

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420247

研究課題名(和文) 高温超伝導回転機内の電磁環境における超電導コイルの交流損失評価・低減に関する研究

研究課題名(英文) Research to evaluate and reduce AC loss in HTS coil under electromagnetic environment of high temperature superconducting rotating machine

研究代表者

小川 純(Ogawa, Jun)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：60377182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導回転機内に生じる電磁条件から、超電導コイルに鉄心が隣接する条件における交流損失と回転磁界を印加したときの交流損失特性について調査を行った。この結果、超電導コイルに鉄心が隣接する場合には損失が増大することが実験により示された。特に、鉄心に近い最も外側の線材の損失が著しく増加することが分かった。また、超電導線材に回転磁界を印加した場合には、線材面に垂直に外部磁界を印加したときと同程度の損失が生じることが示された。

研究成果の概要(英文)：This research evaluated the AC losses in high temperature superconducting (HTS) coil and tape under electromagnetic environment of HTS rotating machine. These results shows the AC loss characteristics in HTS coil inserted in an iron core, and the AC loss in HTS tape in the rotating magnetic field. AC loss with the iron core is increase than the without condition. Especially, the outside HTS tape of the HTS coil is extremely increase than the other tape. The AC losses in the rotating magnetic field are same level to the perpendicular magnetic field conditions.

研究分野：応用超伝導

キーワード：高温超伝導 超電導コイル 交流損失 回転磁界

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導回転機は車載用の超伝導モータ、風力発電用超伝導発電機など様々なところで開発が行われており、鉄心を積極的に使うことにより超伝導線材の使用量を減らし低コストでかつ高効率の回転機として期待されている。従来型の回転機に対し次世代の回転機設計技術として超伝導回転機の開発が必要であり、超伝導化の利点を発揮できる超伝導コイルの設計指針を示す必要がある。高温超伝導回転機に生じる交流損失は回転機の性能、安定性に直結することから特性の把握と低減が不可欠である。現在まで変圧器、限流器などでは鉄心を使用した超伝導電力機器は存在しており、交流損失特性の評価や低減へのアプローチが行われている。しかし、超伝導モータのように鉄心中に囲まれたような配置の交流損失への影響に関する研究は十分に行われていない。超伝導線材の交流損失特性は金属が隣接することにより、磁束の侵入過程に影響を受け損失特性に影響を及ぼすことが報告されており、超伝導コイルにおいても同様の特性が予想される。また、回転機内では回転磁界に晒されることから、このような電磁条件における交流損失特性を評価する必要があった。

2. 研究の目的

高温超伝導モータ、高温超伝導発電機などの高温超伝導回転機の界磁巻線に使用される高温超伝導コイルに生じる交流損失特性の把握と低減を目的とし研究を実施した。回転機内の交流損失を把握するためには、鉄心による交流損失への影響と回転磁界による交流損失特性の把握が重要となる。巻線となる超伝導コイルの損失は磁性体の影響を受けることは知られているが、鉄心などの磁性体に囲まれた超伝導体の交流損失特性へ及ぼす影響について研究が行われていない。また、回転機内の超伝導線材は回転磁界に晒されておりこのような条件における損失評価を行った前例はない。交流損失は超伝導回転機の効率と安定性に直結するため交流損失特性の把握と低減が重要である。このような背景から本研究は回転機内を模擬した電磁環境における交流損失特性を実験により調査し超伝導回転機設計に関する実用的な知見を得ることを目的としている。

3. 研究の方法

本計画は高温超伝導回転機内の電磁環境に着目し、鉄心による交流損失への影響と回転磁界による交流損失特性の把握を行い、レーストラック型超伝導コイルの交流損失特性を実験により損失特性の評価を行う計画であった。このため以下に示す内容を遂行し

た。

- (1) 鉄心中に埋め込まれた高温超伝導線材の交流損失の特性の評価
- (2) 高温超伝導レーストラック型コイルの作成と基礎特性評価
- (3) 高温超伝導レーストラックコイルの直線部分を金属で囲った時の交流損失特性
- (4) 回転磁界印加時の高温超伝導線材に生じる交流損失特性

4. 研究成果

- (1) 鉄心中に埋め込まれた高温超伝導線材の交流損失の特性の評価

高温超伝導線材を鉄心中で積層した条件における交流損失特性について実験的に調査を行った。図1に示すように市販の変圧器用カットコアを購入し溝を設け、線材本数を1~5本挿入した。超伝導線材に生じる各線における損失は熱的測定法により測定を行った。また、比較のために鉄心外に生じる損失特性についても同様の条件において調査し行い比較を行った。

