

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年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：2015～2018

課題番号：15K06648

研究課題名(和文)液体ヘリウム温度下での素線配置計測に基づくCIC導体の交流損失の撚りピッチ依存性

研究課題名(英文) Investigation of twist pitch dependence on the AC loss in Cable-In-Conduit Conductor based on the measurement of strand locations at liquid helium temperature

研究代表者

谷貝 剛 (YAGAI, Tsuyoshi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：60361127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：大型マグネット用導体として最も有力なケーブル・イン・コンジット導体は、1000本を超える超電導素線が多数段にわけて撚り合わされ、金属のケースに圧縮して挿入されている。近年、特性の劣化原因が、通電中の電磁力による素線配置のズレにある事がわかり、撚りピッチを短くして、高剛性化した結果、繰り返し通電による劣化がなくなった一方で、交流損失が大きく増大した。冷却系への負担軽減のため、撚りピッチと交流損失の関係を明らかにする必要があった。解析には、素線の配置と素線間接触抵抗分布把握が重要であり、素線配置3D計測に基づく素線の詳細な位置関係と素線間接触抵抗の測定装置を開発、基盤となるデータ取得に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大型マグネットの交流損失低減は、冷却動力の削減や、安定性向上といった、ランニングコストに大きく関係する項目である。本研究では、これまで明らかにできなかった、超電導導体の撚りピッチと交流損失増大の関係を定量的に調査するものであり、複雑な導体の内部構造解析とともに、導体の運転時の挙動が解析できるのは学術的な意義が極めて大きい。さらに、核融合発電はマグネットなしには実現しないため、本研究の成果は、将来の大規模かつクリーンな電源開発に大きく貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：The Cable-In-Conduit conductor consists of thousands of strands, twisted and assembled in several stages and inserted into metallic tube, is the most promising conductor for fusion magnets. The deterioration of the performance has been observed, which has proved that the strand movement might affect the issue during cyclic loading of large electromagnetic force. To curb the movement, the shorter twist-pitch design has been introduced and results in improved performance. On the other hand, the increment of AC loss has occurred due to the drastic reduction of inter-strand resistances as a result of closer contact between strands. To reduce the loss, it was important that the relation between AC loss increment and twist pitch had been cleared based on the individual strand location measurement and the distribution of inter-strand contact resistances. In this study, the sophisticated measurement system was developed and the fundamental strand locations were successfully obtained.

研究分野：超伝導応用

キーワード：ケーブル・イン・コンジット導体 交流損失 撚りピッチ 素線配置計測 素線間接触抵抗

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

1. 研究開始当初の背景

図1は、国際協力で建設が進められている国際熱核融合実験炉(ITER)のマグネットシステムである。日本はシステム製作の内、これまでTFコイル(実線矩形内)導体の25%、を製作し、今後CSコイル(破線矩形内)導体の100%を製作する事になっており、その責任は重大である。これらのコイルに用いられる導体は、ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体で、図2のように、直径1mm程度の超電導素線及び銅素線を多数段に撚り合わせ、圧縮してステンレスのケースに収められた構造を持つ。先のTF導体の性能評価試験において、図3の白丸のように、励磁回数の増加に従って分流開始温度(常伝導へ転移する温度)が低下する現象が観測された。これは、電磁力と熱収縮応力によって、脆いNb₃Sn素線が変形して劣化するために生じる事がわかった(平成24年度若手研究(B)課題番号24760700で機構を解明した)。一番短い1次撚りピッチが45mmで設計されてきたため、素線変位を防止する目的で1次撚りピッチを25mmに短くし、高次の撚りピッチもそれぞれ短くする事で素線同士を密に結合させ、この問題を回避した(図3黒シンボル)。

