

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05974

研究課題名（和文）超長時定数を有するループ電流が大型超伝導コイルの安定性に与える影響の解明

研究課題名（英文）Investigation of the effect of loop current with very long time constant on the stability of large superconducting coils

研究代表者

尾花 哲浩（Obana, Tetsuhiro）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：60435518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,000,000円

研究成果の概要（和文）：多数の素線からなる超伝導体を用いて製作した大型超伝導コイルの自己磁場測定を行った。その結果、超伝導コイル内において、最長で数百秒程の時定数を有する遮蔽電流が発生していることを確認した。また、そのような遮蔽電流が発生する原因は、導体端部の電流経路が関係していることを明らかにした。更に、遮蔽電流によって生じる超伝導体内での不均一な電流分布と熱的安定性の関係を、数値解析によって明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代の発電として期待される磁場閉じ込め型核融合発電では、発電炉の中核機器として大型超伝導コイルが使用される。本研究では、大型超伝導コイルの開発を進める過程で重要となる実験データを収集することができた。更に、超伝導コイルに使用する超伝導体の性能を評価するための解析コードを開発することができた。

研究成果の概要（英文）：We measured the self-magnetic field of a large-scale superconducting coil manufactured using a superconducting conductor composed of many strands. As a result, it was confirmed that a shielding current having a time constant of several hundred seconds at the longest was generated in the superconducting coil. Moreover, it was clarified that the cause of such a shielding current is related to the current path at the end of the conductor. Furthermore, the relationship between the non-uniform current distribution in the superconducting conductor caused by the shielding current and the thermal stability was clarified by numerical analysis.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導コイル 超伝導体 磁場測定 核融合

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合用超伝導マグネットでは、『高磁場環境下での大電流通電』を実現し、更に、『高絶縁性と高剛性』をも可能にするために、ケーブル・イン・コンジット (CIC) 導体を主に使用する。CIC 導体は、図1に示すように、多数の超伝導素線を幾重にも撚り合わせたケーブルを、金属配管(ジャケット)に挿入した形状である。

1980年代から現在まで、CIC 導体を用いた大型超伝導コイルが十数基、国内外にて開発された。その内、半分程のコイルにおいて、導体特性からは全く予想できない、非常に長い減衰時定数(超長時定数)を有するループ電流の存在が確認された。CIC 導体は、変動磁場によって、超伝導素線間に生じる遮蔽電流(結合電流)を低減するための対策が取られている。そのため、CIC 導体のもつ時定数は、通常、数ミリ秒から数十ミリ秒であるのに対して、計測された時定数は、“数十秒から数千秒”である。これまでに、『超長時定数を有するループ電流』の発生機構を解明するために、様々な研究が国内を中心に進められた。その結果、コイル巻線時に生じる CIC 導体内の『撚線部(ケーブル)の撚り乱れ』が、超長時定数の原因であると、現在のところ、考えられている。残念ながら、核融合科学研究所のポロイダルコイルや日本原子力研究開発機構の CS インサートコイル等で計測された、『数千秒オーダーの超長時定数』を有するループ電流が再現できる解析モデルは、未だに開発されていない。それゆえ、実際の大型超伝導コイルで生じるループ電流が、どの程度の電流値であるのか全く見当が付かない。最悪の場合、図2 (CIC 導体の撚線部の一部を、電気回路で模擬した図) のように、コイルへの輸送電流にループ電流が重畳されて、素線の一部に常伝導が生じ、コイルがクエンチすることも考えられる。

研究代表者は、大型超伝導コイル製作の開始を決断する際、非常に重要な要素となる“短尺サンプル(全長2m程)”を用いた CIC 導体の性能評価に、これまで従事してきた。現状のコイル製作の指針では、CIC 導体を長尺化(コイル形状化)したとしても、短尺サンプルの性能が、そのまま再現されると考えられている。そのため、導体を“長尺化(コイル形状化)”することで生じる『超長時定数を有するループ電流』が、どの程度、大型超伝導コイルの性能に影響を与えるのか非常に懸念される。

