

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820106

研究課題名(和文) 実用超伝導電力機器に必須の運転監視と診断に関する基礎研究

研究課題名(英文) Basic Study on Monitoring and Diagnosis During Operation of Actual Superconducting Power Devices

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：40315396

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高温超伝導コイルで生じる局所的な異常を、安全で簡便に測定できる測定法(電磁エネルギーフロー観測法)を応用し、高温超伝導コイルや高温超伝導電力機器の健全性を常時監視できる新モニタリングシステムの開発を行った。その結果、常電導転移が起こる重故障時には、測定信号が低下することを見出した。また、短尺線材の電磁界分布を測定し、得られた磁界分布より臨界電流密度分布の評価が可能であることを示した。さらに、高温超伝導変圧器巻線の局所異常を観測することができることを明らかにするとともに、鉄心あり・複数層巻線においても、常電導転移が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, development of the monitoring system for high temperature superconducting (HTS) coils or HTS power devices have been carried out. In the system, the new method to measure abnormal area in windings in HTS coils is applied. The method can measure safely and easily abnormal area. As results, it was shown that observed signals decreased drastically when normal transitions generated. And it was shown that distributions of critical current densities in the superconducting tapes can be evaluated from profile of magnetic fields around the short straight samples on which electromagnetic fields were measured. In addition, it was shown followings points by experiments on HTS transformers: Local abnormal area in windings of HTS transformer can be observed. Normal transition in windings can be diagnosed even in HTS transformers which have multilayer windings and an iron core.

研究分野：電気電子工学、電力量工学・電力変換・電気機器

キーワード：超伝導電力機器 診断 監視 クエンチ 交流損失 超伝導変圧器

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導機器に限らず、すべての機器にはモニタリングシステムが必要である。特に超伝導機器の場合、常電導転移する可能性があり、その場合のリアクションが大きいので、モニタリングシステムは極めて重要である。しかしながら、NbTi や Nb<sub>3</sub>Sn などの低温超伝導材料を用いた低温超伝導機器と、今後の実用化の期待が高い RE 系や Bi 系の高温超伝導材料を用いた高温超伝導機器では、異常発生時の特徴が大きく異なるため、求められるモニタリングシステムも大きく異なる。

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、電圧端子を直接取り付け付けたバランス電圧法による確実な異常検出と、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。

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、一担常電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、正常な運転が継続されているかどうかを常にモニタリングし、また定期的な診断を行うためには、安全な非接触型であり、監視しようとする超伝導機器の安全性や生産性、メンテナンス性を低下させないことも必要である。このためには、高温超伝導機器製造後に設置でき、必要に応じて容易に取り外せるように、低温容器外周の室温空間に設置できるような汎用性に優れたモニタリング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極めて大きな問題であり、このために、実用段階の高温超伝導機器には、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。

### 2. 研究の目的

本研究は、高温超伝導コイルで生じるような局所的な異常を、安全で簡便に測定できる画期的な新異常測定法を応用し、高温超伝導コイルや高温超伝導電力機器の健全性を常時監視できる新モニタリングシステムの開発を目指した基礎研究である。ここで採用する新異常測定法(電磁エネルギーフロー観測法)は、局所的な電界と磁界を測定する2種類のピックアップコイルを用いる研究代表者らが提案している独自の測定法であり、超伝導コイルに対し非接触で、また保冷容器外側の室温空間からでも異常が測定できるという他に類を見ない優れた測定法である。

本研究の目的は、本異常測定法で観測される信号と実際の巻線状態との関係を実験と理論の両面から明らかにし、本システムの基礎を確立することである。

### 3. 研究の方法

本研究では、臨界温度や臨界電流を超えるような「重故障」状態に陥ったかどうかを判断するための手法と、重故障に至らない程度の温度上昇や臨界電流の低下などの「軽故障」の症状がどの程度かを判断する手法の、2つの手法の確立を目指す。

そのために、1ターンコイルをサンプルとした装置を開発する。サンプルに発生させた異常の程度を様々に変化させ、そのときの巻線の温度、そして電磁エネルギーフローの測定を行う。並行して、小型の高温超伝導変圧器を作製し、その変圧器巻線に局所的な異常を発生させたときの測定も行う。さらに、軽故障時の診断方法の確立のために、得られた電磁界分布から線材の電流分布を評価する手法について、その有効性を検証する。

