

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03586

研究課題名(和文) 50T級次世代高電磁力超伝導マグネット技術の構築

研究課題名(英文) Construction of 50T class large electromagnetic force superconducting magnet technology

研究代表者

淡路 智 (Awaji, Satoshi)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：10222770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は50T級超伝導マグネット開発において問題となる巨大電磁力を克服するため、コイル構造そのものに電磁力を支持させるYOROIと呼ばれる新しい補強構造の影響を実験と数値計算の両面から研究した。実験では、現実的な体積の補強構造を有するモデルコイルを作製し、高電磁力下で試験を行った。その結果、1000MPaの電磁力を補強により200MPa程度まで低減できることが分かった。これらの結果は、概ね数値計算結果と一致した。これらの結果を受け、50T超伝導マグネットにおける最内層コイルが、500MPaの線材強度以下で設計可能であることを示すことに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we investigated an effect of new reinforcement coil structure “YOROI” in order to overcome a huge electromagnetic stress in the 50T-class high field superconducting magnet from both experimental and numerical simulation approaches. The model coil with the practical volume for insert coil in the high field magnet was made and tested in the high stress state. We found a drastic reduction of the hoop stress from more than 1000 MPa to 200 MPa even for the practical volume reinforced structures. The obtained results were in agreement with the simulation results. Finally, we successfully design the inner most coil for the 50 T superconducting magnet within the induced hoop stress less than 500 MPa.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導 電磁力 機械特性

1. 研究開始当初の背景

高温超伝導材料は、低温における優れた強磁場特性を有することから、30T を超える強磁場マグネット開発が期待されている。このため、世界中で強磁場マグネット開発が実施されている。しかし、強磁場マグネットでは発生する磁場と電流に起因した巨大な電磁力に耐えうる補強が問題となる。これまで開発されてきた強磁場超伝導マグネットと、電磁力の関係をプロットすると、30T の磁場発生で約 400MPa 程度の電磁力となっている。これを外挿すると、50T の磁場発生には約 1GPa もの大きな電磁力に耐えうるが必要となり、現状の超伝導材料では対応できない。一方で、申請者のグループはコイルに新しい補強構造を導入することで、高電磁力をコイル構造に持たせることに成功してきた。また、高温超伝導内層コイルを用いた 20T 及び 25T 無冷媒超伝導マグネット開発にも成功し、高磁場高温超伝導マグネット開発の実績も複数有する。本研究では、これらの実績をさらに発展させ、高電磁力高温超伝導マグネット開発を見据えた技術開発を行った。

2. 研究の目的

本研究は、超伝導線材に補強を施すこれまでの手法とは異なり、コイル構造そのものに電磁力を支持させる新しい手法を用いて、50T 級超伝導マグネット開発を目指した次世代の高電磁力・高精度超伝導マグネット技術を確立することを目的とする。このため、申請者らが中部電力と共同で開発に成功した新しい補強構造について、熱応力・電磁応力下の変形挙動を解明する。さらに、その結果をもとに、高強度である $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ テープ線材の 2 倍に相当する 1GPa 以上の高電磁力下で安定に動作する実証コイルを開発し、50T 級超伝導マグネットの概念設計を実施する。これにより、現在日本で計画している、30T 無冷媒超伝導マグネット、50T ハイブリッドマグネット用大口径 20T 超伝導マグネットへの適用を検討すると共に、その先の 50T 級超伝導マグネットへの道筋をつける。

3. 研究の方法

本研究では、ひずみゲージ、温度センサー等の多くのセンサを取り付けた新補強構造を有する要素コイルを作製し、熱応力下、電磁応力下におけるコイル及び補強構造の変形を詳細に調べ、応力解析シミュレーションを併用することで、新規補強構造を用いたコイルの補強効果について、応力・ひずみの観点から理解する。要素コイルの結果を受けてコイル構造（構造・材料等）の最適化を施し、機械的強度の優れている RE123 を使った従来コイルの約 2 倍である電磁応力 1GPa の高電磁

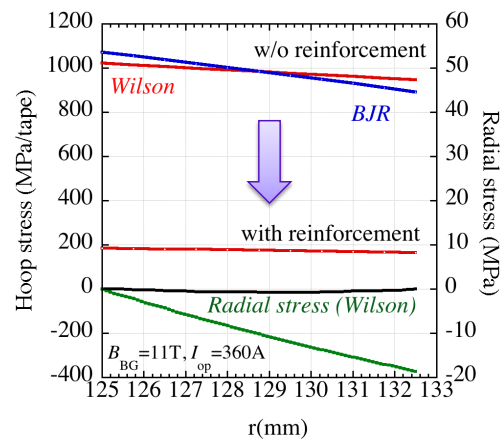


図1 試験コイルの応力分布解析計算結果

応力下の安定運転を実証する。さらにこの結果を踏まえて、50T 級超伝導マグネットの概念設計を実施した。

4. 研究成果

(1) コイル試験

強磁場マグネットの場合、内層コイルに空間電流密度を高く維持するため、補強構造に割く空間はなるべく少なくすることが必要である。すなわち、補強と電流密度は背反する関係にある。このため、本研究では内層コイルの体積を現実的なサイズまで小さくしてコイルを作製し、電磁力試験を実施した。YORIO 構造は、コイル内外側の外周リングと内周リング、さらにコイル上下を挟む円板で構成される。内径 250 mm、外形 265 mm のコイルに対し、上下の円板の厚みを 0.5 mm、リングの径方向厚を 4.2 mm としてコイル設計を行った。材質は SUS316L である。このコイルを $\phi 360\text{mm}-12\text{T}$ の大口径超伝導マグネット内のクライオスタットにセットし、11 T の外部磁場下で通電を行った。このとき、通電電流と

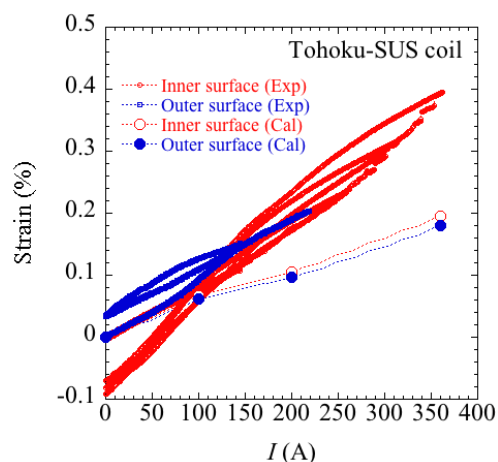


図2 コイル内面と外面におけるひずみの測定結果と計算結果の比較

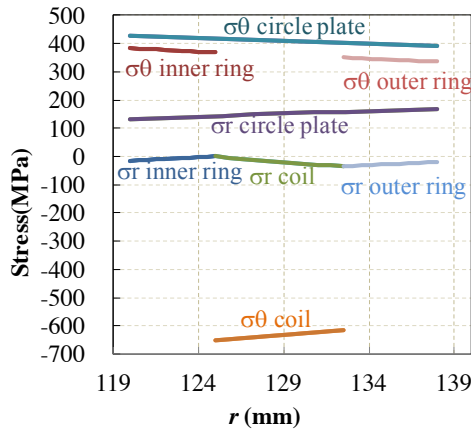


図3 コイルと補強構造における応力分布計算結果

外部磁場の相互作用によって電磁力が発生する。図1は、円筒モデルによって計算したコイル内部の電磁力分布である。図から分かるように、補強なしの場合にはコイル内の hoop 応力(周方向)は1GPaを超え、径方向応力は圧縮側で約1MPaとなることが分かる。しかし、YOROI 構造によって約200MPaまで減少することが計算によって明らかとなった。このとき、コイルには外周リングより径方向に圧縮応力がかかることで、補強されているため、コイル内部の径方向応力は、最大20MPaの圧縮となることが分かった。このときにコイル内外周に誘起されるひずみを計算すると、図2のように電流と共に増加して、通電した最大電流である360Aの時、約0.2%となった。一方で、コイル内外に取り付けたひずみゲージによるひずみ測定結果は、最大で約0.4%となることが分かった。通電電流が小さい100A以下では計算結果と実験結果の良い一致が見られているが、100A以上では実験結果が大き

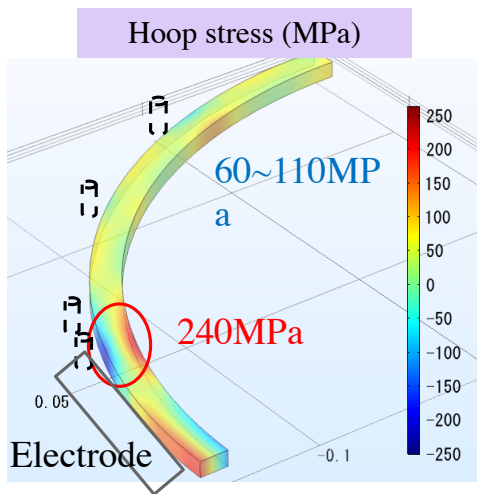


図4 有限要素法によるテストコイルの内部応力分布の計算結果

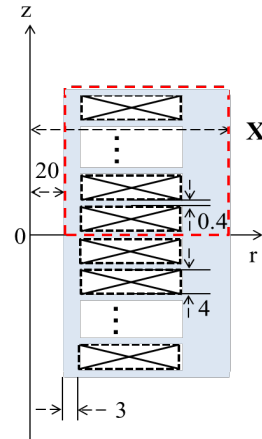


図5 50T 超伝導マグネット用最内層コイルの解析モデル

くなり、360Aではほぼ倍となることが分かる。計算はコイルを弾性で見なし、複合則で求めたヤング率95GPaを用いた。高電磁力ではコイルの塑性変形が関連していると予想される。実施、実験結果にはヒステリシスが見られ、コイルを構成している材料の一部が塑性変形を起こしていることを示唆している。

(2) シミュレーション

有限要素法を用いてコイル構造の内部応力及びひずみ分布の詳細計算を行った。用いたソフトはCOMSOLである。

図1は(1)の実験で用いたコイルに対して計算した結果である。特に補強構造ではボルトによる固定を行っているため、ボルトの影響について計算を行った。図4は、11Tの磁場中で100A通電した場合のコイル内部の応力分布である。図中の四角部分が電極であり、破線の円柱部分がボルト位置となる。電極から離れた部分では、応力が60-110MPa、ひずみが約0.05-0.1%である。この値は、実験で得られた値や解析計算の結果と良く一致している。一方で、電極近傍では、最大で240MPa、0.14%となり、電極から離れた部分では倍以上の応力となることが分かった。これは、電極部分では補強構造がないためと考えられる。計算では、電極を固定するボルトの影響も調べ、ボルトをもう一本増やして3本で電極を上部円板に固定することで、100MPaまで電磁力を軽減できることが分かった。すなわち、YOROI 構造では、補強構造である上下円板と外周リングの固定が問題であり、ボルト位置を最適化することが重要と結論できる。

(3) 50T 超伝導マグネット検討

次に新しい補強構造が50Tに適用できるか検討した。バックアップ磁場を18Tと設定し、5つの同心円状コイルを仮定し、最内層コイルを検討した。コイル及び補強材の最大電磁

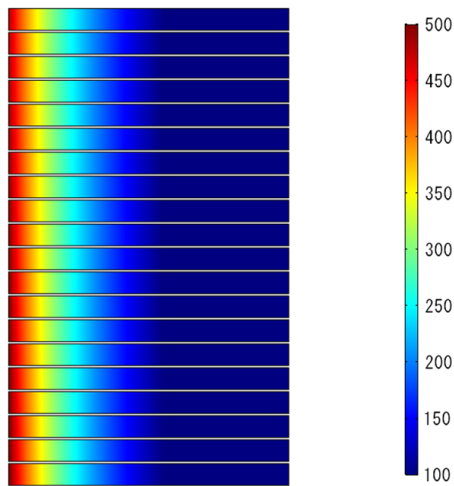


図6 50T 超伝導マグネット用最内層コイルの応力分布計算結果

力を 500MPa 以下として検討した結果，内半径を 20mm，外半径を 71.5mm のコイルに，外半径 220mm 以上の補強リングの時に，コイルの最大 hoop 力が 500MPa 以下となることが分かった。このとき，図 5 に示すように内外リングをコイル上下の円板で補強する構造となっており，補強構造は 1 体とした。50T 発生時のコイル内部の電磁力分布を図 6 に示す。図 6 はコイルの上半分のみを示してある。図から分かるように，コイルにかかる応力は上下でほぼ均等となり，最内層で最大 500MPa となることが分かる。次に補強構造の応力分布を図 7 に示す。コイル内側に 1mm 厚の内リングを設けているが，これによって上下円板の内側に応力集中を起こすことを防いでいる。結果として，補強材の最大応力は 400MPa 程度となり，500MPa の hoop 力以下で 50T マグネットの設計が可能であることが分かった。

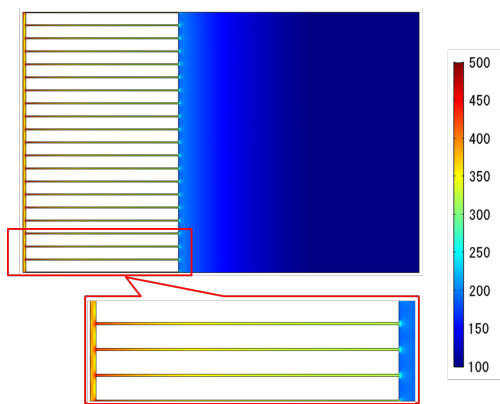


図7 50T 超伝導マグネット最内層コイルの補強構造内部の応力分布計算結果

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 4 件)

- ① Influence of Bolt Positions and Electrode Structure in Yoroi-Coil Structure on Stress Distribution in an HTS Coil Winding, M. Kato, D. Miyagi, M. Tsuda, S. Awaji, IEEE Trans. Appl. Supercond., 28 (2018) 4600505 (5pp), 査読有.
- ② Progress of “Yoroi-Coil Structure” in Mechanical Strength With High Current Density, T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Awaji, H. Oguro, A. Ishiyama, M. Hojo, M. Nishikawa, IEEE Trans. Appl. Supercond., 27 (2017) 4602305 (5pp), 査読有.
- ③ First performance test of a 25 T cryogen-free superconducting magnet, S. Awaji, K. Watanabe, H. Oguro, H. Miyazaki, S. Hanai, T. Tosaka, S. Ioka, Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 065001 (8pp), 査読有.
- ④ Strengthening Effect of “Yoroi-Coil Structure” Against Electromagnetic Force, T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Awaji, H. Oguro, Y. Tsuchiya, T. Omura, S. Nimori, T. Shimizu, A. Ishiyama, X. Wang, IEEE Trans. Appl. Supercond., 25 (2015) 8400204 (4pp), 査読有.

[学会発表] (計 11 件)

【国際会議】

- ① [Pleanary] Learning from R&D and operation of HTS insert coil for high field magnet, S. Awaji, European Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS) 2017, Sep. 17-21, 2017, Geneva, Switzerland.
- ② Influence of Bolt Positions and Electrode Structure in Yoroi-Coil Structure on Stress Distribution in an HTS Coil Winding, M. Kato, D. Miyagi, M. Tsuda, S. Awaji, International Conference on Magnetic Technology 2017 (MT25), Aug. 27- Sep. 1, 2017, Amsterdam, Netherlands.
- ③ Electromechanical analysis of REBCO pancake coils reinforced by an outer-shell structure, S. Awaji, K. Takahashi, T. Okada, M. Kato, D. Miyagi, M. Tsuda, CHATS on Applied Superconductivity 2017, Dec. 10-12, 2017, Sendai, Japan.
- ④ Progress of “Yoroi-coil Structure” in Mechanical Strength with High Current Density, T. Watanabe, S. Nagaya, N. Hirano, S. Awaji, H. Oguro, A. Ishiyama, M. Hojo, M. Nishikawa, Applied Supercond. Conference 2016, Sep. 4-9, 2016, Denver, CO, USA.

- ⑤ [Invited] 1st Performance Test of the 25 T Cryogen-free Superconducting Magnet, S. Awaji, K. Watanabe, H. Oguro, H. Miyazaki, S. Hanai, T. Tosaka, S. Ioka, Applied Supercond. Conference 2016 Sep. 4-9, 2016, Denver, CO, USA.

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者
長屋 重夫 (NAGAYA Shigeo)
中部電力 (株)

【国内会議】

- ① 加藤雅大, 宮城大輔, 津田 理, 淡路 智, 電気学会 超電導機器研究会「超電導応用ならびに材料関連技術」, 2017年1月19-20日, 新潟
- ② 淡路 智, 高橋弘紀, 岡田達典, 加藤雅大, 宮城大輔, 津田 理, 渡辺智則, 長屋重夫, 2017年度春季低温工学・超電導学会, 2017年5月22-24日, 東京
- ③ 加藤雅大, 宮城大輔, 津田 理, 高橋弘紀, 淡路 智, 2017年度春季低温工学・超電導学会, 2017年5月22-24日, 東京
- ④ 加藤雅大, 宮城大輔, 津田 理, 高橋弘紀, 淡路 智, 2017年度秋季低温工学・超電導学会, 2017年11月21-23日, 高知
- ⑤ 加藤雅大, 宮城大輔, 津田 理, 高橋弘紀, 淡路 智, 電気学会 超電導機器研究会「超電導応用ならびに材料関連技術」2017年7月20-21日, 福島
- ⑥ 加藤雅大, 宮城大輔, 津田 理, 高橋弘紀, 淡路 智, 電気学会金属・セラミックス/超電導機器行動研究会, 2016年8月30-31日, 仙台 (宮城)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

淡路 智 (AWAJI Satoshi)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号: 10222770

(2) 研究分担者

小黒 英俊 (OGURO Hidetoshi)
東北大学・金属材料研究所・助教
研究者番号: 90567471
(他大学へ転出)

津田 理 (TSUDA Makoto)
東北大学・工学研究科・教授
研究者番号: 10267411

宮城 大輔 (MIYAGI Daisuke)
東北大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 10346413