

令和元年6月27日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06232

研究課題名(和文)高温超伝導コイルの異常検出と診断に関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic Study on Monitoring Abnormality of The High-Temperature Superconducting Coil and Diagnosing Its Soundness

研究代表者

川越 明史 (Kawagoe, Akifumi)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：40315396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導機器の異常を監視し、その健全性を診断する手法について実験と理論の両面から検討した。我々の提案する異常監視・診断法では、高温超伝導機器の健全性を非接触で測定するために、交流損失特性に起因する電磁的なエネルギーフローを観測している。本研究では、この電磁エネルギーフローの測定値から、高温超伝導巻線の臨界電流が推定できることを実験と理論の両面から明らかにした。まず、交流電中、交流外部磁界中のいずれの状態でも、臨界電流を定量的に評価できることを実験的に示した。次に、交流外部磁界印加中の高温超伝導線材周囲の電磁エネルギーフローを数値解析によって計算し、実験結果とよく一致することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の超伝導機器の異常監視は、巻線損傷の保護が主目的であった。しかしながら、変圧器などの実用機器においては、意図しない機器の遮断をできるだけ避ける必要がある。このため、常電導転移よりも前に、超伝導特性の低下を把握できなくてはならない。本研究結果により、従来は全く不可能と考えられていた機器運転中の超伝導特性の低下を、臨界電流値として評価できることが明らかになった。これにより、これまでの保護目的の異常監視方法から脱却し、予防保全が可能になる。以上のように、学術的にも超伝導機器の実用化促進による省エネルギー化社会の構築にも大きく寄与する。

研究成果の概要(英文)：The method of monitoring the abnormality of high-temperature superconducting (HTS) devices and diagnosing its soundness was investigated on both the experimentally and the theoretically. In our proposed monitoring and diagnosing method, electromagnetic energy flows originated from AC loss properties are measured to estimate the soundness of the HTS devices without contact.

In this study, firstly, it is clarified that the critical current of the HTS winding can be estimated from the measured electromagnetic energy flows. Secondly, it is shown that numerically calculated electromagnetic energy flows around HTS wires were a good agreement with experimental data.

研究分野：超伝導工学，電力応用

キーワード：高温超伝導 交流損失 異常監視 健全性診断 予防保全

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

低温超伝導機器は、運転温度が液体ヘリウム温度近傍であるため、材料の比熱が小さく、少しの擾乱ですぐに常電導転移してしまう安定性の低いものである。また、発生した常電導領域は高速で広がる。このため、常電導転移発生後、急激な発熱上昇によって冷媒が爆発的に蒸発し、保冷容器の破裂などの重大事故が起こる危険性がある。したがってこのような事態を引き起こさないためのモニタリングシステムが必要であった。このため、主として用いられてきたモニタリングシステムでは、直接電圧端子を取り付けたバランス電圧法による確実な異常発生の検出と、超伝導コイルからの迅速なエネルギー回収が重視されてきた。すなわち、その主目的は機器の保護であった。

一方、高温超伝導機器では、運転温度が高く比熱が高いために、安定性が高いことが期待されている。しかしながら、一担常伝導領域が発生すると、その領域が広がりやすく、その場所の温度だけが上昇する「ホットスポット」が発生する可能性がある。このホットスポットは観測するのが難しく、見落とすと最悪の場合巻線が焼損する可能性がある。そのため、高温超伝導機器を運転する場合、その巻線の健全性をできるだけ小さな領域に対して監視できる高感度の装置が必要である。さらに、実用段階に入った（あるいは近づいた）ような機器において、健全な状態かどうかを常にモニタリングすることが必要である。特に重要なのは、機器の意図しない遮断を可能な限り防ぐために、常電導転移の前段階で起こると想定される「超伝導特性の低下」を定量的に把握することである。すなわち「予防保全」を可能にする異常監視・診断システムが必要である。

