

ITER TF コイルの調達進捗 Progress of ITER TF coil manufacture

小泉 徳潔, 松井 邦浩, 中本 美緒, 山根 実, 安藤 真次, 高野 克敏, 辺見 努, 梶谷 秀樹 (量研機構)
 KOIZUMI Norikiyo, MATSUI Kunihiro, NAKAMOTO Mio, YAMANE Minoru, ANDO Shinji, TAKANO Katsutoshi,
 HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki (QST)
 E-mail: koizumi.norikiyo@qst.go.jp

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構 (量研機構; QST) は, ITER における日本の国内機関として, ITER トロイダル磁場コイル [1] (Fig.1: スペア 1 個を含み 19 個. 以下, TF コイルと記す.) のうち 9 個の TF コイル, 19 個分のコイル容器の調達を担当している. TF コイルは, ITER の超伝導コイルの中でも最大の超伝導コイルであり, かつ, 製作の難易度も最も高いコイルである. 本稿では, TF コイルの製作進捗を報告する.

2. 日本における TF コイル及び構造物調達体制

日本では, TF コイル 5 機及び欧州向け構造物の 4 機は三菱重工, 三菱電機及び現代重工が協力して, TF コイル 4 機及び欧州向け構造物の 6 機は東芝が担当し, 2025 年のファースト・プラズマを達成できるように, 調達を進めている.

3. 調達進捗

日本における TF コイルの製作進捗は, 以下のとおり.

- ・巻線: 28 ダブル・パンケーキ (DP) 完了 (全 DP 数 = 63)
- ・熱処理: 24DP 完了
- ・トランスファー及び導体絶縁: 16DP 完了
- ・DP 含浸 (Fig.2) : 11DP 完了
- ・DP 積層及び巻線部絶縁 (Fig.3) : 1WP 完了

TF コイルの製作における主な成果としては, TF コイルでは, その大きさ (Fig.1 参照) に対して, 数 mm の厳しい公差が要求されているが, DP の製作を進めるなかで, これらの要求公差を達成できるようになっている. 主な例としては, ラジアル・プレート (RP) の輪郭度 1mm の達成, CP 溶接後の平面度 2mm の達成, DP 含浸後の平面度 2mm の達成などが挙げられる.

日本における TF コイル構造物の製作進捗については, 別報 (1C-a02) で報告する.

4. まとめ

日本では, 9 機の TF コイルの製作を進めている. 約半数の DP で巻線を完成させるなど, ITER の 2025 年ファースト・プラズマを目指して, 順調に製作を進めている.

謝辞

TFコイルの製作では, 三菱重工, 東芝, 三菱電機, 現代重工等多数のメーカーに協力を頂き, 技術的課題を解決しながら進めています. これらのメーカーのご協力に感謝します.

参考文献

- (1) ITER TFコイル特集号: 低温工学, 47(2012) 135-139



Fig. 2 Completed DP.

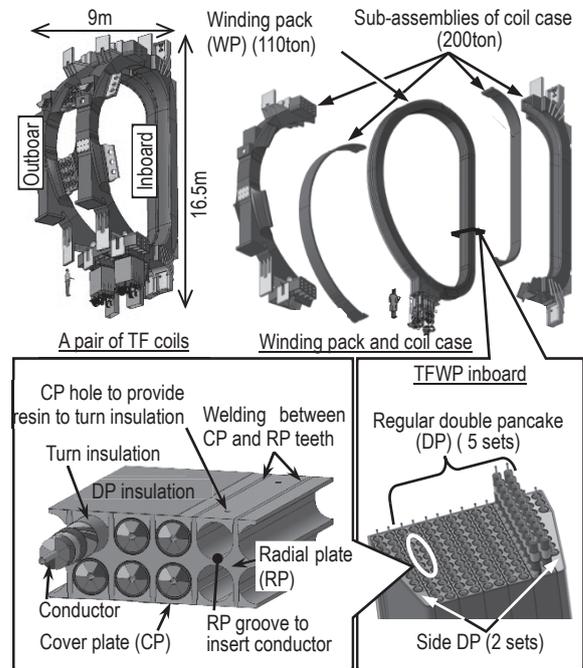


Fig.1 ITER TF coil and structures

Table 1 Major parameters of ITER-TF coil

Conductor outer diameter	43.7 mm
Cable diameter	39.7 mm
Conduit material	SS316LN
Number of coils	18
Number of DPs	7 (5rDPs + 2sDPs)
Conductor length in DP	760 m / rDP, 415 m / sDP
Nominal current	68 kA
Nominal field	11.8 T

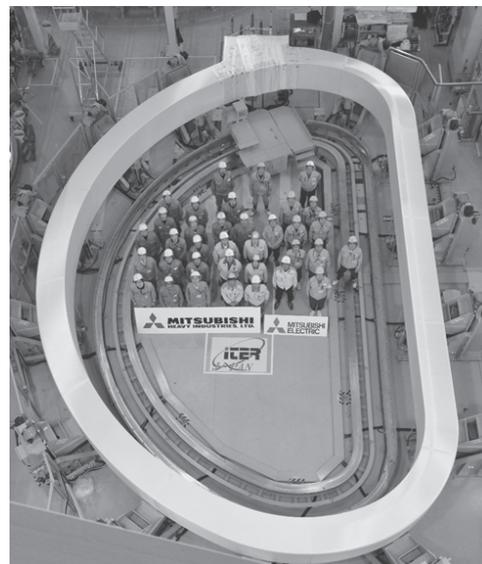


Fig.3 WP insulation completeio

ITER TF コイル構造物 主構造体の製作進捗

Manufacturing progress of main structure for ITER TF Coil Structure

櫻井 武尊, 井口 将秀, 中平 昌隆, 藤原 英弘, 金森 信乃, 猪野 昌信, HONG Yunseok, 西野 雅夫, 田中 信彦, 花岡 敏成, 栗田 智久, 小泉 徳潔 (量研機構)

SAKURAI Takeru, IGUCHI Masahide, NAKAHIRA Masataka, FUJIWARA Eiko, KANAMORI Shino, INO Masanobu, HONG Yunseok, NISHINO Masao, TANAKA Nobuhiko, HANAOKA Toshinari, KURITA Tomohisa, KOIZUMI Norikiyo (QST)
E-mail: sakurai.takeru@qst.go.jp

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(量研機構)は ITER 計画においてトロイダル磁場コイル(TF コイル)の調達を担当している。TF コイル構造物本体は D 型形状の超伝導巻線を格納する高さ 16.5m、幅 9m、重量 200トンの超大型で複雑な構造物である(Fig.1)。量研機構ではこれまで実機大の TF コイル構造物の試作を実施し、製造計画を確立してきた。その計画に基づき、2014年4月から実機 TF コイル構造物製作を開始し、2016年に TF コイル 1号機用の AU 主構造体が完成した。本稿ではその初号機製作をはじめとした TF コイル構造物製作の進捗について報告する。

2. TF コイル構造物の製作

TF コイル構造物本体はサブアセンブリと呼ばれる 4 体の構造体から成り、トカマク中心側をインボード側と呼び、そのコの字型容器を AU、蓋材を AP と呼ぶ。一方、装置外側をアウトボード側と呼び、そのコの字型容器を BU、蓋材を BP と呼ぶ。更に、AU、BU は外板と側板から成るベーシックセグメントというサブアセンブリを分割した単位で製作し、それらを溶接接合して AU 又は BU 主構造体を製作する。主構造体を最終機械加工し、TF コイルを冷却するための管取付けをすることでサブアセンブリが完成する。

3. TF コイル構造物講の試作結果

TF コイル構造物には非常に厳しい公差が要求されているため、溶接変形を考慮した余肉を材料に設け溶接後に機械加工する必要がある。量研機構では、アウトボード側・インボード側それぞれの代表的なベーシックセグメントの試作を実施し、溶接変形量の把握や変形量を最小化するための溶接条件や溶接手順の最適化を行ってきた。

そして、主構造体製作に向けて、セグメント同士の溶接試作も実施した[1]。インボード側のセグメント間溶接試作では、曲線部である A1 ベーシックセグメントと直線部 3m の A2 ベーシックセグメントを、変形量をモニタリングしながら施工するバランス溶接により溶接した。Fig.2 における P1 から P9 の点で寸法を計測した結果、外板同士では溶接収縮が 6.3~6.8mm、角変形が 2.7mm、側板同士では溶接収縮が 5.4~6.8mm、角変形が -0.3~0.3mm となった。外板は若干の角変形をするも、側板はほとんど角変形がなかった。これらの実機大の試作結果より、適切な余肉量を検討し、製造計画を確立した。

4. 実機 AU 主構造体の製作

AU 主構造体は、はじめに A1 ベーシックセグメントと A2 ベーシックセグメントを溶接し、それらに A3 ベーシックセグメントを溶接する。試作の結果より、外板が角変形することが予想されるため、予め変形を打ち消す逆歪を与えて開先合わせを実施した。また、実機ではアタッチメントと呼ばれる他の機器との取り合いやハンドリングするための金物が取り付けられる。

寸法計測は主にレーザートラッカーを使用し、コイル容器の基準点に対して、寸法管理値を設定し、変形量を管理した。Fig.3 に溶接が完了した AU 主構造体を示す。

5. TF コイル構造物製作の進捗

現在、インボード側では 6 機の AU 主構造体が完成し、7 機分のベーシックセグメントと 8 機の AP 主構造体が製作中である。アウトボード側では 1 機の BU 主構造体が完成し、3 機の主構造体と 10 機分のベーシックセグメント、7 機の BP 主構造体が製作中である。主構造体は最終加工と冷却配管取付け、検査等を経て、随時完成予定である。

謝辞

TF コイル構造物の調達活動にご協力頂いている三菱重工業(株)、現代重工業(株)、イーエナジー(株)、(株)東芝、並びに関連会社の皆様に厚く御礼申し上げます。

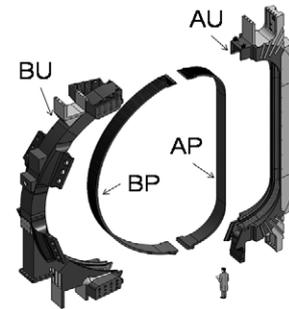


Fig. 1 Sub-assemblies of TF Coil structure

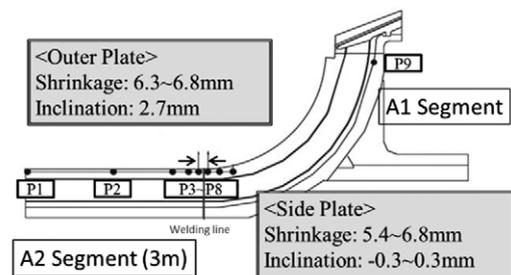


Fig. 2 Welding Basic Segments trial (A1+A2)



Fig. 3 Overview of AU main structure

参考文献

1. T. Sakurai, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 109-111 (2016) p.1592-1597

ITER TF コイル巻線の熱処理変形の評価

Evaluation of Winding Deformation Caused by Reaction Heat-treatment for ITER TF coil

辺見 努, 梶谷 秀樹, 松井 邦浩, 山根 実, 坂口 香織, 中本 美緒, 齊藤 徹, 安藤 真次, 高野 克敏, 小泉 徳潔(量研機構)

HEMMI Tsutomu, KAJITANI Hideki, MATSUI Kunihiro, YAMANE Minoru, SAKAGUCHI Kaori, NAKAMOTO Mio,

SAITO Toru, ANDO Shinji, TAKANO Katsutoshi, KOIZUMI Norikiyo (QST)

