

令和元年5月27日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06237

研究課題名(和文) JT-60SA用CSにおける熱的安定性評価

研究課題名(英文) Investigation of thermal stability in JT-60SA CS module

研究代表者

中村 一也 (Nakamura, Kazuya)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：00407339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：JT-60SAはITERの早期実現のためのプロジェクトである。JT-60SAの超伝導マグネットシステムは18個のトロイダル磁場コイル、4つの電氣的に独立したセントラルソレノイド、及び6つの並行磁場コイルから構成されている。隣接するコイルから様々な磁界が印加され、この磁界が時間変化し超伝導コイルに共振現象や交流損失が発生する。これらの要因を把握することによりコイルのプラズマ運転に役立てることを目的とした。以下に結果を示す。(1) CS内共振特性解析では共振特性により最大電圧値が設計値を超えないことを示した。(2) CSモデルコイルの冷却安定性解析では、実験値と解析値が一致して解析の妥当性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合の研究開発は様々な機関で行われている。現在、国際熱核融合実験炉(ITER)計画が各国の協力のもと進められている。本研究で主に用いられるJT-60SA用CSモジュールの設計概念はITERのCSモジュールと同一であるため、CSの熱的安定性評価はプラズマ運転時に非常に重要な位置づけと考えられる。これらの結果はITERのみならず将来の実証炉に用いられる大型超伝導コイルの礎となる。

研究成果の概要(英文)：The JT-60 Super Advanced (JT-60SA) is a fusion experiment designed to support the operation of ITER. The superconducting magnet system for the JT-60SA consists of the poloidal field coil and toroidal field coil. The PF coil consists of the central solenoid (CS) and equilibrium field coils. When a time-varying magnetic field is applied to the coils, the resonance phenomenon and AC losses in the coil occur, and the temperature margin of the coil decreases. And hence, to protect this coil system, it is necessary to understand the voltage behavior and temperature margin of the coil. The results of the work are as follows; (1) Resonance phenomenon of the CS: The resonance characteristics and the voltage distribution between the conductors were evaluated considering the influence of structures. (2) Analysis of the cooldown of the JT-60SA CS model coil: We measured the temperature of the JT-60SA CS model coil under cooldown. Based on these experimental results, the thermal model was created.

研究分野：電気工学

キーワード：超伝導工学 電気工学 JT-60SA central solenoid Stability

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2014 年度初めから、核融合炉の実現に向け、超伝導型核融合実験装置 (JT-60SA) の建設が日本原子力研究開発機構の那珂核融合研究所で始まった。JT-60SA の位置づけは国際熱核融合実験炉 (ITER) の建設・運転に必要な炉心プラズマ技術の研究開発、原型炉に向けた研究開発、そして高温プラズマの物理の解明に関する研究開発が挙げられる。

JT-60SA は JT-60 のトカマク本体を日本と EU の協力で超伝導化したものである。JT-60SA トカマク本体 (Fig. 1 参照) は 18 個のトロイダル磁場 (TF: Toroidal Field) コイル、4 個の中心ソレノイド (CS: Center Solenoid) と 6 個の平衡磁場 (EF: Equilibrium Field) から構成されている。日本が担当しているのは CS と EF コイルで 2010 年から量産体制に入っている。

上記のコイルを超伝導化するためには様々な問題が発生する。

例えば、本研究に関わるところとしては、核融合炉内の超伝導コイルには隣接するコイルの影響から様々な磁界が印加される。この磁界が時間変化するとコイル間での共振現象及び超伝導コイルに損失 (交流損失) が発生する。これらは超伝導コイルの安定性を阻害する主要な原因である。そのため、超伝導コイルを安定に連続通電するためには、このような不安定要因を定量的に見積もり、必要に応じて対策を講じることが肝要である。

本研究では、JT-60SA 計画で使用される CS を用いて、種々の条件にて測定を行う。それらのデータをもとに CS の安定性を確認し、併せて理論的な解析を実施して試験結果との比較検討を行う。

