

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K20898

研究課題名(和文)熱暴走に対する自己保護機構をもつ半絶縁高温超伝導コイルの開発

研究課題名(英文)Self-protection of semi-insulated HTS coil for thermal runaway

研究代表者

土屋 雄司(Tsuchiya, Yuji)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：50736080

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)：低炭素社会の実現に向けて、高温超伝導コイルによる発電・貯蔵エネルギーシステムの開発が急務である。しかし、高温超伝導コイルは、熱暴走によって焼損するという欠点があり、さらに熱暴走の検出が非常に困難である。そのため、本研究では、高温超伝導コイルの熱暴走に対する保護指針の探索を目指した。

本研究では、要素開発として、高温超伝導コイルにおける熱電磁気解析に向けた数値計算システムを立ち上げおよび、高温超伝導線材の特性測定手法の開発、高温超伝導コイルの許容電流を増強に向けた高温超伝導薄膜の作製を行った。

研究成果の概要(英文)：To realize a low-carbon society, it is urgent to develop a power generation and storage energy system using high temperature superconducting coils. However, the high temperature superconducting coil has a disadvantage of burning out due to thermal runaway, and it is very difficult to detect it. Therefore, in this research, we aimed to search for protection guidelines for thermal runaway of high temperature superconducting coils.

In this research, as element development, we set up a numerical calculation system for thermal electromagnetic analysis in high-temperature superconducting coils, developed a method for measuring characteristics of high-temperature superconducting tapes. We fabricated a high temperature superconducting thin film to increase the current capacity of high-temperature superconducting coils.

研究分野：超伝導応用

キーワード：高温超伝導体 磁束ピンニング クエンチ保護

1. 研究開始当初の背景

(1) 概要

低炭素社会の実現に向け、高温超伝導線材を用いた超伝導コイルによる発電・貯蔵エネルギーシステムの開発が急務である。しかし、高温超伝導コイルは熱暴走により焼損する欠点があり、その検出は極めて困難である。そこで本研究では、高温超伝導コイルの熱暴走に対する保護を目的として、高温超伝導線材の開発を行う。

(2) 学術的背景

低炭素社会の実現に向けて、超伝導体を用いた革新的エネルギーシステムの開発が急務である。稼働・建設中の超伝導機器は、既存の技術である低温超伝導線材を用いている。一方、希土類銅酸化物系高温超伝導線材は、臨界電流が強磁場中で高く、従来の低温超伝導コイルに比べ飛躍的に高効率の電力機器の開発が可能となるポテンシャルがある。高温超伝導コイルは熱暴走が発生すると焼損してしまうという欠点があり、現状は実用化に至っていない。よって、信頼度の高い超伝導エネルギーシステムを実現するには、高温超伝導コイルにおける熱暴走に対する保護が必要不可欠である。現在、保護機構として超伝導線材を絶縁しない無絶縁コイルが提案されているが、励磁時の転流にともなう低い磁場安定度が欠点である。磁場安定度を持ちながら熱暴走に対する保護機構を持つ高温超伝導コイルの開発が望まれている。

2. 研究の目的

熱暴走に対する保護機構を持つ高温超伝導コイルに向けた基礎研究を行う。そのために、高温超伝導コイルを作製し、熱的安定性と磁場安定性を両立した保護機構の開発と最適化を行う。

3. 研究の方法

有限要素法計算ソフトウェアを用いて熱電磁気数値計算による高温超伝導コイルにおける熱暴走特性について計算を行う。保護に最適な絶縁特性を明らかにする。

高温超伝導線材の特性測定手法の開発および高温超伝導コイルの許容電流を増加させるため特性向上に向けた高温超伝導薄膜の作製を行う。

4. 研究成果

本研究では、高温超伝導コイルの保護方法に向けた要素開発として、高温超伝導コイルにおける熱電磁気解析に向けた数値計算システムを立ち上げおよび、高温超伝導線材の特性測定手法の開発および高温超伝導コイルの許容電流を増加させるため特性向上に向けた高温超伝導薄膜の作製を行った。

