

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560309

研究課題名(和文) イットリウム系超電導コイルの偏流現象解明と大電流量化に関する設計指針の確立

研究課題名(英文) Investigation of non-uniform current distribution and establishment of design guideline for large current capacity in Y-base superconducting coil

研究代表者

津田 理 (TSUDA, Makoto)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10267411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数のY系テープ線を束ねた集合導体で作製した複数のパンケーキコイルをトロイダル配置する場合と、1本のY系テープ線で作製した複数のパンケーキコイルを並列接続してトロイダル配置する場合の電流分布を解析と実験で評価し、偏流現象の原因および大電流量化への設計指針について検討した。その結果、複数のテープ線を束ねる場合、テープ線間の距離が小さいため、製作誤差に伴う各テープ線の自己インダクタンスの変化が偏流現象に大きく影響することがわかった。このため、Y系テープ線を用いた大電流量トロイダルコイルを設計する場合は、単線で作製したパンケーキコイルを並列接続してトロイダル配置する方法が有効である。

研究成果の概要(英文)：We analytically and experimentally evaluated the current distributions in a toroidal coil composed of the series connected double pancake coils composed of a stacked conductor with parallel-connected multiple YBCO tapes and a toroidal coil composed of the parallel-connected multiple double pancake coils composed of single YBCO tape conductor connected in series. Based on these results, we investigated the cause of non-uniform current distribution in the toroidal coils and the design guideline for an YBCO toroidal coil with large current capacity. Due to quite small distance between the tapes, the non-uniform current distribution in the stacked conductor is easily occurred by the difference of the self-inductance in each tape due to a manufacturing error of tape thickness. Therefore, the parallel-connected multiple double pancake coils composed of single tape conductor is effective for preventing the non-uniform current distribution.

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：超電導 コイル 偏流 電流分布 イットリウム

1. 研究開始当初の背景

超電導応用機器の8割以上で必要となる超電導コイル化技術は、超電導応用の発展に不可欠な要素技術である。最近、日本やアメリカでは、低コスト化を期待できる次世代線材として YBCO 線材が注目されており、現在、盛んに高性能化が進められている。しかし、YBCO 線材は、幅 5mm、厚さ 1 μ m 程度とアスペクト比が大きく、テープ幅広面に対する垂直磁場印加により大幅に臨界電流密度が低下する。このため、YBCO コイル作製時には、この垂直磁場を可能な限り抑制することが重要となり、複数のパンケーキコイルをトロイダル状に配置する方法が最適であることが報告されている。しかし、超電導コイルは大電流を扱うことが多いため、コイルの大電流容量化技術の構築が重要となる。このため、YBCO テープ線を積層した“積層導体”が提案され、日本をはじめ欧米諸国において、積層導体を用いたコイルの試作や通電試験が盛んに行われてきた。これに対し、申請者は、積層導体を用いてパンケーキコイルを作製する場合には、コイル間で転位しなければ導体内に大きな偏流が生じること、積層テープ線数や接続コイル数の条件を満足しなければコイル間で転位しても電流均一化を実現できないこと、コイル間で転位を施してもテープ線厚さのわずかな製造誤差(50 μ m 程度)により大きな偏流が生じる可能性があること、等を明らかにしてきた。導体内に偏流が生じると、大電流容量化が難しくなるばかりでなく、導体の損失増大や安定性低下にも影響を及ぼす恐れがあるため、コイル用導体内の偏流問題は、コイルの大電流容量化にとって克服すべき重要な課題であるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、高い臨界電流密度を有し、次世代線材として期待の大きいイットリウム系(Y系)超電導テープ線に関して、その応用上重要な技術として位置づけられるコイル化技術のうち、現在有効な解決策が得られていない「コイルの大電流容量化」を可能とする導体・コイルの最適な構成方法の確立を目指し、導体・コイルの構成方法とテープ線幅広面への垂直磁場印加による臨界電流密度低下現象の関係、コイルの大電流容量化の際に問題となる複数のテープ線間の偏流現象、大電流容量化に適したコイル間接続方法、を明らかにし、次世代超電導応用機器の重要構成要素となるY系超電導コイルの基本設計指針を構築することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、これまでの積層導体を用いてコイル化した場合の偏流特性に関する成果を踏まえ、HTS テープ線固有のコイル形状やコイル構成方法に着目して新たに考案した