E-mail: hemmi.tsutomu@qst.go.jp

1. はじめに

ITER TF コイルでは、導体周りの絶縁材に他のターンからの電磁力が重畳されないようにするため、絶縁を施した導体をラジアル・プレート(RP)と呼ばれる D 型の溝付きステンレス板に挿入し、カバー・プレート(CP)を被せて導体を固定する構造としている。Nb₃Sn が脆性材料であることから、熱処理後に 0.1%以上の曲げ歪を加えることができないため、D 型形状に巻線し、熱処理した後、RP 溝に導体を挿入する。このため、RP 溝幅と絶縁後の導体の隙間から、導体長として±0.02%(1ターン約 34 m に対して±7 mm)の高精度で巻線長を管理し、熱処理により巻線形状が変形しても 0.1%以下の曲げ歪で RP 溝に挿入する必要がある。本発表では、韓国導体の熱処理前後の導体長、形状の変化及び RP 溝に挿入するための曲げ歪の評価結果について報告する。

2. 熱処理による導体長の変化

熱処理による導体長の変化を評価するため、実機サイズで D 型 1 ターンの韓国導体の熱処理を行った結果、導体長の伸び量は 0.035%であった。この結果から、巻線を導体長で 0.035%だけ小さく巻き、熱処理後に正規の寸法になるように巻線形状を決定した。Fig.1 に 3DP 分の熱処理による導体長の伸びを示す。これまでの熱処理による導体長の伸びは平均値±3σで 0.0367±0.0078%となっている。巻線における導体長の誤差が-0.0013%±0.0098%であったため、巻線と熱処理の誤差の合計は 0.0004%±0.0125%となり、目標として定めた±0.02%を十分に満足している。

3. 導体を RP 溝に挿入するための曲げ歪の評価

熱処理前後の巻線形状の変化を示すため、一例として韓国導体で巻いた TF コイル 3 号機の DP1 P 面の設計形状と測定結果の差異を 100 倍に拡大して図示した結果を Fig.2 に示す。巻線は約 400 mm ピッチで RP を模擬した櫛に挿入されており、熱処理前の巻線は櫛が設計位置で固定されている。この測定結果より、設計形状と測定形状の差異は、熱処理前後の最大値でそれぞれ、1.5mm 及び 13.5mm となっている。

熱処理後の導体を設計形状の RP 溝に挿入するため、片持ち梁を想定して順々に RP 溝に挿入する際の曲げ歪を計算した結果を Fig.3 に示す。片持ち梁の長さが短すぎると曲げ歪が大きくなるため、曲げる間隔は 500 mm 以上とし、0.1%以下の曲げ歪で RP 溝に挿入できることを確認した。RP 溝と絶縁後の導体の隙間は、インボード直線部、インボード曲線部、アウトボード部でそれぞれ、0.72 mm、2.22 mm、1.72 mm としているが、曲げて位置を合わせた点以外の箇所もこの隙間の範囲内に収まり、RP 溝に挿入可能であることを確認した。なお、曲げ歪は片持ち梁の長さの 2 乗に反比例するため、曲げる間隔を長くすることで、曲げ歪をさらに小さくすることができる。

4. まとめ

韓国導体の熱処理前後の導体長、形状の変化及び RP 溝に挿入するための曲げ歪について検討した。その結果、熱処理後の導体長は目標とした±0.02%で管理できることを示した。加えて、熱処理後の導体を 0.1%以下の曲げ歪で RP 溝に挿入できることを確認した。

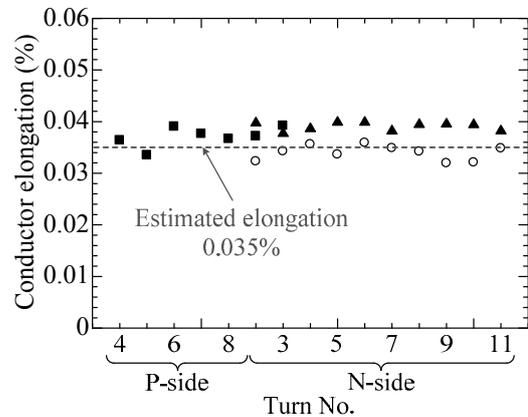


Fig.1 Conductor elongation caused by the reaction heat-treatment for Korean conductors.

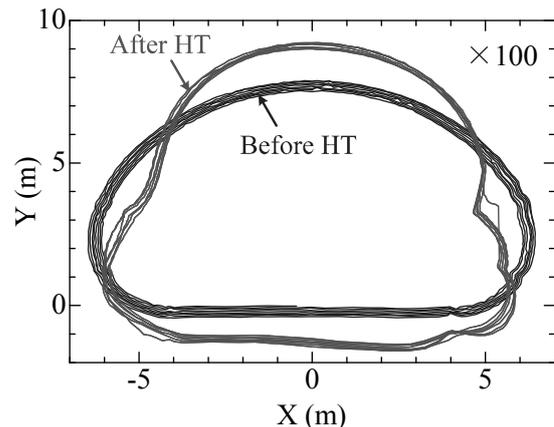


Fig.2 Winding deformation caused by the reaction heat-treatment for Korean conductor (P-side of DP1/TF03).

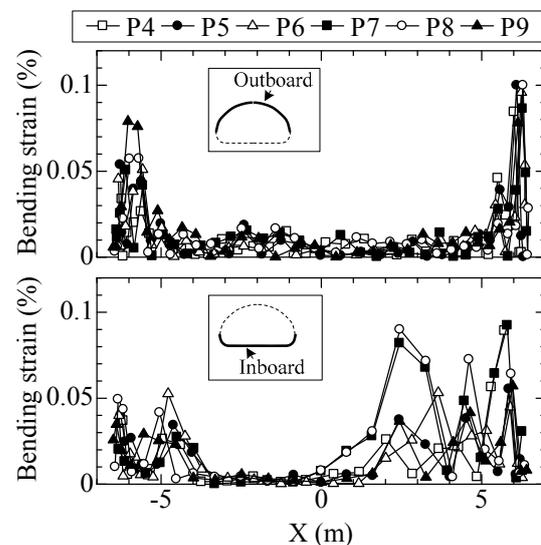


Fig.3 Bending strain to insert the heat-treated conductor into the RP groove for Korean conductor (P-side of DP1/TF03).

ITER TF コイルにおける常温下でのジョイント抵抗検査手法の開発

New inspection method of joint resistance at room temperature for ITER TF Coil

梶谷 秀樹, 辺見 努, 山根 実, 清水 辰也, 宇野 康弘, 中本 美緒, 松井 邦浩, 小泉 徳潔 (量研機構)
 KAJITANI Hideki, HEMMI Tsutomu, YAMANE Minoru, SHIMIZU Tatsuya, UNO Yasuhiro, NAKAMOTO Mio,
 MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo (QST)
 E-mail: kajitani.hideki@qst.go.jp

1. はじめに

ITER TF コイルのジョイント部 (Fig.1) では, ジョイント抵抗 (R_j) を, 数 $n\Omega$ の低抵抗とする必要がある。しかし, 実機 TF コイルのジョイント抵抗を低温にて測定することは, TF コイルは, 高さ 14 m, 幅 9 m, 重さ 300 トンの巨大な D 型コイルであることから, それに合わせて巨大な装置が必要となるため, 容易ではない。そこで, 著者らは, R_j を常温にて簡易的に評価することのできるジョイント部の非破壊検査手法を開発した。本講演では, 開発した検査手法の詳細について報告する。

2. 検査手法のコンセプト

R_j の大きさは, 主に撚線とジョイントボックス銅スリーブ間の接触抵抗 (R_c) とジョイント部同士を接合する半田接合面の抵抗 (R_{sol}) によって決まる。このうち, R_{sol} については, 製造過程における目視検査によって, 品質を確認することができるが, R_c については, それが難しい。そこで本研究では, R_c を評価することに着目した。

R_c は, 撚線と銅スリーブ間の電流染込長 (CPL) に影響を与える。そのため, 著者らは, 製造したジョイント部の品質に問題がない場合 (つまり, R_c が十分低い場合) では, CPL に再現性があり, 一方で, 何かしらの異常や欠陥が存在する場合は, CPL に変化が生じるのではないかと考えた。

3. 検査システム

このような現象を観測するため, 銅スリーブの電圧分布を測定することのできる測定システムを開発した (Fig.2)。

本測定では, Fig.2 に示すように, 銅スリーブの撚線圧縮部全域に電圧タップピンを 5 mm 間隔で配置した。末端のタップを基準電位 V_0 として, 常温にて銅スリーブ両端部に 20 A を印加し, ナノボルトメータを用いて, V_0 から各タップ間の電圧測定を行った。また, ここでは, 検査感度を上げるために, 次式に示す銅スリーブ長手方向座標 z に対する局所的な電圧変化率にも着目した。

$$\frac{dV}{dz} = \frac{V_n - V_{n+1}}{\Delta z} \quad (1)$$

ここに, Δz はタップ間距離, $V_n - V_{n+1}$ は隣り合うタップ間の電圧を表す。

4. 検査結果

ここでは, 実機 TF コイルジョイント部での 7 測定に加えて, NIFS ジョイントサンプル [1] についても測定を行った。これは, R_j が予め確認できる NIFS サンプルの結果と比較することで, 実機ジョイント部の健全性を確認できるためである。また, 通電試験後の NIFS サンプルを解体し, この解体サンプルについても測定を行った。

V_0 を基準とした電圧測定結果を Fig.3 に示す。このように, 実機ジョイント部の測定では, 全ての測定において再現性を確認でき, また, NIFS サンプルのそれとも一致しているため, 健全であることが確認できる。

一方, 解体サンプルの測定結果は, これらから大きく逸脱している。これは, 解体サンプルでは, 撚線内部の状態は電磁力によって変化しており, 撚線内部への CPL が実機ジョイ

ント部のそれとは異なるためである。このように, 本検査法では, 撚線内部の変化も感度良く検知することができる。

また, これらの電圧降下を dV/dz に変換した結果を Fig.4 に示す。このように, dV/dz に変換することによって, Fig.3 では見え難かった $z = 0 \sim 0.1$ m 付近の差異も明確に観測できるようになる。以上より, 本検査法を用いれば, ジョイント部の状態を感度良く検知できるため, R_c の品質を検査することが可能となる。

参考文献

1. H. Kajitani, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.47

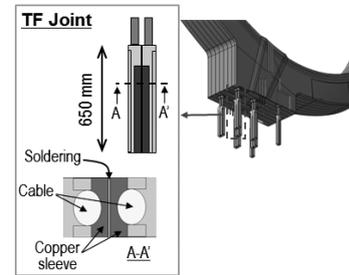


Fig.1 ITER TF joint.

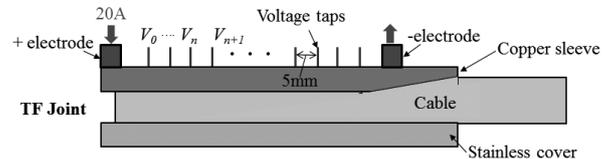


Fig.2 Schematic view of measurement system.

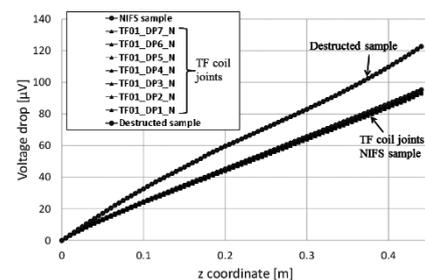


Fig.3 Measurement results of voltage drop from V_0 .