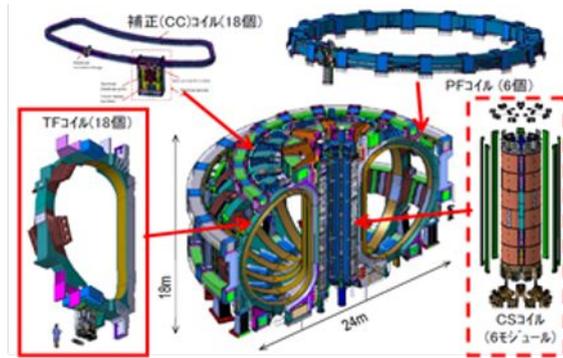


図1: ITERのマグネットシステム

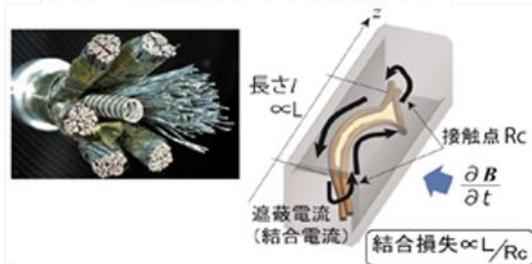


図2: CIC 導体構造と結合損失

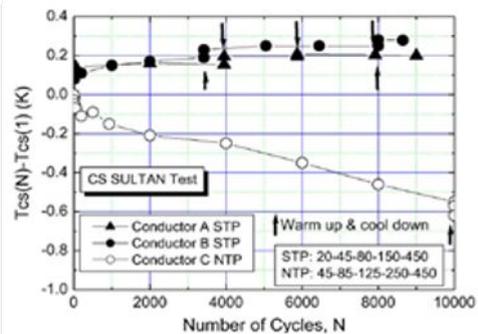


図3: 分流開始温度と励磁サイクルの関係

一方で、20m程度の導体試験でも、交流損失は3~5倍に増大した。交流損失の主な成分である結合損失の概念を図2右に示す。素線同士の密結合によって素線間接触抵抗 Rc が減少し、変動磁界で生じる結合電流ループ(インダクタンスL)の減衰時定数=L/Rcが増大した事が原因と考えられる。60000回の励磁・減磁過程を繰り返すCS導体では、交流損失の増大は極めて重大な問題であり、長尺の実規模導体(~数100m)において、予想外の長い遮蔽電流ループが形成されると、Lが長さに比例するので、さらなる交流損失増大が予想される。

2. 研究の目的

現状では、核融合マグネットに適用可能な超電導特性と、低交流損失は両立できていない。CIC 導体の超電導性能を維持しつつ、交流損失の低減を図るためには、実規模導体における定量的な交流損失の評価が極めて重要となる。本申請では、以下の点に焦点を絞って研究を行う。即ち

- (i) 実規模CIC導体(STP,NTP)の素線配置を詳細に測定し、内部構造を明らかにする
- (ii) 液体ヘリウム中で素線接触位置における局所的接触抵抗分布を計測し、
実規模導体内部の結合電流パスを明らかにする(L, Rcの分布を明らかにする)
- (iii) 電気回路・熱伝達モデルを用いて導体の交流損失・温度上昇を評価し、導体の電流負荷率と冷却システムの最適化に関する検討を行う。

3. 研究の方法

以下の2点を実行する

- 1. 実規模CIC導体のスライスサンプル準備
- 2. 冷凍機による伝導冷却を導入したマグネット運転温度での素線間接触抵抗分布計測

1. 実規模 CIC 導体 (STP, NTP) のスライスサンプルの準備

CIC 導体スライスサンプルは、コンジット内部にエポキシを流して素線の配置を固定し、切断によって内部構造に変化がないようにした後、切り代 1mm 未満で切断する。

サンプルの準備は、一部すでに始まっており、核融合科学研究所からは ITER のサテライト装置である、JT-60SA 用の平衡磁場 (EF) コイル導体、長さ約 500mm 分の提供をすでに受け (図 6 : 提供導体の写真)、測定を開始している。また、原子力研究開発機構より、ITER の TF 導体サンプル (NTP, 長さ 200mm) の提供を受けており、測定用固定治具 (導体サイズに合わせて設計) の準備中である。結合損失の定量的な算出のために必要な導体長は、不規則に形成される結合電流ループの長さの整数倍だけ必要である。ITER TF 導体の撚りピッチから算出すると、素線間接触の頻度は NTP で 375mm, STP で 171mm である [1]。自動計測によって 1 年で 1m 程度の長さの計測が可能であり、実規模導体中で不規則に形成される結合電流ループの統計的な推定が可能になると考えている。27 年度に NTP 導体の残り、STP 導体 1m 分の提供を受ける予定である。

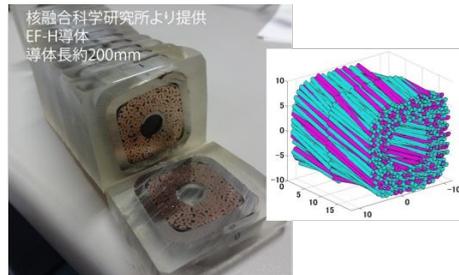


図 6 : 核融合研より提供のあった JT-60SA 用 EF-H 導体サンプル (左) と素線配置の測定結果 (右)



図 7 : 原子力研究開発機構より提供の ITER 用 TF 導体サンプル (導体長さ約 200mm)

2. 冷凍機による伝導冷却を導入したマグネット運転温度での素線間接触抵抗分布計測

図 8 は、申請者が開発した素線配置の 3D 計測装置である。液体窒素温度付近までサンプルを冷却すると、液体ヘリウム温度とほぼ同じ熱収縮環境を実現できる。素線間接触抵抗を測定するための装置は内径 800mm, 高さ 800mm の真空チャンパーの中に格納され、任意の背景圧力、雰囲気中で測定が可能である。

液体ヘリウム温度にて測定を行うには、次の 2 点の改造が必要である。

1. パルスチューブ冷凍機の導入
2. 2 重断熱構造 (液体窒素温度層、真空断熱層)

本申請の大きな特色は、基盤となる装置の設計・製作が全く必要ではなく、極低温化に必要な改造およびモジュールの追加で済む点である。

具体的には、天板を冷凍機接続可能にし、1st (65K) ステージを輻射シールド層の冷却、2nd (4.2K) コールドステージによってサンプル冷却を行えるように構成する。容器本体は、2 重断熱に改造し、大気 65K 間および 65K-4.2K 間の真空断熱によって冷却状態を維持できるように改造し、順次計測を開始する。

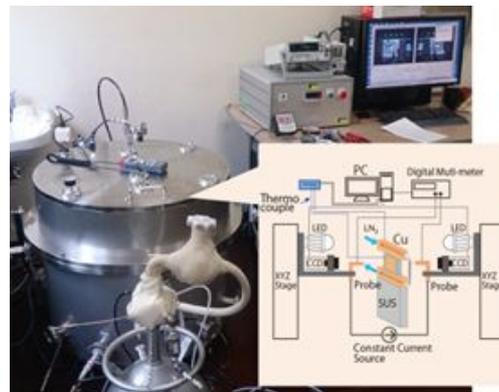


図 8 : 素線配置 3D 計測装置の外観
液体窒素温度付近で素線配置および素線間接触抵抗分布の計測が可能

4. 研究成果

(i) 液体ヘリウム中での素線間接触コンダクタンス計測

ヘリウム温度中において、最終サブケーブル撚りピッチ長程度の TF 導体サンプル (素線数 1152 本) の片端のコンジットは剥ぎ取り、素線を注意深く解して、熱処理後で脆くなった素線を支持・固定するプレートを取り付けた。次に、各々のサブケーブルに属する素線をピックアップして電圧タップおよび電流導入端子を取り付けた物を 2 本用意する。そして、1 本は、コンジット内部にエポキシを含浸して素線同士が動かないように固定する。この加工の意図は、液体ヘリウム温度における素線間のコンダクタンス (450mm 長の

平均値)が、エポキシ含浸の有無によって、変化しないかどうかを確認するためであり、10mm 間隔でスライスして素線軌跡測定を行うときに、エポキシが素線間の位置関係および接触抵抗に影響がないことを確認する狙いがある。図9に、サンプルの全景と、液体ヘリウム中にて素線間コンダクタンス計測を行う装置のセットアップ概略図である。

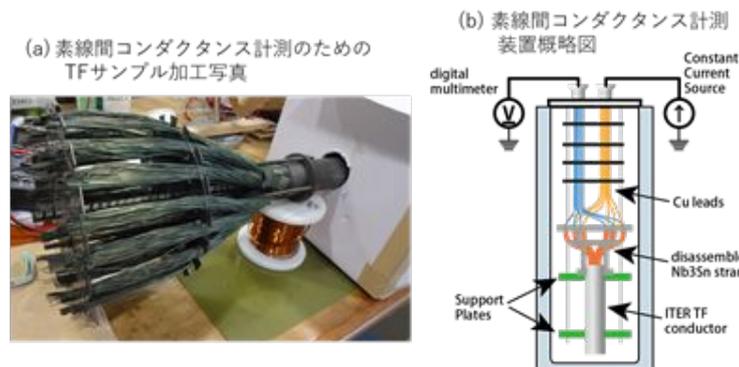


図9：(a)素線間コンダクタンス計測用のTF導体サンプル写真と、(b)コンダクタンス計測実験装置の概略図

素線間コンダクタンス測定の結果を次の図10に示す。横軸は素線間の平均距離であり、図中の網掛け領域は、最終サブケーブルの内部で、素線間平均距離が小さいケースを示している。縦軸が素線間接触抵抗値であり、SUSラップされている最終サブケーブル内部において、素線間接触抵抗はエポキシの有無で差が無い事がわかった。すなわち、エポキシの含浸によって、最も重要な近接素線同士の接触には影響がないと結論できた。

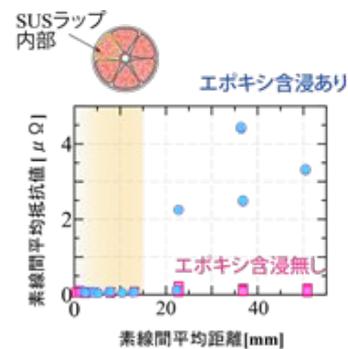


図10：素線間コンダクタンス計測結果

(ii) 液体ヘリウム温度下における素線軌跡測定の準備

素線配置3D計測は、2重に真空断熱された容器の内部にて、スライスされたサンプルの両側から細いプローブを当て、4端子法によってプローブ間の抵抗を測って計測される。測定抵抗値が最小になった場合、プローブが当たっている両側1対の素線の断面が、1本の素線のスライス面上の位置を示していることになる。異なる素線断面の場合、測定抵抗値は、素線単体の抵抗と、素線間接触抵抗値を含むため、10mm長の素線間接触抵抗分布が計測できる。制御系を含めた素線軌跡の測定装置の概略を図11(a)に、設計図面を図11(b)を示す。

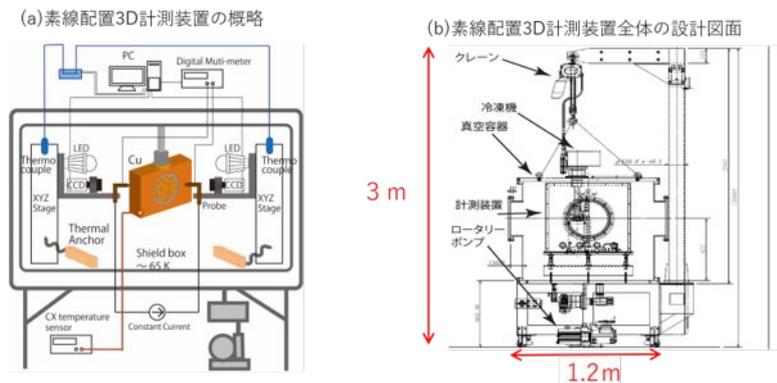


図11：(a)素線配置3D計測装置の概略図および(b)装置図面

次に素線配置計測のための準備として、低温中の連続計測に耐えるプローブの開発を行った。1サンプルあたり5000回程程度の抵抗測定を行う。真空中であるため、1サンプル測定中に交換ができないため、測定中プローブ接触抵抗値が一定である必要がある。強度と加工性を確保するため真鍮を用いると、接触抵抗が純Cuと比較して大きくなるため、適切なコーティングが必要となる。図12は、インジウムメッキと銀入りハンダメッキを施したプローブ先端の測定抵抗値の繰り返し接触数の依存性である。銀入りハンダメッキが良好な耐久性を有していることがわかる。

また、常温で開発されたプローブを用いて、ヘリウム中で素線抵抗および素線間接触抵抗測定試験を行った。試験は、素線単体の抵抗値がゼロになるため、測定抵抗値は最小でプローブと素線断面間の接触抵抗値になる。装置の概念図を図 13(a)に、図 13(b)にプローブの圧着力に対する測定抵抗の依存性を示す。

素線配置の測定装置において、液体ヘリウム温度下にて想定される圧着力の範囲でプローブと素線断面間の接触抵抗を測定した結果、全ての圧着力の範囲において、素線間接触抵抗の有無による値の有意な差が観測され、ヘリウム温度下における素線配置および素線間接触抵抗分布の測定が可能である事が証明された。

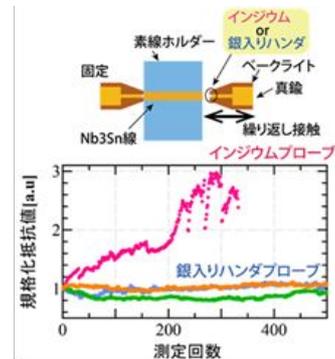


図 12：インジウムおよび銀入りハンダでメッキしたプローブの接触抵抗の耐久性試験

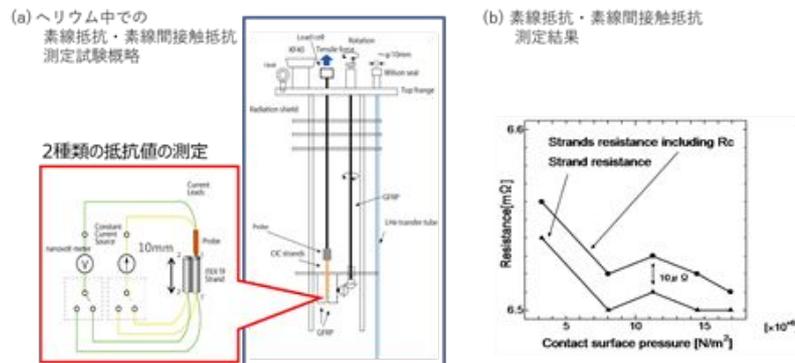


図 13：(a)プローブによる素線抵抗・素線間接触抵抗測定装置の概略および、(b)圧着力に対するプローブ・素線断面間抵抗の依存性

(iii) 製作した素線配置 3D 計測装置と 1 断面サンプル測定結果

図 14(a)は、開発した素線配置 3D 計測装置の外観である。2 重断熱真空容器であり、設計通りの仕様となっている。天板に GM 冷凍機のコールドヘッドが設置され、内部のサンプルを冷却する。図 14(b)および(c)は、サンプルの冷却曲線であり、真空度が上がった後、約 150min 程度で最低到達温度である 16 K 付近まで冷却され、さらにその後 1000min 以上、温度が安定していることがわかった。今後ヘリウムの沸点付近の運転条件にするためには、冷凍機を 2 段にする必要がある。

(a)設置される素線配置 3D計測装置

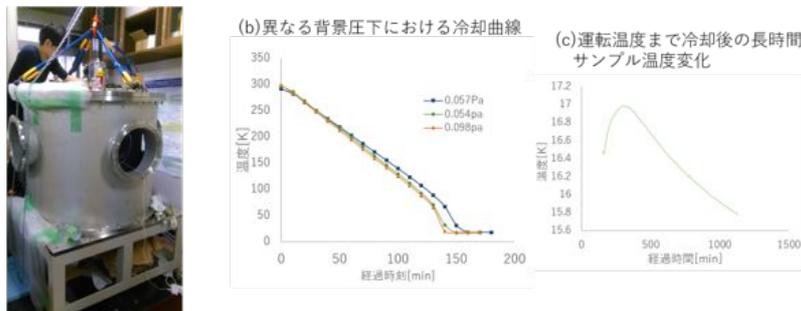


図14：(a)装置の外観、(b)初期冷却曲線、および(c)長時間サンプル温度変化

(iv) 常温における測定結果（速報）

図 15 は、常温にて行った試運転の結果である。測定対象は、SUS テープでラップされた最終サブケーブル（素線数：全体の 1/6）で行った。赤が Nb3Sn 素線であり、青が Cu 線である。サンプルの両面からプローブを当て、得られた結果を 3D でプロットすることによって、素線の軌跡が得られている事がわかる。

その後、真空中におけるサーボモータの熱除去不具合が発生し、制御基板が動作しないトラブルに見舞われた。冷凍能力の増強を含め、これらの結果を基に、新たな研究助成に申し込む予定である。

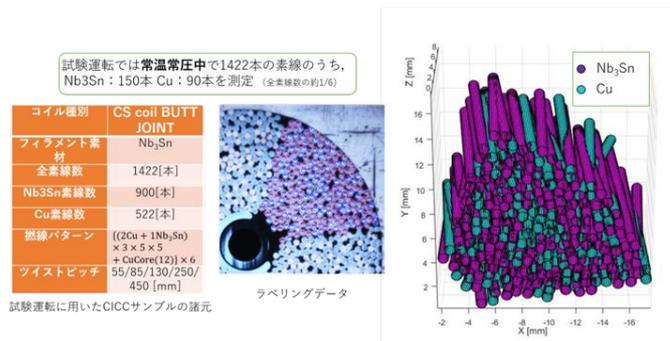


図15：常温における試運転結果（素線数：全体の1/6）

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 谷貝 剛、「大型コイル内部の機械的・電磁気学的現象」、平成30年超電導科学技術研究会 第96回ワークショップ（招待講演）2018
2. T. Yagai, et al, “Development of Analyzing Capability of React and Wind Process based on Strand Trace and Inter-Strand Resistance Measurement System for Cable-In-Conduit Conductor”, 25th International Conference on Magnet Technology, Nederland, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6．研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：尾花哲浩

ローマ字氏名：(OBANA, Tetsuhiro)

研究協力者氏名：梶谷秀樹

ローマ字氏名：(KAJITANI, Hideki)

研究協力者氏名：今川信作

ローマ字氏名：(IMAGAWA, Shinsaku)

研究協力者氏名：村上陽之

ローマ字氏名：(MURAKAMI, Murakami)

研究協力者氏名：小泉徳潔

ローマ字氏名：(KOIZUMI, Norikiyo)

研究協力者氏名：津田 理

ローマ字氏名：(TSUDA, Makoto)

研究協力者氏名：宮城大輔

ローマ字氏名：(MIYAGI, Daisuke)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。