「コイルの大電流容量化方法」の有効性を検証するために、以下に示す様に、数値解析コードを用いて、コイル導体におけるテープ線への垂直磁場印加による臨界電流密度低下現象のコイルパラメータ依存性と、本提案方法を用いた場合のテープ線やコイルの製造誤差に対する並列接続されたコイル間の電流分布について解析し、積層導体で作製したコイル内の電流分布との違いについて検討した。そして、本結果を踏まえ、従来の大電流容量化方法と新たに提案する方法に基づいたトロイダルコイルをそれぞれ作製し、電流分布を測定・比較することによって、本提案方法の妥当性を検証した。研究開始当初予定していた研究方法・内容は以下の通りである。

(1) テープ線への垂直磁場印加による臨界電流密度低下現象のコイルパラメータ依存性の検討

YBCO テープ線の臨界電流の磁場印加角度依存性の測定

既に作製しているパンケーキコイルで使用した YBCO テープ線材の短尺試料を作製し、テープ線幅広面に直流外部磁場を印加し、磁場印加角度をパラメータとした際の臨界電流値を、試料両端の電流電圧特性を測定することにより評価する。なお、各コイルに使用しているテープ線材の超電導特性は少しずつ異なるため、すべてのテープ線に対して測定する。

解析モデルおよび数値解析コードの作成

パンケーキコイル単体ならびにパンケーキコイルをトロイダル配置した場合の、パンケーキコイルを構成する各テープ線のインダクタンス、コイル内部の磁場分布、コイルの臨界電流、各テープ線における電流分布を評価するための解析モデルを検討し、で測定したデータを用いて数値解析コードを作成する。

・ コイル内磁場分布のコイルターン数・パンケーキコイル数依存性解析

パンケーキコイルのターン数やパンケーキコイル数を変化させ、パンケーキコイル単体の場合と複数のパンケーキコイルをトロイダル配置した場合について、コイル内部の磁場分布を解析し、パンケーキコイル単体ならびにトロイダルコイル全体の臨界電流を算出する。また、臨界電流低下抑制に効果的なターン数とパンケーキコイル数を明確にする。なお、パンケーキコイルの内径、テープ線幅・厚さについては、既に作製したパンケーキコイルの値を採用する。

コイル内磁場分布のコイル位置ずれ依存性解析

で得られた、臨界電流低下抑制に効果的なターン数とコイル数に対して、トロイダル配置されているコイルのうちの1つに位置ず

れが生じた場合の、各コイル内部における磁場分布とコイル間電流分布を解析し、コイルの位置ずれが臨界電流低下に及ぼす影響を明確にする。

コイル内磁場分布の鉄心使用効果解析

YBCO テープ線を用いたコイルを作製する場合、テープ幅広面への垂直磁場印加による臨界電流低下を抑制するためにトロイダル配置を採用するが、コイル数が少ない場合は漏えい磁場が大きくなり垂直磁場成分が大きくなる。このような場合を想定し、トロイダルコイル中心に円環状の鉄心を挿入した場合の垂直磁場抑制効果を、コイル内磁場分布解析を通じて評価する。

(2)テープ線やコイルの製造誤差に対する並列接続されたコイル間の電流分布特性の解明

・ コイル間電流分布のテープ線厚さ誤差・コイル位置ずれ依存性解析

本提案方法に基づいてトロイダル配置されたパンケーキコイルを並列接続した場合に対し、1個または2個のパンケーキコイルのテープ線厚さやコイル位置を変化させた場合の、各コイル内磁場分布、各コイルの電流分布、コイル全体の臨界電流を解析し、テープ厚さの製造誤差やコイルの位置ずれがコイル間電流分布やコイル全体の臨界電流低下に及ぼす影響を明確にする。

テープ線間に絶縁シートを挿入したパンケーキコイルの製作

テープ線厚さの製造誤差がコイル間電流分布に及ぼす影響を検証するために、既に作製済みの8個のパンケーキコイルに加え、テープ線間に絶縁シートを挿入して作製したパンケーキコイルを新たに2個作製する。なお、コイル外径以外のコイルパラメータはすべて同じ値を採用する。

テープ線厚さ誤差に対するコイル間電流分布測定

既に作製している8個のパンケーキコイルで構成されるトロイダルコイルのうちの1個または2個を、で作製したパンケーキコイルと取り替えた場合の、各コイルの電流分布ならびにコイル全体の臨界電流を測定し、解析結果と比較することにより、テープ厚さ誤差がコイル間電流分布やコイル全体の臨界電流（大電流容量化）に及ぼす影響を検証する。