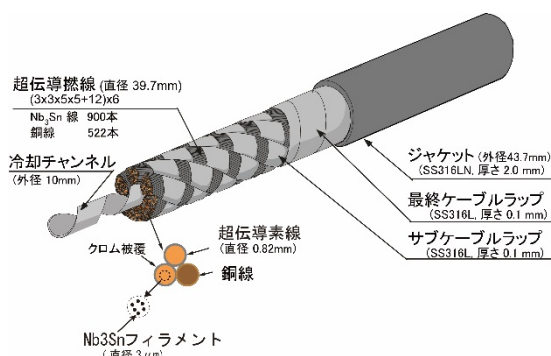


図1 CIC 導体の概略図

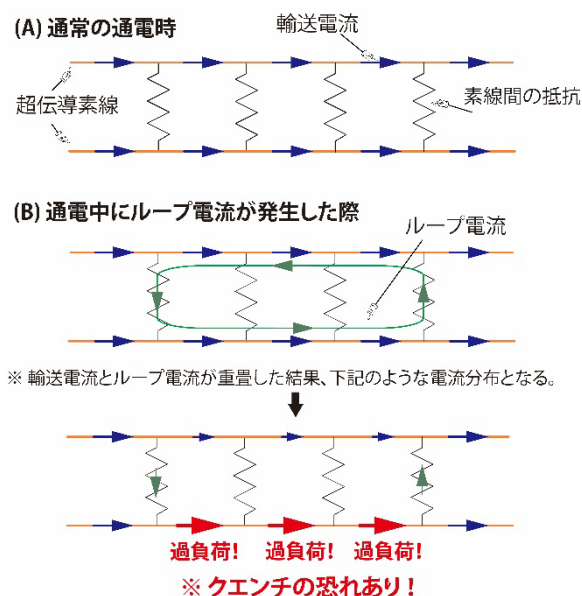


図2 CIC 導体の撚線部の一部を分布定数回路化

2. 研究の目的

大型超伝導コイルで発生する『超長時定数を有するループ電流』の定量的な評価が、未だにできていない。そこで、本研究では、CIC 導体の撚線部を分布定数回路で模擬した解析コードを開発し、『超長時定数を有するループ電流』が、どのような条件の際に発生するのか調査する。

また、『超長時定数を有するループ電流』が、超伝導コイルの性能に、どのような影響を与えるのか現在のところ全く分かっていない。そこで、『超長時定数を有するループ電流』が、どのように、コイルに使用する超伝導導体の安定性に影響を与えるのかを、数値解析によって、定量的に明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 磁場測定

磁場測定は、二種類の大型超伝導コイルについて行った。一方の超伝導コイルは、4層パンケーキコイル形状(巻数40、内径1.3m、外径2.0m、重量2t)であり、もう一方の超伝導コイルは、52層パンケーキコイル形状(巻数52、内径1.3m、外径2.0m、重量18t)である。各コイルの写真を、図3と図4に示す。両方の超伝導コイルには、Nb₃Sn素線からなるCIC導体(径21.0mm、ジャケットサイズ27.9mm×27.9mm)を使用している。図5に、使用したCIC導体の写真を示す。

大型超伝導コイルの自己磁場測定を行うため、コイル上面において、複数のホール素子をコイル径方向及び周方向に等間隔で配置した。磁場測定は、極低温まで冷却した超伝導コイルへ台形波通電した際に行った。本研究では、長時定数を有する磁場変化を評価するために、コイル通電ホールド時、及びコイル減磁完了後における測定結果を解析した。



