

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289070

研究課題名(和文)超コンパクト次世代超伝導コイル機器を実現する線材/コイルのインターフェース技術

研究課題名(英文)Interface technology of conductor/coil to achieve next generation ultra-compact superconducting coil systems

研究代表者

中込 秀樹 (Nakagome, Hideki)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20375611

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：近年実用化へ移行しつつあるREBCO高温超伝導線材は、超伝導機器を20 Kレベルの高温で、従来よりもはるかに高い電流密度・エネルギー密度で運転できる可能性を持つので、電力機器をはじめとする様々な用途への適用が期待されている。しかしながら、REBCO線材をコイル化すると、「コイルとしての特性が線材の能力より顕著に劣化する問題」をはじめとする様々な技術課題があった。本研究ではこれらの課題の内でもっとも重要な3つの技術課題(劣化、遮蔽電流、熱暴走)を研究し、REBCO線材をコイル機器に使用するために必要な基盤技術を構築した。

研究成果の概要(英文)：The REBCO coated conductor has a potential to realize a superconducting devices with very high current density and energy density at 20 K class temperature and expected to be used for various devices such as power applications. The conductor, however, shows problems when it is used as a coil; typical one is degradation of superconducting performance. In this study, three important problems and solutions for them were studied for achieving basic technology for REBCO coated conductor coil applications.

研究分野：低温・超電導工学

キーワード：高温超伝導コイル 特性劣化 遮蔽電流 熱暴走

1. 研究開始当初の背景

レアアース(RE)系高温超伝導線材(以下REBCO線材、図1参照)は20ケルビン(K)レベルで、従来の低温超伝導線材(ニオブチタン(NbTi)線材など、液体ヘリウム温度(4K)で使用)と同等の臨界電流密度をもつ。この線材は高い引張り強度を持つので、高電流密度化による電磁応力にも十分耐えることができる。一方、20Kでの運転は希少な液体ヘリウムを必要とせず、小型冷凍機に必要な電力が4Kに比べて1桁小さくなることを意味する。この様にREBCO線材は、「ヘリウムフリーの20K運転でありながら高磁場で高電流密度化、超コンパクト化が可能」という優れた特性を持つので、この線材を用いたコイルを実用化できれば、エネルギー密度が高くコンパクトな超伝導機器が実現できる。しかし、これまでの研究により、REBCO線材はコイル化すると次のような問題を示すので、本来のポテンシャルを活かすことができないことが明らかになってきた。

- (1) REBCO線材で製作したコイルに、従来から広く使用されているエポキシ含浸法を適用すると、超伝導特性が大幅に劣化する。
- (2) コイル内部に劣化した部分があると、励磁中に熱暴走が発生しコイル損傷に至ることがある。
- (3) 線材面に対して磁場が垂直に当たると線材に遮蔽電流が生じ、これにより大きな交流損失が生じると共に、コイル中心磁場の値が設計値から大幅にずれる。

これらはREBCO線材とREBCOコイルの間に横たわる「死の谷」であるといえる(図2参照)。従来の低温超伝導コイルでは、「電磁界解析」・「構造解析」・「安定性」・「クエンチ保護」・「交流損失」などからなる技術体系が構築されており、これに基づいて超伝導機器が設計・製作されている。一方REBCOコイルでは、この種の技術体系が構築されていないので、REBCOコイルの実用化に先立ち、この種の技術体系を構築することが強く要求されている。

2. 研究の目的

上記の課題を解決する「REBCO線材/コイル

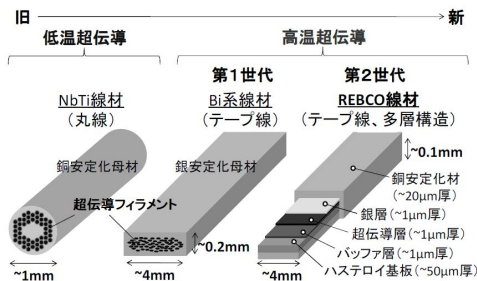


図1 実用超伝導線材の構造。従来のNbTi低温超伝導線材、第1世代のBi系高温超伝導線材、第2世代のREBCO高温超伝導線材

ルのインターフェース技術」を構築する(図2参照)。

(1) エポキシ含浸による超伝導特性劣化を防ぐ技術の構築

REBCOコイルはエポキシ含浸によって、超伝導特性が顕著に劣化することが明らかになり、世界的に大きな問題となってきた。研究代表者らは、REBCO線材の絶縁被膜として20μm厚程度のポリイミド被膜を形成することで劣化が防止できることを初めて明らかにした。この新規技術を世界に先駆けて実用コイルに適用し、普及させる為に必要な技術基盤を構築する。具体的にはポリイミド被膜を更に均一化するとともに被膜の厚みを極限まで薄くして、コイル断面積に占める絶縁の割合を更に低減する。さらにポリイミド被膜が実用的なコイルにも適用でき、非常に高い電流密度を実現できることを実証するために、長尺線材に均一にポリイミド被膜する技術を開発する。

