

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18864

研究課題名（和文）高温超伝導マグネットのキーテクノロジーとなる革新的即時遮断・保護技術の開発

研究課題名（英文）Development of an innovative quick-shutdown and protection method as a key technology for high-temperature superconducting magnets

研究代表者

東川 甲平（Higashikawa, Kohei）

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号：40599651

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：超伝導応用は他の技術では為し得ないほどの高磁界を発生できる電磁石応用がその根幹を支えており、高温超伝導線材の開発進展によって、従来の低温超伝導線材による電磁石応用が一変しようとしている。一方、高温超伝導マグネットは、その保護技術に大きなボトルネックを抱えており、あと少しのところでの応用展開が行き詰っている。そこで本研究では、これまでのコンセプトにとらわれない革新的な手法により、この問題を解決する高温超伝導コイルの保護動作を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究による成果は、高温超伝導マグネット応用においてボトルネックとなっていた過電流による巻線の焼損と過電圧による巻線の焼損の双方を回避するものであり、同応用における従来の設計制約を取り払い、同応用の拡大・展開に大きく資するものである。具体的には、高温超伝導線材において焼損を防ぐために付加されている銅などの厚い安定化層が不要になり、実効的な電流密度の大幅な向上による応用機器の小型化や線材使用量の低減が期待される。

研究成果の概要（英文）：Superconducting technology have been realizing high-field electro-magnet applications which cannot be realized by other technologies. Recent progress in developing high-temperature superconducting (HTS) wires is now expected to enhance their performance dramatically compared with the case by conventional low-temperature superconducting (LTS) wires. On the other hand, protection for HTS magnet coils has been recognized as a significant issue to be established for practical use. In this project, protection operation of a HTS coil was successfully demonstrated based on an innovative method.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導コイル 保護

## 1. 研究開始当初の背景

高温超伝導線材は、従来の超伝導電磁石応用を支えてきた金属系低温超伝導線材に比較して、磁界中で流せる電流密度が大幅に高く、その磁界領域の限界も飛躍的に高い。その中でも、希土類系高温超伝導線材は第二世代高温超伝導線材とよばれ、すでに数百メートル以上の線材が市販されており、電磁石の試作の報告が盛んになっている。一方、金属系低温超伝導線材では、何らかの理由によって局所的な発熱が発生した場合、極めて速い常伝導伝搬速度によって電磁石全体が抵抗状態となり、電磁石に蓄積されていたエネルギーを電磁石全体で消費できることで局所焼損が起こらないような保護が可能となっているが、高温超伝導線材では、常伝導伝搬速度が何桁も小さく、エネルギーの消費が局所的に集中し、早期に電流を遮断しなければ焼損に至ってしまう。従って、いかに素早く電流を遮断できるかが鍵となるが、電磁石は大きなインダクタンスを有しているために、急激な電流の遮断を行うと高電界が発生し、放電によって電磁石が損傷してしまうばかりか、電源設備にも影響を及ぼす。このような背景によって、高温超伝導マグネットは、その保護技術に大きなボトルネックを抱えており、あと少しのところまで応用展開が行き詰っている。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、高温超伝導巻線の磁気エネルギーを瞬時に補助巻線に負担させる画期的な手法により、高温超伝導巻線中の電流を瞬時に遮断できる革新的な保護技術を提案する。従来技術では上記の電圧の制約から電流の遮断に時間を要し、焼損を防ぐために巻線には銅などの安定化材を十分に適用した高温超伝導線材が使用される。一方、本研究では、磁氣的に結合した補助巻線を導入することで、高温超伝導線材の電流を即時に遮断してもその磁束の変化を抑制する電流が補助巻線に流れ、電圧を発生させずに高温超伝導線材に流れる電流を即時に遮断することが可能となる。さらに注目すべきは、この機能により高温超伝導線材に用いる安定化材を削減することができれば、巻線の実効的な電流密度が大幅に上がり、同じ磁界を発生させるために必要な線材の量と巻線の体積を飛躍的に低減できることである。例えば、電流密度が2倍になった場合、線材の量と巻線の体積は1/6程度（相似形であれば1/8であるがボア径を固定しているため）になると試算しており、電磁力の制約はほぼ変わらずに、蓄積エネルギーが1/5程度（上記と同様の理由）となるメリットも生まれる。すなわち本研究は、高温超伝導マグネットの応用展開のボトルネックを解決するばかりか、同マグネットの飛躍的な小型化とコスト低減にまで貢献するものである。

