

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 3月31日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360117

研究課題名（和文） 低CO₂対応電力用酸化超伝導コイル設計のための基礎研究研究課題名（英文） Basic Study on Design of Oxide-Superconducting Coils for Electric Power Application in Low-CO₂ Near Future

研究代表者

船木 和夫 (FUNAKI KAZUO)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号：60091352

研究成果の概要（和文）：

高効率冷凍機冷却が可能な低損失超伝導コイルの新しい設計手法を確立するために、まず、現在最も長尺化が進んでいるビスマス系(Bi-2223)酸化超伝導多芯テープ線の交流損失を低減させる線材構成法を新しく提案し、実験的に可能であることを示した。次に、低損失なテープ線材によるパンケーキコイルの交流電損失をそのコイルの磁界分布と巻線の交流損失特性を利用して幅広い温度領域において定量的に評価できることを示し、低損失なコイル設計の指針を与えた。さらに、超伝導線の交流損失の原因となる磁化のヒステリシスを極限的に減少させる手法により、超伝導コイル内の磁界分布の均一度を向上させる設計法を提案し実証した。

研究成果の概要（英文）：

In order to establish new design methods of low-AC-loss superconducting coils cooled by cryocooler with high efficiency, we proposed a new low-AC-loss structure for Bi-system (Bi-2223) oxide-superconducting multifilamentary taped wires on the first stage, which are promising practical wires developed. We showed a new design method of transport AC losses generated in superconducting coils with magnetic field distribution and local AC loss properties of superconducting windings on the second stage. We also proposed advanced structures for superconducting coils with highly uniform distribution of magnetic field by means of reducing magnetic hysteresis remarkably in taped windings.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2012年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

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：電気有効利用、電気エネルギー工学、電気機器、高温超伝導、伝導冷却、コイル設計、低損失化

1. 研究開始当初の背景

酸化超伝導線材の中で大電流容量化、長尺化の点で線材化技術が最も先行しているBi系テープ線材について、その無損失な特徴

を活かす直流仕様の電力機器（直流電力ケーブル、モータ用直流コイル、磁気浮上列車用直流コイル）への適用を目指した応用研究は始められていた。一方で、交流仕様（交流電

流、交流磁界が印加される環境対応)の酸化
物超伝導コイルへの適用については、その通
電時の交流損失を定量的に議論する学術的
基盤が整っておらず、機器設計において損失
特性を定量化する手法が確立していなかつ
た。線材の低損失化と損失特性の定量的評価
法を提案することは、機器の小型化や高効率
化の観点から、酸化物超伝導線材の幅広い
応用を支援する上で重要な課題のひとつに
なっていた。

2. 研究の目的

高効率冷凍機冷却が可能な低損失環境調
和型超伝導コイルの新しい設計手法を確立
するために、低損失線材の構成法や超伝導コ
イルの通電損失の定量的評価法を開発する。
高価で煩雑な冷却設備を要する液体ヘリウ
ム冷却方式から脱却するために、伝導冷却を
前提とした低 CO₂ 対応の超伝導コイルの多
様なニーズを創出する基盤になる。これによ
り、エネルギー貯蔵装置等の電力機器やモタ
等等の運輸・輸送設備に適用できる、低コス
ト・メンテナンスフリー・「親環境志向」の
超伝導コイル実現を支援する。対象の超伝導
線を、主に、臨界温度は 110K で km 級の長
尺化が実現している酸化物 Bi 系テープ線材
とする。

3. 研究の方法

(1) Bi-2223 多芯テープ線の低損失化

超伝導コイルの交流電流通電時の交流損
失(交流通電損失)の低減を図るために、超
伝導巻線の素線レベルでの低損失化を目指
して、中央部に絶縁層をもつ Bi-2223 銀シ
ース多芯テープ線の設計を行い、線材メーカ
との共同研究により試作した。コイル中での
超伝導テープ線の交流通電損失は、外部垂直
磁界(テープ面に垂直な磁界)での交流損失(垂
直磁界損失)が主要な成分になるので、試作
線の垂直磁界損失を液体窒素中で鞍型ピッ
クアップコイル法により測定し、中央部に絶
縁層の損失低減効果を検証した。また、得
られた損失低減効果を線材構造の設計時に
用いた損失解析モデルと比較検討した。