高温超伝導コイルにおける電磁気解析

有限要素法を用いてパンケーキコイル内の磁場分布の計算を行なった。内径 48 mm、外径 78 mm、厚さ 4 mm の REBCO パンケーキコイルにおける磁場強度および方向分布を計算した。図 1 に、コイル模式図および磁場分布を示す。コイル内径周辺および外径周辺では、線材の垂直方向に磁場が印可されており、一方、コイルの上下周辺では、線材の垂直方向に磁場が印可されていることが分かる。コイル保護の観点からは、電流分流温度を向上するためには、 J_c の温度依存性を加味して磁束ピンニングの増強が課題である。今後、本研究にて立ち上げた超伝導線材評価装置、数値計算システムおよび、得られた高温超伝導薄膜の特性向上の手法を用いて、より高い許容電流を持つ高温超伝導コイルの作製および、実機サイズでの熱電磁気数値計算を行う予定である。

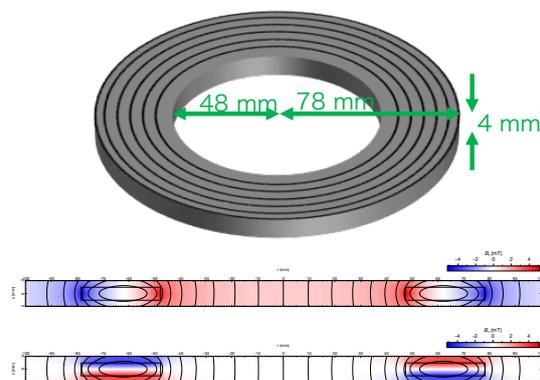


図 1. REBCO パンケーキコイルにおける磁場分布。

高温超伝導線材の特性測定手法の開発

高温超伝導コイルを作製する際に必要な超伝導特性の測定手法として、液体窒素浸漬冷却中での REBCO 線材の J_c 測定装置を立ち上げた。具体的には、液体窒素中 700A 級および 1 m 長さまでの超伝導線材に対する 4 端子法による超伝導特性の分布評価装置の立ち上げを行った。これを用いて、市販高温超伝導線材の超伝導特性評価を行った。

高温超伝導薄膜の特性向上

人工ピンニングセンターとして、 $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 高温超伝導薄膜に BaHfO_3 を添加することで量子化磁束をピンニングし、磁場中臨界電流の増強を行った。薄膜はパルスレーザー蒸着法によって作製し、一度良質のシード層を作製した後に比較的低温でアッパー層を作製する低温成膜手法を用いた。作製した試料を東北大金研強磁場センターにおいて 25T 無冷媒超伝導マグネットを用いて磁場中 J_c を測定を行なった。24 T の強磁場での詳細な磁場印可角度依存性の測

定によって、磁束ピンニングの起源を明らかにした。この成果によって、低温強磁場マグネットへの応用において、ランダムピンと呼ばれるコヒーレンス長 ξ 以下のサイズの磁束ピンニングが重要であることが明らかになった。