(2) 熱暴走時のコイル保護法の構築

REBCOコイルの励磁中に、コイルの臨界電流以下で線材の温度が急上昇する熱暴走が発生してコイルが損傷することが大きな問題となっている(これを「早期熱暴走」と呼ぶ)。研究代表者らは、早期熱暴走は(1)のコイル特性の部分的な劣化が引き起こすことを明らかにした。REBCOコイルを実用化するためには、早期熱暴走のメカニズムを解明し、対策を施さねばならない。ところが、これまでこの種の研究例はほとんどない。研究代表者らは、熱暴走の発生の基本メカニズムを先行研究で明らかにしている。これに基づき、(a)熱暴走のパターンを要素実験とシミュレーション技術で体系化し、(b)部分的な劣化があっても熱暴走が発生しにくくなるようなコイル構成や、(c)熱暴走が発生しても温度上昇が低く抑制できる手法について研究する。



図2 REBCO線材/コイルのインターフェース技術

(3) 遮蔽電流と交流損失の低減法の構築

REBCO コイルを通電すると線材に垂直に磁場が貫くので、線材に遮蔽電流と呼ばれる渦電流が誘導され、これが負の磁場を発生する。このため、中心磁場の磁場が小さくなると共に、磁場のヒステリシスや磁場の時間変動が生じる。更に、この効果が大きな交流損失を生む。小さな単一の REBCO コイルにおける遮蔽電流の発生メカニズムと中心磁場に及ぼす影響は既に明らかになっている。本研究では、先行研究で得た知見とシミュレーション技術を高度化することにより、遮蔽電流の低減手法として、多芯 REBCO 線材の効果を明らかにする。

3. 研究の方法

革新的高温超伝導線材である REBCO 線材とそれをコイル化した REBCO コイルの間には大きな技術的なギャップがある。このギャップを埋め、両者を橋渡しするために必要な次の 3 つのインターフェース技術を開発する。

(1) 超伝導コイルの製造法として一般的なエポキシ含浸法を適用しても、超伝導特性が劣化しない技術を構築する。10 μm レベルのポリイミドを被覆した REBCO 線材を用いてコイルを製作し、エポキシ含浸による劣化の防止効果を検証する。

(2) 熱暴走が起きた時に、コイルを損傷から保護する技術を構築する。熱暴走からの保護手法として、絶縁を使用しない非絶縁法を用いた REBCO コイルを製作し、実験と解析により、効果を検証した。

(3) 遮蔽電流によって引き起こされる遮蔽電流磁場と交流損失の低減法を構築する。遮蔽電流磁場そのものの抜本的な低減を目的とし、スクライビングを施した REBCO 線材(図 3 参照)で巻いたコイルにおける遮蔽電流磁場の振る舞いを実験と数値解析で検討した。これらの結果に基づき、遮蔽電流磁場の低減の指針を抽出した。

4. 研究成果

(1) 劣化の防止技術

10 μm レベルのポリイミドを被覆した REBCO 線材を用いて、小型のダブルパンケーキコイルを製作した。このコイルをエポキシ含浸し、液体窒素中で通電したところ、劣化はなく、良好な特性が得られた。

(2) 熱暴走からの保護技術

非絶縁方式の REBCO コイルを製作し、液体窒素中で過電流試験を行った。過電流により熱暴走が発生するが、速やかにこれが収束し、自己保護性を示すことが明らかとなった。

(3) 遮蔽電流磁場の低減技術

超伝導層を幅方向に 3 分割したスクライビング REBCO 線材で巻いたダブルパンケーキコイル(図 4 参照)の遮蔽電流磁場ヒステリシスの振幅は、スクライビングなしの場合に比