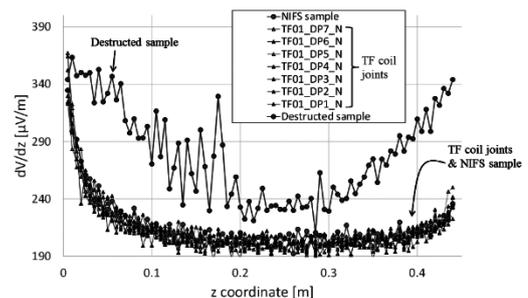


Fig.4 Evaluation results of dV/dz .

ITER-TF接続サンプル試験における電位分布の考察

Consideration of voltage distribution in conductor surface of ITER-TF joint samples.

今川 信作, 尾花 哲浩, 高田 卓, 濱口 真司, 力石 浩孝, 高畑 一也 (NIFS);
梶谷 秀樹, 松井 邦浩, 辺見 努, 小泉 徳潔 (QST)

IMAGAWA Shinsaku, OBANA Tetsuhiro, TAKADA Suguru, HAMAGUCHI Shinji, CHIKARAISHI Hiroataka,
TAKAHATA Kazuya (NIFS); KAJITANI Hideki, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, KOIZUMI Norikiyo (QST)
E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

ITER-TF 接続サンプルの通電試験を核融合科学研究所の大型導体試験装置を用いて実施している[1]。これまでに 5 本の接続サンプルを試験し、接続抵抗が「外部磁場 2 T 以上で 3 nΩ 以下」の要求値を満足することを確認した。インダクタンスと渦電流の影響を排除するため、電流値 1, 15, 30, 45, 60, 68 kA で3分間保持して電位差を測定し、各位置 6 点の平均電位差の電流値依存性(勾配)から抵抗値を求める方法により、nΩレベルの抵抗測定を可能としている。電圧端子間には 0.01 mV 程度の電位分布が観測されており、接続サンプルに共通するものと固有のものがあり、その要因について考察する。

2. 試験装置と試験サンプル

9 T スプリットコイルと 100 kA 電流リードを有する大型導体試験装置への ITER-TF 接続サンプルの取付図を図1に示す。スプリットコイルは浸漬冷却であるため、強制冷却の接続サンプルは容器内に収納され、その周囲はガスヘリウム雰囲気である。サンプル最下端から超臨界圧ヘリウムが供給され、往復導体の各々の最上部より排出される。供給管に巻き付けたヒータの制御により、4.4 K と 6 K の2通りで接続抵抗を測定している。

接続サンプルは、長さ 1.5 m のケーブル・イン・コンジット(CIC) 導体2本の下部が ITER-TF 実機と同じ接続部形状に加工され、銅スリーブ同士が半田接合されている。超伝導線と銅スリーブの接続長は 440 mm で、最終撚りピッチ長に相当する。上部は、100 kA 電流リードに接続される銅ブスバーと低抵抗で接続するため、下部と同様の接続部形状に加工され、銅ブスバーとはインジウムを挟んで接続されている。中央の通常部の導体長として 300 mm を確保するため、上部接続部の超伝導線と銅スリーブの接続長は試験装置の寸法制限から 325 mm に短縮されている。電圧端子は、300 mm の通常部の3箇所位置のコンジット表面に6点ずつ取り付けられており、各位置における往復導体間の電位差から下部接続部の接続抵抗を求めている。

3. 電圧測定結果

下部接続部での電圧降下の代表的な例を図2に示し、その時の導体通常部の長手方向の電位差を図3に示す。測定ノイズ除去のため 10 ms サンプルングのデータの100点分を平均した値を示している。図2において、6組の電圧端子間の偏差は 0.01 mV 以下であり、接続抵抗による電圧降下と比べると小さい値に収まっている。この値は図3の通常部の長手方向の電位差と同等であり、矛盾しない結果が得られている。電流値が増えても偏差が拡大しない点は全サンプルに共通する特徴である。

通常部の長手方向電位差は、CIC 導体内の超伝導素線間の電位差を表していると考えられ、この電位差は、主に上部接続部と下部接続部での接続抵抗の偏差によって生じると考えている。しかし、図3から分かるように、15 kA 以上における電位差の変化は全ての電圧端子において電流値にほぼ比例しているが、1 kA から 15 kA に電流を増やす間に電圧端子によっては電位差が大きく変化しており、その原因を考察するための解析モデルを検討している。

参考文献

1. H. Kajitani et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 25 (June 2015) Art. ID. 6965582.

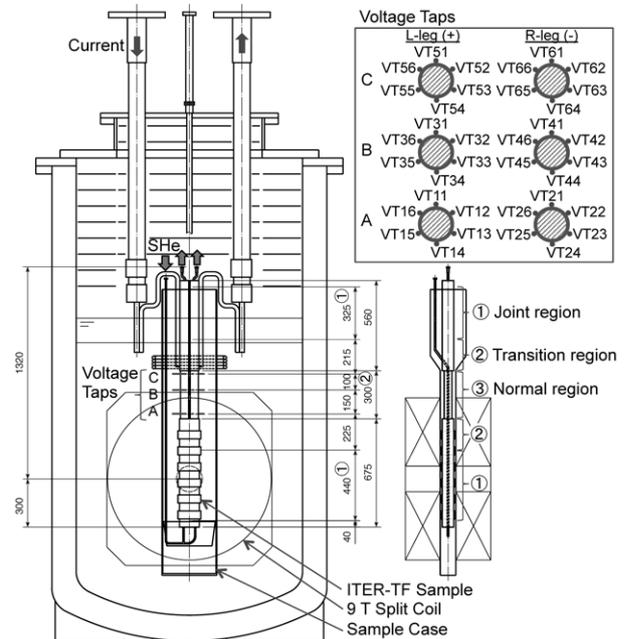


Fig. 1. Set up of an ITER-TF joint sample in the 9 T test facility.

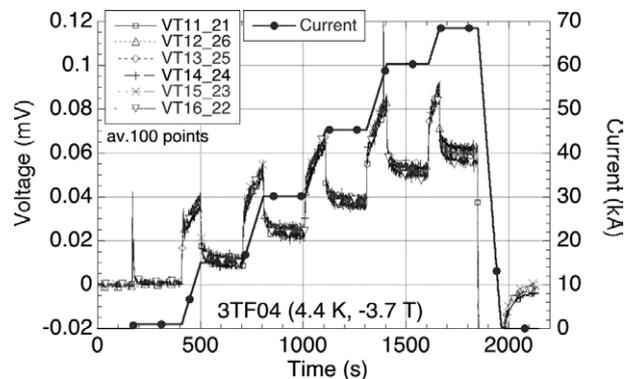


Fig. 2. Voltage drops at the position A of the 3rd joint sample at the external field of -3.7 T at 4.4 K.

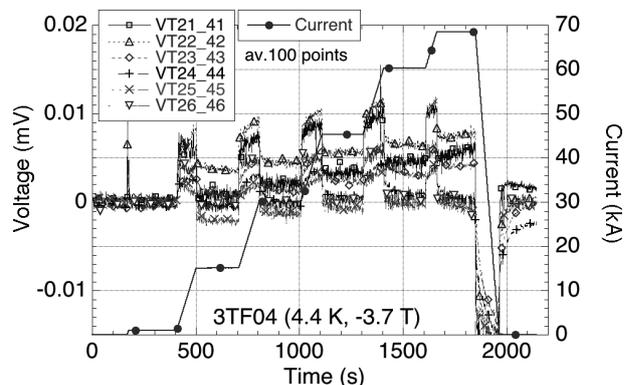


Fig. 3. Longitudinal voltage drops in R-leg of the 3rd joint sample at the external field of -3.7 T at 4.4 K.

ITER CS 導体におけるツイストピッチ変化が分流開始温度に与える影響

The effect of twist pitch elongation on current sharing temperature of ITER Central Solenoid conductor

諏訪 友音, 高橋 良和, 堤 史明, 三木 孝史, 辺見 努, 布谷 嘉彦, 小泉 徳潔 (量研機構)

SUWA Tomone, TAKAHASHI Yoshikazu, TSUTSUMI Fumiaki, MIKI Takashi, HEMMI Tsutomu, NUNOYA Yoshihiko, KOIZUMI Norikiyo (QST)
E-mail: suwa.tomone@qst.go.jp

1. 概要

量子科学技術研究開発機構(QST)は、ITER 調達活動において中心ソレノイド(CS)導体の調達を行っており、Nb₃Sn 素線を用いた 613 m と 918 m のケーブルインコンジット導体(CICC)を合計 49 本製作する。2017 年 4 月までに CS 導体は 42 本完成しており、調達の約 86%が完了している。これまでに製作した実機導体から 4 m サンプルを採取し、SULTAN 試験によって性能評価を行っている。また、導体製作中に撚線のツイストピッチが伸びるため[1, 2]、ツイストピッチを伸ばした導体の試験を行い、ツイストピッチが導体性能に与える影響を調べた。

2. CS 導体のツイストピッチ変化

ITER CS 導体は、576 本の Nb₃Sn 素線、288 本の Cu 素線を用いた超伝導撚線およびステンレス鋼ジャケットで構成される CICC である。超伝導撚線には、JASTEC および古河電工によって製作されたブロンズ法 Nb₃Sn 素線と Kiswire Advanced Technology(KAT)によって製作された内部拡散法 Nb₃Sn 素線が用いられる。撚線は 5 次ツイストピッチを 450 mm として製作されるが、撚線をジャケットに引き込む際撚線先端の 5 次ツイストピッチが 450 mm から最大 590 mm まで伸びてしまうことが確認されている。これは、引き込み時に最大で 30kN 程度の力を加えることと、撚線に対して回転拘束ができないことが原因であると考えられる。そこで、引張り試験機を用いて短尺撚線のツイストピッチを意図的に伸ばして、ツイストピッチを伸ばした短尺導体を製作した。その導体の性能評価試験を行い、ツイストピッチが分流開始温度(T_{cs})に与える影響を調べ、導体製作時におけるツイストピッチの上限値($L_{5,UL}$)を決めた。

製作した実機導体とツイストピッチを伸ばした導体の性能評価試験は、スイス・プラズマ・センター(SPC)の SULTAN 試験装置[3]を用いて行った。SULTAN 試験では、450 mm の範囲に導体軸方向に対して垂直に磁場を印加し、10.85 T における 45.1kA 通電時の T_{cs} を測定した。また、CS 運転を模擬するため、10,000 回以上の電磁力サイクルを与え導体の健全性を調べた。

3. 試験結果

Fig.1 に、引張り試験機によって撚線に引張り力を印加したときの 5 次ツイストピッチの変化を示す。撚線製作直後のツイストピッチは 450 mm だが、引張り力 0 kN においてツイストピッチが約 500 mm になっているのは、撚線からサンプルを切断すると拘束がなくなり撚り戻しが発生するためである。各社の撚線のツイストピッチは引張り力に対して増加することがわかり、引き込み力と同じ 30kN を加えればツイストピッチ 600 mm 以上の導体が製作できることがわかった。

Fig.2 に、通常通りに製作された導体から採取したサンプルと引張り試験機によってツイストピッチを伸ばしたサンプルの T_{cs} の測定結果を示す。Fig.2 より、いずれの導体の T_{cs} も仕様値 (6.5 K) 以上であることが確認できた。従って、ブロンズ法素線と内部拡散法素線においてそれぞれのツイストピッチが 586 mm、543 mm まで伸びても T_{cs} への影響は無いことがわか

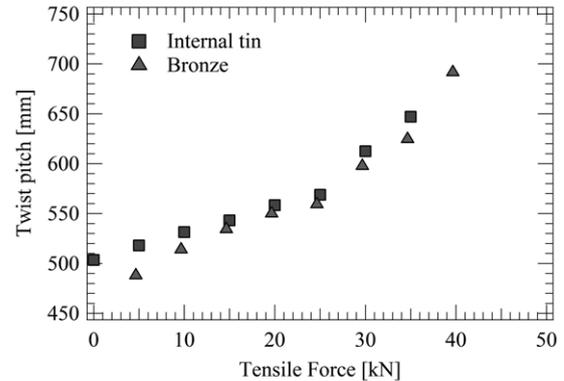


Fig.1 Twist pitch was elongation by tensile test.