上述のバランス電圧法は、電圧端子を取り付けるために、放電事故を誘発する危険性がある点が大きな問題である上に、常電導転移前に何らかの異常を検出することは極めて困難である。このために、実用段階の高温超伝導機器にこの方法は使えない。また音を測定するアコースティックエミッション法も安全な非接触法として提案されているが信頼性が低い。同じく非接触法のピックアップコイル法もあるが、汎用性が低く、今後のモニタリングシステムには適さない。

以上のように、実用段階の高温超伝導機器には、運転時の健全性を常時監視し、診断することのできる安全で簡便である上に局所的な異常を高感度で検出できる新しいモニタリングシステムが必須であるにも関わらず、このような研究は、国内外問わず、殆ど行われていなかった。

このような背景のなかで、研究代表者らは、以前より電磁エネルギーフロー測定による高温超伝導機器の異常監視・診断システムを提案している。この方法では、2つのピックアップコイルの対を用いることにより、巻線の異常を非接触で高感度に測定する。本研究開始前には、その測定原理の検証は完了していたものの、測定した結果から巻線の健全性を定量的に評価する段階にはいたっていなかった。また、使用するピックアップコイルのサイズの問題から、汎用性に問題があった。このため、我々の提案するシステムで測定した結果と巻線の健全性との関係を定量的に把握し、ピックアップコイル対で測定される測定信号の定量的な予測を可能にすること、また実用的なピックアップコイルの設計を可能にすることが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、本異常測定法によって高温超伝導機器の健全性を診断することを可能にするために、巻線周囲で測定される電磁エネルギーフローと巻線の健全性との関係を定量的に明らかにすることである。またそれによって、より応用範囲の広い小型で高感度のピックアップコイルの設計を可能にすることである。

3. 研究の方法

巻線の健全性を定量的に評価するために、本研究では、巻線の臨界電流値を推定することとした。これは、高温超伝導線材の超伝導特性は、機械的なダメージでも温度上昇でも、臨界電流の低下を伴う。このため、機器の運転中の臨界電流が正常値にあるかどうかを判断すれば、健全性を評価できる。また、実機に用いられる巻線は、複数ターンで構成されるので、巻線周囲で観測される電磁エネルギーフローは、複数ターンの状況の重ね合わせで決定される。このため、まずは1ターンの状態と測定される電磁エネルギーフローの関係を定量的に明らかにすることを試みた。具体的には、1ターンのリング状コイルのサンプルとして、高温超伝導線材周囲で電磁エネルギーフローを測定した。その際、サンプルの温度を変化させることによって、サンプルの健全性を変化させた。この実験は、液体窒素中で行った。交流電流を通電した場合と、交流外部磁界を印加した条件で実験した。

交流電流通電時は、サンプルを Bi-2223 多芯テープ線材と YBCO 線材の2種類を用いた。温度は自然蒸発により変化させた。交流外部磁界印加時は、Bi-2223 テープ線材のみの実験を行い、印加磁界方向は、幅広面に平行とした。

さらに交流外部磁界印加時の条件では、数値解析を行い、測定される電磁エネルギーフローを理論的に計算できるかどうかを調べた。

4. 研究成果

Fig. 1 は、交流通電時の電磁エネルギーフローの測定値から臨界電流を求めた結果である。参照信号として、直接サンプルに電圧端子を取り付けて測定した交流損失をもとに臨界電流を求めた結果も載せている。測定は液体窒素中で行った。液体窒素を自然蒸発させることによってサンプルの温度を上昇させた。図の横軸は時間で、時間の経過とともに温度が上昇し、臨界電流が低下する。青色が電磁エネルギーフローから求めた結果で、赤色が交流損失から求めた結果である。

Bi-2223 線材か YBCO 線材かに依存せず、電磁エネルギーフローから求めた臨界電流がよく推定できていることがわかる。Bi-2223 線材の方は、80A 程度まで非常によく推定できている。YBCO 線材の方は、95A までで実験を停止したので、これ以上の臨界電流低下が起こると、Bi-2223 線材同様に臨界電流の推定値の誤差が生じると考えられる。

臨界電流の低下が大きくなると推定精度が著しく悪くなるのは、電磁エネルギーフローが非接触で測定されていることに起因する。すなわち、通電電流が臨界電流を超える状態になると、磁束フロー抵抗が生じるため、サンプル周囲の電界は静電界が支配的になる。この場合、本測定方法では誘導電界のみを測定していることから、正確な静電界の測定はできない。なお、測定された交流損失が Norris の理論値とよく一致していることは確かめている。

Fig. 2 は、交流外部磁界を Bi-2223 コイル状サンプルに印加したときに測定された電磁エネルギーフローである。縦軸は電磁エネルギーフローを印加磁界の二乗で規格化したもので、横軸は印加磁界振幅を中心到達磁界で規格化している。サンプルとの距離が 1mm, 15mm, 30mm の場所で測定したものを、それぞれ、N, M, F としている。○, □, △は、実験温度を表しており、それぞれ 77.3K, 72K, 67K である。

温度によらず、測定値は一つのマスターカーブに乗っていることがわかる。これは、測定される電磁エネルギーフローの場所依存性は、臨界電流にのみ依存していることを示している。測定場所が遠くなるにしたがって電磁エネルギーフローの絶対値が小さくなるのは、電磁エネルギーフローが単位面積あたりのエネルギーの流れであるためである。なお、中心到達磁界は、77.3K, 72K, 67K で、それぞれ 38mT, 47mT, 56mT と求められている。これらは、どの場所でもよく一致した。すなわち、電磁エネルギーフローの磁場依存性は、中心到達磁界が変わっても本質的に変わらないことが示された。このことから、予め測定される正常な電磁エネルギーフローの磁場依存性を求めておけば、その値と測定された電磁エネルギーフローとの関係から、中心到達磁界を推定することが可能なことがわかる。中心到達磁界は、臨界電流とサンプルの形状で決まるので、サンプルの臨界電流が推定できることを意味している。

Fig. 3 は、得られた中心到達磁界から臨界電流を求めた結果をグラフに載せている。実線は、温度を変化させたときの臨界電流値を 4 端子法で測定した結果である。3 種類のプロットは、測定場所の違う測定値を示している。実線とプロットはよく一致しており、本測定法によって臨界電流を推定できることが実験的に示されている。

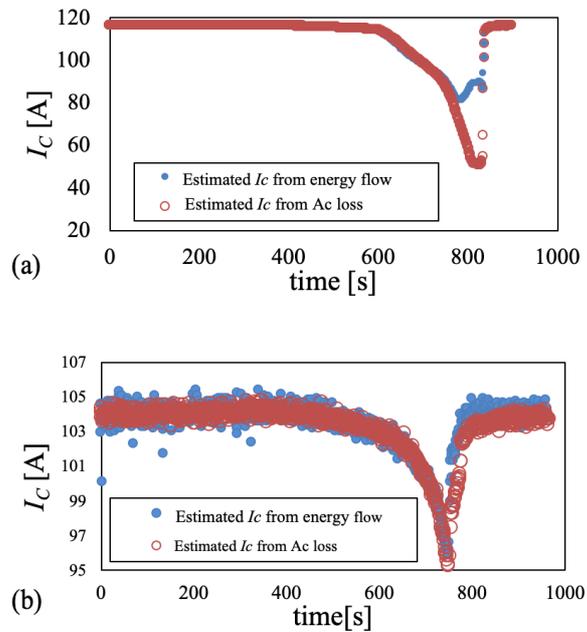


Fig. 1 The critical current value estimated from the measured energy flows and the critical current value estimated from the AC loss on (a) Bi-2223 (b) YBCO, when amplitude of the transport currents are 90A.

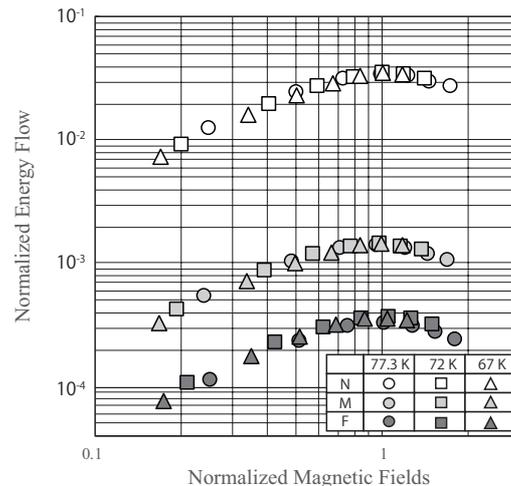


Fig. 2 Normalized magnetic field dependences of energy flows, where the horizontal axis is normalized magnetic fields by penetration fields. The penetration fields are assumed the applied magnetic fields at which normalized energy flows are peak values. Open, gray and solid symbols represent measured positions, N, M and F, respectively.

77.3K, 72K, 67K で、それぞれ 38mT, 47mT, 56mT と求められている。これらは、どの場所でもよく一致した。すなわち、電磁エネルギーフローの磁場依存性は、中心到達磁界が変わっても本質的に変わらないことが示された。このことから、予め測定される正常な電磁エネルギーフローの磁場依存性を求めておけば、その値と測定された電磁エネルギーフローとの関係から、中心到達磁界を推定することが可能なことがわかる。中心到達磁界は、臨界電流とサンプルの形状で決まるので、サンプルの臨界電流が推定できることを意味している。

次に、数値計算によって、測定される電磁エネルギーフローを解析した結果を示す。Fig. 4は、規格化エネルギーフローの測定値と数値解析結果を比較した結果である。横軸は印加磁界振幅である。数値解析は 77.3K の臨界電流値を元に計算している。数値解析では、ピックアップコイル対のうち、電界測定用のピックアップコイルで観測される信号のみを解析した。この際、超伝導体内への磁束侵入過程を詳細に解析することは困難であることから、交流損失に寄与する遮蔽電流のみを考慮することで、簡便に行う近似的な解析とした。すなわち、印加磁界の周波数と同じ周波数成分で、印加磁界の位相から 90 度遅れた遮蔽電流のみがサンプルに流れているとして解析した。遮蔽電流の大きさは、交流損失特性の理論値から求めた。また実験値は、電界用ピックアップコイルで測定される成分のみに着目するために、磁界測定用ピックアップコイルをサンプルから大きく離れた位置にセットした結果を載せている。青色のプロットが解析結果で、それ以外のプロットが実験値である。77.3K の測定値と数値解析結果はよく一致している。このことから、電磁エネルギーフローを精度良く計算できることがわかる。

以上のように、本測定法で観測される電磁エネルギーフローから、高温超伝導線材の臨界電流を非接触で定量的に評価できることを理論と実験の両面から明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

1) [Akifumi Kawagoe](#), Keita Hosoda, Junya Tsuruda, "The Method to Diagnose Soundness of The High Temperature Superconducting Coil by Pick-up Coil Pairs," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, in press.

DOI: 10.1109/TASC.2019.2905982

2) Keisuke Sakemoto, Toshiki Kubo, [Akifumi Kawagoe](#), "The Method to Diagnose Local Abnormalities in Windings of High Temperature Superconducting Transformer During Load Changing," Physics Procedia, Vol. 81, 2016, pp. 199-202

DOI: 10.1016/j.phpro.2016.04.050

[学会発表] (計 8 件)

1) 細田啓太, 鶴田絢也, [川越明史](#), 運転中の高温超伝導巻線に生じた異常の診断法 2 ～ピックアップコイル設置位置の影響～, 第 97 回 2018 年度秋季低温工学・超電導学会, 2018

