

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360110

研究課題名(和文) 異常横磁界効果を利用した高温超伝導テープ線の遮蔽電流磁化の消去法の検討

研究課題名(英文) Investigation of Elimination Techniques for Screening-Current-Induced Magnetization in High Temperature Superconducting Tapes Utilizing Abnormal Transverse-Field Effect

研究代表者

柁川 一弘 (Kajikawa, Kazuhiro)

九州大学・超伝導システム科学研究センター・准教授

研究者番号：10294894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：高温超伝導テープ線材を用いたレイヤー巻きコイルおよびパンケーキコイルにおいて、付与した消磁コイルにより微小な交流磁界を印加することにより、異常横磁界効果に基づいてテープ幅広面に誘起された遮蔽電流を除去可能なことを実証した。また、実規模サイズの核磁気共鳴用高温超伝導インサートコイルにおいても、高温超伝導テープ巻線に誘起された遮蔽電流が、微小な外部交流磁界の印加により低減可能なことを確認した。

研究成果の概要(英文)：It was experimentally verified that the in-plane screening currents induced in the tapes constituting layer-wound and pancake coils with high temperature superconducting (HTS) tapes can be removed by applying small AC magnetic fields using additional degaussing coils on the basis of the abnormal transverse-field effect. It was also confirmed that the screening currents induced in the HTS tape windings for full-scale NMR insert coils can be reduced for the application of small external AC fields.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導体 テープ線材 遮蔽電流 磁化 異常横磁界効果

1. 研究開始当初の背景

(1) 実用超伝導材料である第2種超伝導体に外部磁界を印加すると、磁束ピンニング機構に基づく巨視的な遮蔽電流が流れて不可逆に磁化する。そこで、従来の低温超伝導線として、磁気的不安定性の原因となるフラックスジャンプを抑制し、かつ磁化を低減するために複合多芯構造が開発され、数 μm ~数十 μm 程度の直径をもつ多数の細い超伝導フィラメントが常伝導母材(銅等)中に埋め込まれている。このような低温超伝導線を巻いたコイルを用いて、液体ヘリウムで浸漬冷却することにより、数Tから数十Tの磁界環境を利用する超伝導システム(病院のMRI装置や分析用のNMR装置、素粒子研究用の粒子加速器等)が実用化されている。

(2) 一方、高温超伝導線の研究開発も国内外で活発に行われており、現在ではBi-2223銀シース線材やY系薄膜線材を購入して利用できる状況にある。しかし、これらの高温超伝導線はテープ形状をしており、そのままコイルに巻線して励磁すると、テープ幅広面に垂直な磁界成分により幅広面内に巨視的な遮蔽電流が誘起されて垂直方向に磁化し、この巻線の磁化が磁界環境の質を著しく損なうことが実用化に向けた課題となっている。そこで、高温超伝導線の磁化を低減する必要があるが、Bi-2223線材では多芯化により超伝導フィラメント間の電磁氣的結合を切ることが難しく、またY系線材では機械加工やレーザー加工による細線化が更なるコスト増に至っている。しかし、高温超伝導線は低温超伝導線に比べて、大きな比熱により熱的安定性が大幅に向上し、また液体窒素温度まで動作温度を高くして冷却コストを少なくできる魅力があり、高温超伝導線の簡便な遮蔽電流磁化の低減法の開発が望まれている。

(3) 超伝導線の磁化を除去可能な方法の1つとして、「異常横磁界効果」が約30年前に九州大学で発見され、一連の研究が実施された。異常横磁界効果は、外部から印加された直流磁界による磁化に対して、垂直方向に微小な交流磁界を印加することで磁化が緩和する現象である。当時は、高温超伝導体が発見される前であり、かつ多芯線の開発も達成されていたことから、異常横磁界効果への興味は物理現象の解明に留まっていた。

2. 研究の目的

(1) 近年、高温超伝導線が市販化されて幅広く利用できる環境が整ってきており、高温超伝導線を用いた巻線を実現する要素技術の確立が望まれている。しかし、高温超伝導線はテープ形状をしており、そのままコイルに巻線して励磁すると、テープ幅広面に垂直な磁界成分により幅広面内に巨視的な遮蔽電流が誘起されて垂直方向に磁化し、この巻線の磁化が磁界環境の質を著しく損なうこと