### 4. 研究成果

1ターンサンプルコイルの異常測定実験装置の作製を完了した。本装置は、外部磁界印加マグネットと1ターンのサンプルコイルから構成され、マグネットの保冷容器外側にピックアップコイル対を設置した構造である。本実験装置を用いて、ツイストなし Bi-2223 多芯テープ線材の局所異常を発生させた時の測定を行った。異常は、試料コイルにガス窒素を噴き付けることによって発生させた。15ターン空芯コイルにおける4~8ターンを模擬した条件の測定より、どのターンを模擬した条件でも、異常発生時のエネルギーフローの変化を観測することができた。

そのときの測定信号は、どのターンで常電導転移が発生しても、測定信号は大幅に小さくなることも確認された。すなわち重故障時に測定信号が低下することが確かめられた。測定結果の一例を図1に示す。またこの結果は、線材に加わる磁界が小さくなくても、垂直磁界成分が大きくなると、常電導転移時の測定信号の低下が大きくなった。

次に、種々のサンプル形状のポインティング

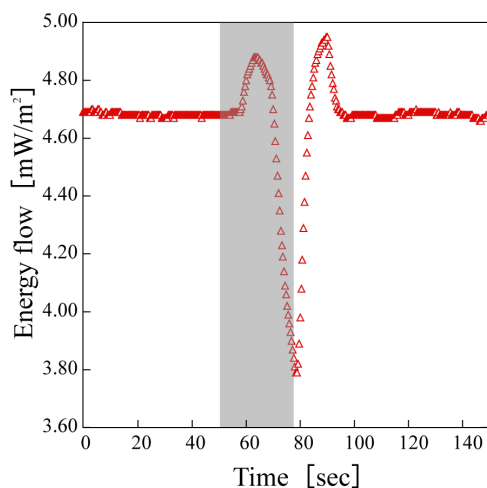


図1 測定結果の一例。常電導転移したと時点から測定信号が低下していることがわかる。グレーの部分温度を上昇させた領域である。

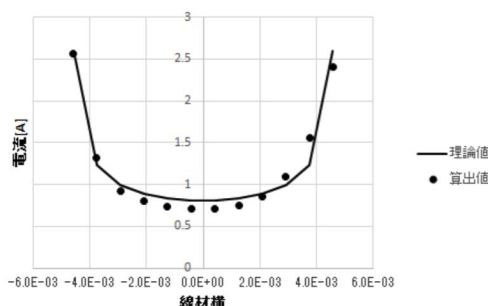


図2 GdBCO線材の電流分布算出結果。右側の電流値が低いことから、右側の臨界電流密度が低いことが推定できる。

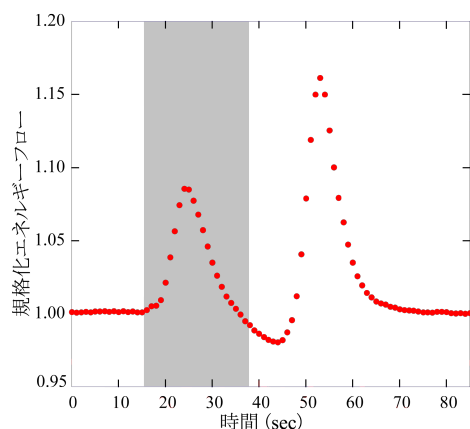


図3 高温超伝導試験変圧器の巻線の異常検出試験結果。

ベクトル分布の測定も行い、データの取得を行った。また、1ターンサンプルコイルの交流損失測定を行うための測定方法を開発した。さらに、測定された電磁界分布から線材内部の状態を推測する手法として、磁界分布から電流分布を求めることによって、臨界電流密度分布が推定できることも明らかにした。図2は、GdBCO線材の磁界分布から算出した電流分布と均一な臨界電流密度を仮定した場合の理論的な電流分布である。実験値から算出した結果では、右側の電流値が小さく、線材幅方向により深く電流が入り込んでいることがわかる。このことから、線材右側の臨界電流密度が低いということが推定できる。このことは、本研究で測定している信号から、線材の臨界電流密度の情報を得ることが可能なことを示している。

続いて、Bi-2223多芯テープ線を用いた高温超伝導変圧器を試作し、その局所異常検出試験を行い、負荷変動時でも異常を測定できることを確かめた。また常伝導転移する「重故障」時に測定信号がほとんど観測されなくなるという現象が、高温超伝導変圧器でも観測されることを示すデータが得られた。図3は、測定結果の一例である。変圧器巻線に局所的に大きな異常を与えた時に観測された結果である。空芯コイルの測定結果と同様に、測定信号は加熱中にも関わらず低下している。さらに、本測定システムの汎用性を向上させることを目的として、測定用ピックアップコイルの形状の改良を行った。異常測定に用いる電界測定ピックアップコイルは、被測定コイルの径方向に引き出された形状である。このため、異常測定装置の設置条件に制約を与える。そこで、磁界測定用ピックアップコイルと同形状のピックアップコイルを使用する方法を考案し、この場合でも異常の測定が可能なことを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

