

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月29日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360120

研究課題名（和文） 磁界と温度の2つのリスク要因を分離配置した超伝導コイルの熱電磁特性評価と最適設計

研究課題名（英文） Evaluation of thermal-electromagnetic properties of superconducting coil separating two risk factors of magnetic fields and temperature and its optimal design

研究代表者

住吉 文夫 (SUMIYOSHI FUMIO)

鹿児島大学 理工学研究科・教授

研究者番号：20136526

研究成果の概要（和文）：

超伝導コイルの性能を向上させるために、巻線の磁界最大点と温度最高点を分離するという新しい発想のコイル設計法を提案した。まず、超伝導テープ線やコイル周辺のポインティングベクトル分布を測定する手法を開発した。またこの測定法を応用して、コイルの局所損失状態の推定法も確立させた。次に、 MgB_2 テープ線を使った試作導体が、素線間を低抵抗接続した高安定型 NbTi ラザフォードケーブルと同等以上の高い安定性を有していることを明らかにした。さらに、局所的な磁界変化を抑制する新しい損失低減方法を提案し、Bi-2223 コイルを使って、本手法の有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）：

In order to improve performance of superconducting coils, the new method to design the coils has been proposed. The method is based on a new idea that the maximum magnetic fields and the highest temperature areas are separated. Firstly, a measuring method of profile of Poynting's vector around superconducting tapes or coils has been developed. In addition, a method to estimate local loss generation in windings has been established by applying Poynting's vector method. Secondary, it was clarified that a test conductor composed of five MgB_2 tapes has high stability, which is equal or more than that of NbTi Rutherford cable with high stability due to low resistive contact between strands. Finally, a new loss reduction method suppressing changes of magnetic fields has been proposed. And then the validity of the method has been experimentally confirmed by using Bi-2223 coil wound.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：超伝導・コイル・線材・導体・損失・安定性・電磁特性

1. 研究開始当初の背景

超伝導応用機器としては、人体断面撮影用の MRI，たんぱく質などの分析 NMR，磁気分離装置などが既に実用化されている。実用化に近いものとしては、超伝導リニアや瞬時電圧低下補償用の超伝導電力貯蔵装置 (SMES と略記) がある。また、大型の実験用装置として、核融合実験装置や粒子加速器がある。これらの装置にはいずれも、低温超伝導 (LTS と略記) 線材である NbTi や Nb₃Sn などの金属系超伝導材料が使われている。この場合、寒剤として液体ヘリウムまたは 4.2K の冷凍機が必要である。ヘリウム液化機や冷凍機の効率を考慮すると、超伝導応用機器の実用化が進むためには、さらに電流容量の増大や交流損失の低下による高効率化などの高性能化が求められていた。一方、最近発見された金属系の超伝導材料である MgB₂ は、臨界温度が高く、しかも材料コストが安いと、大変期待されているものの、十分な性能は得られていなかった。また酸化物系の高温度超伝導 (HTS と略記) 超伝導材料は、液体窒素温度でも超伝導状態が得られるため、次世代線材として大いに期待されていたが、基礎研究または小型モデル機器の試作研究の段階であった。

2. 研究の目的

本研究では、超伝導電力機器などに用いる超伝導コイルについて、従来とは違う新しい発想の設計概念を構築し、これによるコイル性能向上を理論的に明らかにする。さらに、それに基づいて最適設計した高性能コイルの基礎的な実証実験までを行う。従来の超伝導コイルの設計では、臨界電流と呼ばれるコイルの限界性能がコイル巻線に加わる最大磁界の値によって決定づけられていた。これは、磁界最大するとき、超伝導線材の交流損失が最大となり温度も同時に最大になるためである。これに対して本研究では、交流損失特性が印加磁界方向に対して異方性をもつテープ状線材を使い、コイル巻線部分の最大磁界となる点と交流損失が最大となる点とを積極的にずらす、という新しい超伝導コイル設計概念を提案する。これにより、コイルの臨界電流特性が格段に向上するのは勿論のこと、コイル全体で発生する交流損失の全量も減り超伝導電力機器の効率が向上することも合わせて期待できる。

3. 研究の方法

まず、テープ線の電磁特性を種々のサン

プル形状で評価するために、独自のポインティングベクトル法の改良を行いテープ線材の基礎データを取得する。さらに本測定法を応用して、コイルの局所的な損失状態を推定できるようにする。次に、主として MgB₂ テープ線を導体化するための設計指針を明らかにするために、試作導体等の電磁特性の評価を行う。さらに、テープ線を使ったコイルの性能が向上することを確かめるために、取得した基礎データを元に数値解析を行い、本研究で提案するコイル設計法の効果を予測し、実際に小型モデルコイルを使った実験までを行う。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果を述べる。