2) [Akifumi Kawagoe](#), Keita Hosoda, Junya Tsuruda, "The Method to Diagnose Soundness of The High Temperature Superconducting Coil by Pick-up Coil Pairs," Applied Superconductivity Conference 2018 (ASC2018), 2018

3) [川越明史](#), 松元拓磨, 細田啓太, 運転中の高温超伝導巻線に生じた異常の診断法～外部磁界印加中の測定～, 第 95 回 2017 年度秋季低温工学・超電導学会, 2017

4) [Akifumi Kawagoe](#), Takuma Matsumoto, Keita Hosoda, "Experiments to Validate New Method to Diagnose Soundness of The High Temperature Superconducting Coils by Pick-up Coil Pairs," 13th European Conference on Applied Superconductivity, 2017.

5) 細田啓太, 松元拓磨, [川越明史](#), 高温超伝導コイルにおける健全性診断法の検証 ～1 ターンコイルの臨界電流推定～, 低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2017 年度支部研究成果発表会, 2017.

6) 細田啓太, 松元拓磨, [川越明史](#), 負荷変動中に生じた高温超伝導変圧器巻線の局所異常の診断方法 2 - 1 ターンコイルの臨界電流の推定 -, 第 94 回 2017 年度春季 低温工学・超電導学会, 2017.

7) 松元拓磨, 酒元啓佑, [川越明史](#), 高温超伝導変圧器巻線の異常診断法～線材周囲のポインチ

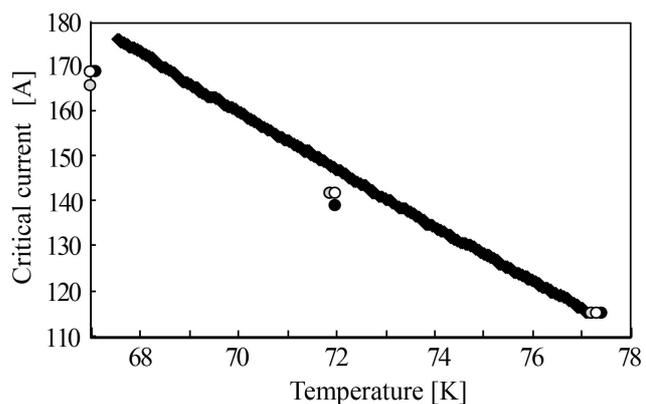


Fig. 3. Temperature dependences of the critical current. A solid line represents measured data on one turn sample. Circles are estimated critical currents from energy flow measurements. Open, gray and solid symbols represent N, M and F, respectively.

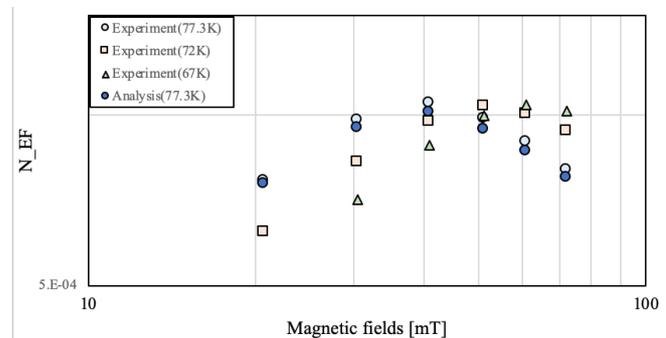


Fig. 4 Comparison between experimental data and calculated data. Blue plots are calculated results by numerical analyses. Other plots are experimental data.

ングベクトルと線材温度の関係~, 低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2016 年度支部研究成果発表会, 2016.

8) Takuma Matsumoto, Keisuke Sakemoto, Akifumi Kawagoe, "Estimation of the Winding temperature of the High Temperature Superconducting Transformer by Pick-up coil pairs," 1st ICMC and CSSJ 50th Anniversary Conference, 2016

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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 : 4 0 3 1 5 3 9 6

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。