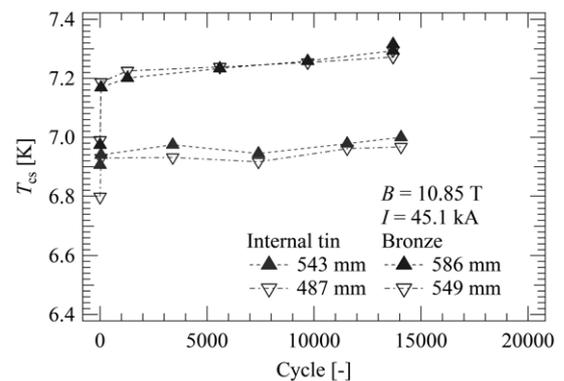


Fig.2 Current sharing temperature (T_{cs}) against electromagnetic loading cycles. Solid symbols show T_{cs} of samples with elongated twist pitch by tensile test.

った。これは、5 次ツイストピッチが伸びても 1 次から 4 次ツイストピッチが変化しないため、電磁力に対する撚線の剛性も変化しないことが原因と考えられる。

4. まとめ

撚線をジャケットに引き込む時に撚線のツイストピッチが伸びることは回避できないため、 T_{cs} に与えるツイストピッチの影響を調べた。ブロンズ法素線と内部拡散法素線を用いた撚線のツイストピッチを意図的に 586 mm、543 mm まで伸ばしても通常通り製作した導体の T_{cs} との差はないことがわかった。従って、586 mm、543 mm 程度までツイストピッチが伸びても、 T_{cs} には影響を与えないと言える

参考文献

1. Y. Nabara, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 25, No 3, June 2015 4200305.
2. T. Suwa, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, No 4, June 2016, 4803505.
3. P. Bruzzone, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3, June 2009, 1508.

種々の Cu 合金母材を用いた内部拡散法 Nb₃Sn 線材の研究

Internal-Sn processed Nb₃Sn wires prepared from different Cu alloy matrix

伴野信哉, 二森茂樹(物材機構); 宮本泰男(東海大学); 太刀川恭治(物材機構、東海大学)

BANNO Nobuya, NIMORI Sigeki (NIMS); MIYAMOTO Yasuo (Tokai Univ.); TACHIKAWA Kyoji (NIMS, Tokai Univ.)

E-mail: tacsuper@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. 緒言

内部拡散法では、任意の Cu 母材を用いることにより線材の機械的特性や超電導特性を高めうる可能性がある。著者らはこの観点から Cu-15wt%Zn 合金(Gold Brass)を用いた線材や [1]、Cu-5wt%Ge 合金を用いた線材について報告した[2]。本研究では、新たに Cu-10wt%Ga 合金を母材にした線材を作製し、これまでの結果と比較、検討した。

2. 実験方法

Cu-10wt%Ga 合金を溶製し、これに Nb 芯を複合した要素と、Cu に Sn-1.6wt%Ti 芯を複合した要素を Nb シースに組み込んで 0.8mmΦ の 36 芯線に加工した後、1 気圧の Ar 雰囲気中で熱処理を行った。熱処理後の線材断面を EDX により観察し、また、生成された Nb₃Sn 層の組成を EPMA 分析により求めた。さらに試料の T_c を SQUID 磁力計により測定、比較した。

3. 実験結果と考察

10Ga 母材は 15Zn 母材に比べると加工硬化がやや著しかったが、線材に加工することが出来た。なお、500°Cにおける Cu に対する Zn、Ge、Ga の固溶限はそれぞれ約 37、12、20wt%である。Fig.1 に 10Ga 母材線を 700°Cx200h の熱処理後の Nb 芯周りの EDX mapping を示した。厚さ約 12 μm の Nb₃Sn 層がほぼ均一に生成している。図 (b) の Ga は母材から Nb₃Sn 層の周りに拡散して Nb₃Sn 層に少量均一に固溶した後、Nb 芯に到達して薄いリングを形成する。このように Ga は母材から Nb₃Sn 層を通過して、残留 Nb 芯の周りに集まる。

Fig.2 に 750°C x 100h 熱処理後の Nb₃Sn 層の Sn、Ga、Ti、Cu の EDX 線分析図を示した。Nb₃Sn 層の厚さは Fig.1 より若干増加し、約 15 μm となる。なお、縦軸の強度目盛りは各元素により異なる任意目盛りである。各元素とも Nb₃Sn 層内の分布はほぼ均一である。Ga には Fig.1 にみられるリングに対応して Nb 芯近くにピークの形成が認められる。

Table 1 に 700°Cx200h 熱処理後に生成される Nb₃Sn 層の組成を前報の Cu 母材線(Cu)、Cu-15Zn 母材線(15Zn)及び Cu-5wt%Ge 母材線(5Ge)の値と比較して示した。全試料について Ti は約 1wt%含まれ、Ge、Ga 量は 2wt%前後である。Cu は Cu 母材線でやや多く、10Ga 母材線でやや少ない。Sn 量は Cu 母材線と 15Zn 母材線と同程度であるが、5Ge 母材線で少なく、10Ga 母材線で多くなる。

Fig.3 には各試料の onset 近くの T_c 遷移を比較して示した。Cu 母材線と 15Zn 母材線はほぼ同じ T_c を示したが、15Zn 母材線の方が遷移がやや鋭い。これらに比較して 5Ge 母材線は T_c が低く、10Ga 母材線は高い。5Ge 母材線の T_c は 750°C の熱処理で高められ、700°C 熱処理の Cu 母材線及び 15Zn 母材線の値より高くなる。10Ga 母材線はこれらの中で最も高い遷移を示す。T_c は Table 1 に示した Nb₃Sn 層の Sn 量と関係し、Sn 量の多いほど高くなる。

これまでに用いた種々の合金母材を比較すると、15Zn 母材は加工性が最もよく、Sn の拡散を促進し、Zn-Ti 化合物の生成もなく、Nb₃Sn 生成後も Zn はそのまま母材に残るので、標準的な母材といえる。5Ge 母材は Nb₃Sn 層の周りに Ge リングを形成するのが特徴で、Sn の Nb 芯への拡散を遅らせるが、Nb₃Sn 芯を包んで機械的に補強し、また交流特性にも有利であろう。今回の 10Ga 母材線において残留 Nb 芯の周りに Ga リングが形成されるのは、Nb-Ga 中間層が生成されやすいためと考えられる。10Ga 線材は Nb₃Sn 中の Sn 濃度が多く、T_c

が高いのが特徴である。本報告の製法は今後も改良、発展の可能性があると考えられる。

[1] 太刀川恭治、伴野信哉、宮本泰男、日本金属学会誌 80 巻 7 号(2016)480-486, [2] N. Banno, Y. Miyamoto, K. Tachikawa: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 93 (2016) p.33

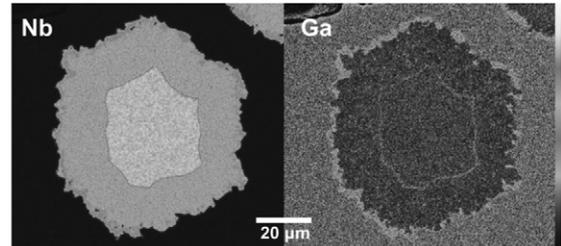


Fig.1 EDX mapping of Nb and Ga in Nb₃Sn filament reacted at 700°C for 200h.

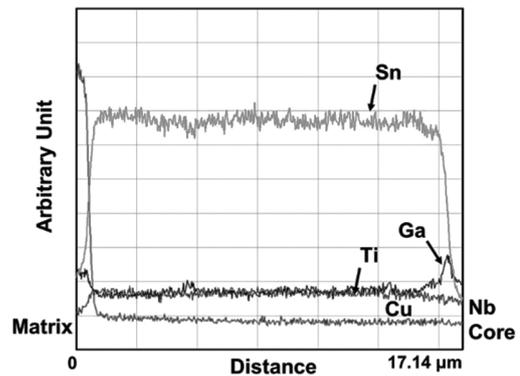


Fig.2 EDX line scanning chart for Sn, Ga, Ti and Cu across the Nb₃Sn layer reacted at 750°C for 100h.

Table1 Composition of Nb₃Sn layer in different matrix wires heat treated at 700°C for 200h.

Matrix	Nb	Sn	Ge	Ga	Cu	Ti
Cu	70.60	22.49	—	—	5.62	1.29
15Zn	71.78	23.28	—	—	3.83	1.11
5Ge	71.80	21.06	1.93	—	4.12	1.09
10Ga	68.02	25.88	—	2.10	3.13	0.87

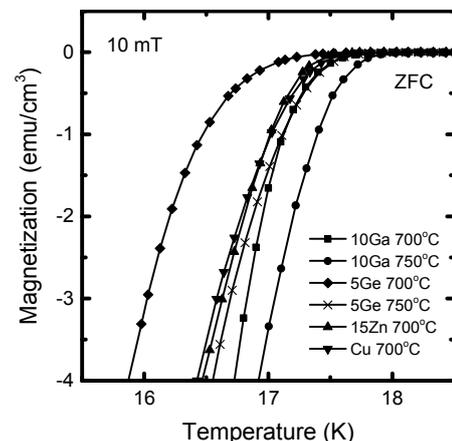


Fig.3 T_c transition for quoted wires measured by SQUID.

Brass 法による極細多芯 Nb₃Sn 線の作製と組織Multifilamentary Nb₃Sn wires fabricated through Brass method and their microstructures

伴野信哉(物材機構); 宮本泰男(東海大学); 太刀川恭治(物材機構, 東海大学)

BANNO Nobuya (NIMS); MIYAMOTO Yasuo (Tokai Univ.); TACHIKAWA Kyoji (NIMS, Tokai Univ.)