(1) ポインティングベクトル法による超伝導テープ線材・コイルの電磁特性評価法の確立

まず、巻線となる高い断面アスペクト比の線材自体や巻線されたコイルの電磁特性を詳細に明らかにするために、線材周辺のポインティングベクトル分布を測定する装置の改良を行った。ポテンシャルリードとピックアップコイルで構成される測定センサー対を、これまでの可動型から、多数の測定センサー対を固定設置する固定型にした。多数のポテンシャルリードを設置してもサンプルへハンダ付けする端子対は 1 対で良いことを理論と実験から明らかにした。この改良により、測定センサー対をサンプルに近づけることが可能になり、その結果、ポインティングベクトル分布がより詳細に測定できるようになった。図 1 に、GdBCO 線材に垂直な磁界を印加した時の電界・磁界・ポインティングベクトルの分布を示している。線材両端から入り込むエネルギーが大きいことがわかる。

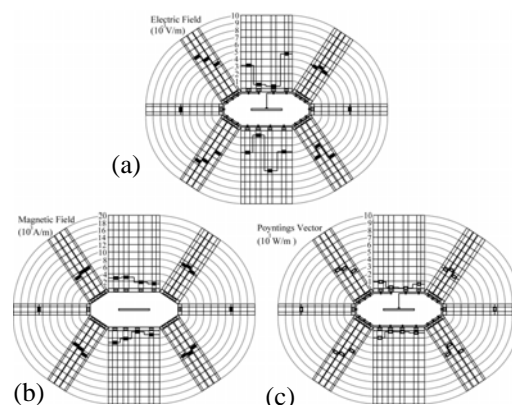


図 1 GdBCO 線材の測定例，(a)電界，(b)磁界，(c)ポインティングベクトル，磁界振幅 20mT_p(垂直)，周波数 46Hz

さらに、この方法を応用し、高温超伝導コイルの局所的な損失状態を推定する画期的な手法を確立させた。本手法を用いると、巻線の健全性を、保冷容器外型の室温空間から診断することが可能である。

(2) MgB₂ テープ線材を用いた試作導体の特性評価

臨界電流の格段の向上と交流損失の大幅な低減効果が確認されている MgB₂ テープ線材について、5本の MgB₂ テープ線を使って転位導体を試作し、その臨界電流特性を評価した。試作導体は、テープ線間を絶縁したサンプルと絶縁しないサンプルを準備した。これらの試作導体の臨界電流は、図2に示すように、短尺線材の予測値とよく一致し、導体が劣化なく作製できることが確かめられた。さらに絶縁ありテープ線で試作した導体の安定性を測定した。4.2 Kの測定結果を図3に示す。最小クエンチエネルギー (MQE) を縦軸に、横軸に通電電流の臨界電流に対する比率を示している。NbTi 素線レベルの安定性よりも10倍以上、素線間が低抵抗接続された高安定型 NbTi ラザフォードケーブルと同等以上の高い安定性を有していることがわかる。このことから、MgB₂ テープ線で作製された導体の高い安定性を明らかにした。

(3) テープ形状導体を用いたコイルの高性能化

高い断面アスペクト比のテープ形状導体を用いたコイルで実際に性能向上が達成されるかどうかを理論と実験の両面から検討した。

まず、トロイド型コイルの性能を向上させる方法として、D型断面変形トロイダルコイルに特殊な巻線方法を採用することを提案した。この巻線方法では、一部の巻線密度を調整することにより磁界分布を制御した。その結果、巻線密度を調整した方が高臨界電流であることを理論的に明らかにした。

次に、高い断面アスペクト比のテープ線材で巻線したコイルの低損失化の方法について検討した。テープ線で巻線したコイルの端付近では、テープ面幅広面に垂直な変動磁界によって大きな損失が発生する。この課題に対し、垂直磁界の変動分だけを選択的に抑制する付加コイルを設置する新しい損失低減方法を提案し、その効果を理論と実験の両面から明らかにした。実験では、Bi-2223 多芯テープ線を使用した測定を行った。図4に示すように、付加コイル有り無しで、損失が低減することを実証した。本損失低減方法では、コイル端付近の損失を重点的に低減することにより、伝導冷却型コイルにおける上昇温度を抑制する効果が期待できる。なお、RE系線材において、縦磁界効果によるコイルの性