図2に各線における交流損失特性を示す。すべての条件において鉄心外に比べ鉄心内のほうが損失が増大していることがわかる。これは、電流が流れる過程で線材内に磁束が侵入する過程で、超伝導線材の周囲に鉄心があることにより磁束の侵入の仕方が変化し、損失が増大するためであると考えられる。また積層された線材においては中央の線材の損失が減少しており、これは外側の線材のシールド効果により損失が減少していると考えられる。

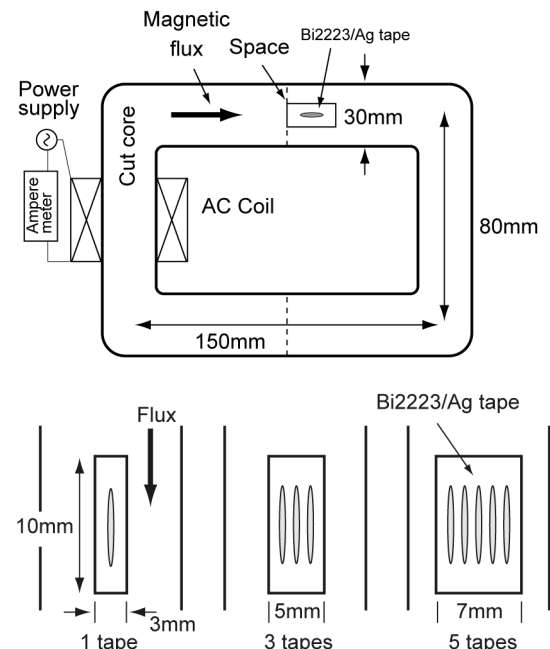


図1 変圧器用鉄心に超伝導線材を複数本挿入した様子

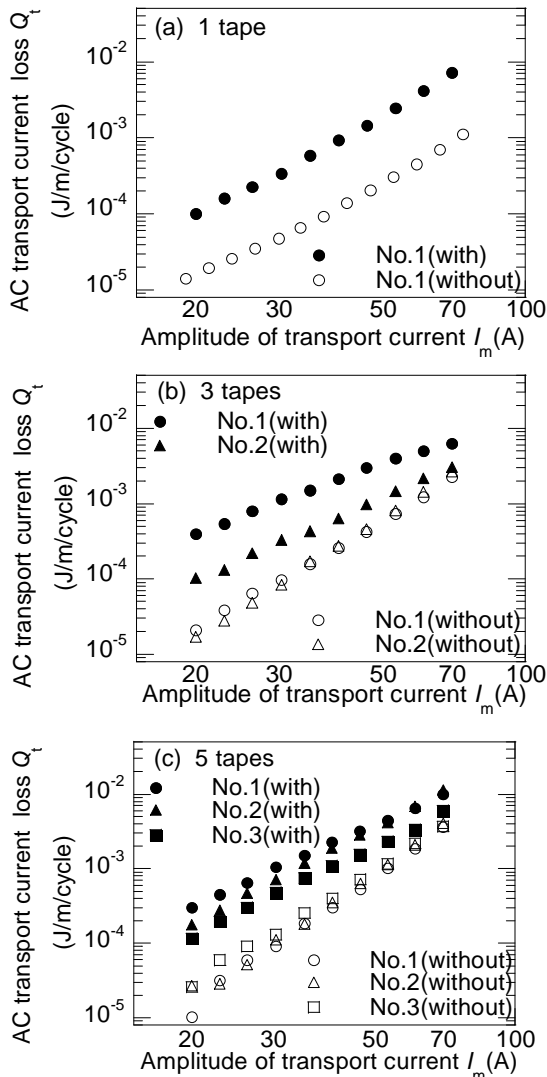


図2 変圧器用鉄心に超電導線材を複数本挿入したときの交流損失特性

(2) 高温超伝導レーストラック型コイルの作成と基礎特性評価

図3に示すような巻き線機を作成し、図4に示すようなレーストラックコイルの作成を行った。レーストラックコイルを作成する際の線材の劣化を確認するために、コイル全体の直流特性と交流損失特性の評価を行った。コイル全体の臨界電流値は49.8Aであった。図5にレーストラックコイル全体の交流通電損失の周波数特性を示す。超電導線材の交流損失は一般的に低周波においてはヒステリシス的に生じる。作成したコイルにおいても1サイクル当たりの交流損失がよく一致していることから、ヒステリシス的に交流損失が生じているといえ、コイル内でキンクなどによる線材劣化が見られないと考えられる。