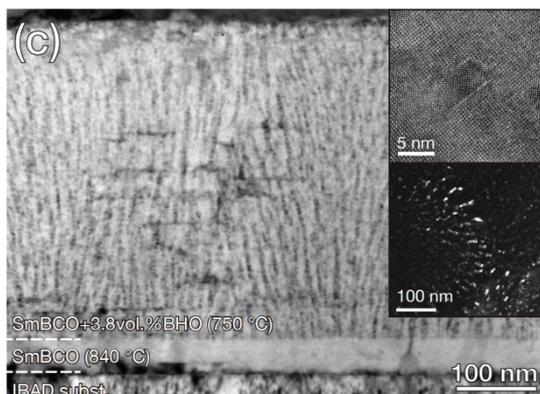


図 2. パルスレーザー蒸着法によって作製した BaHfO₃ 添加 SmBa₂Cu₃O_y 薄膜の断面 TEM 像。

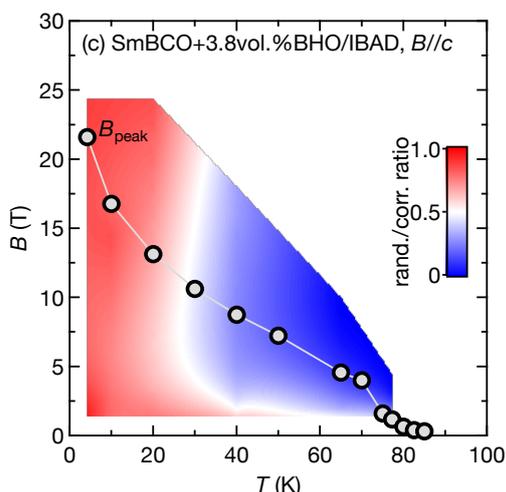


図 3. パルスレーザー蒸着法によって作製した BaHfO₃ 添加 SmBa₂Cu₃O_y 薄膜における磁束ピンニング相図。青は相関ピンニング、赤はランダムピンニングが支配的な温度磁場領域を示している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 20 件)

[1] Y. Tsuchiya, S. Miura, S. Awaji, Y. Ichino, K. Matsumoto, T. Izumi, K. Watanabe, Y. Yoshida "Flux pinning landscape up to 25 T in SmBa₂Cu₃O_y films with BaHfO₃ nanorods fabricated by low-temperature growth technique", Superconductor Science and Technology, 30, 104004, (2017) 査読有, doi: 10.1088/1361-6668/aa7ef0.

[2] Y. Tsuchiya, S. Miura, Q. Xu, Y. Ichino, Y. Yoshida, S. Awaji, K. Watanabe, "Effect of Nanorod Alignment on Flux Pinning State in BaHfO₃ Doped SmBa₂Cu₃O_y Films", IEEE

Transactions on Applied Superconductivity, 27, 8000805 (2017) 査読有, Doi: 10.1109/TASC.2016.2646838

[3] Y. Tsuchiya, S. Awaji, K. Watanabe, S. Miura, Y. Ichino, Y. Yoshida, and K. Matsumoto, "Delocalization of Vortex in SmBa₂Cu₃O_{7-δ} Superconducting Films with BaHfO₃ Nano-rods", J. Appl. Phys. 120, 103902, (2016), 査読有. Doi: 10.1063/1.4962398

[学会発表] (計 76 件)

[1] 土屋 雄司, 秋田 純弥, 一野 祐亮, 岡田 達典, 淡路 智, 吉田 隆, "バイクリスタル基板上 SmBa₂Cu₃O_y 薄膜における低温強磁場中磁束ピンニング特性", 応用物理学会 19p-B403-4, 早稲田大学西早稲田キャンパス(東京), (2018), (口頭).

[2] 土屋 雄司, 木内 勝, 一野 祐亮, 三浦 峻, 淡路 智, 松本 要, 吉田 隆, "BaHfO₃ ナノロッドを導入した SmBa₂Cu₃O_y 高温超伝導薄膜における磁化緩和特性", 低温工学会, 高知市文化プラザかるぼーと(高知), (2017), (口頭).

[3] Y. Tsuchiya, K. Suzuki, Y. Ichino, Y. Yoshida, "Reversible Superconducting Diodes Using Rectified In-plane Vortices in Asymmetrically Multilayered BaHfO₃-doped SmBa₂Cu₃O_y Films", EUCAS 4MP3-02, ジュネーブ国際会議場(ジュネーブ), (2017), (ポスター).

[4] Y. Tsuchiya, S. Miura, M. Kiuchi, Y. Ichino, Y. Yoshida, S. Awaji, "Vortex Dynamics in SmBa₂Cu₃O_y Films with BaHfO₃ Nanorods as Correlated Artificial Pinning Centers", EUCAS 3MP1-08, ジュネーブ国際会議場(ジュネーブ), (2017), (ポスター).

[5] 土屋 雄司, 一野 祐亮, 吉田 隆, "BaMO₃ ナノロッドを導入した SmBa₂Cu₃O_y 超伝導薄膜における磁束液体-磁束ガラス相転移", 応用物理学会 6a-PB1-3, 福岡国際会議場(福岡), (2017), (ポスター).

