

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 5 月 21 日現在

機関番号：12051

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 年度～2012 年度

課題番号：22560263

研究課題名（和文）

革新的次世代超伝導技術であるイットリウム系コイルの反磁性効果による問題の研究

研究課題名（英文）

Investigation on the diamagnetism effect of Y-based superconducting coils

研究代表者

中込 秀樹（NAKAGOME HIDEKI）

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20375611

研究成果の概要（和文）：

様々な機器への応用が期待される次世代超伝導技術であるイットリウム系コイルは、顕著な反磁性効果を示し、中心磁場が低下するなどの問題を持つ。本研究では、実験と数値解析を組み合わせ、イットリウム系コイルにおける反磁性効果の基本的な振る舞いを調べ、これを応用機器においてコントロールするために必要な基礎的な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

Y-based superconducting coils are promising for various coil applications. However, the coils show diamagnetism effect which generates several problems such as reduction in center field. In this work, the effect was systematically investigated with experiments and numerical simulation to control the diamagnetism effect for coil applications.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：イットリウム系超伝導コイル、反磁性効果

1. 研究開始当初の背景

これまで研究段階であった次世代超伝導技術であるイットリウム系線材が近年商用化され幅広い活用の道が開けた。イットリウム系線材は A) 安価な液体窒素で冷却可能であり、B) 優れた強度と C) 高磁場中での優れた臨界電流密度（流すことのできる電流密度の最大値）をもつ。そのため A) の利点を生かし電力ケーブルへ応用して、送電ロスを減らす

ことで二酸化炭素排出量を大幅に低減する計画が日米で計画されている。さらに B), C) の特性を生かして磁気浮上列車、磁気共鳴画像装置（MRI）、核磁気共鳴分光器（NMR）などへの応用することで、その性能を大幅に向上させられる革新的技術として目されている。例えば高価な医療装置である MRI にイットリウム系線材のコイルを適用すれば、高磁場化による性能向上と共に、装置の価格・

ランニングコストの大幅な低減が期待できる。また従来の線材より数倍大きい強度と臨界電流密度を持つため、コイルのサイズを抑えて装置を小型にできる。

しかしながらイットリウム系線材は、線材単体での物理特性（臨界電流・臨界磁場・応力特性など）に関する研究は数多くなされている一方、多くの応用機器での基本となるコイル形状での特性に関する研究は世界的に見てもほとんどなされていない。そのためイットリウム系線材で制作したコイル（イットリウム系コイル）の特性や付随する問題は明らかになっていなかった。そこで研究代表者らは、小型のイットリウム系コイルの制作・実験を行い、数値解析とともに直流コイルとしての特性・問題点を検証してきた。これによりイットリウム系コイルは大きな反磁性効果を示し、最悪の場合中心磁場強度が設計値の80%にまで減少してしまう、という結果を明らかにした。

イットリウム系線材は極薄の超伝導膜（1 μm 程度）を基材に蒸着する方法で製作される。そのためコイルを励磁した時に超伝導膜に垂直に印加される磁束をはじき出そうとして、遮蔽電流ループが発生する。この遮蔽電流がコイルの中心部に下向きの磁場を発生させるため、反磁性効果が発生する。すなわち電流を流すことで発生させた磁場をコイル自身が打ち消そうとしてしまうのである。イットリウム系コイルの応用が期待されている直流機器には精密な磁場が必要とされる場合もあるためこれは重大な問題である。例えばMRI装置やNMR装置では 10^{-6} ~ 10^{-8} レベルの精度の磁場が必要とされるため、この反磁性効果をコントロールする手法が確立されなければ実用化は不可能である。

2. 研究の目的

上述の問題に関して、本研究では実験と数値解析的を組み合わせることで、コイルの形状などのパラメータが反磁性効果は与える影響を明らかにし、反磁性効果をコントロールするための基礎的な知見を得ることを目的とする。