が実用化に向けた課題となっている。

(2) 本研究では、異常横磁界効果に基づいた高温超伝導線における遮蔽電流磁化の低減について、市販の高温超伝導線を用いて製作したレイヤー巻きコイルもしくはパンケーキ巻きコイルの周囲に、微小な交流磁界を印加するための銅コイルを付与し、異常横磁界効果による高温超伝導コイル巻線の遮蔽電流の低減効果を実証する。

3. 研究の方法

(1) 高温超伝導テープ線材を用いたレイヤー巻きコイルおよびパンケーキ巻きコイルにおける遮蔽電流磁化の消去法について検討する。市販の高温超伝導テープ線材を用いて多層レイヤー巻きコイルおよび積層型パンケーキコイルを設計・製作する。次に、製作した高温超伝導テープ巻線に微小交流磁界を印加するために、同軸型およびトロイド型の消磁コイルを銅線により巻線する。これら試料コイル全体を液体窒素中に浸漬し、高温超伝導コイルが作る中心磁界の時間変化を極低温用ホール素子により計測する。

(2) 実規模サイズのNMRマグネット用の高温超伝導巻線を対象に、誘起された遮蔽電流の除去が可能かどうかを確認するために、高温超伝導インサートと銅消磁コイルを設計・評価する。

(3) 銅消磁コイルを用いた場合の不要な熱損失を取り除き、かつNMRシステム用に内部空間をできるだけ広く確保するために、新型の消磁コイルについて議論する。つまり、別の高温超伝導テープ線を用いて消磁コイルを巻線し、遮蔽電流を低減する高温超伝導インサートの外側のみに配置する。この高温超伝導消磁コイル自身に起因する交流動作後の遮蔽電流磁界を可能な限り小さく抑制するために、幅の狭い高温超伝導テープ線を使用する。なお、高温超伝導消磁コイルとして数層だけ巻けば、中心到達磁界以上の交流磁界を発生するのに十分なので、遮蔽電流磁界への寄与はわずかなことが期待される。

4. 研究成果

(1) 高温超伝導テープ線材を用いたレイヤー巻きコイルにおける遮蔽電流磁化の消去法について検討した。まず、市販の高温超伝導テープ線材を用いて多層レイヤー巻きコイルを設計・製作した。その後、テープ線材の幅広面に対して平行方向に微小交流磁界を印加するために、製作した高温超伝導コイルの内外に同軸型消磁コイルを銅線により巻線した。これら試料コイル全体を液体窒素中に浸漬し、高温超伝導コイルが作る中心磁界の時間変化を極低温用ホール素子により計測した。まず、高温超伝導コイルをある一定の通電電流まで励磁して保持した後、振幅

の異なる一定の交流電流を同軸型消磁コイルに通電した。その結果、中心磁界は時間とともにわずかに増加した後にほぼ一定となった。また、電流振幅が比較的大きい場合、交流磁界印加後の中心磁界はほぼ一定値に飽和した。この最大飽和値との差分を遮蔽電流磁界として片対数プロットすると、電流振幅が比較的大きい場合は、時間に関してほぼ直線的に減少し、やがてゼロに漸近した(図1参照)。一方、電流振幅が比較的小さい場合は下に凸となり、最終的に有限な値に漸近した。次に、高温超伝導コイルの通電電流を繰り返し励減磁する一連の過程における中心磁界を計測した。その結果、交流磁界を印加しない場合はヒステリシスな曲線となり、遮蔽電流の影響を無視できないことがわかった。一方、高温超伝導コイルの通電電流を保持した後、振幅および周波数が一定の交流磁界を短時間だけ印加すると、ヒステリシスが消滅した。以上のことから、高温超伝導コイルの軸方向に微小交流磁界を印加して遮蔽電流を低減する方法の妥当性が検証できた。