(2) Bi-2223 パンケーキコイルの交流通電損 失の定量化

Bi-2223 銀シース多芯テープ線によるパ
ンケーキ型の超伝導コイルに対して、巻線に
使用した線材の交流損失特性とコイル巻線部
の磁界分布を考慮した数値解析によってコ
イルの交流通電損失を推定する方法を提案
し、その定量性を検討した。まず、実際のコ
イルの交流通電損失を測定した。次に、コ
イル巻線部を要素分割した解析モデルを
作成しコイル巻線部にかかる局所的な磁界
について、垂直磁界と平行磁界の各成分に
分けて要素ごとに求めた。一方で、垂直磁界と平行

磁界に対する巻線線材の短尺試料の交流損
失(垂直磁界損失、平行磁界損失)特性をそ
れぞれ測定した。得られた損失特性の簡単
な近似式を用いて印加磁界の方向と振幅を
考慮した局所的な交流損失を計算し、この局
所的な損失をコイル全体で積算することによ
りコイルの交流通電損失を評価した。最後
に、その結果と測定したコイルの交流通電
損失を比較検討して、提案した方法の妥当
性を議論した。

(3) 酸化物超伝導テープ線に誘起された遮 蔽電流の低減

酸化物超伝導線材は、酸化物超伝導体自
身の結晶が積層構造を有しており、かつそ
の線材化に際して長手方向の高い通電性能
を確保するために、必然的にテープ形状とな
っている。このような超伝導テープ線をコ
イル状に巻線して、高い均一度をもつ高品
質な磁界環境を利用可能にするためには、
コイルの励磁に伴ってテープ線の幅広面に
誘起される遮蔽電流を極力小さくしなければ
ならないが、そのような技術はこれまでに
確立していない。そこで、異常横磁界効果
に基づいた超伝導テープ線の遮蔽電流の低
減方法を新規に提案する。また、超伝導テ
ープ線を巻いたソレノイドコイルが作る中
心磁界を実験的に評価し、提案手法の妥当
性を検証する。

4. 研究成果

(1) Bi-2223 多芯テープ線の低損失化

比較対象の AC74-A と中央部に絶縁層をも
つ XM453A について、60mm 長の短尺テ
ープ線を絶縁膜を挟んで 6 枚積層して測定
試料とした。周波数は 0.1~60Hz の範囲、
磁界振幅は 0.25T までの領域で損失測定
を行った。図 1 に、磁界振幅 0.2T にお
ける AC74-A と XM453A の垂直磁界損
失の周波数依存性の測定結果を示す。損
失の周波数依存性の低周波数極限レ
ベルをヒステリシス損失と見なし、この
レベルからの増加分が超伝導フィラメン
ト間の結合損失と評価した。XM453A
のヒステリシス損失の減少は臨界電流の
低下として理解できる。さらに、結合損
失も 1 桁程度小さくなっているが、両者
のツイストピッチがほぼ等しいことから
、結合時定数が中央部に絶縁層により抑
制されていると推測できる。さらに、結
合時定数の解析は、ほぼ定量的にこの
結果を再現している。

今回の試作線では、臨界電流が比較対
象と比べて 1/5 程度と小さいので、臨界
電流を更に向上させた線材についても同
様の効果を実現することが課題である。

(2) Bi-2223 パンケーキコイルの交流通電 損失の定量化

まず、ツイストされていない Bi-2223 多
芯テープ線による 8 個のダブルパンケー
キ(DP)コイル(300 A 通電時の中心磁束
密度 4.2 T)