[6] 土屋 雄司, 木内 勝, 一野 祐亮, 吉田 隆, "BaHfO₃ ナノロッドを導入した SmBa₂Cu₃O_y 超伝導薄膜における高温磁束ピンニング", 応用物理学会 6p-S42-4, 福岡国際会議場(福岡), (2017), (口頭).

[7] Y. Tsuchiya, Y. Ichino, Y. Yoshida, "Morphology of Perovskite Oxide Nanorods in High-Temperature Cuprate Superconducting Films Fabricated by Vapor Phase Epitaxy", ICE 31-4-49in, 名古屋大学野依記念学術交流館(名古屋), (2017), (招待講演口頭).

[8] 土屋雄司, 草深佑真, 一野祐亮, 吉田隆, "Ba₂SmNbO₆ ナノロッドを添加した SmBa₂Cu₃O_y 薄膜における磁束ピンニング", 物理学会 18pK-PS-25, 大阪大学豊中キャンパス (大阪), (2017), (ポスター).

[9] 土屋 雄司, 徐 千語, 一野 祐亮, 一瀬 中, 吉田 隆, "新規ナノロッド材料 BaTbO₃ の SmBa₂Cu₃O_y 超伝導薄膜への導入", 応用物理学会 16p-318-5, パシフィコ横浜(神奈川), (2017), (口頭).

[10] Y. Tsuchiya, S. Awaji, Y. Sawada, H. Oguro, S. Kimura, K. Watanabe, Y. Ichino, and Y. Yoshida, "Visualization of Hotspots in REBCO Pancake Tapes and Coils by Cryogenic Fluorescent Thermography", ICMC-CSSJ 3C-a02, 金沢歌劇座(金沢), (2016), (招待講演口頭).

[11] Y. Tsuchiya, S. Miura, K. Suzuki, J. Nishiyama, Y. Ichino, S. Awaji, and Y. Yoshida, "Random Pinning Centers in SmBa₂Cu₃O_y Films Induced by Discontinuous BaHfO₃ Nanorods Fabricated by the Low Temperature Growth Technique", ICMC-CSSJ 2P-p05, 金沢歌劇座(金沢), (2016), (ポスター).

[12] 土屋 雄司, 三浦 峻, 一野 祐亮, 吉田隆, 淡路 智, 渡邊 和雄, "BaHfO₃ ナノロッドをドーピングした SmBa₂Cu₃O_y 薄膜の磁束ピンニング", 物理学会 14aAC-7, 金沢大学角間キャンパス (金沢), (2016), (口頭).

[13] Y. Tsuchiya, S. Awaji, S. Miura, Y. Doki, Y. Ichino, and Y. Yoshida, K. Matsumoto, Teruo Izumi, K. Watanabe, "Effect of Nano-rods on Vortex Pinning State in BaHfO₃ doped SmBa₂Cu₃O_y Films Deposited by Low Temperature Growth Technique", ASC 2MOr1C-02, Colorado Convention Center(コロラド), (2016), (口頭).

[14] 土屋 雄司, 三浦 峻, 道木 裕也, 一野祐亮, 吉田 隆 (名大); 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大); 松本 要 (九工大), "低温成膜手法により作製した BaHfO₃ 添加 SmBa₂Cu₃O_y 薄膜線材の低温強磁場中磁束ピンニング特性", 低温工学会 2B-a02, タワーホール船堀(東京), (2016), (口頭).

[15] 土屋 雄司, 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, "蛍光低温サーモグラフィによる REBCO コイル内ホットスポットの可視化", 低温工学会 1A-p08, タワーホール船堀(東京), (2016), (口頭).

[16] 土屋雄司, "ナノロッド導入高温超伝導薄膜の磁束ピンニングと磁束相図", 応用物理学

会東海支部基礎セミナー, 名古屋大学 ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー(名古屋), (2016), (口頭).

[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.ees.nagoya-u.ac.jp/~web_dai1/index.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

土屋 雄司(TSUCHIYA, Yuji)

名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻・助教

研究者番号:50736080