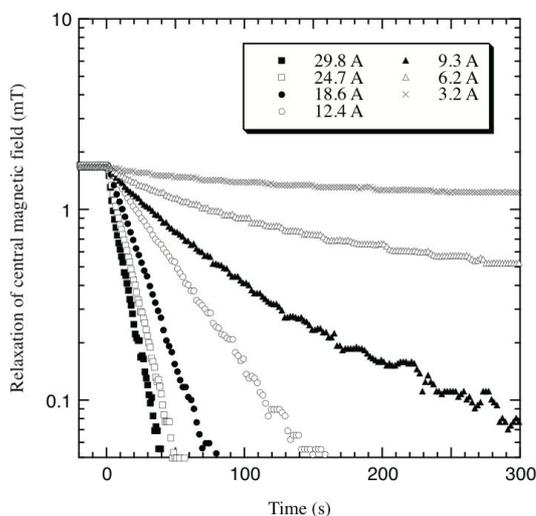


図1 同軸型銅消磁コイルを用いた高温超伝導レイヤー巻きコイルにおける遮蔽電流磁界の減衰特性

(2) 高温超伝導テープ線材を用いたパンケーキ巻きコイルにおける遮蔽電流磁化の消去法について検討した。まず、市販の高温超伝導テープ線材を用いて積層型パンケーキコイルを設計・製作した。その巻線方法として、ジョイントレスダブルパンケーキコイル巻きを採用した。その後、テープ線材の長手方向に微小交流磁界を印加するために、製作した高温超伝導コイルの周囲にトロイド型消磁コイルを銅線により巻線した。これら試料コイル全体を液体窒素中に浸漬し、高温超伝導コイルが作る中心磁界の時間変化を極低温用ホール素子により計測した。まず、高温超伝導コイルをある一定の通電電流まで励磁して保持した後、振幅の異なる一定の交流電流をトロイド型消磁コイルに通電した。その結果、中心磁界は時間とともにわずかに

増加した後にほぼ一定となった。また、電流振幅が比較的大きい場合、交流磁界印加後の中心磁界はほぼ一定値に飽和した。この最大飽和値との差分を遮蔽電流磁界として片対数プロットすると、電流振幅が比較的大きい場合は、時間に関してほぼ直線的に減少し、やがてゼロに漸近した。一方、電流振幅が比較的小さい場合は下に凸となり、最終的に有限な値に漸近した。次に、高温超伝導コイルの通電電流を繰り返し励減磁する一連の過程における中心磁界を計測した(図2参照)。その結果、交流磁界を印加しない場合はヒステリシスな曲線となり、遮蔽電流の影響を無視できないことがわかった。一方、高温超伝導コイルの通電電流を保持した後、振幅および周波数が一定の交流磁界を短時間だけ印加すると、ヒステリシスが消滅した。以上のことから、高温超伝導コイルの周方向に微小交流磁界を印加して遮蔽電流を低減する方法の妥当性が検証できた。

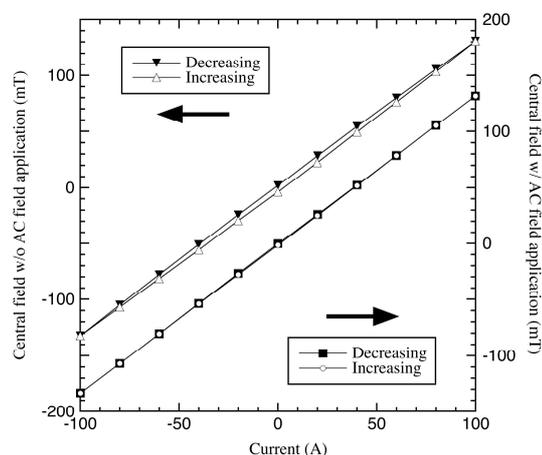


図2 トロイド型銅消磁コイルを用いた高温超伝導パンケーキ巻きコイルにおける微小交流磁界の印加を伴った繰り返し励減磁に対する中心磁界の変化

(3) 既存のNMRマグネット用の低温超伝導インサートを、Y系薄膜線を巻いた高温超伝導インサートで置き換えることを想定した。高温超伝導インサートは1対の銅消磁コイルで挟み込まれる必要があるため、両者を合わせた大きさを元の低温超伝導インサートとほぼ同一とした。想定したY系薄膜線における臨界電流密度の局所磁界の大きさと印加角度に対する依存性を実験結果に基づいて定式化し、高温超伝導インサートと低温超伝導マグネットを同時に励磁した際の、高温超伝導インサート内の臨界電流分布を評価した。1対の銅消磁コイルにより発生する交流磁界振幅として、最大の中心到達磁界よりも約1.4倍大きい値に設定すると、内外の銅消磁コイルの発熱はそれぞれ40W、60Wと見積られた。次に、Y系薄膜線の両面に配置する銅安定化層の厚さを見積り、熱暴走時の最終到達温度を3秒間で250K以下に抑えること