(3)コイル間電流分布のコイル間接続方法依存性の検討

・ テープ線厚さ誤差とコイル位置ずれに対するコイル間電流分布のコイル間接続方法依存性の検討

の試験を、コイル間の並列接続方法を変えた場合について行い、コイル間接続方法が

コイル間電流分布に及ぼす影響とコイルの大電流容量化に適したコイル間接続方法を明確にする。

鉄心使用時のコイル間電流分布のコイル間接続方法依存性の検討

トロイダルコイルの中央部に円環状の鉄心を挿入して と の試験を行い、コイル間接続部がコイル間電流分布に及ぼす影響やコイルの大電流容量化に適したコイル間接続方法が、鉄心を挿入することによってどの様に変化するかについて検討し、鉄心の挿入効果を明確にする。

4. 研究成果

初年度となる平成 23 年度は、既に作製済みの YBCO ダブルパンケーキコイルに使用している YBCO テープ線材の短尺試料を作製し、テープ線幅広面に直流外部磁場を印加した場合の臨界電流値を、試料両端の電流電圧特性を測定することにより評価した。なお、本試験では、テープ幅広面への磁場印加角度と磁場強度をパラメータとして行った。これにより、0.1T 印加時では、テープ面に垂直方向磁場が印加された場合の臨界電流値が、平行磁場印加時の約 6 割程度、1T 印加時は約 4 割程度にまで減少することがわかった。次に、パンケーキコイル単体ならびにパンケーキコイルをトロイダル配置した場合の、パンケーキコイルを構成する各テープ線の自己インダクタンス、トロイダル配置した場合のパンケーキコイル間の相互インダクタンス、コイル内部の磁場分布、コイルの臨界電流分布、各テープ線の電流分布を評価するための解析モデルを構築し、数値解析コードを作成した。そして、パンケーキコイルのターン数やパンケーキコイル数を変化させ、パンケーキコイル単体の場合と複数のパンケーキコイルをトロイダル配置した場合について、コイル内部の磁場分布を解析し、臨界電流低下の抑制に有効な、パンケーキコイル単体の構成方法やトロイダル配置方法を明確にした。また、トロイダル配置されているコイルのうちの1つに位置ずれが生じた場合の、各コイル内部における磁場分布とコイル間電流分布について解析した。その結果、トロイダル配置されたパンケーキコイル数が多くない(8個程度)の場合は、わずかなコイル位置のずれに対して、臨界電流はほとんど低下しないことがわかった。

平成 24 年度は、パンケーキコイル単体ならびにパンケーキコイルをトロイダル配置した場合の、パンケーキコイルを構成する各テープ線のインダクタンス、コイル内部の磁場分布、コイルの臨界電流、各テープ線における電流分布を評価するために開発した数値解析コードを用いて以下の解析を行った。「・ コイル間電流分布のテープ線厚さ誤差・コイル位置ずれ依存性解析」では、本提案方法に基づいてトロイダル配置されたパ

ンケーキコイルを並列接続した場合に対し、1個または2個のパンケーキコイルのテープ線厚さやコイル位置を変化させた場合、各コイル内磁場分布、各コイルの電流分布、コイル全体の臨界電流を解析し、テープ厚さの製造誤差やコイルの位置ずれがコイル間電流分布やコイル全体の臨界電流低下に及ぼす影響を明確にした。また、「テープ線間に絶縁シートを挿入したパンケーキコイルの製作」では、当初の予定では、テープ線厚さの製造誤差がコイル間電流分布に及ぼす影響を検証するために、既存の8個のパンケーキコイルに加え、テープ線間に絶縁シートを挿入したパンケーキコイルを新たに2個作製する予定であったが、従来の複数テープ線で構成されるパンケーキコイルに通電する場合と1本のテープ線で構成される複数のパンケーキコイルを並列接続して通電する場合の電流分布の違いをより明確にするために方針を変更し、小型パンケーキコイルを60個作製することにした。内訳は、1本のテープ線で構成される10ターンのダブルパンケーキコイルが45個、3並列導体を用いた30ターンのダブルパンケーキコイルが15個である。また、上記ダブルパンケーキコイルを設置する架台を作製した。

最終年度となる平成25年度は、前年度までに実施した電流分布解析結果と、前年度作製したYBCOテープ線で構成されるパンケーキコイルを用いた電流分布実験結果の比較により、偏流現象の原因および大電流容量化への設計指針について検討した。具体的には、まず、各コイル・各テープ線の電流分布を精度良く測定するために、複数のロゴスキーコイルを用いた電流分布評価装置を構築し、高精度測定が可能となるロゴスキーコイル形状や配置方法について検討した。次に、1本のYBCOテープ線で構成される3個のパンケーキコイルを並列接続したユニットを3nユニット直列接続したものと、3本のYBCOテープ線で構成されるパンケーキコイル3n個を転位して直列接続したものをを用いて、正弦波交流電流通電時の電流分布測定を行った。その結果、理論的には両コイルとも各テープ線の電流が同じになるものの、1本のテープ線で構成されるコイルを並列接続した場合には10%程度の偏流が、3本のテープ線で構成されるコイルを転位し直列接続した場合には40%以上の偏流がそれぞれ観測された。この原因の一つにコイル間の接続抵抗の影響が考えられるが、本質的には、複数のテープ線を束ねる場合、テープ線間の距離が小さいことから、製作誤差に伴うテープ線間の鎖交磁束のわずかな違いがインダクタンスのアンバランスに大きく影響するためであると考えられる。また、トロイダルコイルに鉄心を挿入することにより、偏流現象が緩和される傾向があることが確認された。しかし、鉄心の設置位置のわずかな違いにより電流分布が変化することから、鉄心挿入効果の詳細

を明確にするには至らなかった。

以上より、解析コードの妥当性を確認するとともに、イットリウム系テープ線を用いた大電流容量を有するトロイダルコイルを設計する場合、製作誤算による偏流現象をより効果的に抑制するためには、単線で作製したパンケーキコイルを並列接続する方法が有効であることを明らかにすることができた。

従来の金属系超電導線を用いて大電流容量を有するコイルを作製する場合は、超電導線を撚り合わせるなどして導体の大電流容量化を図り、その導体を用いてコイルを作製することが定石とされている。これに対し、本提案方法は、酸化物系超電導線のテープ形状に適した固有のコイル形状やコイル配置に着目し、大電流容量化のためにテープ線を並列接続させた積層導体を使用する代わりに、テープ線1本で構成される複数のコイルを並列接続することにより、コイルの大電流容量化を実現しようとする。従来の、「導体の大電流容量化」「集合(積層)導体を用いたコイル作製」というコイルの大電流容量化の定石を覆すものである。また、本提案方法は、積層導体を使用する場合に比べて作製するコイル数は多くなるものの、このコイル数増加は、パンケーキコイル間の漏れ磁場の減少、パンケーキコイルを構成するYBCOテープ線に印加される垂直磁場成分の抑制、テープ線の臨界電流密度低下の抑制に有効である。以上より、本研究において本提案方法の有効性を検証できたことは大きな意義があるといえる。

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3件)

後村 直紀、高橋 利典、宮城 大輔、津田 理、濱島 高太郎、ダブルパンケーキコイルで構成した種々のコイル配置に用いる多重HTSテープ導体の電流分布一様化、低温工学、査読有、vol.47、No.4、2012、251-256

DOI: 10.2221/jcsj.47.251

N. Atomura, T. Takahashi, Y. Chiba, M. Tsuda, T. Hamajima, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, Homogeneous current distribution experiment in a multi-laminated HTS tape conductor for a double-pancake coil of SMES, Physica C、査読有、vol.471、2011、1395-1398
DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.202

M. Tsuda, T. Hamajima, Current Distribution in YBCO Coated Conductors of Toroidal Coil Composed of Multiple Double Pancake Coils, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism、査読有、vol.24、2011、999-1006
DOI: 10.1007/s10948-010-0872-z

〔学会発表〕(計4件)

Yo Saichi, Daisuke Miyagi, Makoto Tsuda,
A Suitable Design Method of SMES Coil
for Reducing Superconducting Wire
Usage Considering Maximum Magnetic
Field, 23rd International Conference
on Magnet Technology, 2013.7.15、ボス
トン 米国

最知 庸、大野 真、宮城 大輔、津田
理、濱島 高太郎、SMES用超電導コイル
の最大磁場と線材使用料の関係、2013年
度春季低温工学・超電導学会、2013.5.13、
東京

T. Hamajima, Y. Chiba, N. Atomura, T.
Takahashi, D. Miyagi, M. Tsuda, K.
Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya,
Homogeneous Current Distribution in
Multi-laminated HTS Tape Conductor for
Pancake Coil of SMES, The
EUCAS-ISEC-ICMC 2011, 2012.9.19、ハー
グ オランダ

熊沢 拓人、宮城 大輔、津田 理、濱島 高
太郎、鉄心を用いた低コスト SMES の概念
検討、平成 24 年度電気関係学会東北支部
連合大会、2012.8.31、秋田

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ecei.tohoku.ac.jp/hamajima/top.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津田 理 (TSUDA MAKOTO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10267411