## 3. 研究の方法

コイルの作製にはGdBCO高温超伝導線材を用いた。具体的には、内径100mmのボアに同線材を410ターン巻き付けたものをメインコイルとした。コイルの長さは900mmであり、この時の自己インダクタンスは0.5mHとなった。また、コイル保護のための補助巻線として、メインコイルの外側に同線材を同じく410ターン巻き付けた。メインコイルと補助巻線ともに、液体窒素浸漬冷却下の四端子法測定から、少なくとも100Aまでは電圧が発生しない超伝導状態となることを確認した。また、メインコイルと補助巻線を直列に接続し、この際に評価された合成インダクタンスと上記のコイル個別のインダクタンスとの関係から、結合係数は0.99以上であることを確認した。保護動作の評価には、任意の回路要素をハードウェアに置き換えることが可能であるリアルタイムデジタルシミュレータ（RTDS）を用いた。まず、補助巻線を用いない場合を想

定して、補助巻線の両端を解放したままメインコイルに 100 A を通電し、その通電電流を遮断した際の誘導電圧が 0.1 V を超えないように、保護抵抗として 1 m $\Omega$  を選定した。一方、補助巻線を適用する場合として、補助巻線を解放したままメインコイルに 100 A を通電し、補助巻線を短絡させた上で通電電流を遮断した。なお、補助巻線の短絡抵抗も 1 m $\Omega$  とし、上記の誘導電圧と同等の条件下でメインコイルの通電電流を即時に遮断できるかを評価した。

#### 4. 研究成果

その結果を図 1 に示す。まず、補助巻線を用いない場合、時間  $t = 0.0$  s で電源からの電流を遮断すると、コイルの通電電流は、保護抵抗により減衰する。なお、この際の時定数は、コイルのインダクタンスと保護抵抗の抵抗値によって決まり、抵抗値が大きいほど電流の遮断は早くなるが、電流の変化が大きくなるために誘導電圧が大きくなるという点が問題である。この誘導電圧を 0.1 V に抑えるという本条件下では、使用できた保護抵抗は 1 m $\Omega$  までであり、コイルの自己インダクタンスである 0.5 mH との比から、その時定数が 0.5 秒となっていることがわかる。これが電流の遮断速度を決める因子となっている。一方、補助巻線を用いた場合には、ほぼ同じ誘導電圧発生条件下において、即座に電流を遮断できている様子がわかる。これは、メインコイルに磁氣的に結合した補助巻線に電流が即時に移ることで、磁束の変化が相殺されて誘導電圧を抑えていることによるものである。すなわち、本研究による成果は、過電流による巻線の焼損と過電圧による巻線の焼損の双方を回避するものであり、高温超伝導マグネット応用における従来の設計制約を取り払い、同応用の拡大・展開に大きく資するものである。具体的には、高温超伝導線材において焼損を防ぐために付加されている銅などの厚い安定化層が不要になり、実効的な電流密度の大幅な向上による応用機器の小型化や線材使用量の低減が見込まれる。