イットリウム系コイルを直流機器に応用する場合、コイルの形状・大きさ・線材の種類に関して様々なケースが想定される。そのため、どのようなコイル形状・線材寸法の場合に反磁性効果が大きくなるのかを明らかにすることが重要である。既に反磁性効果を取り扱う基本的な数値解析手法を構築しており、これを用いる事で様々な形状のコイル（内径・外径・高さの比、コイルの大きさ）に関して数値解析を行い、コイル形状と反磁性効果の関係を明らかにする。

反磁性効果の一般的な振る舞いが実験・数値解析により明らかになれば、それをもとに反磁性効果をコントロールしたコイル設計が可能となる。例えばMRIにはコイル内部に 10^{-6} レベルの精度の磁場が必要であり、従来の超伝導線材を用いてこの精度を実現するコイル設計手法は確立されている。この従来の設計方法に、本研究で明らかにした観点を新しく取り入れることで、反磁性効果を大幅に低減して必要な磁場の精度を実現できるコイル設計が可能となる。

3. 研究の方法

研究代表者は過去に、超伝導コイルの遮蔽電流を計算する数値解析手法を考案した。図1に数値解析手法の概念図を示す。この手法と小型のイットリウム系試験コイルにおける実験とを組み合わせる以下の項目を研究する。いくつかの技術課題の検討の後、試験コイルの制作を行う。制作したコイルはまず基本的な励消磁試験により電流-電圧特性を計測し、制作過程において超伝導特性の劣化が起きていないことを確認する。これらの基礎試験の後、下記に示す反磁性効果を調べる実験を行う。

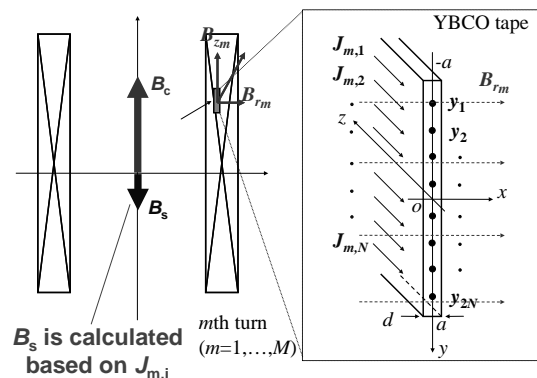


図1 数値解析モデル

(1) コイル形状と反磁性効果の関係

図2は典型的なソレノイドコイルの形状と中心磁場の強さの関係を表した等高線図である。横軸はコイルの外径/内径の比、縦軸はコイルの高さ/内径の比である。同じ等高線上ではコイル形状が違って同じ中心磁場強度を持つ。破線は線材使用量が最小になる設計であり、コイルを制作する上で基本となる設計である。研究代表者らが既に行った実験・解析では、この基本設計のコイルの中心磁場強度が反磁性効果により、設計値の80%にまで減少してしまう結果が得られている。本研究ではこの等高線図をもとにコイル形状・大きさと反磁性の一般的な関係を調べた。

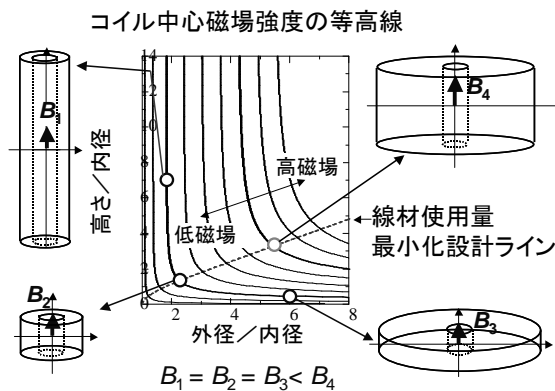


図2 コイルの形状

(2) 反磁性効果の時間変動

反磁性効果はイットリウム系超電導層の中に誘導される遮蔽電流が原因となって発生する。この遮蔽電流は時間と共に変化するため、反磁性効果の影響も時間と共に変動する可能性がある。この影響について小型のイットリウム系試験コイルの実験によって調べた。