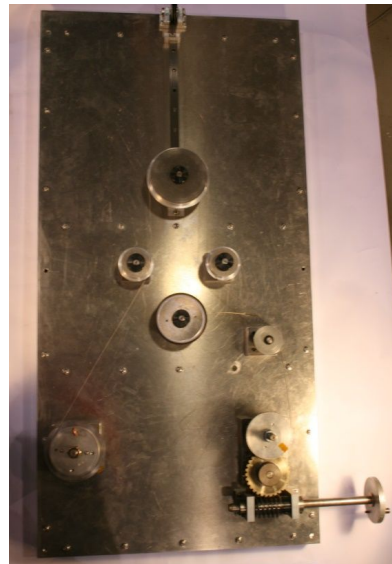


図3 高温超伝導コイル用巻線機

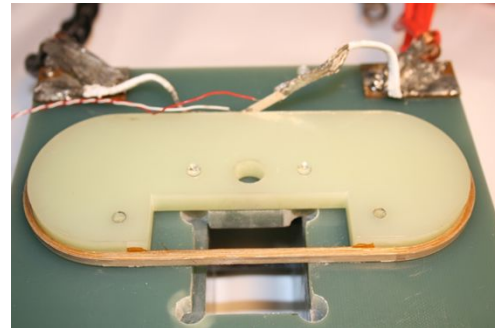


図4 レーストラック型高温超伝導コイル

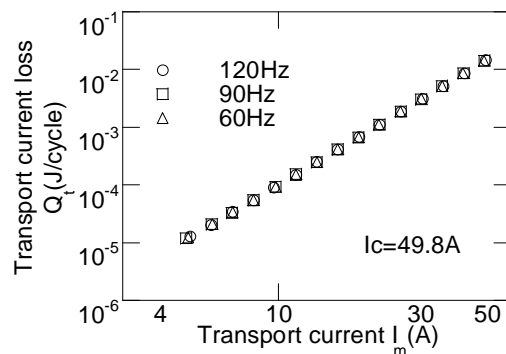


図5 巻き線機で作成したレーストラックコイルの交流通電損失特性

(3) 高温超伝導レーストラックコイルの直線部分を金属で囲った時の交流損失特性

(2)で作成した高温超伝導レーストラックコイルの直線部分の40mm区間を変圧器用鉄心で囲い交流損失特性の調査を実施した。測定方法は四端子法により測定を行ったが、この方法では鉄心の損失を含むため、あらかじめ鉄心に生じる損失を調査し、超電導コイルのみに生じる損失を測定した。

図6に鉄心内と鉄心外における交流通電損失特性を示す。鉄心外における損失に対し、

鉄心内の損失は1桁以上大きくなり、電流に対する損失の傾きも3乗から2乗に変化していることがわかる。これは(1)において報告した鉄心内で積層した高温超電導線材の損失特性と同様の特性であり、測定結果は妥当であると考えられる。

鉄心内に挿入された高温超電導コイルの損失は増加する傾向となり、熱的に不安定となるが、図2に示されるように最外の線材の損失が大きいため、外層に保護用の超電導線材を配置したり、線材を2重とすることにより外層の線材の損失によるコイル全体へのダメージの可能性を抑制することは可能である。

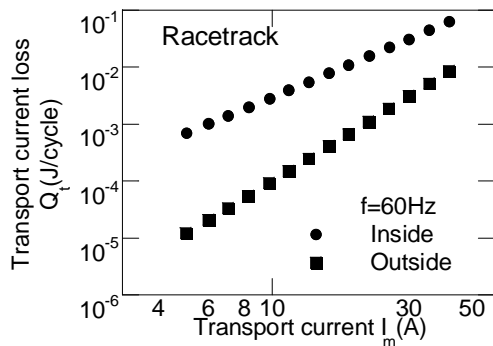


図6 レーストラックコイルの直線部分を鉄心で囲ったときの交流損失特性

(4) 回転磁界印加時の高温超電導線材に生じる交流損失特性

回転磁界を印加するために、変圧器用の鉄心を組み合わせて、図7に示すような装置を作成し、この中央部分にBi2223/Ag線材を挿入し交流損失測定を実施した。交流損失の評価方法は、一般的に用いられているピックアップコイルを用いた磁化法では測定ができないため、熱的測定法を用いて損失測定を行った。