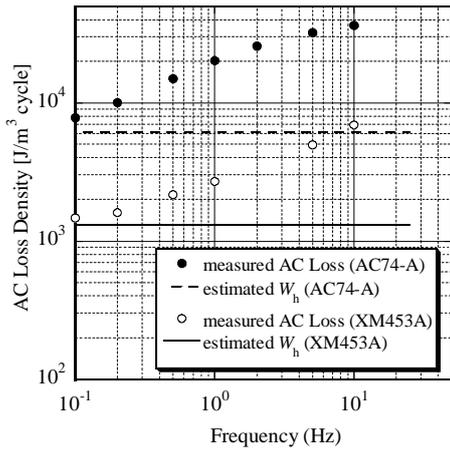


図1 中央絶縁層の交流損失低減効果

の交流電損失を液体ヘリウム中で測定した。通電は、0.008 Hz と 0.04 Hz で行ったが測定結果にほとんど周波数依存性はみられず、超伝導フィラメントのヒステリシス損失が主要な成分である。図2に、0.04 Hz 通電時の測定結果を電流振幅に対して白丸で示す。また、数値解析により得られるコイル巻線部の磁界分布から、巻線に使用した線材の短尺線に対して実測した垂直磁界損失と平行磁界損失よりコイルの局所的な外部磁界を評価し、これをコイル巻線領域で積算することによりコイルの交流電損失とした解析結果を黒丸で示している。その際、巻線の積層効果や同時掃引効果（交流電と交流外部磁界の相乗効果）を考慮した解析を行っている。図2の比較により、ヒステリシス損失が主要な成分であるコイルの通電損失について、巻線の局所的な外部磁界損失に基づいた解析によりほぼ定量的に説明できることが示された。また、上記の8個のダブルパンケーキ (DP) コイルを2セット重ねた168個のダブルパンケーキ (DP) コイル (300 A 通電時の中心磁束密度 5.4 T) についても、同様の比較検討を行い、提案の方法の汎用性を確認できた。

次に、ツイストされた Bi-2223 多芯テープ線による16個のダブルパンケーキ (DP) コイル (30 A 通電時の中心磁束密度 0.25 T) の交流電損失を液体窒素中で測定した。周波数 0.1 Hz - 5.0 Hz の範囲での測定結果を電流振幅に対して白抜き印で図3に示す。電流振幅が大きな領域では、通電損失の周波数依存性が顕著になっている。この領域では、フィラメントのヒステリシス損失に加えてフィラメント間の結合損失も目立つ成分となっていることが分かる。また、周波数ごとに、コイル巻線の局所外部磁界損失からコイル全体の損失を評価する前項と同様の解析を行い得られた結果を黒塗り印で示している。

交流電損失がヒステリシス損失と結合損失で構成される場合にも、本研究で提案している手法により、超伝導コイルの交流電損失が予測評価できることが示されている。

本研究では、液体ヘリウム温度と液体窒素温度における超伝導コイルの交流電損失を対象にしたが、提案の手法は、その中間的な温度においても同様に有効であると考えられる。よって、一般に冷凍機冷却により温度制御された超伝導コイルに対しても本手法により交流電損失の定量的な予測、引いては損失設計を可能とする結果が得られたと結論付けられる。