H. Hiwatashi, R. Mizoue, A. Kawagoe, T. Eguchi, Detection of Local Abnormalities in Windings of High-Temperature Superconducting Transformers by Using Pick-Up Coils, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.24, No. 3, Art. Num. 9001104, (2014), 査読有り.  
DOI:10.1109/TASC.2013.2288801

A. Kawagoe, H. Higuchi, N. Matsufuji, A Measurement Method of AC Losses in Superconducting Coils Using Poynting's Vector Method, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.24, No.3, Art. Num. 9000604, (2014), 査読有り.  
DOI: 10.1109/TASC.2013.2288154

〔学会発表〕(計 12 件)

A. Kawagoe, H. Higuchi, T. Shiraki, M. Iwakuma, Measurements of Magnetization

Losses in A Superconducting Coil under Changing External Magnetic Fields Spreading to Radial Direction, 27th International Symposium on Superconductivity, ISS2014, 2014年 11月 27日、タワーホール船堀(東京都・江戸川区).

久保 俊貴、溝上 竜馬、川越 明史、ポインティングベクトル法による超伝導変圧器の運転モニタリングシステムの開発(7)-負荷変動中の局所異常検出-, 2014 年度秋季低温工学・超電導学会、2014年 11月 7日、コラッセ福島(福島県・福島市).

白木 拓弥、樋口 英輝、川越 明史、岩熊 成卓、ポインティングベクトル法を応用した高温超伝導コイルの電磁特性評価、2014 年度秋季低温工学・超電導学会、2014年 11月 7日、コラッセ福島(福島県・福島市).

久保 俊貴、溝上 竜馬、川越 明史、ピックアップコイル対を用いた高温超伝導変圧器巻線の運転監視装置の開発、平成 26 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会、2014年 9月 19日、鹿児島大学(鹿児島県・鹿児島市).

白木 拓弥、川越 明史、樋口 英輝、岩熊 成卓、ポインティングベクトル法を応用した超伝導コイルの電磁特性評価、平成 26 年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会、2014年 9月 19日、鹿児島大学(鹿児島県・鹿児島市).

帯田 啓太、古川 匡玄、川越 明史、ポインティングベクトル法を用いたソレノイドコイル形状 REBCO 長尺線材の交流損失測定、2013 年度秋季低温工学・超電導学会、2013年 12月 6日、ウイंक愛知(愛知県・名古屋市).

帯田 啓太、古川 匡玄、川越 明史、ポインティングベクトル法による高温超伝導線材の交流損失測定-コイル形状長尺線材への適用-、低温工学・超電導学会 九州・西日本支部 2013 年度 若手セミナー・支部研究成果発表会、2013年 9月 6日 九州工業大学戸畑キャンパス(福岡県・北九州市).

A. Kawagoe, H. Higuchi, N. Matsufuji, A Measurement Method of AC Losses in Superconducting Coils Using Poynting's Vector Method, International Conference on Magnet Technology (MT-23), 2013年 7月 16日、ボストン(米国).

H. Hiwatashi, R. Mizoue, A. Kawagoe, T. Eguchi, Detection of Local Abnormalities in Windings of High Temperature Superconducting Transformers by Using Pick-up Coils, International Conference on Magnet Technology

(MT-23), 2013年 7月 15日、ボストン(米国).

古川 匡玄、帯田 啓太、川越 明史、ポインティングベクトル法を用いたソレノイドコイル形状 HTS 線材の交流損失測定 2 - 交流斜め磁界と交流輸送電流の同時掃引時の交流損失特性一、2013 年度春季低温工学・超電導学会、2013年 5月 13日、タワーホール船堀(東京都・江戸川区).

樋口 英輝、松藤 直樹、川越 明史、ポインティングベクトル法を用いた高温超伝導コイルの交流損失測定、2013 年度春季低温工学・超電導学会、2013年 5月 13日、タワーホール船堀(東京都・江戸川区).

樋渡 裕紀、溝上 竜馬、川越 明史、江口 徹、ポインティングベクトル法を応用した超伝導変圧器の運転モニタリングシステムの開発 6 - 常伝導転移の観測 -、2013 年度春季低温工学・超電導学会、2013年 5月 13日、タワーホール船堀(東京都・江戸川区).

〔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：40315396