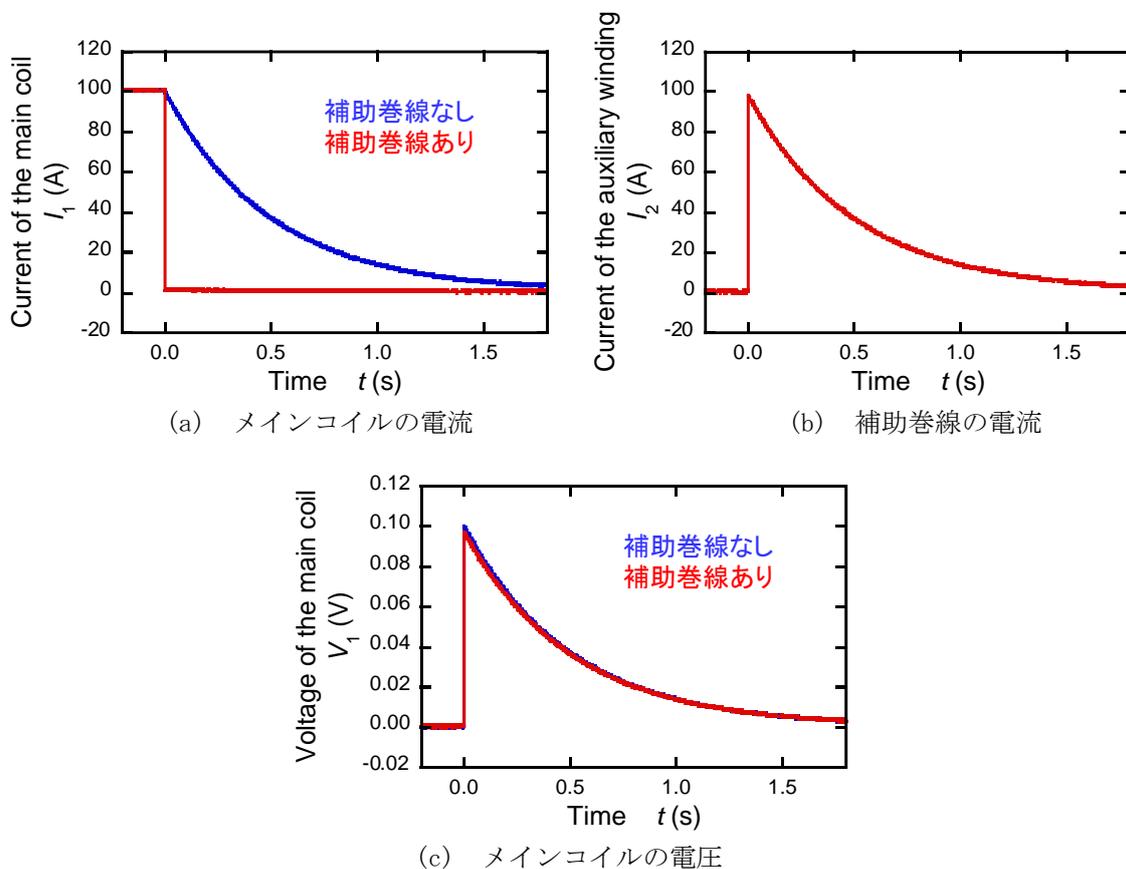


図 1 メインコイル電流の即時遮断試験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kohei Higashikawa, Takanobu Kiss	4. 巻 29
2. 論文標題 Novel Power System with Superconducting Cable with Energy Storage Function for Large-scale Introduction of Renewable Energies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 5402204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2903393	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Higashikawa, Junichi Arai, Katsuhiko Harada, Tadashi Koshizuka, Jun Matsushima, Hisatoshi Ikeda, Nouredine Harid, Ahmed Al-Durra	4. 巻 29
2. 論文標題 Dynamic Performance Analysis of Long-distance Power Transmission System with DC Superconducting Cable from Large Photovoltaic Generation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 5402105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2903390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kohei Higashikawa, Naohiro Numata, Kohei Hisajima, Takumi Suzuki, Takanobu Kiss	4. 巻 30
2. 論文標題 Measurement and Analysis on Local Magnetization Properties of RE-123 Coated Conductor With DC Transport Current and External Magnetic Field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 4701605
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2020.2974859	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kohei Higashikawa, Masayoshi Inoue, Shujun Ye, Akiyoshi Matsumoto, Hiroaki Kumakura, Ryuji Yoshida, Takeharu Kato, Takato Machi, Akira Ibi, Teruo Izumi, Takanobu Kiss	4. 巻 33
2. 論文標題 Scanning Hall-probe microscopy for site-specific observation of microstructure in superconducting wires and tapes for the clarification of their performance bottlenecks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 64005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6668/ab89ef	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 東川 甲平
2. 発表標題 高度評価技術から展開する次世代超伝導電力応用に関する研究
3. 学会等名 低温工学・超電導学会 東北・北海道支部研究会 / 第3回材料研究会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Higashikawa, Takanobu Kiss
2. 発表標題 Novel Power System with Superconducting Cable with Energy Storage Function for Large-scale Introduction of Renewable Energies
3. 学会等名 2018 Applied Superconductivity Conference（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kohei Higashikawa, Junichi Arai, Katsuhiko Harada, Tadashi Koshizuka, Jun Matsushima, Hisatoshi Ikeda, Nouredine Harid, Ahmed Al-Durra
2. 発表標題 Dynamic Performance Analysis of Long-distance Power Transmission System with DC Superconducting Cable from Large Photovoltaic Generation
3. 学会等名 2018 Applied Superconductivity Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東川 甲平, 木須 隆暢
2. 発表標題 再生可能エネルギーの大量利用の鍵となるエネルギー貯蔵機能を有する 超伝導ケーブルの可能性（2）
3. 学会等名 2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東川 甲平, 荒井 純一, 原田 克彦, 腰塚 正, 松島 潤, 池田 久利, Nouredine Harid, Ahmed Al-Durra
2. 発表標題 太陽光発電からの長距離電力輸送に向けた直流超電導システムの提案と動的特性解析
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Higashikawa, Takanobu Kiss
2. 発表標題 Potential of Long Solenoid Coil as Superconducting Cable with Energy Storage Function
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology (MT26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Higashikawa, Naohiro Numata, Kohei Hisajima, Takumi Suzuki, Takanobu Kiss
2. 発表標題 Measurement and Analysis on Local Magnetization Properties of RE-123 Coated Conductor with DC Transport Current and External Magnetic Field
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology (MT26) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohei Higashikawa, Takafumi Kanno, Shuya Nogata, Takanobu Kiss
2. 発表標題 Novel Power System with Superconducting Cable with Energy Storage Function for Large-scale Utilization of Renewable Energies
3. 学会等名 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC / CSSJ Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----