E-mail: tacsuper@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

1. 緒言

内部拡散法 Nb₃Sn 線材において、Cu 母材に Zn を添加した合金マトリクスを用いると、Sn 拡散が促進され、母材における残留 Sn 濃度の低下とともに、厚い Nb₃Sn 層の形成に繋がることがこれまでの実験結果から明らかとなってきた。著者らはさらに、Sn 拡散のさらなる促進を目的に Nb フィラメントの極細化を図り、構成元素の拡散挙動を調べてきた [1]。加えて、 J_c 向上には Nb 占積率の向上が不可欠となる。本研究では、デザインを見直し、熱処理時の Ti 化合物の生成を抑制しつつ、Nb 占積率の増加を図った。これにより、16 T では 600 A/mm²、12 T では 1400 A/mm² を超えるマトリクス J_c が得られた。これらの値はブロンズ法線材の特性を凌駕する。しかし、断面設計、熱処理条件はまだ十分に最適化されておらず、本線材の潜在的なポテンシャルが期待できる。

2. 実験方法

基本的な試料の作製手順は次のとおりである。まず Gold Brass (Cu-15wt%Zn 合金) を母材とした Nb 多芯線を作製し、併せて Cu を母材とした Sn-1.6wt%Ti 単芯線を準備する。ここで、サブバンドルの構成要素として Nb 多芯線と Sn-Ti 単芯線とに分けるのは、Nb 多芯線に対して中間焼鈍を可能とし、良好な線材加工性を確保するためである。次にそれぞれを設計に合わせて所定の本数ずつ組み合わせフィラメント領域を構成したのち、パリアとなる Nb シース、Cu シースに組み込む。のち、伸線加工を経て極細多芯前駆体線とする。本研究では、Nb 芯数、Nb フィラメント径、Nb 占積率の異なる 3 種類の極細多芯前駆体線材 (MF817、MF4477、MF684) を準備した。線材諸元を Table 1 に、また各線の断面を Fig. 1 に示す。

各線材は 550°C × 50~100 h、650°C × 100 h の予備加熱をしたのち 700°C × 200 h の熱処理を施した。熱処理はいずれも 1 気圧の Ar 雰囲気中で行った。熱処理後の線材断面を FESEM、EPMA、EDX により観察し、マトリクスならびに生成された Nb₃Sn 層の組成分析を行った。また磁場中の J_c 測定を行い、フィラメント領域面積で除して J_c を求めた (マトリクス J_c)。

3. 実験結果と考察

MF817 線は、フィラメント領域の Nb 占積率が低く、マトリクス比が大きかったため、Nb フィラメント間に十分な Sn-Ti の拡散経路が確保された。Sn、Ti は外側まで十分拡散し、Nb 芯はほぼ Nb₃Sn 層へと変化し、Nb 芯極細化の効果が確認されている。しかし、外側 Nb フィラメントには若干未反応の Nb 芯が見られており、改善の余地は残されている [1]。

次の MF4477 線については、マトリクス比を極力低減して、Nb 占積率を 2 倍近く高め、加えて Nb 芯径をさらに縮径化することで、 J_c 向上を追求する設計とした。本線材を同様に 550°C、650°C、700°C と熱処理を行ったところ、650°C を超えた辺りから、内側のフィラメントサブバンドル内の Nb 芯が Nb₃Sn 相へ変化するのに伴って、Nb₃Sn 層が膨張し、フィラメントサブバンドル間で Ti 化合物による拡散経路の詰まりが生じることが確認された。これには Sn 芯中の Ti 量が多すぎたことも考えられる。Fig. 2 に示すように、Ti 化合物の詰まりは 700°C 熱処理後も解消されることはなく、Sn 拡散がブロックされ、外側 Nb フィラメントでは Nb₃Sn 層の形成が極めて不十分となった。

これらの結果をもとに、MF684 ではフィラメントサブバンドル間の Sn、Ti 経路を確保するよう Nb 芯数、Nb フィラメント径、マトリクス比を再デザインした。700°C で熱処理した試料につ

いて組織確認したところ、Ti 化合物の詰まりは確認されなかった。サブバンドル内の Nb フィラメント間は非常に狭く、サブバンドルは Nb₃Sn 層としてほぼ一体化する。サブバンドル内では Ti は Nb₃Sn 層内を Sn とともに粒界拡散していくものと考えられる。この様に線材設計の改良により大幅に J_c が向上した。[1] N. Banno, Y. Miyamoto, K. Tachikawa, IEEE TAS 27 (2017) 60000205.

Table 1 Specifications of multifilamentary-type Brass-method Nb₃Sn wires.

	MF817	MF4477	MF684
Wire diameter (mm)	0.6	0.6	0.6
No. of filaments	19×43	121×37	19×36
Filament diameter (μm)	5.94	3.5	8.18
Area fraction in filament region (%)			
Matrix	63.5	35	43.2
Nb cores	23.5	44.5	36.3
Sn-Ti cores	13.0	20.5	20.4

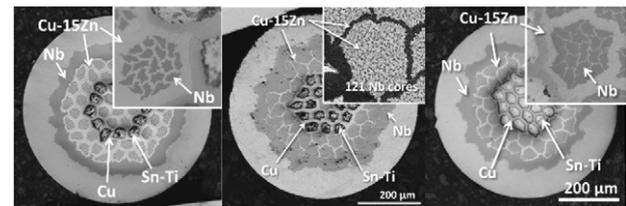


Fig. 1 Cross-sections of developed precursor wires, MF817, MF4477 and MF684 from left.

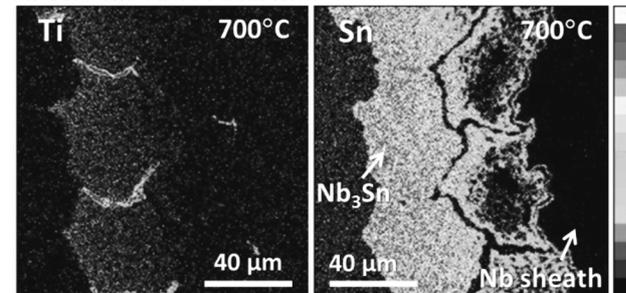
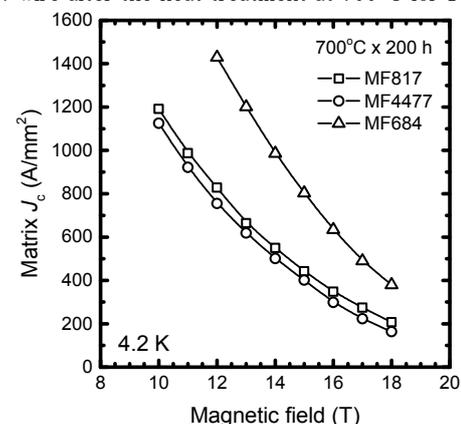


Fig. 2 EPMA mapping (Ti, Sn) on the sub-bundle area of MF4477 wire after the heat treatment at 700°C for 100 h.

Fig. 3 J_c - B characteristics of all samples. J_c of MF684 is about 600 A/mm²@16 T and 1400 A/mm²@12 T, which are far beyond those of conventional bronze-route Nb₃Sn wires.

Cu-Sn-Zn 三元系ブロンズを用いた Nb₃Sn 線材の超伝導特性における 一方向引張ひずみ効果

Unidirectional tensile strain effect on superconducting property of Nb₃Sn multifilamentary wires using various Cu-Sn-Zn ternary bronze matrices

菱沼 良光 (核融合研) ; 小黒 英俊 (東海大) ; 谷口 博康 ((株)大阪合金工業所) ; 菊池 章弘 (物質・材料研究機構)
HISHINUMA Yoshimitsu (NIFS); OGURO Hidetoshi (Tokai Uni.);
TANIGUCHI Hiroyasu (OAW); and KIKUCHI Akihiro (NIMS)
E-mail:hishinuma.yoshimitsu@nifs.ac.jp

1. はじめに

Zn を固溶した高 Sn 濃度 Cu-Sn-Zn 合金母材を用いた Nb₃Sn 極細多芯線材の試作に成功し、Zn による Nb₃Sn 相の生成促進効果と均質な Zn の母材中での残存を報告している [1]。そして、残存した Zn が Nb₃Sn 相生成後の母材の固溶強化に寄与する可能性があり、Nb₃Sn 線材の高強度化への新しい試みとなると考えられる。そこで、Zn を固溶した Cu-Sn-Zn 合金母材を用いた Nb₃Sn 極細多芯線材の機械特性を明らかにする目的で、線材に一方向引張ひずみを印加した時の臨界磁場特性の変化について評価した。

2. 実験方法

Table.1 に示すような種々の Sn 量と Zn 量の Cu-Sn-Zn 母材を用いたブロンズ法 Nb₃Sn 極細多芯線材 (線径: 0.9mm) を用意し、550 °C-100 h+650 °C-100h の二段熱処理を行った。その際、Ar 雰囲気とした。これは、熱処理過程での Zn の蒸発を抑制する目的である。

臨界磁場特性における引張ひずみ効果は、超伝導線材の機械特性の評価に実績のある東北大金研の協力のもと、Fig.1 に示す強磁場下引張ひずみ印加装置を用いて評価した

Table. 1 Nominal composition of the Cu-Sn-Zn bronze matrices for the bronze processed Nb₃Sn multifilamentary wires

Item (code)	Matrix (mass%)
Sample-A	Cu-10Sn-10Zn-0.3Ti
Sample-B	Cu-12Sn-6Zn
Sample-C	Cu-12Sn-6Zn-0.3Ti
Sample-D	Cu-13.5Sn-4Zn-0.3Ti

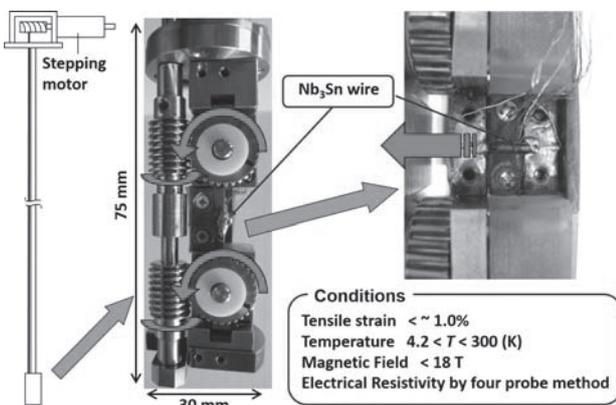


Fig. 1 Sample setting configuration of the H_{c2} measurement with unidirectional tensile deformation

[2]。線材長は 15mm とし、線材両端を Cu 電極に半田付けした。そして、電圧端子間距離を 10mm とした。そして、一方の電極が長手方向にスライドすることで線材に一方向の引張変形が加えられる。引張変形に伴うひずみ量は、線材を上下に挟むように接着したひずみゲージの出力の平均値とした。試料をセットしたプローブを 18T 超伝導マグネットに挿入した。

電気抵抗率と外部磁場の関係 (R-B 曲線) は、試料を所定のひずみを加えた後に、100mA の電流を通电しながら外部磁場を掃引した。臨界磁場 (H_{c2}) は、R-B 曲線のオフセットとした。

3. 実験結果

Fig.2 に、Sample-D 線材における一方向引張変形前後の R-B 曲線の比較を示す。温度は 10K とした。変形前の臨界磁場は、15.444 T と見積もられた。一方、0.1% の引張ひずみを印加すると、15.667 T となり、特性が向上した。これは、臨界電流特性の挙動と同様に、線材内部の残留ひずみが、引張変形に伴って緩和されるためであると考えられる。

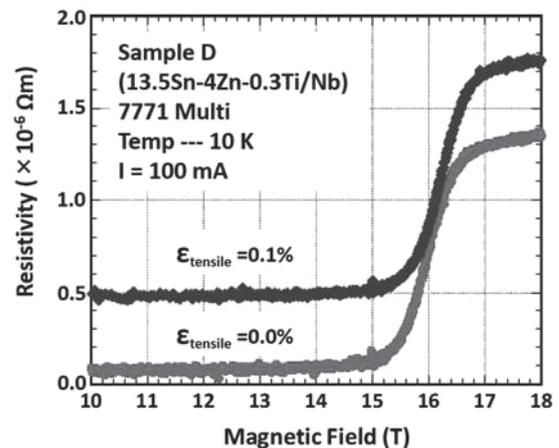


Fig. 2 R-B curves under 10 K of the sample-D wire before and after unidirectional tensile deformation

- 1) Y. Hishinuma et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., 50, (2014), p.194-201.
- 2) H. Oguro et.al: IEEE Trans. Appl. Supercond, 20, (2010), p.1424-p.1427