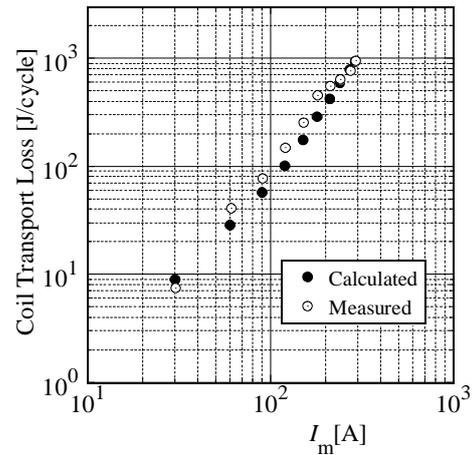


図2 8-DP コイルの LHe 中での通電損失

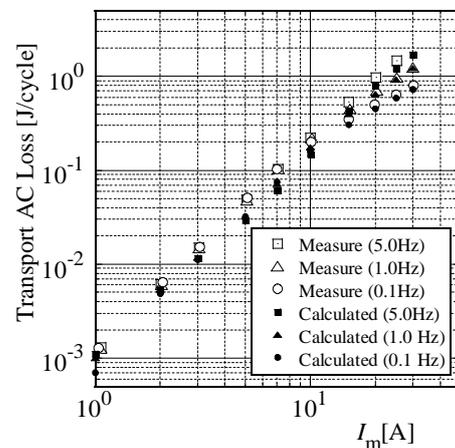


図3 16-DP コイルの LN₂ 中での通電損失

(3) 酸化物超伝導テープ線に誘起された遮蔽電流の低減

超伝導テープ線を巻いたコイルに流れる電流は通常、輸送電流と遮蔽電流の2成分を合成したものとなる。輸送電流が流れるテープ線の幅広面に対して垂直な外部磁界が印加されると、テープ面内に遮蔽電流が誘起され、テープ面に垂直な方向に磁化する。この状態で、磁化に垂直な方向に付加的に交流磁

界を印加すると、時間とともに磁化が緩和することが知られている。この緩和現象は「異常横磁界効果」と呼ばれる。この異常横磁界効果を酸化銅超伝導コイルで実現するために、2つの銅コイルを内外に同軸配置し、それらを逆向きに結線する方法を考案した。この銅コイルに交流電流を通電することで、酸化銅超伝導コイルを構成するテープ線の幅広面内に誘起された遮蔽電流を、異常横磁界効果により低減できる。その結果、コイル中心部に作られる磁界の均一度は大幅に向上することが期待できる。

市販の酸化銅超伝導テープ線を用いて、計4層のソレノイドコイルを試作した。また、その内外に同軸に配置する2つの銅コイルも製作し、両者を逆向きに結線した。液体窒素中に浸漬した場合の実験結果を、図4に示す。ケースAでは、銅コイルに交流電流を全く通電していないが、酸化銅超伝導コイルの励減磁を繰り返すと、テープ線の幅広面内に誘起された遮蔽電流の影響で、発生する中心磁界に大きなヒステリシスが観測された。一方、ケースBでは、酸化銅超伝導コイルの励減磁の途中でその都度、銅コイルにより数十秒間の交流磁界を印加したものであるが、中心磁界の直線性が向上し、ヒステリシスが消滅した。このように、提案手法により、超伝導テープ線の幅広面内に誘起された遮蔽電流を効果的に低減可能なことが実証された。

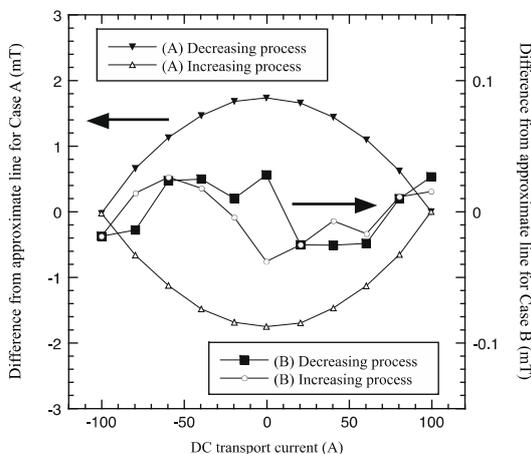


図4 中心磁界の近似直線からのずれ

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. Funaki (筆頭者), K. Kajikawa (4番目), 他6名, Transport AC Loss Properties of a Bi-2223 Superconducting Coil From 0.1 Hz to 10 Hz, IEEE Trans. of Appl. Supercond., 査読有, Vol. 23, 2013, to be published.