ができた。また、発生する超伝導層の履歴損失と銅安定化層の渦電流損失を見積ると、それぞれ 0.34 W, 3.47 W となった。異常横磁界効果を利用すると、外部直流磁界の印加により誘起された遮蔽電流による磁化は、直流磁界に垂直な中心到達磁界以上の振幅をもつ外部交流磁界を印加し続けることにより指数関数的に減衰していくが、減衰した磁化の値が初期磁化の $1/e$ に減少するのに要する交流サイクル数を、特性サイクル数として新たに定義した。次に、径方向磁気モーメントループが原点に作る軸方向磁界の理論表式を新たに導出し、シングルパンケーキ全体を無限平板で近似した際の遮蔽電流磁界を見積ると、励磁直後の 200 ppm から、銅消磁コイルを用いた 180 秒間の交流磁界印加により 0.33 ppm まで低減できることがわかった(図 3 参照)。以上のことから、Y 系薄膜線を巻いた高温超伝導インサートおよび 1 対の銅消磁コイルを設計することにより、交流動作時の全消費電力は 104 W と評価され、数分間に数リットルの液体ヘリウムが蒸発するレベルに留まり、充分実現可能な見通しが得られた。

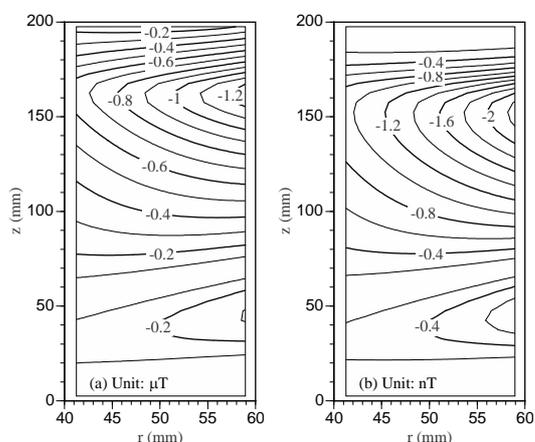


図 3 設計した高温超伝導インサートを構成する各ターンからの遮蔽電流磁界への寄与 (a) 励磁直後 (b) 微小交流磁界印加後

(4) 高温超伝導消磁コイルを設計・製作した。既存の高温超伝導インサートは Bi-2223 銀シーステープ線を巻いたものであり、複数枚のダブルパンケーキコイルを積層している。一方、今回製作した高温超伝導消磁コイルは、幅の狭い Y 系薄膜線を巻いたものである。その層数は 2 であり、2 層目の中央部にノッチを施した。このようなノッチ付ソレノイドコイルを用いた場合、内側にある高温超伝導インサートの巻線に印加される局所磁界の径方向成分を最小限に抑えることが期待される。既存の高温超伝導インサートと製作した高温超伝導消磁コイルを同軸に配置し、液体窒素中に浸漬冷却した。まず、高温超伝導インサートに遮蔽電流を誘起するために、大口径の低温超伝導マグネットを使用し、励減磁した。次に、磁束クリープに起因する遮蔽電流の減衰が無視できるようになるまで待機した。その後、高温超伝導インサートの中心

部に配置した極低温用ホール素子を用いて、軸方向の遮蔽電流磁界を計測した(図 4 参照)。その結果、遮蔽電流磁界は交流サイクルの増加とともに減衰した。また、掃引速度の変化は遮蔽電流磁界の減衰特性にほとんど影響を与えず、ほぼ交流サイクル数で決まることもわかった。一方、電流振幅を減少すると、遮蔽電流磁界の減衰は緩やかとなった。高温超伝導インサートに用いた Bi-2223 テープ線の臨界電流値と製作した高温超伝導消磁コイルが作る磁界を理論的に比較することにより、発生磁界が Bi-2223 テープ線の中心到達磁界よりも大きくなると、遮蔽電流磁界の減衰が顕著となることがわかった。以上のことから、幅の狭い Y 系薄膜線を巻いた高温超伝導消磁コイルを用いて微小交流磁界を印加することにより、Bi-2223 テープ線を巻いた実規模サイズの高温超伝導インサートにおける遮蔽電流磁界を低減することに成功した。

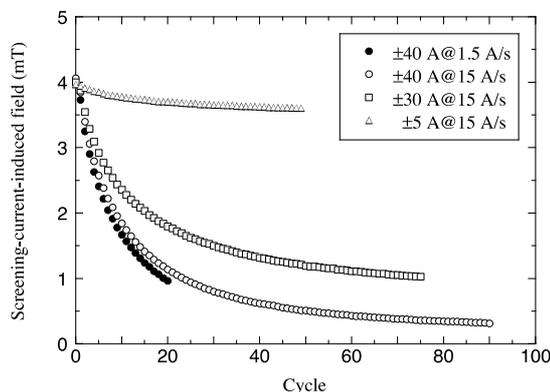


図 4 外側配置高温超伝導消磁コイルを用いた既存の実規模サイズをもつ高温超伝導インサートにおける遮蔽電流磁界の減衰特性

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 5 件)

