

ITER TF コイルの調達進捗状況 Status of Manufacturing of ITER Toroidal Field

小泉 徳潔, 高橋 良和, 布谷 義彦, 濱田 一弥, 磯野 高明, 名原 啓博,
吉川 正敏, 松井 邦浩, 辺見 努, 千田 豊, 井口 将秀, 中嶋 秀夫 (原子力機構)

KOIZUMI Norikiyo, TAKAHASHI Yoshikazu, NUNOYA Yoshihiko, HAMADA Kazuya, ISONO Takaaki, NABARA Yoshihiro,
YOSHIKAWA Masatoshi, MATSUI Kunihiko, HEMMI Tsutomu, CHIDA Yutaka, IGUCHI Masahide, NAKAJIMA Hideo (JAEA)
E-mail: koizumi.norikiyo@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構は、ITER 計画において、25%のトロイダル磁場 (TF)コイル用超電導導体(導体 33 本、Nb₃Sn 線約 110 トン) [1]、TF コイル 9 個(予備を含め全体で 19 個)[2]、TF コイル 19 個分の構造物[3]、及び中心ソレノイド(CS)コイル用超電導導体の 100%(導体 42 本、Nb₃Sn 線約 120 トン)の調達を担当する。本講演では、TF 導体及びコイルの製作の進捗状況について報告する。

2. TF 導体の製作

2011年4月までに約60トンのNb₃Sn線の製作を完了し[4]、11本のTF導体の製作が完了した。今後、約1カ月の間隔で導体を製作する計画であり、2013年に全ての導体の製作を完了する予定である。

一方、TF 導体の性能検証試験で、インサート・コイルで観測されなかった繰返し励磁での劣化が観測されており、現在、ITER 機構と協力して、本原因の調査を行っている。

3. TF コイル及び構造物の製作

TF コイル及び構造物 (Fig.1) の調達は、3 段階に分けて、段階的に行われている[2,3]。2009年3月より、メーカーと協力して、第一段階として、中、実規模試作を実施した。

TF コイル巻線の試作では、冷媒入口部の試作、カバー・プレート溶接試験 (Fig.2)、及び、1/3 規模の巻線[5]、熱処理[6]、及び絶縁含浸試験[7]を成功裏に完了させた。これにより、実規模ダミー・ダブル・パンケーキ (DP) の最終検証試験に移行する準備を整えた。なお、1/3 規模試作の結果の詳細については[5-7]で報告する。また、その他の試作結果については、別報で報告する。

ラジアル・プレート (RP) の実規模試作では、トカマクの磁場精度から要求される輪郭度に対する数 mm の高精度の公差を達成することができた[8]。本 RP は、ダミー DP に使用する計画である。

構造物についても、実規模部分セグメント (Fig.3) の試作、開発した材料の品質確認検証試験を進め[9]、今後、ITER 機構と協力して、さらなる合理化を進めていく計画である。

4. まとめ

原子力機構は、国内メーカー(日立電線、JASTEC、新日鉄エンジニアリング、東芝、川崎重工、IHI、他)の協力のもと、TF 導体の製作、TFコイル及び構造物の実規模試作を着実に進展させている。

参考文献

1. Y. Takahashi, et al., *IEEE ASC*, vol.18, p.471, 2008.
2. 小泉徳潔, 他, 2009年度春季低温工学講演集, p.121.
3. 中嶋秀夫, 他, 2009年度春季低温工学講演集, p.123.
4. 名原啓博, 他, 2011年度春季低温工学講演, 2B-a02.
5. 松井邦浩, 他, 2011年度春季低温工学講演, 2B-a03.
6. 松井邦浩, 他, 2011年度春季低温工学講演, 2B-a04.
7. 辺見努, 他, 2011年度春季低温工学講演, 2B-a05.
8. 高野克敏, 他, 2011年度春季低温工学講演, 2B-a06.
9. 井口将秀, 他, 2011年度春季低温工学講演, 2B-a07.