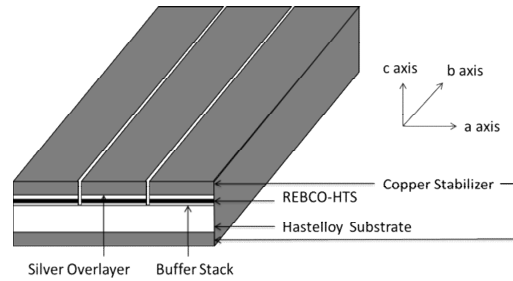


図 3 超伝導層が 3 分割されたスクライビング REBCO 線材の模式図

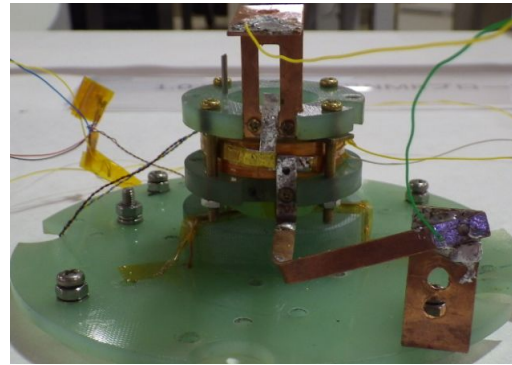


図 4 超伝導層を 3 分割したスクライビング REBCO 線材で巻いたダブルパンケーキコイル (Coil-B)

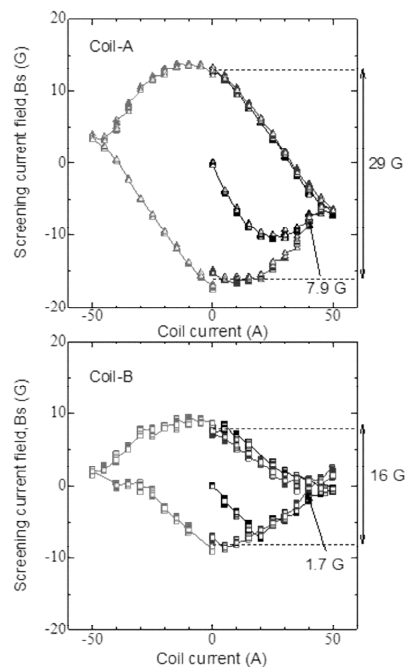


図 5 遮蔽電流磁場のヒステリシスループ

べ、55%にまで減少した。遮蔽電流磁場の低減効果は高負荷率になる程顕著に現れ、負荷率 80%の場合には、スクライビングなしの場合にくらべて 22%にまで減少した(図 5 参照)。数値解析でも同様の結果が確認された。

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3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. In press, 2016, 査読有
Doi:10.1109/TASC.2016.2515540
- Y. Yanagisawa, K. Sato, K. Yanagisawa, H. Nakagome, X. Jin, M. Takahashi, H. Maeda, Basic mechanism of self-healing from thermal runaway for uninsulated REBCO pancake coils, Physica C, 499, 40-44, 2014, 査読有
Doi:10.1016/j.physc.2014.02.002
- Y. Yanagisawa, K. Sato, T. Matsuda, T. Nagato, H. Kamibayashi, H. Nakagome, X. Jin, M. Takahashi, H. Maeda, An ultra-thin polyimide insulation coating on REBCO conductors by electrodeposition produces a maximum overall current density for REBCO coils, Physica C, 495, 15-18, 2013, 査読有
Doi:10.1016/j.physc.2013.07.009

[学会発表](計3件)

- 柳澤 吉紀、佐藤 耕太、柳澤 杏子、中込 秀樹、金 新哲、高橋 雅人、前田 秀明、非絶縁 REBCO パンケーキコイルにおける熱暴走からの自律的な回復メカニズムの解明、第88回2013年度秋季低温工学・超電導学会、名古屋、2013年12月4-6日、1A-a03(口頭)
- 許一、柳澤吉紀、金新哲、中込 秀樹、前田 秀明、スクライピング REBCO 線材で巻いたダブルパンケーキコイルにおける遮蔽電流磁場、第88回2013年度秋季低温工学・超電導学会、名古屋、2013年12月4-6日、2P-p21(ポスター)
- K. Sato, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Nagato, H. Kamibayashi, T. Matsuda, M. Takahashi, H. Maeda, Ultra-thin 5 μ m thick polyimide coating on REBCO-coated conductors to enhance coil current density, 23rd International Conference on Magnet Technology, 2013年7月14日~2013年7月19日、米国・ボストン(ポスター)

6. 研究組織

(1)研究代表者

中込 秀樹 (NAKAGOME, Hideki)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20375611

(2)連携研究者

前田 秀明 (MAEDA, Hideaki)
理化学研究所・ライフサイエンス技術基盤
研究センター・施設長
研究者番号：40392120