図3 4層パンケーキコイル



図4 52層パンケーキコイル

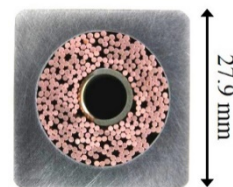


図5 CIC導体の断面

(2) 電流分布を考慮した安定性解析

複数の超伝導素線から構成される撚線での電流分布を評価するために、電気回路解析と伝熱解析からなる連成解析コードを開発した。本解析コードにおける伝熱解析では、支配方程式として、ジュール発熱、ヒーター入熱、及び冷却に関する項を含んだ非定常次元伝熱方程式を用いた。ジュール発熱の項に関しては、超伝導特性を考慮している。電気回路解析では、支配方程式として、分布定数回路を使用した。式に用いたインダクタンスは、実際の素線間を考慮して求めた。また、素線間コンダクタンスには、実測したデータを使用した。上記のような連成解析コードを用いて、『超長時定数を有するループ電流』に因る不均一な電流分布が生じたCIC導体の熱的安定性に関して数値解析を行った。本解析では、モデルの簡略化、及び解析時間の短縮化のため、2本の超伝導線からなるモデルを使用した。

4. 研究成果

(1) 磁場測定

CIC導体を用いた二種類の大型超伝導コイルの磁場測定を行い、測定結果を解析した。その結果、4層パンケーキコイルでは、通電電流値20kAホールド時において、最長570s程の時定数を有する磁場変化がみられた。また、52層パンケーキコイルでは、コイル減磁時完了後に、最長100s程の時定数を有する磁場変化がみられた。従って、各超伝導コイルにおいて、長時定数を有する遮蔽電流の発生が確認できた。

大型超伝導コイル以外において、長時定数を有する遮蔽電流の発生の有無を検証した。試験サンプルは、両端部において素線同士をハンダで接続した短尺（全長0.5m程）のCIC導体を用いた。試験では、サンプルの通電時に、サンプルの自己磁場測定を行った。その結果、短尺の試験サンプルでも最長100s程の時定数を有する磁場変化がみられた。従って、導体長は長時定数の要因とは限らないことが明らかになった。また、CIC導体での長時定数を有する遮蔽電流の発生は、導体の端部での電流経路に関係していると考えられる。

(2) 電流分布解析

本解析では、CIC導体での様々な電流分布における最小クエンチエネルギー（MQE）と温度マージンの関係を調べた。温度マージンは、導体温度と電流分流開始温度（ T_{cs} ）の差である。素線への入熱は各素線の片端で均一に行い、入熱時間は 1.0×10^{-3} 秒とした。図6に、各電流分布におけるMQEと温度マージンの関係を示す。温度マージンが増加すると、MQEは各電流分布で直線的に増加する。また、不均一な電流分布がMQEに及ぼす影響を調査するために、均一な電流分布（比率5:5）と不均一な電流分布（比率9:1）の計算結果を比較した。その結果、0.3Kの温度マージンの際、均一な電流分布のMQEは、不均一な電流分布のMQEの3.7倍となった。さらに、0.7Kの温度マージンでは、均一な電流分布のMQEは、不均一電流分布の1.5倍となった。従って、温度マージンが減少するにつれて、不均一な電流分布による熱的安定性への影響が大きくなる。

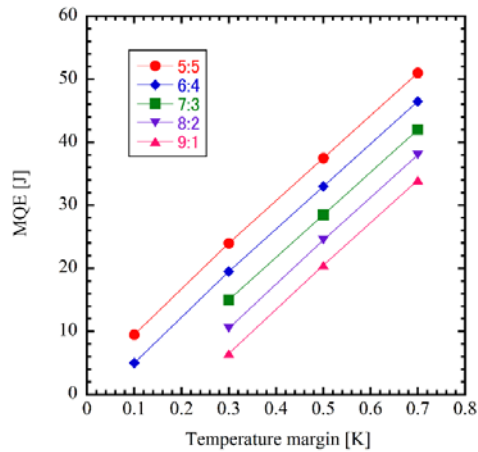


図 6 各電流分布における MQE と温度マージンの関係

(3) 新しい知見

① Nb₃Sn 素線からなる CIC 導体同士の突合せ接続部における微細構造観察

本研究で用いた大型超伝導コイルには、複数のコイル巻線を接続するために、Nb₃Sn 素線からなる CIC 導体同士の突合せ接続技術を使用している。そこで、突合せ接続技術を詳細に評価するために、突合せ接続部を含んだ CIC 導体サンプルを用いて、FE-SEM により、接続部の微細構造観察を行った。その結果は、Nb₃Sn 素線と銅板が界面で適切に接続していることを確認した(図 7)。さらに、界面近くの素線の Nb₃Sn 層にヘアライン亀裂が生じているのを確認した(図 8)。

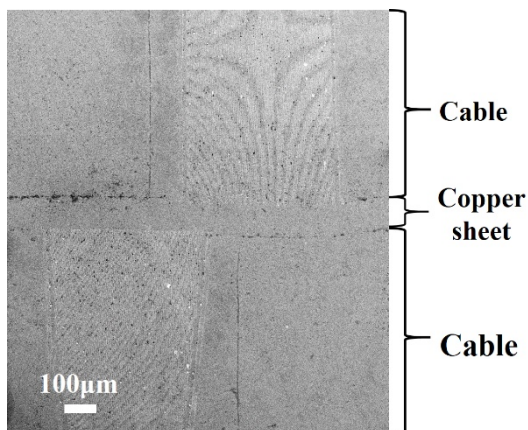


図 7 突合せ接続の界面

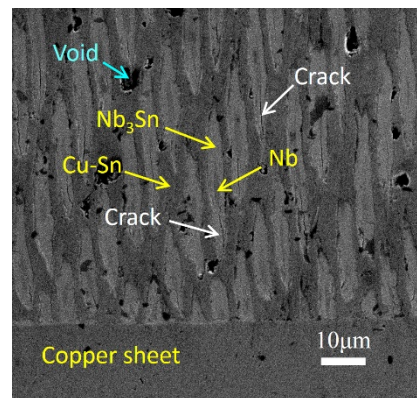


図 8 界面での Nb₃Sn フィラメントの状態

② Nb₃Sn CIC 導体を用いた多重積層型超伝導コイルのクエンチ検出の評価

Nb₃Sn CIC 導体で巻かれた多重積層型超伝導コイルにおける、電圧を活用したクエンチ検出方法について評価を行った。クエンチ検出方法として、2つのコイル巻線間のバランス電圧を用いる方法(図 9)と、1つのコイル巻線とディスク型ピックアップコイルの間でのバランス電圧を用いる方法(図 10)を使用した。本研究では、2つのクエンチ検出法の測定結果を比較するために、多重積層型超伝導コイルへの通電中におけるコイルの電圧測定を行った。その結果、図 11と図 12に示すように、2つのコイル巻線間のバランス電圧に基づくクエンチ検出は、もう一方の検出方法よりもノイズが低く抑えられ信頼性が高いことを示した。また、測定では、コイル電流が急激に変化したときにスパイク電圧が観測された。その原因として、多重積層型超伝導コイルの磁化が考えられる。クエンチ検出の基準を決定するときは、スパイク電圧を考慮したクエンチ検出システムを構築する必要がある。

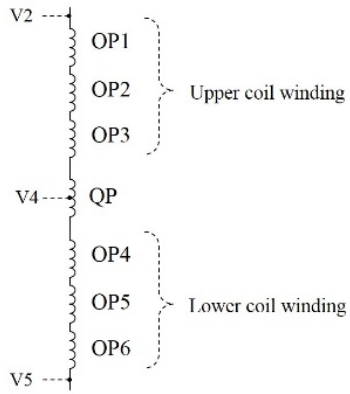


図 9 多重積層型超伝導コイルのクエンチ検出用電圧タップの位置

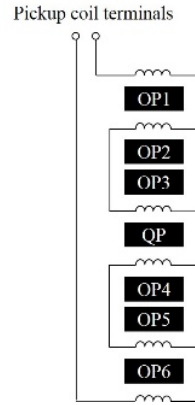


図 10 多重積層型超伝導コイルとピックアップコイルの位置関係

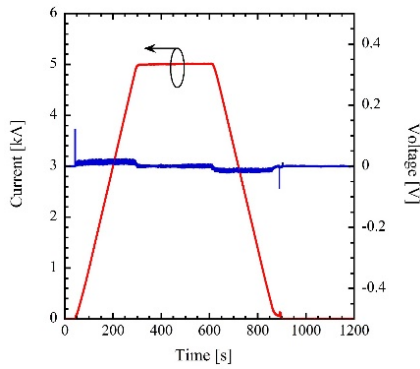


図 11 2つのコイル巻線間のバランス電圧

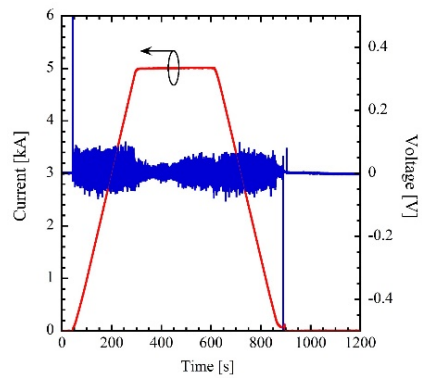


図 12 1つのコイル巻線とディスク型ピックアップコイルの間でのバランス電圧

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tetsuhiro Obana, Kazuya Takahata, Shinji Hamaguchi, Hiroataka Chikaraishi, Suguru Takada, Akifumilwamoto, Shinsaku Imagawa, Toshiyuki Mito, Haruyuki Murakami, Kyohei Natsume, Kaname Kizu	4. 巻 137
2. 論文標題 Investigation of long time constants of magnetic fields generated by the JT-60SA CS1 module	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 274-282
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.10.005	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 Obana, T., Tokitani, M., Takahata, K., Kizu, K., Murakami, H.	4. 巻 81
2. 論文標題 Microstructure observations on butt joint composed of Nb3Sn CIC conductors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Cryogenics	6. 最初と最後の頁 54-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cryogenics.2016.11.009	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 Tetsuhiro Obana, Haruyuki Murakami, Kazuya Takahata, Shinji Hamaguchi, Hiroataka Chikaraishi, Toshiyuki Mito, Shinsaku Imagawa, Kaname Kizu, Kyohei Natsume, Kiyoshi Yoshida	4. 巻 518
2. 論文標題 Performance verification tests of JT-60SA CS model coil	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Physica C	6. 最初と最後の頁 96-100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physc.2015.07.009	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 Tetsuhiro OBANA, Kazuya TAKAHATA, Haruyuki MURAKAMI	4. 巻 15
2. 論文標題 Investigation into Quench Detection for a Multi-Stacked Pancake Coil Wound with Nb3Sn CIC Conductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2405028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1585/pfr.15.2405028	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Tetsuhiro Obana
2. 発表標題 Self-magnetic field measurements of the JT-60SA CS1 module
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuhiro Obana
2. 発表標題 Magnetic field measurements of the JT-60SA CS1 module
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T Obana, K Takahata, S Hamaguchi, H Chikaraishi, S Imagawa, T Mito, H Murakami, K Natsume and K Kizu
2. 発表標題 Effect of electromagnetic force on a quad-pancake coil wound with a Nb3Sn CIC conductor
3. 学会等名 The 30th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 力石 浩孝, 今川 信作, 三戸 利行, 村上 陽之, 夏目 恭平, 木津 要
2. 発表標題 JT-60SA CSモデルコイルの流体特性
3. 学会等名 2017年秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Obana, T. , Tokitani, M., Takahata, K., Kizu, K., Murakami, H.
2. 発表標題 Microstructure observations on butt joint composed of Nb3Sn CIC conductors
3. 学会等名 国際超電導シンポジウム2016(ISS2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tetsuhiro Obana
2. 発表標題 Investigation into quench detection for a multi-stacked pancake coil wound with Nb3Sn CIC conductors
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference (ITC-28) (国際学会)
4. 発表年 2019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