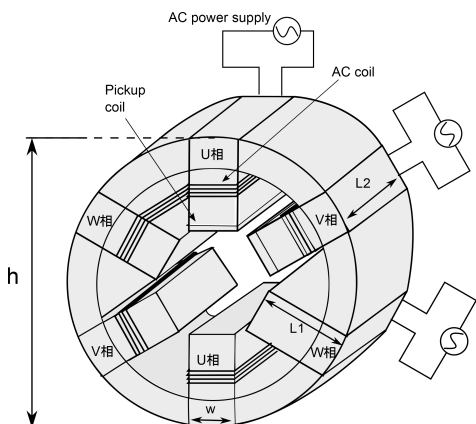


図7 高温超電導線材に回転磁界を印加するための装置の概要

図8に回転磁界を印加したときの超電導線材に生じる交流損失特性を示す。比較のため同じ線材にソレノイドコイルを用いて平行磁界と垂直磁界を印加したときの磁化損失を示す。回転磁界を印加したときの交流損失特性は線材面に対し垂直に交流磁界を印加したときの交流損失と同程度の大きさとなることが示されている。

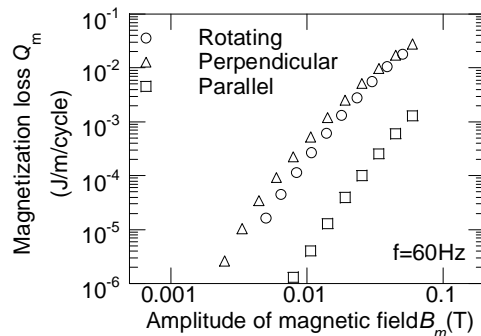


図8 Bi2223/Agテープ線材に回転磁界を印加したときの損失特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Sakurai, Y. Sano, H. Tada, Y. Yoshii, "Experimental Investigation of AC Loss Characteristics of Stacked HTS Tapes in an Iron Core", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.26, No.4, DOI:10.1109/TASC.2016.2543504 (2016)

J. Ogawa, T. Oka, S. Fukui, T. Sato, A. Fushimi, T. Shoda, "Influence of the Arrangement of HTS Tapes Inserted in an Iron Core on AC Loss Characteristics", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.24, No3, DOI:10.1109/TASC.2013.2280730 (2014)

〔学会発表〕(計 7件)

佐野 佑樹, 桜井 達哉, 小川 雅大, 多田 寛明, 吉井 佑斗, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, "鉄心内に挿入された高温超伝導集合導体の交流損失特性", 電気学会東京支部新潟支所大会, 2015/10/31, 長岡技術科学大学(新潟県・長岡市)

J. Ogawa, S. Fukui, T. Oka, T. Sakurai, Y. Sano, H. Tada, Y. Yoshii, "Experimental Investigation of AC Loss Characteristics of Stacked HTS Tapes in an Iron Core", 24th International Conference on Magnet Technology, 2015/10/20, Seoul(Korea)
多田 寛明, 桜井 達哉, 吉井 佑斗, 佐野 佑樹, 小川 純, 福井 聡, 岡徹雄,

佐藤 孝雄, “鉄心内に挿入された高温超伝導集合導体の交流損失特性の実験的評価”, 春季低温工学, 2015/5/27, 産業技術総合研究所(茨城県・つくば市)

中野 芳彦, 多田 寛明, 吉井 佑斗, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, “レーストラック型超電導コイル内の局所的交流損失測定法の検討”, 電気学会東京支部新潟支所大会, 2014/10/25, 新潟大学(新潟県・新潟市)

桜井 達哉, 伏見 侑, 小川 純, 福井 聡, 岡徹雄, 佐藤 孝雄, “挿入された高温超電導線材の位置及び種類による交流損失特性への影響”, 秋季低温工学, 2014/5/27, タワーホール船堀(東京都・江戸川区)

伏見 侑, 前川 達也, 小川 純, 福井 聡, 岡 徹雄, 佐藤 孝雄, “挿入された鉄心形状による高温超伝導線材の交流損失特性への影響”, 電気学会B部門大会, 2013/8/27, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)

J. Ogawa, T. Oka, S. Fukui, T. Sato, A. Fushimi, T. Shoda, "Influence of the Arrangement of HTS Tapes Inserted in an Iron Core on AC Loss Characteristics", 23th International Conference on Magnet Technology, 2013/7/16, Boston(USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 純 (OGAWA Jun)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 60377182