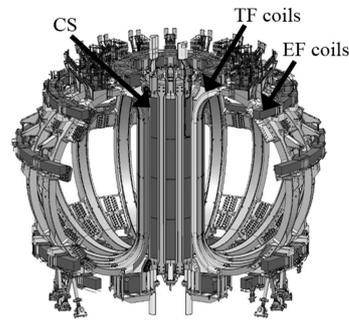


Fig. 1. JT-60SA トカマク本体概要図

2. 研究の目的

JT-60SA 用超伝導コイルは実証試験の段階まで進んでいる。日本が担当している CS モジュールの設計概念は ITER の CS モジュールと同一であるため、非常に重要な位置づけとなっている。この実証試験の一環として、本研究では JT-60SA 用 CS における熱的安定性評価を目的とする。核融合炉内超伝導コイルは隣接するコイルの影響から様々な磁界が印加され、その結果、共振現象や交流損失が発生する。これらの要因は超伝導コイルの温度を上昇させ、安定性を阻害する要因の一つである。これらを定量的に見積り、熱的安定性評価を行い、超伝導コイルの安定性を評価することは、核融合炉用超伝導コイル技術の早期実用化に寄与すると考えられる。

3. 研究の方法

研究期間 3 年間 (平成 28-30 年度) で行ったことを列挙する。(1) CS モデルコイル試験, (2) CS モジュールの安定性評価解析, (3) CS モジュールの冷却安定性評価。これらの研究の成果は、国内では、電気学会全国大会、電気学会研究会、また国外では Conference on Magnet Technology (磁石技術会議) や Applied Superconductivity Conference (応用超伝導会議) で発表し、積極的な成果の発信を行った。研究体制は日本原子力開発研究機構からは村上陽之氏及び夏目恭平氏から助言を受けた。日本原子力研究開発機構とは平成 27-29 年度の共同研究 (代表) を締結済みである。また、実験・シミュレーション等において、研究室の大学院生の協力が得られた。また、研究が当初計画どおりに進むように定期的に打ち合わせを行った。

4. 研究成果

(1) CS モデルコイル試験結果

超伝導コイルの問題点の 1 つに導体間絶縁の耐電圧が挙げられる。JT60-SA CS モジュールには 10 kV の電圧が印可されるため、理想的に電圧降下が発生した場合、各層には 0.38 kV の電圧がかかる。しかし、共振現象によるコイル内で不均一な電圧分布が原因となり、理論値よりも高い電圧が導体間にかかる可能性がある。そのため、共振現象の特性を理解する必要がある。そこで、CS に用いられる 4 層パンケーキコイルと同様の材料、構造を持つ CS モデルコイルを用い、共振特性試験を行った。CS モデルコイルを Fig. 2 に示す。CS モデルコイルは実機 4 層パンケーキコイルと同様の材料、構造であり、撚線は Nb₃Sn 素線及び銅線から成り、導体間はエポキシガラス、カプトンテープによって絶縁されている。試験には電源として振幅 5 V、周波数を 0.1 から 1000 kHz まで発生させるファンクションジェネレータ及び周

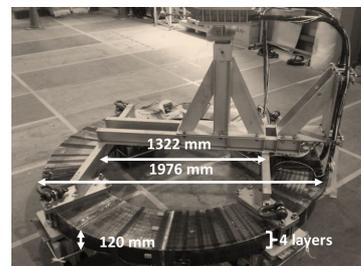


Fig. 2. CS モデルコイル

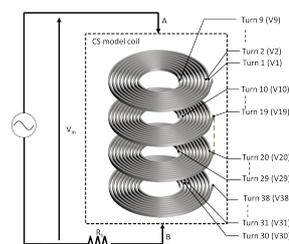


Fig. 3. 試験回路概略図

波数に依存しない 1 m のシャント抵抗を用いた。本試験は常温で行い, Fig. 3 に示す AB 間に電圧を印加し, V_{in} , V_6 , V_8 , V_{19} , V_{30} , V_{32} , V_{34} を測定した。測定結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 の縦軸は CS モデルコイルに印加した電圧 V_{in} で規格化した。Fig. 4 より 150 kHz までは均一に分圧がされていた。しかし, 150 kHz 以降では各ターン間のインダクタンス, キャパシタンスでの共振現象によって, 不均一な電圧分布となった。特に, 750 kHz で規格電圧の最大値が 6 ターン目で 2.1 となった。これらの実験結果をもとに安定性評価解析モデルを作成した。

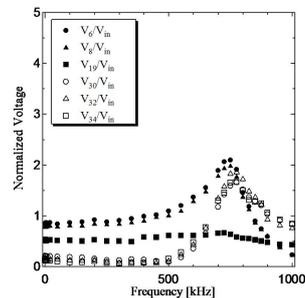


Fig. 4. CS モデルコイルにおけるターン間電圧の周波数特性

(2) CS モジュールの安定性評価解析

(1) で得られた実験結果をもとに JT-60SA モジュールに電源, プスパー, 接地抵抗を考慮にいたれた, 回路解析モデルを作成した。Fig. 5 に作成した回路解析モデルを示す。解析モデルは電源, CS モジュール, 電源と CS モジュールの間にある常温プスパーと超伝導電流フィードおよび, 接地抵抗で構成される。CS モジュールの各素子は長手方向の抵抗, インダクタンス, 巻き線間, また巻き線と構造物間のコンダクタンス及びキャパシタンスで構成されている。巻

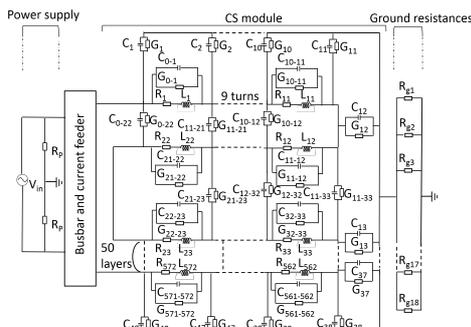


Fig. 5. CS モジュール回路解析モデル

き線間, また巻き線と構造物間のコンダクタンス及びキャパシタンスは数値計算より算出している。インダクタンスはノイマンの式を基に算出した。長手方向の抵抗は銅の抵抗率及び形状から算出した。接地抵抗は 18 個の抵抗 (100 m) から構成されている。

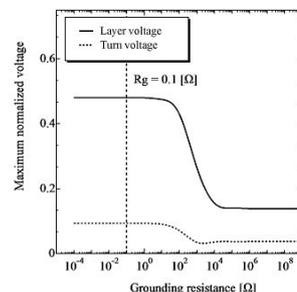


Fig. 6. 共振時最大電圧値の接地抵抗依存性

Fig. 6 は共振時の規格化したターン間および層間の最大電圧値と接地抵抗の関係を示す。この結果より, 接地抵抗が 10 以下の領域では最大電圧値は一定の値を保つことが示された。これより接地抵抗の値が設計値に対して誤差を含んでいたとしても, コイル内電圧に対しての影響は無視できるほど小さいことが示された。

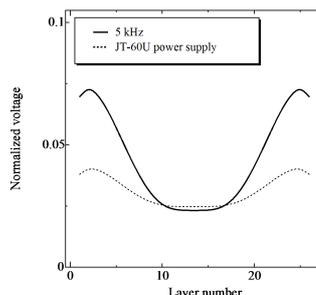


Fig. 7 CS モジュール層間電圧分布

Fig. 7 は解析回路の電源に 5 kHz 正弦波の電圧波形を用いた場合と JT-60 用電源波形を用いたときの CS モジュール層間最大電圧の比較を示す。JT-60 用電源波形を入力とした場合の方が, 最大電圧値は減少している。この結果より, CS 内の最大電圧値は設計値である 0.077 を超えないため共振現象が CS の運転に対し影響を及ぼすことはないことが示された。

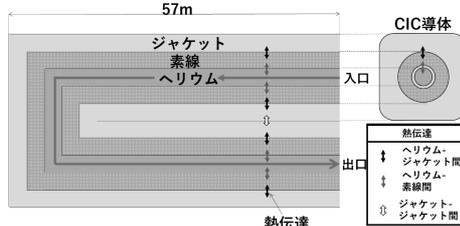


Fig. 8 解析モデル

(3) CS モジュールの冷却安定性評価

JT-60SA 用超伝導コイルの CS は運転時ヘリウムで冷却される。常温から冷却を行う場合, 熱応力が発生するため, 急速な冷却は導体の損傷をまねく。そのため, CS のクールダウン時の温度分布を把握することは重要である。

本研究ではクールダウン時の CS モジュール導体内温度分布解析を行った。Fig. 8 に解析モデルを示す。一対のヘリウム入口, 出口に対して二層のパンケーキコイルの冷却を行っている。ヘリウム-素線間, ヘリウム-ジャケット間, ジャケット-ジャケット間で熱伝達を考慮にいたれた。その結果から, 導体 Bundle 部に流れるヘリウム, 素線, ジャケットの支配方程式を算出した。今回の解析は, 簡略化のため, ターン間の熱伝達率は考慮していない

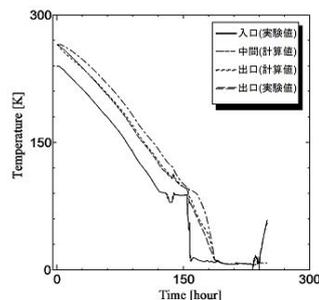


Fig. 9. 導体内ヘリウム温度

Fig. 9 に 2016 年 12 月 7, 8 日に核融合科学研究所 (NIFS) で行った CS モジュール冷却試験結果 (クールダウン時導体内ヘリウム温度) と本研究で行った

解析結果を示す。この結果，実験値と解析値が一致する結果となった。その結果，解析の妥当性が示された。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- (1) K. Nakamura, S. Fujiyama, K. Nasu, H. Meguro, T. Takao, H. Murakami, K. Natsume, K. Kizu “Evaluation of Voltage Between Conductors for Resonance Phenomenon and Transient Response in JT-60SA Central Solenoid”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 3, Article#: 4201205, DOI:10.1109/TASC.2017.2780049 査読あり(2018).
- (2) K. Nakamura, K. Suzuki, S. Fujiyama, K. Nasu, T. Takao, H. Murakami, K. Natsume, K. Yoshida, Y. Koide “Influence of Resonance Phenomenon on Voltage Distribution in Central Solenoid of JT-60SA”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, Article#: 4200404, DOI:10.1109/TASC.2016.2628916 査読あり(2017).
- (3) K. Nakamura, Y. Yamamoto, K. Suzuki, S. Fujiyama, T. Takao, H. Murakami, K. Natsume, K. Yoshida “Thermal Stability of Conductor Joint for JT-60SA Central Solenoid”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, Article#: 4200304, DOI:10.1109/TASC.2015.2513206 査読あり(2016)

〔学会発表〕(計 10 件)

- (1) 園田翔梧，那須京介，目黒博嵩，中村一也，村上陽之，夏目恭平，福井良磨，磯野高明，JT-60SA CS モジュールにおける接地抵抗の影響による導体間電圧の評価，平成 31 年電気学会全国大会，北海道(2019 年 3 月)。
- (2) K. Nasu, K. Nakamura, H. Meguro, S. Sonoda, T. Takao, H. Murakami, K. Natsume, K. Fukui, K. Kamiya, K. Kizu, T. Isono, Investigation of Voltage Distribution Affected by Ground Resistance in JT-60SA CS module, ASC2018, Seattle, USA (2018 年 10 月)。
- (3) K. Nakamura, K. Nasu, H. Meguro, S. Sonoda, T. Takao, H. Murakami, K. Natsume, K. Fukui, K. Kamiya, K. Kizu and T. Isono, Behavior of Voltage between Conductors due to the grounding resistance in JT-60SA Central Solenoid, ICEC27-ICMC 2018, Oxford, England (2018 年 9 月)。
- (4) 目黒博嵩，那須京介，中村一也，高尾智明，村上陽之，夏目恭平，木津要，JT-60SA 中心ソレノイド用電源の周波数成分が導体間電圧にもたらす影響，平成 30 年電力・エネルギー部門大会，徳島 (2018 年 9 月)。
- (5) 目黒博嵩，那須京介，園田翔梧，中村一也，高尾智明，村上陽之，夏目恭平，木津要，JT-60SA 中心ソレノイドにおける電圧分布と絶縁材料の電気的特性との関係，金属・セラミック/超電導機器金属合同研究会，東京 (2018 年 7 月)。
- (6) 目黒博嵩，藤山奨，那須京介，中村一也，高尾智明，村上陽之，夏目恭平，木津要，JT-60SA 中心ソレノイドにおける過渡応答による導体間電圧の評価，平成 30 年電気学会全国大会，福岡 (2018 年 3 月)。
- (7) 藤山奨，那須京介，目黒博嵩，中村一也，高尾智明，村上陽之，夏目恭平，木津要，JT-60SA 中心ソレノイドにおける共振現象による導体間電圧の挙動について，金属・セラミック/超電導機器金属合同研究会，名古屋 (2018 年 1 月)。
- (8) 那須京介，鈴木一輝，藤山奨，中村一也，高尾智明，村上陽之，夏目恭平，木津要，JT-60SA 中心ソレノイドにおける共振現象の電圧分布への影響”，平成 29 年電気学会全国大会，富山 (2017 年 3 月)。
- (9) 鈴木一輝，藤山奨，那須京介，中村一也，高尾智明，村上陽之，夏目恭平，木津要，JT-60SA 中心ソレノイドにおける共振特性及び電圧の不均一性について，超電導機器研究会，新潟 (2017 年 1 月)。
- (10) 藤山奨，鈴木一輝，中村一也，高尾智明，村上陽之，夏目恭平，小出芳彦，JT-60SA 中心ソレノイド導体間接続部における熱的安定性評価，超電導機器/金属・セラミック合同研究会，大阪 (2016 年 6 月)。