(3) 反磁性効果が磁場の分布に与える影響

コイルの中心においては、遮蔽電流は中心磁場と反対向きの磁場（すなわち反磁性）を発生させるが、この影響は場所によって異なると推察される。すなわち、遮蔽電流によってコイル内部の空間的な磁場分布が変わる可能性がある。つまり、空間的に均一な磁場

を発生させるようにあらかじめコイルの精密な設計を行っても、この効果によって磁場分布が不均一になってしまう可能性がある。この影響について数値解析を用いて調べた。

4. 研究成果

(1) 反磁性効果と運転電流の関係

内径 18 mm, 外径 40 mm, コイル長 25 mm のイットリウム系コイルを想定し 0 A → +200 A → 0 A → -200 A → 0 A → +200 A → 0 A の順に電流値を変化させたときの中心磁場を解析した。中心磁場は顕著な反磁性効果を伴ったヒステリシスを示した。中心磁場の解析値から、遮蔽電流が無い場合の磁場の設計値を引くことで求めた遮蔽電流磁場を求めた。0 A → +200 A において負の極性の遮蔽電流磁場が生じており、これが中心磁場強度の減少を引き起こす。たとえば 100 A においては、中心磁場の値が設計値と比べて 16% も減少した。ただし、電流値を上昇させていくと遮蔽電流磁場の強度は一旦飽和し、更に減少した。このため、中心磁場減少の効果は高電流/高磁場ほど緩和されることが明らかになった。これは実際の機器の運転において重要な知見である。また、同じ内径で形状が異なるコイルを複数解析したところ、コイルの形状が細長くなるほど、または平べったくなるほど反磁性効果が小さくなることが明らかになった。

(2) 反磁性効果の時間変動

小型のイットリウム系試験コイルの中心磁場の時間変化を液体ヘリウム中（4.2 ケルビン）において測定した。コイルの通電電流をホールドしたのち、約 1000 秒間で中心磁場の値が 7 G 増加した（図3参照）。磁場は対数時間に比例して増加し、その変化量は時間と共に徐々に小さくなった。この結果は以下のように解釈できる。イットリウム系超電導層内に誘導された遮蔽電流は永久電流として流れ続けるが、磁束クリープと呼ばれる現象によって、長い時間をかけて少しずつ減衰する。これはコイル中心部における反磁性効果が、時間と共に減少することに対応するので、結果としてコイルの中心磁場が時間とともに正の方向に時間変化するのである。

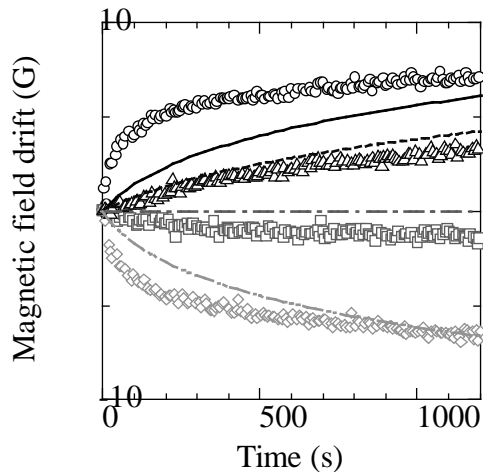


図3 磁場の時間変動

(3) 反磁性効果と磁場の分布の関係

これまで述べたように、遮蔽電流によってコイルに反磁性効果が生まれることが明らかである。ここでは遮蔽電流が空間的な磁場分布に与える影響を数値解析で調べた。図4に結果を示す。遮蔽電流を考慮しない場合は破線のような磁場分布であるが、実際はこれに一点鎖線で示す遮蔽電流磁場が付加される。反磁性効果によって中心磁場が低下していることが明らかであるが、さらに磁場の分布自体も変化している。NMR、MRI、加速器などにおいては、均一な磁場や多極磁場が必要であり、これらを発生させるようにコイルが設計される。反磁性効果によって磁場の分布が変化してしまうため、従来と同じ手法で設計を行っても、所望の磁場分布が得られない可能性がある。すなわち、イットリウム系コイルでは反磁性効果の影響を考慮したコイル機器設計が重要である。

以上のように、イットリウム系コイルにおける反磁性効果の振る舞いの一般的知見を系統的に明らかにした。実際の応用機器においては、機器の種類によって、コイルの形状や運転方式、要求される磁場のスペックなどが異なるため、本研究で得られた基礎的知見をもとに、機器に応じた対策技術や運転方式を構築していく必要がある。

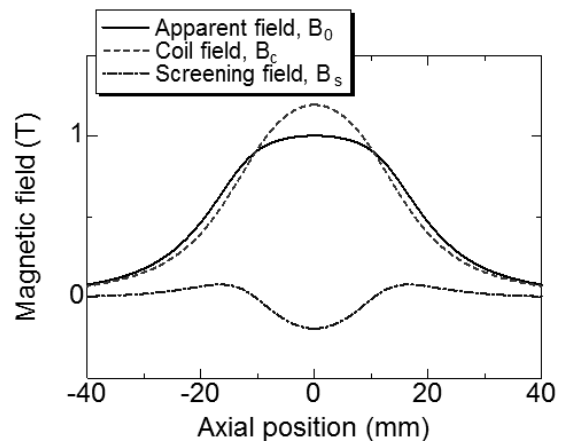


図4 コイル磁場の分布

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10件)

1. S. Matsumoto, T. Kiyoshi, A. Otsuka, M. Hamada, H. Maeda, Y. Yanagisawa, H. Nakagome and H. Suematsu, Generation of 24T at 4.2K using a layer-wound GdBCO insert coil with Nb3Sn and Nb-Ti coils, *Superconductor Science and Technology, Superconducting Science and Technology*, 査読有, 25, 2012, 115-002

2. Yoshinori Yanagisawa, Yasuaki Kominato, Hideki Nakagome, Tatsuhiko Fukuda, Takuya Takematsu, Tomoaki Takao, Masato Takahashi, and Hideaki Maeda, Effect of coil current sweep cycle and temperature change cycle on the screening current-induced magnetic field for Ybco-coated conductor coils, *ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING*, 査読有, 1434, 2012, 1373-1380

DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4707063>

3. A. Otsuka, Y. Yanagisawa, T. Kiyoshi, H. Maeda, H. Nakagome, and M. Takeda, Magnitude of the screening field for YBCO coils, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity, IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 査読有, 21, 2011, 2076-2079

4. T. Takematsu, T. Takao, N. Sato, M. Takahashi, and H. Maeda, Remarkable weakness against cleavage stress for

YBCO-coated conductors and its effect on the YBCO coil performance, *Physica C*, 査読有,471,2011, 480-485

5. Y. Yanagisawa, Y. Kominato, H. Nakagome, R. Hu, T. Takematsu, T. Takao, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi, and H. Maeda, Magnitude of the screening field for YBCO coils, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 査読有,21,2011, 1640-1643

6. Y. Yanagisawa, H. Nakagome et.al., Operation of a 500 MHz high temperature superconducting NMR: Towards an NMR spectrometer operating beyond 1 GHz, *Journal of Magnetic Resonance*, 査読有,203,2010, 274-282

7. D. Uglietti, Y. Yanagisawa et.al., Measurements of magnetic field induced by screening currents in YBCO solenoid coils, *Superconducting Science and Technology*, 査読有,23,2010, 115-002

8. T. Takematsu, Y. Yanagisawa, H. Nakagome et.al., Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation, *Physica C*, 査読有,470,2010, 674-677