本研究は NIFS 核融合工学プロジェクト(UFFF036)、NIFS 一般共同研究(NIFS14KECF013)、及び科研費(基盤(B)16H04621)の支援を受けた。そして、引張ひずみ印加下での測定は、東北大学金研共同利用研究(15H0024)に採択されて実施された。

超高スズ濃度ブロンズ法 Nb₃Sn 極細多芯線材の研究開発

Research and Development of Super-High-Tin Content Nb₃Sn Multifilamentary Wires

菊池 章弘 (NIMS); 谷口 博康, 水田 泰次, 水田 泰成 (大阪合金); 飯嶋 安男 (NIMS)
 KIKUCHI Akihiro (NIMS); TANIGUCHI Hiroyasu, MIZUTA Taiji, MIZUTA Yasunari (OAW); IJIMA Yasuo (NIMS)
 E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

ブロンズ法 Nb₃Sn 線材の高性能化は、ブロンズ原料の高 Sn 濃度化により達成されてきた。我々は、ブロンズ法 Nb₃Sn 線材の一層の特性向上を図るために、新しい超高 Sn 濃度ブロンズ合金の開発を精力的に推進している。α相の Sn 固溶限をはるかに超えた過去最高の Sn 濃度となる Cu-18.5mass%Sn ブロンズでも、Ti 添加量を調整することで優れた冷間加工性が発現する。今回、新しい高 Sn 濃度ブロンズを原料に極細多芯線の試作を行った。

2. 高 Sn 濃度ブロンズ原料の作製

新しい高 Sn 濃度ブロンズ合金は、黒鉛坩堝を直接水冷しながら一方向凝固させる「水田式溶製法」により溶製した。溶製塊は、量産サイズ(～φ220)よりも小さいφ80の実験サイズで、溶製後は組織の均質化のために600℃で200hの均質化熱処理を大気中で実施した。組成は Cu-17.5mass%Sn-0.0mass%Ti 及び Cu-18.5mass%Sn-1.6mass%Ti と、比較のための通常の Cu-16mass%Sn-0.3mass%Ti 組成のブロンズも作製した。高 Sn 濃度ブロンズは適当な熱間鍛錬を実施して組織制御を行った。

3. 熱間押出加工

Fig.1 は 19 芯サブマルチビレットの外観写真である。外径が約 50mm で内径が約 44.5mm の無酸素銅管に、外径 44mm の 19 芯ブロンズを挿入し真空中で電子ビーム溶接して CIP を行った。これを熱間押出して、外径 15mm に縮径した。Fig. 2 は熱間押出後の 19 芯サブマルチの外観である。熱間押出は全く問題なく完了できた。押出比は 11.1 である。さらに押出後の 19 芯サブマルチを六角形状に伸線加工し、それを束ねて Nb 芯が 1615 本となるようなマルチビレットを作製し、サブマルチと同様な熱間押出を実施した。マルチビレットの押出も問題なく実施できた。

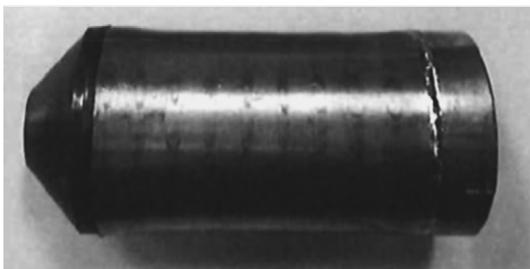


Fig. 1 19 filament sub-multi billet using new high tin bronze alloy.

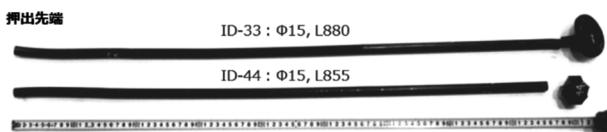


Fig. 2 19 filament sub-multi rod after hot extrusion. Extrusion ratio is 11.1.

4. 極細多芯線材の冷間伸線加工

熱間押出後のマルチ材は、冷間で伸線加工と中間焼鈍を行って、外径 1.0mm まで縮径した。さらに加工性を確認するために、一部は外径 0.3mm まで伸線加工を行った。Fig.3 は 18.5mass%Sn-1.6mass%Ti 組成の高 Sn 濃度ブロンズ合金を使用した極細多芯線材の断面で、外径は 0.3 mm である。きれいな多芯構造で、断面の崩れはみられない。さらに Fig. 3 の一部を拡大した写真が Fig. 4 である。フィラメント径は約 5 ミクロン。ブロンズマトリクスにはサブミクロン径の Ti 化合物粒子が観察される。

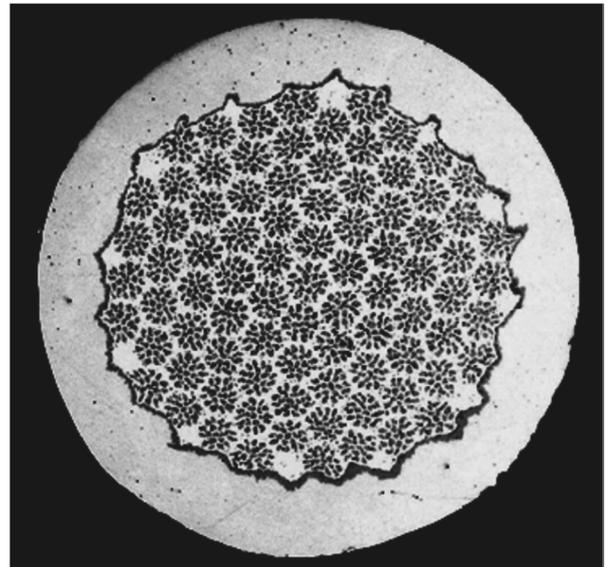


Fig. 3 1615 filaments bronze-processed wire using Cu-18.5mass%Sn-1.6mass%Ti bronze alloy. The wire diameter is 0.3 mm.

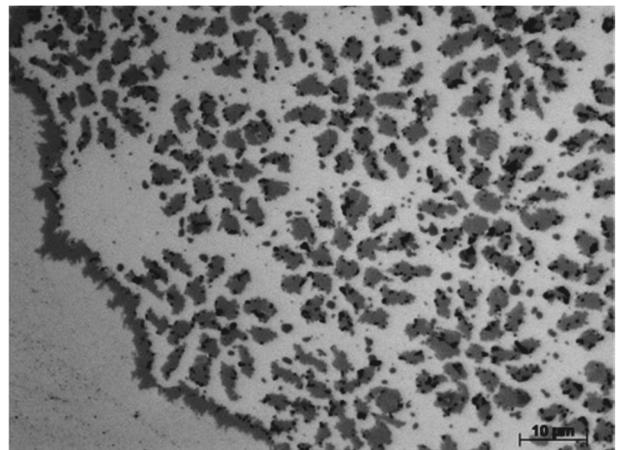


Fig. 4 Enlarged image of Fig. 3. The Nb filament diameter is about 5 microns.

Ta-Ni 合金をフィラメント間母材とした Nb₃Al 線材の諸特性 Characteristics of Nb₃Al wires with interfilament matrix of Ta-Ni alloy

菊池 章弘, 飯嶋 安男, 平田 和人 (NIMS); 土屋 清澄 (KEK); 内田 聖, 高尾 智明 (上智大)
 KIKUCHI Akihiro, IJIMA Yasuo, HIRATA Kazuto (NIMS); TSUCHIYA Kiyosumi (KEK);
 UCHIDA MIO, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.)
 E-mail: KIKUCHI.Akihiro@nims.go.jp

1. はじめに

フィラメント間母材を Ta-Ni 合金とする新しいデザイン Nb₃Al 線材の研究開発を進めている。ジェリーロールシングルビレットの再外皮は、これまで Nb 箔あるいは Ta 箔のみを複数回巻いて拡散バリア(フィラメント間母材)としていたが、Nb 箔あるいは Ta 箔とともに加工性が良好な Ni 箔も同時に巻いて急熱急冷処理時に反応させて合金化する。

2. 前駆体線材

Nb/Al ジェリーロール積層体の外周に通常は Ta 箔のみを巻き込んで拡散バリアとするが、今回のデザインは、Ta 箔(厚さ 100 ミクロン)の間に Ni 箔(厚さ 10 ミクロン)を巻き込んだ構造にしている (Fig. 1)。冷間で静水圧押出加工を行い、その後伸線加工して六角に成型したジェリーロールシングル材を 78 本束ねてマルチビレットを作製し、再び冷間で静水圧押出加工と伸線加工により、外径 1.0 mm とした (Fig. 2)。

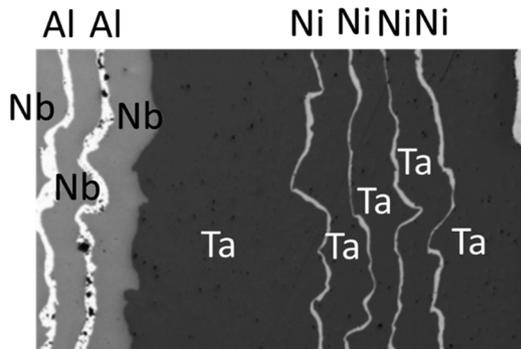


Fig. 1 Jelly-Rolled single precursor with pure tantalum and pure nickel lamination barrier.

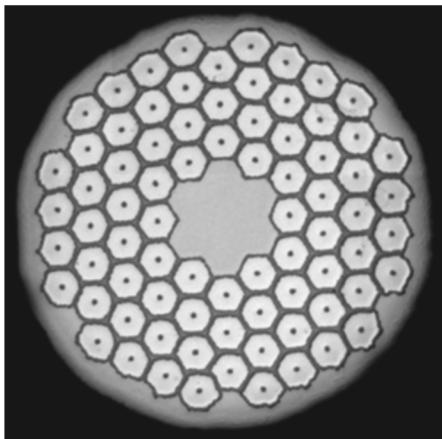


Fig. 2 78 filaments precursor wire with pure tantalum and pure nickel lamination barrier.

3. 急熱急冷処理

Fig.3 はバリア部分を拡大した EPMA による Ni のマッピング図である。急熱急冷処理前の Ni はバリア部に細かく分布しており機械的に混合された様相を呈しているが、急熱急冷処理の高温熱処理で隣接する Ta と反応して Ni が濃化し、バリアは Ni が網目状に分布する組織となっている。

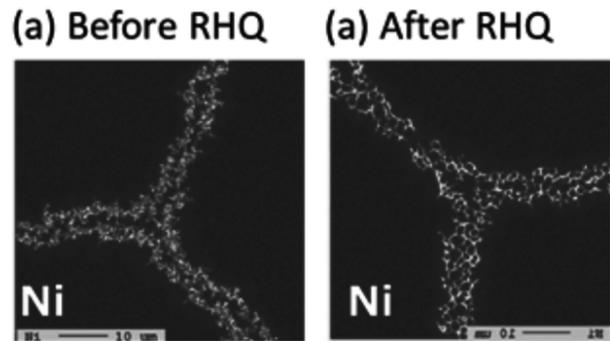


Fig. 3 EPMA mapping of Ni for filament barrier region (a) before and (b) after RHQ treatment.

4. 引張試験(室温)の結果

Fig. 4は、急熱急冷処理後の線材(外径1.0mm)の室温における引張試験の結果である。バリア部が通常の純Nbの線材、Nb-Niの線材、Nb-Alの線材、及びTa-Niの線材を比較した。Ta-Niバリアの線材の引張強度は1GPaが得られ、通常のNbバリア線材より20%ほど高強度である。

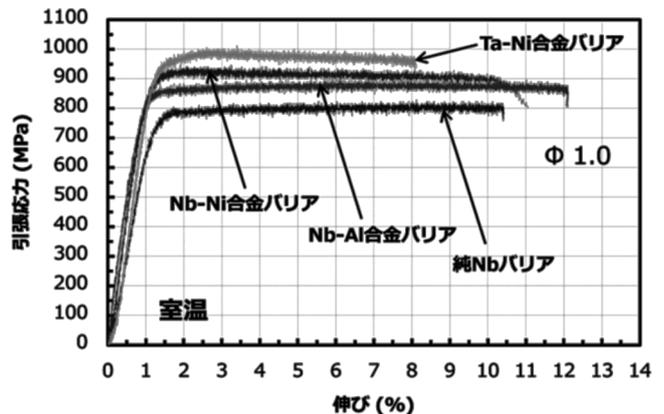


Fig. 4 Tensile test of 78 Nb-Al solid solution filaments wire with deferent interfilament matrix.

5 kW 級ビスマス系高温超伝導誘導同期モータのガス冷媒冷却下回転特性に関する実験的検討

Experimental study on rotating characteristics of Bi-based HTS induction/synchronous motor under refrigerant gas cooling

中村 武恒, 西野 竜平, 黒田 健太郎 (京大); 今川 信作 (核融合研)

NAKAMURA Taketsune, NISHINO Ryohei, KURODA Kentaro (Kyoto Univ.); IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

E-mail: nakamura.taketsune.2a@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、温度可変駆動型の高温超伝導誘導同期モータ (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Motor: HTS-ISM) に関する研究開発を推進している。即ち、運転温度が変化する条件においても駆動可能な HTS-ISM の研究を行っている。また、上記モータを極低温液体循環移送ポンプに適用する検討を実施している[1]。上記研究を推進するためには、温度可変条件下における回転試験システムの開発が不可欠である。本講演では、まず 5 kW 級 HTS-ISM を設計・試作した。また、同モータを冷却するクライオスタットに GM 冷凍機を設置して、ガス冷却時回転試験に成功したので報告する。

2. 5 kW 級機の試作と試験方法

本研究では、ビスマス系高温超伝導テープ材を使用して 5 kW 級回転子の設計・試作を実施した。同回転子と銅固定子 (3相4極) を組み合わせ (Fig. 1), かつ鉛直上向きに設置して、上部のパウダーブレイキによって負荷を印加した。Fig. 2(a) には、回転試験用ホルダーに設置した試作機の外観様子を示す。また、Fig. 2(b) にはクライオスタットの外観写真を示すが、トップフランジに GM 冷凍機を設置し、当該コールドヘッドと試作機ケーシングを伝導冷却する構造を開発し、さらにはガス封入冷却条件下で回転試験を実施できるようにした。

3. 結果と考察

Fig. 3 には、温度 116 K (HTS 回転子: 常伝導状態) と 73 K (HTS 回転子: 超伝導状態) における無負荷急加速試験結果の一例を示す (窒素ガスを封入・冷却して実施)。同図に示すように、116 K では加速指令に対して遅れが発生しているが、73 K では速やかに加速追従しており、これは非線形磁束フロー抵抗に伴う特性と推測できる。実験系の冷却構造や、あるいは定常回転特性など、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

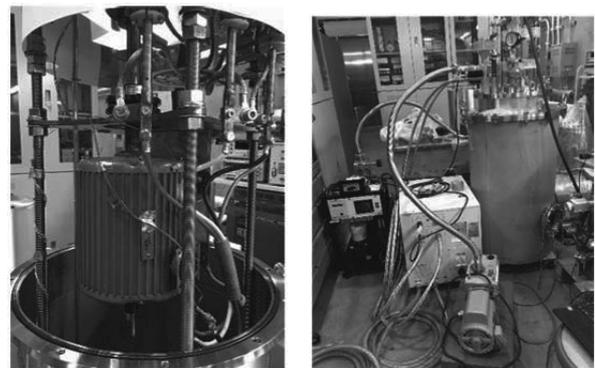
本研究は、科学研究費補助金 (基盤研究 (B), 26289076) ならびに核融合科学研究所・一般共同研究の一環として実施された。

参考文献

1. T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, vol. 92, 3A-a11 (2015).

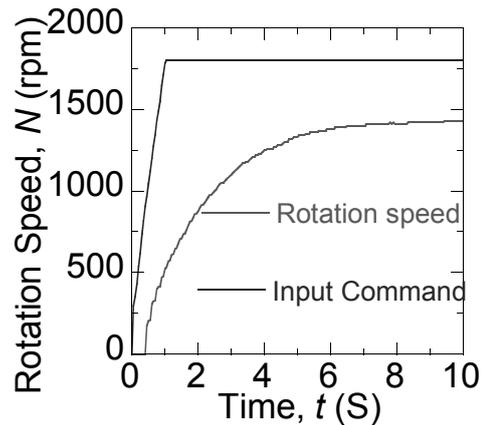


Fig. 1 Photograph of fabricated 5 kW class HTS-ISM

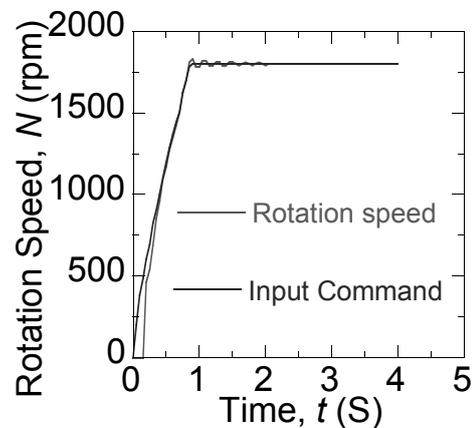


(a) Fabricated motor (b) Cryostat

Fig. 2 Photographs of test system



(a) 116 K



(a) 73 K

Fig. 3 Typical results of no-load acceleration test (Nitrogen gas is sealed and cooled by the use of a GM cryocooler)

ガスの熱伝導・対流・熱伝達を利用した 全超電動回転機の回転子冷却の可能性の検討と熱解析

Feasibility study on rotor cooling of fully superconducting rotating machines using gas heat conduction, convection and heat transfer based on thermal analysis

田中 翔, 寺尾 悠, 大崎 博之 (東大)
 TANAKA Sho, TERAJO Yutaka, OHSAKI Hiroyuki (Univ. of Tokyo)
 E-mail: tanaka@ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp

1. 研究背景と目的

全超電導回転機は航空機用モータや風力発電機等様々な分野への応用が考えられている。しかし電機子と回転子を別々に冷却するための冷媒流路を考える必要があり、構造が複雑化するため、より簡単な冷却構造を考案する必要がある。本研究では、ガスによる熱伝導や回転で生じる渦による熱伝達及び、軸方向に流体を循環させた場合の対流による伝熱促進を利用した回転子冷却の可能性を熱解析により検討する。

2. 冷却機構

本研究では界磁巻線に臨界温度 92 [K]の YBCO 線材、電機子巻線に臨界温度 39 [K]の MgB₂ 線材を想定する。冷却機構としては固定子側を冷媒の伝導冷却により 20 [K]に冷却し、回転子側は固定子との熱伝達によって冷却された固定子-回転子間のガス流体によって間接的に冷却する。必要であればなんらかの方法で回転軸方向にガスを流して伝熱促進させ、回転子の温度を 50 [K]程度に冷却する。

3. 解析方法

Table 1 の回転数の異なる二つのモデルに対して二次元軸対象モデルを作成した(Fig. 1)。境界条件は流体の固定子境界を 20 [K]、回転子境界には回転二重円筒の熱伝達率を与えた[1]。回転子の側面から侵入熱があるとして変数として与え、その他の境界は断熱条件である。FEM解析を行い定常状態の温度分布を求める。回転子表面の温度が 50 [K]になる侵入熱(許容侵入熱と呼ぶことにする)を求めて、風損や実際の侵入熱と比較して冷却可能かを検討する。

4. 解析結果

ガス He を冷媒として用いた場合の流体の圧力と許容侵入熱、風損の関係を Fig. 2 に示す。高速回転機と同様の SuperGM プロジェクトの研究報告によれば侵入熱が約 40 [W]であるため Fig. 2 (a)より風損を考慮すれば 10⁻²~1 [Pa]の低圧のガス He を用いれば冷却可能であることが分かる。

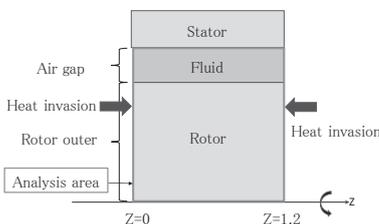


Fig. 1: 2D axisymmetric model of the fully superconducting machine

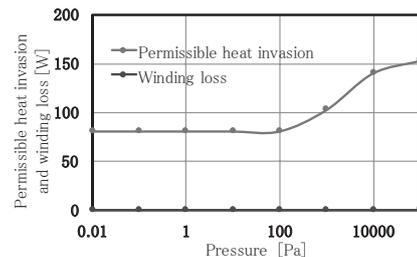
Table 1: 全超電導回転機モデルの仕様

Model	1: Low-speed	2: High-speed
Power [MW]	10	70
Rotational speed [rpm]	10	3600
Air gap [mm]	80	20
Rotor diameter [m]	3	0.88
Axial length [m]	1.2	2.435

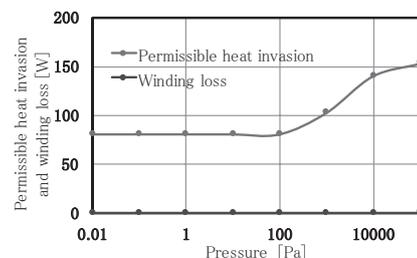
一方低速回転機の場合風損は小さいがトルクが大きく、侵入熱が概算で約 1800 [W]と大きくなることが予想されるため許容侵入熱を大きくする必要がある。そこで流体を回転軸方向に流した場合について He の流量を変えて熱解析を行ったところ流量を大きくすると許容侵入熱が大きくなり、冷却におよそ 1 [kg/s]の流量が必要であることが分かった(Fig. 3)。

5. 結論

本研究によって、風損が大きくなる高速回転機やトルクチューブからの侵入熱が大きくなる低速回転機場合に関しても、流体の適切な圧力を選んだり強制的な流れを作りだしたりすることによって冷却可能であることが分かった。モデル設計を詳細にすることが課題である。また冷媒にガスを用いると軸受部を冷却してしまうため、冷却部分と軸受部に温度勾配をもたせることが望まれ、構造についても再度考える必要がある。



(a) 10rpm



(b) 3600rpm

Fig. 2: Permissible heat invasion and winding loss as a function of pressure

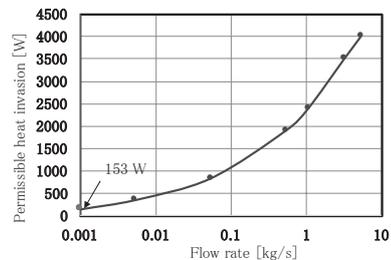


Fig. 3: Permissible heat invasion as a function of flow rate

参考文献

[1] M.Fenot, et. al “A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow,” International Journal of Thermal Sciences 50, 2011.

閉磁路型収束着磁法を用いた高温超電導界磁磁石の電磁界解析

Magnetic Field Analysis of High-Temperature Superconductor Field Pole Using Convergence-Magnetized Method with Closed Magnetic Circuit

都築 啓太, 鈴木 悠之介, 及川 大, 安藤 浩哉, 塚本 武彦(豊田高専)
 Tsuzuki Keita, Suzuki Yunosuke, Oikawa Dai, Ando Hiroya, Tsukamoto Takehiko
 (National Institute of Technology, Toyota College)
 E-mail : J1603@toyota.kosen-ac.jp

1. はじめに

現在、米国をはじめ、ドイツ、韓国を含めた各国で超電導材料を用いた回転機の開発が盛んにおこなわれている[1,2]。わが国でも高温超電導材料を用いた回転機の開発の動向について様々なグループが報告をしている。我々のグループでは、大型電気推進船舶用のモータにバルク高温超電導体(バルク体)を用いることで、高出力小型化を実現する研究を行っている。着磁をすることで永久磁石のように使用でき、励磁を必要としないというバルク体の特徴は、モータを小型化するという点において非常に重要な要素となる。

そこで我々のグループでは、静磁場着磁法を応用しバックヨークにより形成される磁路を効果的に用いた閉磁路型収束着磁法を考案した。先行研究において、電磁解析を用いた簡易的な捕捉磁束の再現手法により、提案手法によりモータ機器内でバルク体に着磁が可能であることを示した[3]。本研究では、閉磁路型収束着磁法を用いた際のバルク体の捕捉磁束密度の電磁解析を行い、出力計算を行うことで、高出力小型化が実現可能な超電導モータの構造設計を実施した結果について報告する。

2. 閉磁路型収束着磁法

回転機内において着磁を行う手法として、現状ではパルス着磁法や静磁場着磁法が有力である[4]。しかしながら、パルス着磁は銅巻線の電機子コイルを活用できるがバルク体と着磁コイルが瞬間的に大きな力を受けるため、支持具を強固なものにする必要がある。また超電導コイルの内径側に収束される静磁場着磁は着磁コイルそのものが大きなものとなるため、機器内に収めることが困難である。

本研究で用いる閉磁路型収束着磁法は電機子コイルとして巻線した超電導コイルを用いた静磁場着磁法に用いることでコンパクトな構造を実現するものでありラジアルギャップ型のバルク超電導回転機内に搭載される。

3. 捕捉磁束密度分布

本モータの基本的な構造を Fig.1 に示す。小型船舶用の推進動力用モータへの適応を目標とし、バックヨーク外形寸法 300 mm の 4 極同期型モータを出発点として概念設計を行った。界磁子には Gd 系のバルク超電導体、電機子コイルには Bi2223 超電導巻線を用いている。

電磁解析ソフトウェア (MagNet7) を用いて、超電導巻線に励磁電流を流した時のバルク体の捕捉磁場分布を計算した。

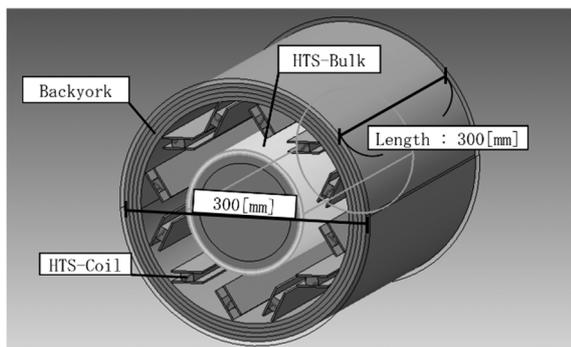


Fig.1 Schematic view of HTS motor

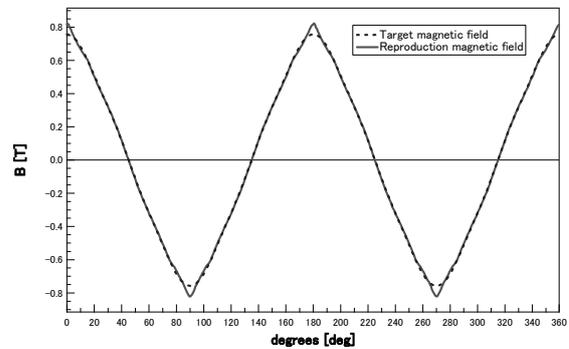


Fig.2 Trapped magnetic field distribution of bulk HTS field pole after magnetization at 1mm above the bulk surface

Table.1 Numerical parameters in HTS motor model

Output Power [kW]	15
Inner radius of rotor [mm]	70
Outer diameter of back iron [mm]	300
Thickness of back iron [mm]	20
Rotation speed [rpm]	1800
Output Torque [N·m]	80.9

4. 捕捉磁束密度および出力解析

Fig.2 に捕捉磁束密度の計算結果として、軸径方向の捕捉磁束密度分布を示す。捕捉磁束密度のピークは 0.8T となり、分布として機械角 360 度にとり、切れ目のない円錐状の分布を得ることが可能であることがわかる。Table.1 に本モデルを用いた出力解析の結果を示す。計算結果より目標出力 15kW、回転数 1800[rpm]と決定した。

5. まとめ

本研究では新たに考案した閉磁路型収束着磁法を用いた回転機の捕捉磁束密度の解析を行い、バルク超電導体を界磁として用いたモータの着磁を完了した。今後試作コイルおよびバルク超電導体を用いた実証実験を行い、大型超電導モータの概念設計を進める計画である。

参考文献

1. I.Kalsi and S. Karon: "Status of Superconducting Motors for Ship Propulsion", Marine Engineering Systems, No. 76,(2003)
2. Zhen Huang , et al.: "Pulsed field magnetization strategies and the field poles composition in a bulk-type superconducting motor", Physica C: Superconductivity, Vol. 534, Pages 73-81 (2017)
3. Y. Suzuki and K. Tsuzuki "Consideration of captured magnetic flux density in cylindrical HTS using finite element method", Tokai-Section Joint Conference on Electrical, Electronics, Information and Related Engineering, Po2-9 (2016)
4. Tetsuya Ida, et al.: "Waveform control pulse magnetization for HTS bulk magnet", Journal of Physics: Conference Series, Volume 695, Number 1(2016)

インフレーション探索を目的とした宇宙マイクロ波背景放射偏光観測のための 超電導磁気軸受開発の概要

Development of Superconducting magnetic bearing system for a CMB polarization modulator operating at below 10 K

松村知岳, 桜井雄基, 片山伸彦, 菅井肇(東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構); 下村俊貴, 寺地祐介, 寺尾悠,
大崎博之(東京大学); 今田大皓, 山本亮, 宇都宮真, 片坐宏一(JAXA/ISAS)

MATSUMURA Tomotake, SAKURAI Yuki, KATAYAMA Nobuhiko, SUGAI Hajime (Kavli IPMU); OHSAKI Hiroyuki,
SHIMOMURA Toshiki, TERACHI Yusuke, TERAU Yutaka (Univ. of Tokyo); IMADA Hiroaki, KATAZA Hirokazu,
UTSUNOMIYA Shin, YAMAMOTO Ryo (JAXA/ISAS)

E-mail: tomatake.matsumura@ipmu.jp

1. はじめに

本講演では、宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background=CMB)偏光観測により初期宇宙の物理を探索するための観測機器開発にて用いる超電導磁気軸受の開発概要、及び応用超電導分野に関わる挑戦的開発項目について紹介する。

2. 科学目的

宇宙論という分野は、ビッグバンにて始まったとする標準宇宙論が近年の理論及び観測により確立されている。しかし、我々が住む宇宙の構造の起源、宇宙の平坦性、また宇宙の地平線問題など、標準宇宙論では未解決の観測事実が存在する。これらを一挙に説明するため、宇宙初期に起きたとされるインフレーション仮説が提唱されている。この仮説は宇宙が始まった後 10^{-38} 秒の事象を記述するモデルである。実験的に検証が不可能に思える物理事象であるが、CMBの偏光観測により仮説の実験的検証が可能である。さらにCMB偏光観測は、インフレーション仮説の検証だけでなく、宇宙の大規模構造、ニュートリノの質量和などにもCMB偏光シグナルは感度を持つ。このための世界的に地上、気球、衛星による観測、またその準備が進んでいる。

3. 観測機器としての偏光変調機と要求機能

CMB偏光を観測するために、偏光に感度のある望遠鏡及び検出器が必要となる。CMBは3Kの黒体放射であることが知られており、特にインフレーション由来の信号は3Kの黒体放射に対してnK程度の揺らぎだと期待される。こうした信号を受信するための望遠鏡は、望遠鏡自身の熱放射を低減するため冷却する必要がある。また、検出器はサブケルビンに冷却された超電導検出器を用いることで高感度を実現する。

CMB望遠鏡の中で鍵となる観測機器の一つに偏光変調器がある。これは、微弱な入射偏光信号に変調をかけることで、検出器の時間的不安定性や系統誤差の低減を実現する。変調を実現する具体的な方法は、光学素子である半波長板を望遠鏡の光路内にて連続的に1Hz程度で回転させることで実現できる。

望遠鏡の光路に置くことから半波長板の直径は0.5m程度、そして望遠鏡の環境温度は10K以下である。結果として、0.5m程度の半波長板を10K以下で連続回転させることが求められ、従来の機械式軸受では発熱源となり実現性が低い。

この困難を克服するため、低温での軸受に超電導磁気軸受を採用した。この軸受は非接触式であることから摩擦が低く、低温でも連続的な回転が実現できる。こうしたシステムは米国CMB偏光観測気球実験EBEXにて採用され、科学観測にて搭載された。[1]

4. 開発項目

現在、衛星によるCMB偏光観測を目指し、開発を進めている。開発項目は以下の通りです。

- 超電導磁気軸受
- AC モーター
- 回転角度エンコーダー
- アクチュエータ
- 磁場シールド

これらの開発項目はすべて10K以下の運用温度にて動作することを想定する。特に、衛星での採用を想定する場合、衛星環境での冷凍能力に限りがあり、総発熱を3mW以下を要求するシステムの検討を行っている。

5. 試作機

上記の要求を実現するために、現在小型試作機を作成し、運用温度10Kにて動作試験及び熱的性能評価試験を行っている。図1に試作機の概要を示す。

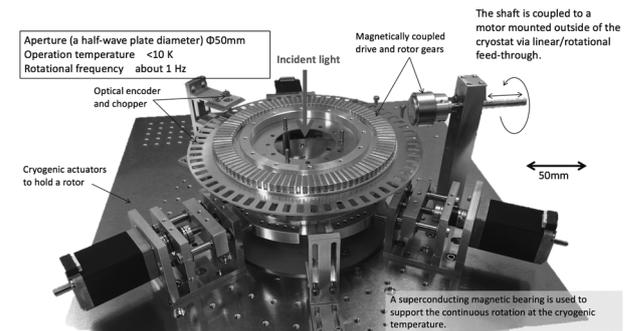


Figure 1 A prototype polarization modulator unit using a superconducting magnetic bearing operating below 10 K. [2]

6. まとめ

本公演では、計画概要、要求及び試作機試験の現状を紹介する。特に、超電導磁気軸受の運用温度10K以下でのエネルギーロス及びばね定数推定に基づき、実機サイズでの性能について外挿し議論を行う。

参考文献

1. J. Klein, et al.: A Cryogenic Half-Wave Plate Polarimeter Using a Superconducting Magnetic Bearing, Cryogenic Optical Systems and Instruments XIII, edited by James B. Heaney, E. Todd Kvamme, Proc. of SPIE Vol. 8150, 815004 · 2011 SPIE.
2. T. Matsumura, et al.: Design and Performance of a Prototype Polarization Modulator Rotational System for Use in Space Using a Superconducting Magnetic Bearing, IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol. 26, NO. 3, April 2016.