○八尋達郎, 柁川一弘 (4番目), 船木和夫 (8番

目), 他6名, 5T級 Bi-2223 超伝導コイルの通電損失の評価, 低温工学, 査読有, Vol. 42, 2012, pp. 108-116

○K. Kajikawa, K. Funaki, A simple method to eliminate shielding currents for magnetization perpendicular to superconducting tapes wound into coils, Physica C, 査読有, Vol. 24, 2011, 125005 (4pp)

○ K. Funaki (筆頭者), 他7名, AC-loss properties of Bi-2223 multifilamentary taped wires with a central insulation layer, Physica C, 査読有, Vol. 471, 2011, pp. 1110-1113

○ K. Kajikawa (筆頭者), K. Funaki, 他3名, Numerical and theoretical evaluations of AC losses for single and infinite numbers of superconductor strips with direct and alternating transport currents in external AC magnetic field, Physica C, 査読有, Vol. 471, 2010, pp. 1321-1324

[学会発表] (計12件)

○K. Funaki, K. Kajikawa, 他6名, Transport AC Loss Properties of a Bi-2223 Superconducting Coil From 0.1 Hz to 10 Hz, Appl. Supercond. 2012, 2012.10.9, Portland, USA

○ K. Kajikawa, K. Funaki, Reduction of Magnetization due to Shielding Current Induced in HTS Tapes for MRI/NMR Application, Kyushu University & Changwon National University Joint Workshop 2012 on Superconductivity, 2012.1.7, 九州大学

○ 蔵脇正弘, 他8名, 5T級 DI-BSCCO 小型コイルの特性評価(3) -積層枚数依存性を考慮したコイル通電損失の評価-, 低温工学・超電導学会, 2011.11.10, いわて県民情報流通センター

○ 柁川一弘, 船木和夫, 異常横磁界効果を利用した高温超電導テープ線材の遮蔽電流の除去, 低温工学・超電導学会, 2011.11.9, いわて県民情報流通センター

○ 蔵脇正弘, 他8名, 5T級 DI-BSCCO 小型コイルの特性評価, 電気関係学会九州支部第64回連合大会, 2011.9.26, 佐賀大学

○Kazuo Funaki, 他8名, AC loss properties of Ag-sheathed Bi-2223 multifilamentary tapes with weak connections among filaments in perpendicular magnetic field, European Conference of Appl. Supercond., 2011.9.21, Den Haag, The Netherland

○ K. Kajikawa, K. Funaki, Removal of Current Inhomogeneity in Windings Composed of HTS Tapes, Magnet Technology Conference-22, 2011.9.12, Marseille, France

○柁川一弘, 船木和夫, 高温超伝導テープ線を用いた均一磁場生成法の提案, 応用物理学会, 2011.9.1, 山形大学

○ 八尋達郎, 他10名, 5T級 DI-BSCCO 小型コイルの特性評価(2)-コイル通電損失の局部外部磁

界損失による積算評価-, 低温工学・超電導学会,
2010.12.3, かがしま県民交流センター

○ 川崎基弘、他 8 名, 新低交流損失 Bi-2223 超電
導線の開発(1)-中央絶縁層による結合時定数の低
減効果-, 低温工学・超電導学会, 2010.12.1, か
ごしま県民交流センター

○ K. Funaki、他 7 名, AC-LOSS PROPERTIES
OF BI-2223 MULTIFILAMENTARY TAPED
WIRES WITH A CENTRAL INSULATION
LAYER, Int. Syp. on Superconductivity 2010,
2010.11.2, エポカルつくば

○ 野上広司、他 7 名, 5 T 級 DI-BSCCO 小型コ
イルの特性評価(1)-コイルの交流損失-, 低温工
学・超電導学会, 2010.0.14, 川崎市産業振興会館

[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: 特許願

番号: 2011-111708

出願年月日: 2011 年 5 月 18 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船木 和夫 (FUNAKI KAZUO)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号: 6 0 0 9 1 3 5 2

(2) 研究分担者

柁川 一弘 (KAJIKAWA KAZUHIRO)

九州大学・システム情報科学研究院・准教授

研究者番号: 1 0 2 9 4 8 9 4