9. Yanagisawa, H. Nakagome et.al., Effect of YBCO-Coil Shape on the Screening Current-Induced Magnetic Field Intensity, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 査読有,20,2010, 744-747

10. T. Kiyoshi, Y. Yanagisawa, H. Nakagome et.al., HTS-NMR: Present Status and Future Plan, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 査読有,20,2010, 714-717

[学会発表] (計 11 件)

Y. Yanagisawa*, E. Okuyama, H. Nakagome et.al., Premature quenches due to existence of a degraded layer in YBCO-coated conductor pancake coils, 22nd International Conference on Magnet Technology, September, 2011, Marseille, France

Y. Yanagisawa*, Y. Kominato, H. Nakagome et.al., Effect of coil load factor on the temporal drift of the central magnetic field due to relaxation of the screening current for an YBCO-coated conductor coil at 77K, 22nd International Conference on Magnet Technology, September, 2011, Marseille, France

Y. Yanagisawa*, Y. Kominato, H. Nakagome et.al., Effect of coil current sweep cycle and temperature change cycle on the screening current-induced magnetic field for YBCO-coated conductor coils, 2011 Cryogenic Engineering

Conference and the International Cryogenic Materials Conference (CEC-ICMC), Jun 2011, Spokane, WA, USA

柳澤 吉紀, イットリウム系高温超伝導マグネット技術の課題 ~ 特性劣化・クエンチ保護・遮蔽電流の観点から, 日本磁気科学会 磁場発生分科会&東北大金研強磁場センター 合同研究会, 2011年10月, 仙台

Y. Yanagisawa, H. Nakagome, T. Takematsu, T. Takao, and H. Maeda*, Magnet Technology for YBCO-Coated Conductors, 24th International Symposium on Superconductivity, 2011 Cryogenic Engineering Conference and the International Cryogenic Materials Conference (CEC-ICMC), Oct. 2011, Tokyo, Japan

Y. Yanagisawa, H. Nakagome et.al., Reduction in the magnitude of screening current-induced magnetic field for YBCO coils, Applied Superconductivity Conference 2010, Aug. 2010, Washington D.C., USA

H. Maeda, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, et.al., Degradation of YBCO coil performance due to epoxy impregnation, Applied Superconductivity Conference 2010, Aug. 2010, Washington D.C., USA

A. Otsuka, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, et.al., Evaluation of the Screening Current in a 1.3 GHz NMR Magnet Using ReBCO, Applied Superconductivity Conference 2010, Aug. 2010, Washington D.C., USA

M. Takahashi, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, et.al., Towards a high temperature superconducting NMR beyond 1GHz: Field stabilization for solid-state NMR in a 500MHz HTS NMR, WorldWide Magnetic Resonance Conference 2010, Joint EUROMAR 2010 and 17th ISMAR Conference, July 4-9, 2010, Florence, Italy

H. Maeda, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, et.al., Towards an NMR spectrometer operating beyond 1 GHz: Operation of a 500 MHz high temperature superconducting NMR, WorldWide Magnetic Resonance Conference 2010, Joint EUROMAR 2010 and 17th ISMAR Conference, July 4-9, 2010, Florence, Italy

柳澤吉紀, 朴任中, 中込秀樹, 濱田衛, 松本真治, 木吉司, 末松浩人, 滝沢杏奈, 松田徹郎, 高橋雅人, 前田秀明, 高温超伝導材料を利用した次世代NMR技術の開発, 電力・エネルギーフォーラム「イットリウム系超伝導コイル技術開発」Y系超伝導コイル開発の現状と研究開発課題, 2013年1月30日, 横浜

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中込 秀樹 (NAKAGOME HIDEKI)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20375611

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

前田 秀明 (MAEDA HIDEAKI)
理化学研究所・生命分子システム基盤研究
領域・チームリーダー
研究者番号：40392120