged due to thermal unexpected thermal runaway and remedies against thermal runaway have to be developed for practical application. In this study, the effect of no-insulation method on REBCO coils was investigated for protection from thermal runaway.

研究分野：高温超伝導コイル技術

キーワード：REBCO高温超伝導コイル 熱暴走 非絶縁方式

1. 研究開始当初の背景

超伝導コイル機器はエネルギーの高効率利用を実現する有望な技術である。例えば超伝導発電機、超伝導エネルギー貯蔵装置の導入により、発電における運用効率の大幅な向上を期待できる。また、産業用モーターなど広く利用されている既存機器を超伝導化することで、エネルギー利用効率を大幅に高めることが可能である。近年実用化フェーズへ移行したレアアース(RE)系高温超伝導線材(以下、REBCO 線材、図 1 参照)は高温域(40 ケルビン以上)での革新的な高電流密度特性を持つ。ニオブチタン(NbTi、図 1 参照)やビスマス系(Bi、図 1 参照)などの従来の超伝導線材のコイル機器では、20 200 A/mm² 程度の電流密度で運転されてきたが、REBCO 線材の特性を考慮すると、高温域において 500 A/mm² を超える超高電流密度のコイル設計ができ、超伝導コイル機器を従来と比べ大幅にコンパクト化・低冷却パワー化できる。

しかし、REBCO コイルは通電中にコイル内部の狭い領域において、突然不可逆的な温度上昇が起きて熱暴走を起こすことが明らかとなってきた(図 2 参照)。REBCO 線材は特定の力に対して弱く、コイル製造プロセスにおいて局所的な超伝導特性の劣化が起こり、この部位からのジュール発熱によって熱暴走が起こるのである。特に 200 A/mm² を上回る電流密度で運転する場合、発熱と温度上昇の強力なフィードバックにより、熱暴走開始からわずか数秒でコイルが焼損してしまうため、全く対処することが出来ない。すなわち線材の持つ高電流密度特性を活かしてコイルを設計するほど、コイル焼損の危険性が増してしまう。局所劣化を防ぐ有効な技術はいくつか開発されてきたが、数十 km を超える大量の線材を使用する実際のコイル機器において、局所劣化を 100%防ぐのは難しい。すなわち、局所劣化部位があっても熱暴走を起こさない技術を構築が重要である。

2. 研究の目的

REBCO 高温超伝導コイルの高電流密度化、

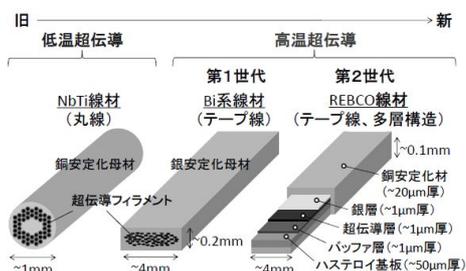


図1 实用超伝導線材の構造。従来のNbTi低温超伝導線材、第1世代のBi系高温超伝導線材、第2世代のREBCO高温超伝導線材

図 1 实用超伝導線材の構造。従来の NbTi 低温超伝導線材、第 1 世代の Bi 系高温超伝導線材、第 2 世代の REBCO 高温超伝導線材。

熱的安定性の向上などの利点を持つ技術として、非絶縁法がある。研究代表者らは、先行研究で、非絶縁 REBCO パンケーキコイル(ロールケーキのように平面的に巻く方式)は、熱暴走自体がトリガーとなり、電流分布が通常の“マルチターンモード”から“シングルターンモード”に転移することで熱暴走から自律的に回復することを明らかにしている。この現象は高電流密度 REBCO コイルにおける熱暴走からのコイル保護方法として使用できる可能性がある。

しかしながら、実用上重要な巻線方法であるレイヤー巻コイル(糸巻きのように巻く方式)において、この種の自律回復現象がどのように起こるかは明らかでない。そこで本研究では、この非絶縁のレイヤー巻き REBCO コイルにおける熱暴走から自律回復現象について調べ、コイル保護の観点から課題を議論した。

また、これまで機械強度が低いため高電流密度運転ができなかった Bi-2223 線材の強度が向上したため、この種のコイルも研究対象に加え、REBCO コイルの特性と比較を行った。

3. 研究の方法

(1) 非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルの熱暴走からの自己回復特性

SuperPower 社製(型番 SCS4050)の 4 mm 幅、0.1 mm 厚の絶縁なし線材を使用し、1 レイヤーあたりのターン数 12、レイヤー数 α (すなわち総ターン数 72) の非絶縁 REBCO レイヤー巻きコイルを製作した(図 3(a)参照)。巻線内径、巻線外径、巻線長さはそれぞれ 30 mm、30.15 mm、52.2 mm である。線材の総長は 7.02 m である。ロードラインから見積もられるコイル臨界電流は 75 A である。正電極と負電極は共にコイル上端部に接続した。コイル内の軸方向磁場を測定するためにホール素子をコイル上部(B_{Z,upper})、コイル中心部(B_{Z,center})、コイル下部(B_{Z,lower})に設置した。励磁速度 0.167 A/s、電源の遮断電圧 5 V にて液体窒素中でコイルの通電を行った。コイルには電圧タップと熱電対を複数設置した。

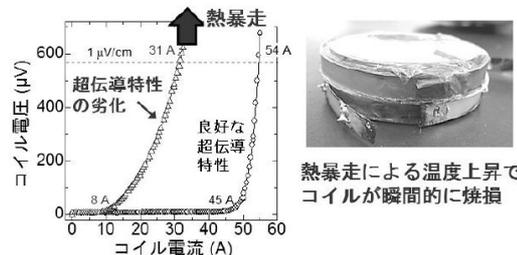


図 2 REBCO コイルにおける熱暴走とコイル焼損

図 2 REBCO コイルにおける熱暴走とコイル焼損

(2) 非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルと非絶縁 Bi-2223 レイヤー巻コイルの熱暴走特性の差異

上述の非絶縁 REBCO レイヤー巻コイル (図 3(b)参照) とほぼ同形状のコイルを Bi-2223 線材で製作した (Fig.1(a)参照)。住友電気工業株式会社製の高強度タイプの Bi-2223 線材 (型番 HT-XX, 幅 4.5 mm, 厚さ 0.29 mm, 77 K での臨界電流 >190 A, 総長 7 m) を使用し、内径 30 mm, 外径 33.6 mm, レイヤー数 6、総ターン数 72 の非絶縁 Bi-2223 レイヤー巻コイルを製作した。線材の 77 K における I_{c-B} 特性とコイルの最大径方向磁場のロードラインから見積もったコイルの臨界電流 $I_{c,coil}$ は 65 A である。コイルを液体窒素中において REBCO は 0.7 A/s, Bi-2223 は 0.2 A/s の掃引速度でコイル臨界電流を超えて励磁した。コイル両端電圧 (電極電圧含む) とコイル内の上端、中心、下端の 3 箇所のコイル軸方向磁場を測定した。

4. 研究成果

(1) 非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルの熱暴走からの自己回復特性

図 4(a) に通電電流に対するコイルの上端磁場 $B_{z,upper}$, 中心磁場 $B_{z,center}$, 下端磁場 $B_{z,lower}$, 図 4 (b) に通電電流に対するコイル両端電圧を示す。電源電流が 100 A の時に電圧が 0.3V まで上昇するもののすぐに 0.13V まで落ち、パンケーキコイルの場合と同様に、電流分布モードの転移が起き、熱暴走から自律回復した。電流モード転移前後で磁場の値を比較すると、 $B_{z,upper}$ では 24.9%, $B_{z,center}$ では 29.1%, $B_{z,lower}$ では 27.6% にまで減衰している。電流分布モード転移による磁場の減衰率はパンケーキコイルの場合と比べ大きく異なる。先行研究で実験した 37 ターンのパンケーキコイルでは、モード転移により磁場の値 3.5% にまで減衰し、これはターン数分の一の割合に近い値である。一方今回のレイヤー巻コイルでは磁場が上述の通り 25-29% にまでしか減衰していない。これは、レイヤー数分の一の値 (すなわち $1 / 6 = 17\%$) に近い。

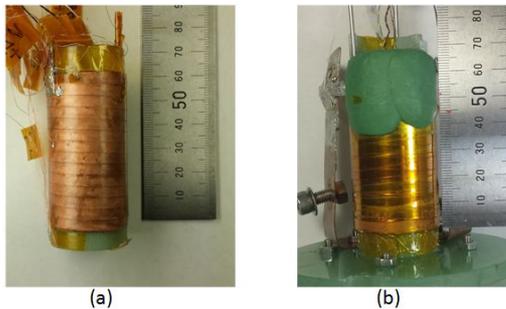


図 3 (a) 非絶縁 REBCO レイヤー巻コイル。
(b) 非絶縁 Bi-2223 レイヤー巻コイル。

すなわち、非絶縁レイヤー巻キコイルにおいて、電流分布の転移がコイル径方向において生じている。つまり、シングルパンケーキが 12 個積層された系において、各パンケーキコイルごとに、電流分布モードが“マルチターンモード”から“シングルターンモード”へと転移しているのと同様の現象が起きているのである。

コイル上端部・中心部・下端部における磁場の減衰率を比較すると、上述の通り $B_{z,upper}$ の減衰が最も大きい。これは、正電極・負電極の設置されたコイル上端において、電流密度がより低くなっていることを意味する。このようにコイル内部において軸方向に電流密度の勾配が生じると、線材を軸方向に引っ張る電磁力が生じる。そのため、電流分布のモード転移が起きた時に、コイル内部で線材が移動したり、コイルが損傷したりする可能性がある。非絶縁法をレイヤー巻キコイルに適用するには、この点について留意が必要である。

電源電流をさらに上げていくと、コイル上端部の最外レイヤーにおける線材 (すなわち負電極の付近) が焼損する現象が見られた。これは、コイルの口出し部分においては電流密度が非常に高くなるためである。

(2) 非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルと非絶縁 Bi-2223 レイヤー巻コイルの熱暴走特性の差異

図 5(a) に示すように、REBCO コイルの場合、110 A で熱暴走が起き、この時の負荷率は 172% である。

一方、図 5(b) に示すように、Bi-2223 コイルは電源電流 209A において熱暴走し、シングルターンモード転移が起きた。熱暴走が起きたときの電流の負荷率 ($I_{c,coil}$ に対する比) は 322% である。すなわち、臨界電流以上での自然熱暴走は、Bi-2223 コイルのほうが 1.9

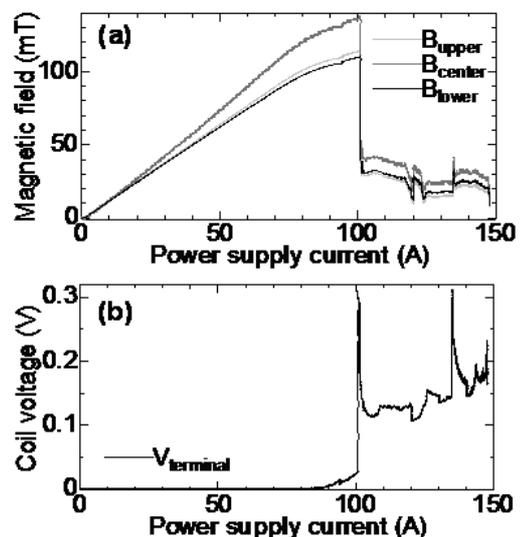


図 4 非絶縁 REBCO レイヤー巻コイルの過電流試験における(a)磁場と(b)コイル電圧

倍も高い負荷率で起きている。

実験結果が示すように、REBCO と Bi-2223 の非絶縁レイヤー巻コイルでは、Bi-2223 のほうが高い電流値まで熱暴走が起きにくい。Bi-2223 コイル、REBCO コイルの $I_{c,coil}$ における線材電流密度 J_{cond} と安定化材電流密度 J_{stab} を表 1 に示す。REBCO コイルでは Bi-2223 コイルと比べ $I_{c,coil}$ における J_{stab} の値が 4 倍高い。ジュール発熱量は基本的に J_{stab} の 2 乗に比例するため、単純に見積もると Bi-2223 コイルのほうが、ジュール発熱量が 1/16 も小さい。そのため、熱暴走に至りにくいのである。また REBCO 線材の n 値 (超伝導-常伝導転移の鋭さ) は 20 を大きく上回るが、Bi-2223 線材は 20 以下と低いため、温度上昇・発熱のフィードバックが弱く、より熱暴走が起き

づらくなっていると推察される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 1 件)

K. Yanagisawa, S. Iguchi, Y. Xu, J. Li, A. T. Saito, H. Nakagome, T. Takao, S. Matsumoto, M. Hamada, Y. Yanagisawa, A long charging delay for a no-insulation REBCO layer-wound coil and its influence on operation with outer LTS coils, IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016 In press, 査読有
Doi:10.1109/TASC.2016.2515540

(学会発表)(計 4 件)

名和 雅斗, 柳澤 杏子, 柳澤 吉紀, 中込 秀樹, 前田 秀明, ~高電流密度 Bi-2223 コイルの保護技術確立に向けて~ 非絶縁 Bi-2223 コイルにおける自然熱暴走の振る舞い, 2014 年度秋季低温工学・超電導学会, 2014 年 11 月 5-7 日, コラッセふくしま (福島)

柳澤 吉紀, 高電流密度運転をめざしたコイル保護技術, 電力・エネルギーフォーラム「イットリウム系高温超電導コイル技術の基礎」, 2014 年 6 月 27 日, 理化学研究所 (横浜)

名和 雅斗, 柳澤 杏子, 佐藤 耕太, 柳澤 吉紀, 中込 秀樹, 前田 秀明, 非絶縁 REBCO 積層パンケーキコイルにおける電流モード転移が持つ危険性, 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 2014 年 5 月 26-28 日, タワーホール船堀 (東京)

柳澤 杏子, 名和 雅斗, 佐藤 耕太, 柳澤 吉紀, 中込 秀樹, 前田 秀明, レイヤー巻き方式とパンケーキ巻き方式の非絶縁 REBCO コイルにおけるシングルターンモード転移, 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 2014 年 5 月 26-28 日, タワーホール船堀 (東京)

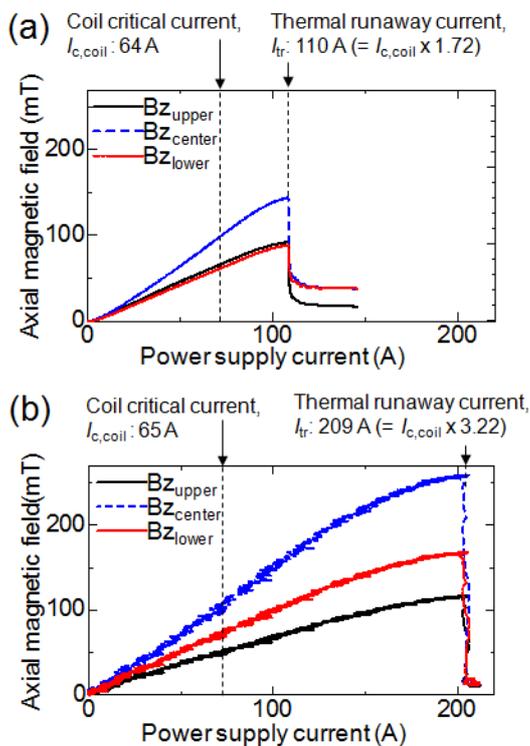


図 5 過電流試験時の磁場の振る舞い。(a) 非絶縁 REBCO レイヤー巻コイル。(b) 非絶縁 Bi-2223 レイヤー巻コイル。

表 1 REBCO レイヤー巻コイルと Bi-2223 レイヤー巻コイルの電流密度

	Bi-2223	REBCO
Coil critical current, $I_{c,coil}$	65	64
Conductor current density, J_{cond} , for $I_{c,coil}$ (A/mm ²)	49	163
Stabilizer current density, J_{stab} , for $I_{c,coil}$ (A/mm ²)	107	400
Thermal runaway current, I_{tr}	209	110
Conductor current density, J_{cond} , for I_{tr} (A/mm ²)	160	275
Stabilizer current density, J_{stab} , for I_{tr} (A/mm ²)	343	688

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳澤 吉紀 (YANAGISAWA, Yoshinori)
国立研究開発法人理化学研究所・ライフサイエンス技術基盤研究センター・基礎科学特別研究員
研究者番号: 60638691