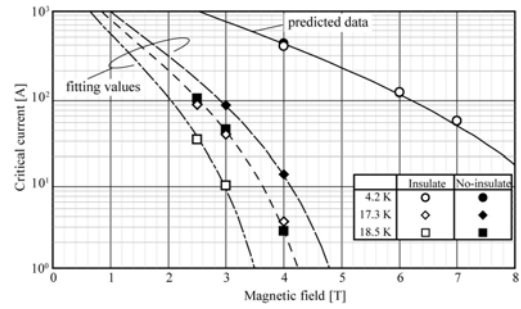


図2 MgB₂ 試作導体の臨界電流特性

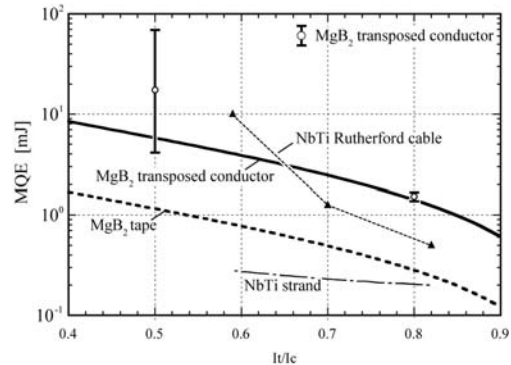


図3 試作導体の安定性

能向上の可能性を検討した。その結果、現在の線材特性では、大きな効果は見込めないことを明らかにした。

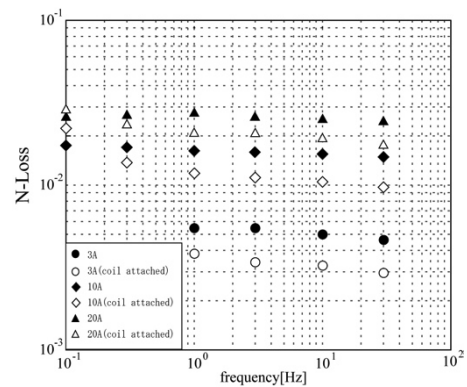


図4 磁界変化抑制コイル法の損失低減効果

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6件)

① A. Kawagoe, H. Moribe, K. Kakiyama, F. Sumiyoshi, Diagnosis of winding conditions in high temperature superconducting coils by applying Poynting's vector method, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, 2013, in

press.

② M. Mukai, M. Furukawa, H. Sakuda, A. Kawagoe, F. Sumiyoshi, AC Loss Measurements of HTS Long Tapes Formed into a Solenoidal Coil Shape Simultaneously Exposed to AC transport Currents and AC External Magnetic Fields by Improved Poynting's Vector Method, *Proceedings of the Twenty-Forth International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2012*, 査読有, 2013, pp. 853-856

③ H. Sakuda, T. Tokuda, M. Mukai, A. Kawagoe, F. Sumiyoshi, Improved poynting's Vector Method: Estimations of Electromagnetic Properties of HTS Tapes Simultaneously Exposed to AC Transport Currents and External Magnetic Fields, *Proceedings of the Twenty-Forth International Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2012*, 査読有, 2013, pp. 849-852

④ F. Sumiyoshi, A. Kawagoe, 他 6 名, Improved Poynting's Vector Method: AC Loss Measurement of HTS Tapes Formed into a Short Straight or a Solenoidal Coil, *Physics Procedia*, 査読有, Vol. 36, 2012, pp. 1534-1539, DOI:10.1016/j.phpro.2012.06.206

⑤ 川越明史、藤岡直人、木元武尊、住吉文夫, 高温超伝導コイルで発生する常伝導領域の非接触型検出法-低温容器外周のピックアップコイル群を使う新しい測定法の提案-, 低温工学, 査読有, Vol. 46, No. 8, 2011, pp. 481-488

⑥ A. Kawagoe, K. Matsushima, Y. Yoshidome, S. Kawabata, F. Sumiyoshi, 他 7 名, Development of an MgB₂ Coil Wound with a Parallel Conductor Composed of Two Tapes with Insulation, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 査読有, Vol. 21, No. 3, 2011, pp. 1612-1615.

[学会発表] (計 34 件)

① 柿山昂佑、他 3 名、ピックアップコイル対による高温超伝導コイルの健全性診断、第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会、2012 年 11 月 8 日、岩手県

② 片山拓郎、他 3 名、高アスペクト比のテープ線材を用いた超伝導パルスコイルの性能向上-新しい交流損失低減方法-、第 86 回 2012 年度秋季低温工学・超電導学会、2012 年 11 月 7 日、岩手県

③ A. Kawagoe, Diagnosis of wining conditions in high temperature superconducting coils by applying

Poynting's vector method, 2012 Applied Superconductivity Conference (ASC 2012), 2012 年 10 月 9 日, USA

④ 北村裕紀、他、MgB₂テープ線を用いた転位導体の開発、第 85 回 2011 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集、2011 年 11 月 10 日、石川県

⑤ A. Kawagoe, Measurements of Electromagnetic Properties of High Temperature Superconducting Tapes by Poynting's Vector Method, The 15th Japan-US Workshop on Advanced Superconductors (invited), 2011 年 10 月 29 日, Japan.

[その他]

ホームページ等

<http://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~sumi-lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

住吉 文夫 (SUMIYOSHI FUMIO)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：20136526

(2) 研究分担者

川越 明史 (KAWAGOE AKIFUMI)

鹿児島大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40315396