- K. Kajikawa, G.V. Gettliffe, Y. Chu, D. Miyagi, T.P. Lecrevisse, S. Hahn, J. Bascunan and Y. Iwasa: "Designs and Tests of Shaking Coils to Reduce Screening Currents Induced in HTS Insert Coils for NMR Magnet," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3 (2015) 4300305, 査読有
DOI: 10.1109/TASC.2014.2363495
- Y. Iwasa, J. Bascunan, S. Hahn, J. Voccio, Y. Kim, T. Lecrevisse, J. Song and K. Kajikawa: "A High-Resolution 1.3-GHz/54-mm LTS/HTS NMR Magnet," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3 (2015) 4301205, 査読有

DOI: 10.1109/TASC.2014.2363496

柁川一弘, G. Gettliffe, Y. Chu, 宮城大輔, T. Lecrevisse, S. Hahn, J. Bascunan, 岩佐幸和: 「NMR マグネット用 HTS インサートコイルに誘起された遮蔽電流を低減する Shaking コイルの設計・試験」, 超伝導システム科学研究センター報告, 第 12 巻 (2015) pp. 11-24, 査読無

K.L. Kim, S. Hahn, Y.H. Choi, Y.G. Kim, D.H. Kang, K. Kajikawa and H.G. Lee: "Feasibility Study for Elimination of the Screening Current-Induced Fields in HTS Coil," Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, Vol. 28, No. 1 (2015.1) pp. 83-88, 査読有

DOI: 10.1007/s10948-014-2790-y

K. Kajikawa and K. Funaki: "Reduction of Magnetization in Windings Composed of HTS Tapes," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3 (2012.6) 4400404, 査読有

DOI: 10.1109/TASC.2011.2181138

〔学会発表〕(計 5 件)

柁川一弘, G. Gettliffe, Y. Chu, 宮城大輔, T. Lecrevisse, S. Hahn, J. Bascunan, 岩佐幸和: 「NMR 用 HTS コイルに誘起された遮蔽電流を抑制する HTS 補償コイルの製作・試験」, 第 90 回 2014 年度秋季低温工学・超電導学会 (2014.11.6) コラッセふくしま (福島市)

K. Kajikawa, G.V. Gettliffe, Y. Chu, D. Miyagi, T.P. Lecrevisse, S. Hahn, J. Bascunan and Y. Iwasa: "Designs and Tests of Compensation Coils to Reduce Screening Currents Induced in HTS Insert Coils for NMR Magnet," 2014 Applied Superconductivity Conference (2014.8.12) Charlotte, North Carolina (USA)

K. Kim, S. Hahn, K. Kajikawa, D.G. Yang and H. Lee: "Experimental Study on the Elimination of Screening Current Induced Fields in No-Insulation HTS Coils," 2014 Applied Superconductivity Conference (2014.8.12) Charlotte, North Carolina (USA)

Y. Iwasa, J. Bascunan, S. Hahn, J. Voccio, Y. Kim, T. Lecrevisse, J. Song and K. Kajikawa: "A High-Resolution 1.3 GHz LTS/HTS NMR Magnet," 2014 Applied Superconductivity Conference (2014.8.14) Charlotte, North Carolina (USA)

柁川一弘, S. Hahn, 岩佐幸和: 「NMR 用 HTS インサートにおける遮蔽電流を抑制する補償コイルの設計」, 第 89 回 2014 年度春季低温工学・超電導学会 (2014.5.26) タワーホール船堀 (東京都

江戸川区)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 1 件)

名称: 超伝導磁石及び核磁気共鳴装置

発明者: 柁川一弘, 船木和夫

権利者: 国立大学法人九州大学

種類: 特許

番号: 国際出願 PCT/JP2012/062777

出願年月日: 2012.5.18

国内外の別: 国外

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sc.kyushu-u.ac.jp/~kajikawa/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柁川 一弘 (KAJIKAWA, Kazuhiro)

九州大学・超伝導システム科学研究センター・准教授

研究者番号: 10294894

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし