

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04422

研究課題名（和文）JT-60SA超伝導コイルの電氣的安定性及び冷却安定性評価

研究課題名（英文）Study on Stability of Voltage between Conductors and Cooling in JT-60SA Poloidal Field coil

研究代表者

中村 一也（NAKAMURA, KAZUYA）

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：00407339

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：JT-60SA超伝導コイルには隣接するコイルから様々な磁界が印加され、コイル内に誘導電流が発生し、交流損失が発生する。この交流損失はコイル内の冷媒（超臨界ヘリウム）温度上昇、圧力上昇を発生させ、コイルの安定性を阻害する要因の一つである。本研究ではこの要因を定量的に見積もりコイルの電氣的及び冷却安定性の評価を行った。以下に結果を示す。（1）JT-60SA PFコイルの電源による共振現象はPFコイルの運転に対して影響を及ぼさないことを示した。さらに、受動構造物によるPFコイルの導体間電圧への影響は小さいことを示した。（2）JT-60 CS冷却時のコイル内温度分布を示し、冷却時の運転指針も示した。

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 CSの設計概念はITERのCSモジュールと同一であるため、それらのコイルの電氣的安定性及び冷却安定性の評価は実機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 superconducting magnet system for the JT-60 Super Advanced (JT-60SA) consists of the poloidal field coil (PF) and toroidal field coil (TF). 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 the 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) A circuit simulation model of the JT-60SA PF coils with the passive structures (cryostat, vacuum vessel and stabilizing plate) was developed. As a result, the influence of the passive structures on the layer voltage in the PF coils is small. (2) we developed an analytical model to estimate the temperature distribution for the helium, strands, and jacket in the conductor from the measurement of the JT-60SA CSMC cool-down test.

研究分野：電気工学

キーワード：超伝導工学 核融合実験装置 JT-60SA

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

平成 26 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)の建設が量子科学技術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)コイルとポロイダル磁場(PF: Poloidal Field)コイルで構成されている。

PF コイルは 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 PF コイルで平成 22 年度から量産体制に入り、本研究開始当初は核融合実験装置の組み立てがされていた。令和 2 年度以降に超伝導コイルの冷却が始まり、現在、様々な実験が行われている。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、超伝導コイルは隣接するコイル及び周辺機器の影響から様々な変動磁界が印加され、その結果、損失が発生する。その損失は超伝導コイルの温度上昇にともなう超伝導状態の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、電気的安定性評価を行い、それらの結果を用いて、超伝導コイルの冷却システムモデルを作成し、超伝導コイルの熱的安定性の評価をすることは非常に重要である。

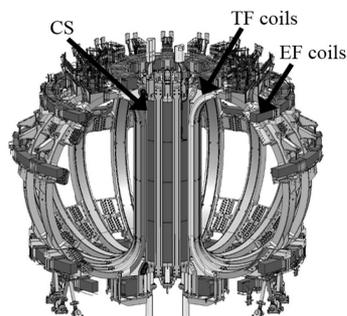


Fig. 1. JT-60SA トカマク本体概要図

2. 研究の目的

JT-60SA 超伝導コイルには隣接するコイルから様々な磁界が印加され、コイル内に誘導電流が発生し、交流損失が発生する。この交流損失はコイル内の冷媒(超臨界ヘリウム)温度上昇、圧力上昇を発生させ、コイル通電やヘリウム冷凍機の運転に影響を与えるため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、電気的安定性評価を行い、超伝導コイルの冷却システムモデルを構築することは、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。

本研究では、JT-60SA 電源電圧変動を考慮した過渡応答及びコイル内共振特性解析、JT-60SA 超伝導コイルのクールダウン時のコイル内温度分布解析を行い JT-60SA 超伝導コイルの安定性を評価することを目的とした。

3. 研究の方法

研究期間 4 年間(令和 2-5 年度)で行ったことを列挙する。(1) JT-60SA PF コイル内電圧分布解析、(2) JT-60SA CS のクールダウン時における冷却安定性評価。これらの研究成果は、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。研究体制は量子科学技術研究開発機構からは濱田 一弥氏、村上 陽之氏、福井 良磨氏から助言を受けた。量子科学技術研究開発機構とは研究機関内は共同研究(代表)を締結し行った。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) JT-60SA PF コイル内電圧分布解析

JT-60SA 超伝導コイルの PF コイルは 4 つの CS モジュールと 6 個の EF コイルから構成されている。PF コイルの電源電圧は、システムの影響により生じる電圧変動を有するため、コイルに印加された場合、過渡応答及び共振現象が発生し、コイル内の電圧分布は不均一になる。その結果、局部的に集中した電圧はコイルの定格電圧を超える可能性がある。

本研究では、令和 2-3 年度に JT-60SA CS 電源の測定結果を用いて、電流リード、4 つの CS モジュール、構造物を含む回路モデルを作成し、過渡応答及び共振現象による導体間電圧への影響の

評価を行った。令和 4 年度に JT-60SA EF6 電源の測定結果を用いて、電流リード、EF6、構造物を含む回路モデルを作成し、過渡応答及び共振現象による導体間電圧への影響の評価を行った。令和 5 年度には、令和 2-4 年度で作成した回路モデルを基に Fig. 2 に示した JT-60SA PF コイ

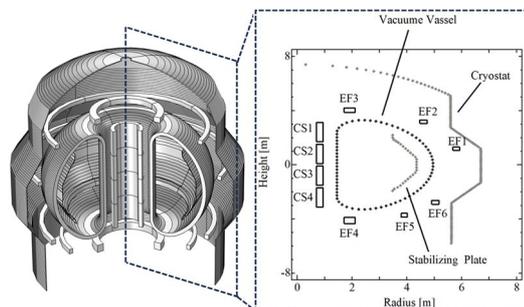


Fig. 2. JT-60SA PF コイル及び受動構造物の配置図

ル及び受動構造物(クライオスタット,真空容器,安定化板)を含む回路モデルを作成し,受動構造物による導体間電圧への影響を評価した。

最大導体間電圧が発生するEF1に5 kHzまでの交流電源を印加した時のEF1内の最大導体間電圧をFig. 3に示す。縦軸は実機運転時の印加電圧である5 kVで規格化した。EF1以外のコイルは電源を短絡している。EF1では,受動構造物の有無によって,導体間電圧はほぼ変化しなかった。EF1インパルス試験結果より,EF1の規格化導体間定格電圧は0.88(=インパルス電圧4.4 kV/5 kV)である。JT-60SAの電源に含まれる周波数成分である5 kHz以下では,最大規格化電圧は0.21であり,規格化導体間定格電圧よりも小さい結果となった。CS1に5 kHzまでの交流電源を印加した時のCS1内の最大導体間電圧をFig. 4に示す。CS1以外のコイルは電源を短絡している。CS1においても,受動構造物の有無によって,導体間電圧はほぼ変化しなかった。CS1インパルス試験結果より,CS1の規格化導体間定格電圧は0.26(=インパルス電圧1.3 kV/5 kV)である。5 kHz以下では,最大規格化電圧は0.071であり,規格化導体間定格電圧よりも小さい結果となった。これらの結果から,JT-60SA PFコイルの電源による共振現象はPFコイルの運転に対して影響を及ぼさないことが示された。さらに,受動構造物によるPFコイルの導体間電圧への影響は小さいことが示された。

(2) JT-60SA CSのクールダウン時における冷却安定性評価

JT-60SA CSは,運転時,ヘリウムで冷却される。常温から運転温度まで冷却を行う際,過度な熱応力の発生を防ぐため,コイル内の最大温度差を40 K以内にする必要がある。しかし,CSモジュール冷却試験より,冷媒出口温度はコイル内の最大温度を示さないことが報告されている。そのため,クールダウン時のコイル内温度分布を把握することは重要である。

本研究では,令和2-5年度にかけて,これまでに実施したCSモデルコイル(CSMC)及びJT-60SA実機冷却試験の結果を用いて,CS内の温度分布解析モデルを作成し,冷媒の質量流量や供給温度を変化させた際のコイル内の最大温度差や冷却速度への影響を評価した。

Fig. 5にCS温度分布解析モデルを示す。解析モデルは4層11ターンのコイルから構成されている。CSでは1対の冷媒inletとoutletに対して2層のパンケーキコイルの冷却を行っている。したがって,解析モデルは2つの流路から構成されている。コイル内の温度は導体内のヘリウム,ジャケット,素線の支配方程式から算出された。ヘリウム-ジャケット間の熱伝達,ヘリウム-素線間,隣接するジャケット-ジャケット間の熱伝達を考慮に入れた。隣接するジャケット間の熱伝達率はフィッティングパラメータとして,CSMC冷却試験及びJT-60SA実機冷却試験から算出した。Fig. 6に冷媒inletとoutletの温度差を変化させた際のコイル内最大温度差及び冷却速度を示す。室温(300 K)から80 Kまでのクールダウン中,冷媒inletとoutletの温度差を各値で一定に保った。冷媒inletとoutletの温度差を20から50 Kまで変化させた時,コイル内の最大温度差は28.8から71.1 Kまで増加し,冷却速度は0.63から1.75 K/hまで増加した。この結果,冷媒inletとoutlet温度差とコイル内の最大温度差及び冷却速度の関係が示された。また,目標となる冷却時間やコイル内の最大温度差の制約に対して,冷媒inletとoutlet温度差を設定するための指針が示された。

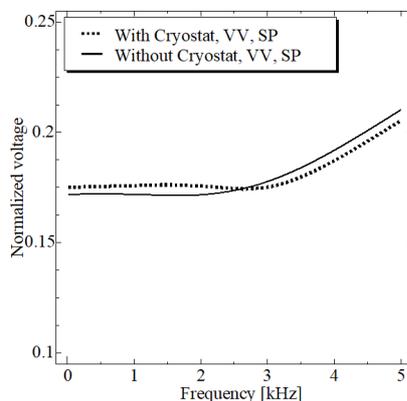


Fig. 3. JT-60SA EF1 内導体間電圧の周波数特性

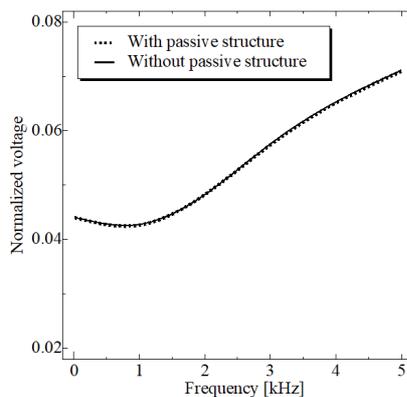


Fig. 4. JT-60SA CS1 内導体間電圧の周波数特性

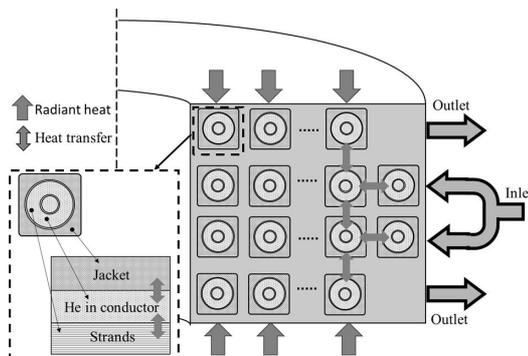


Fig. 5. JT-60SA CS温度分布解析モデル

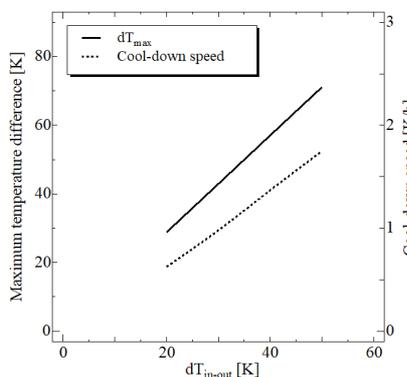


Fig. 6. 冷媒 inlet と outlet 温度差によるコイル内最大温度差及び冷却速度への影響

室温(300 K)から80 Kまでのクールダウン中,冷媒inletとoutletの温度差を各値で一定に保った。冷媒inletとoutletの温度差を20から50 Kまで変化させた時,コイル内の最大温度差は28.8から71.1 Kまで増加し,冷却速度は0.63から1.75 K/hまで増加した。この結果,冷媒inletとoutlet温度差とコイル内の最大温度差及び冷却速度の関係が示された。また,目標となる冷却時間やコイル内の最大温度差の制約に対して,冷媒inletとoutlet温度差を設定するための指針が示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sonoda Shogo, Nakamura Kazuya, Yuinawa Kotomi, Kobayashi Tomoka, Murakami Haruyuki, Hamada Kazuya, Hatakeyama Shoichi, Shimada Katsuhiko	4. 巻 33
2. 論文標題 Study on Resonance Phenomenon Caused by Voltage Fluctuation of Power Supply in JT-60SA EF Coil	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3250379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sonoda Shogo, Nakamura Kazuya, Yuinawa Kotomi, Kobayashi Tomoka, Fukui Kazuma, Murakami Haruyuki, Hamada Kazuya	4. 巻 33
2. 論文標題 Estimation of Cool-Down Speed Affected by Mass Flow Rate and Inlet Pressure in JT-60SA CS Module	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3242620	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Sonoda, K. Nakamura, Y. Hirose, K. Yuinawa, H. Murakami, K. Hamada, S. Hatakeyama, K. Takahashi,	4. 巻 32
2. 論文標題 Investigation of Transient Response Caused by Power Supply on JT-60SA Central Solenoid	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3151038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sonoda Shogo, Nakamura Kazuya, Hirose Yuta, Natsume Kyohei, Fukui Kazuma, Murakami Haruyuki, Kizu Kaname, Hamada Kazuya	4. 巻 31
2. 論文標題 Effect of She Temperature on Cool-Down Speed in JT-60SA CS Module	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3062791	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sonoda Shogo, Nakamura Kazuya, Yuinawa Kotomi, Kobayashi Tomoka, Yoshida Suzuka, Murakami Haruyuki, Hamada Kazuya, Hatakeyama Shoichi, Shimada Katsuhiro	4. 巻 34
2. 論文標題 Effects of Resonance Phenomenon on Voltage Between Conductors in JT-60SA PF Coils	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2024.3358269	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sonoda Shogo, Nakamura Kazuya, Yuinawa Kotomi, Kobayashi Tomoka, Yoshida Suzuka, Fukui Kazuma, Murakami Haruyuki, Hamada Kazuya	4. 巻 34
2. 論文標題 Effect of Cool-Down Speed on Temperature Distribution in the JT-60SA Superconducting Coil	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2024.3362752	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 S. Sonoda, K. Nakamura, K. Yuinawa, H. Murakami, K. Hamada, S. Hatakeyama, K. Takahashi
2. 発表標題 Study on Resonance Phenomenon Caused by Voltage Fluctuation of Power Supply in JT-60SA EF Coil
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yuinawa, S. Sonoda, K. Nakamura, K. Natsume, K. Fukui, H. Murakami, K. Hamada
2. 発表標題 Estimation of Cool-down Speed affected by Mass flow rate and Inlet pressure in JT-60SA CS module
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林倫香, 園田翔梧, 結縄ことみ, 中村一也, 村上陽之, 濱田一弥, 畠山昭一, 島田勝弘
2. 発表標題 JT-60SA EFコイルの過渡応答が引き起こす導体間電圧の評価
3. 学会等名 令和5年電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 園田 翔梧, 中村 一也, 結縄 ことみ, 小林 倫香, 福井 良磨, 村上 陽之, 濱田 一弥
2. 発表標題 JT-60SA CSモジュール冷却試験におけるコイル内最大温度差の推定
3. 学会等名 2022年度秋季 第104回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 園田 翔梧, 中村 一也, 結縄 ことみ, 村上 陽之, 濱田 一弥, 畠山 昭一, 高橋 幸司
2. 発表標題 JT-60SA CSにおける電源電圧による過渡応答に影響を受けた電圧分布の評価
3. 学会等名 2022年度春季 第103回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shogo Sonoda, Kazuya Nakamura, Yuta Hirose, Kotomi Yuiawa, Haruyuki Murakami, Kazuya Hamada, Shoichi Hatakeyama, Koji Takahashi
2. 発表標題 Investigation of Transient Response caused by Power Supply on JT-60SA Central Solenoid
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shogo Sonoda, Kazuya Nakamura, Yuta Hirose, Kotomi Yuiawa, Kyohei Natsume, Kazuma Fukui, Haruyuki Murakami, Kazuya Hamada
2. 発表標題 Estimation of the Cool-Down Speed under the SHe inlet condition in JT-60SA CS module
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田翔梧, 中村一也, 廣瀬雄太, 夏目恭平, 福井良磨, 村上陽之, 濱田一弥
2. 発表標題 JT-60SA CSモジュールの冷却速度による温度分布の挙動について
3. 学会等名 金属・セラミックス/超電導機器合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Sonoda, K. Nakamura, Y. Hirose, K. Natsume, K. Fukui, H. Murakami, K. Kizu, K. Hamada
2. 発表標題 Effect of SHe temperature on Cool-down Speed in JT-60SA CS module
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園田 翔梧, 廣瀬 雄太, 中村一也, 村上 陽之, 濱田 一弥
2. 発表標題 JT-60SA CSにおける構造物の影響による導体間電圧の評価
3. 学会等名 令和二年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sonoda, K. Nakamura, K. Yuinawa, T. Kobayashi, K. Fukui, H. Murakami, K. Hamada
2. 発表標題 Effect of Cool-down Speed on Temperature Distribution in the JT-60SA Superconducting coil
3. 学会等名 28th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Kobayashi, S. Sonoda, K. Nakamura, K. Yuinawa, H. Murakami, K. Hamada, S. Hatakeyama, K. Shimada
2. 発表標題 Effects of Resonance Phenomenon on Voltage between conductor in JT-60SA PF coils
3. 学会等名 28th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田 涼風, 園田 翔梧, 結縄 ことみ, 小林 倫香, 中村 一也, 高尾 智明, 村上 陽之, 濱田 一弥, 畠山 昭一, 島田 勝弘
2. 発表標題 JT-60SA PFコイル導体間電圧に対するクライオスタットの影響
3. 学会等名 令和6年電気学会全国大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------