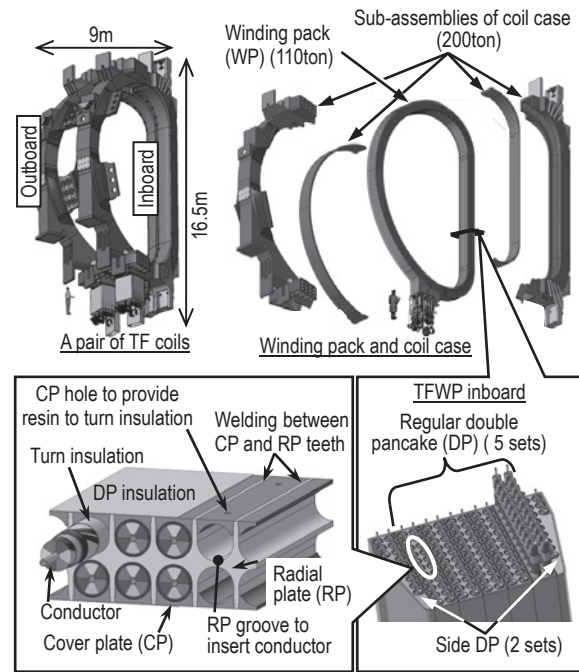


Fig.1 Manufacturing procedure of ITER TF coil.

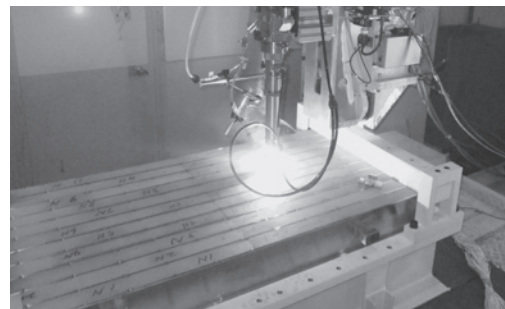


Fig.2 Cover plate welding test.

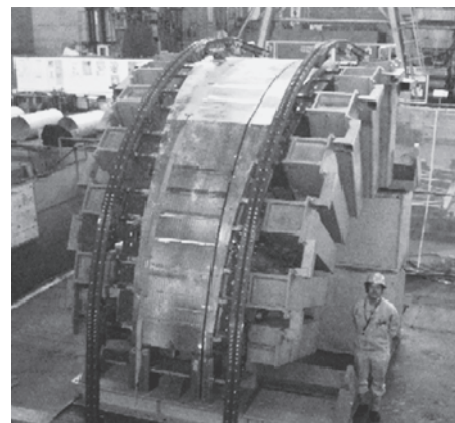


Fig.3 TF coil case mock-up trial manufacture.

ITER TF コイル用超伝導導体の量産化と導体性能

Performance of mass-produced superconducting conductors for ITER TF coil

名原 啓博, 布谷 嘉彦, 磯野 高明, 濱田 一弥, 小泉 徳潔, 松井 邦浩, 辺見 努, 河野 勝己, 吉川 正敏, 宇野 康弘, 押切 雅幸, 堤 史明, 川崎 勉, 藤田 敦, 関 秀一, 関 正男, 海老澤 昇, 井口 将秀, 高橋 良和, 中嶋 秀夫(原子力機構)

NABARA Yoshihiro, NUNOYA Yoshihiko, ISONO Takaaki, HAMADA Kazuya, KOIZUMI Norikiyo, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, KAWANO Katsumi, YOSHIKAWA Masatoshi, UNO Yasuhiro, OSHIKIRI Masayuki, TSUTSUMI Fumiaki, KAWASAKI Tsutomu, FUJITA Atsushi, SEKI Syuichi, SEKI Masao, EBISAWA Noboru, IGUCHI Masahide, TAKAHASHI Yoshikazu, NAKAJIMA Hideo (JAEA)
E-mail: nabara.yoshihiro@jaea.go.jp

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(ITER)ではトロイダル磁場(TF)コイル用のNb₃Sn 導体(定格電流 68kA, 最高磁束密度 11.8T)を約 88km 使用する。この内、原子力機構は日本の国内実施機関として 415m の導体を 9 本、760m の導体を 24 本調達する。調達に先立ち、導体の製作能力を確認するため、素線を提供する 2 社から製作した短尺の試作導体(4m)を 2 本用いてサンプルを製作し(sample 0)、2009 年 11 月にスイスの CRPP にあるサルタン装置を用いて導体性能を評価した。その結果、両導体とも分流開始温度 T_{cs} が設計値の 5.7K を上回ることを確認し[1]、導体の量産化が始まった。本報告では、量産化した導体から切り出したサンプルの導体性能試験結果を示す。

2. 量産化導体のサンプルについて

量産化を始めるにあたり、まず A 社製素線で 415m の導体を、B 社製素線で 100m の導体を製作した(これらは実機 TF コイルに使用しない)。量産プロセスの適切性を確認することを目的として、これらから 4m の導体を切り出してサンプルを製作し(sample 1)、2011 年 1 月にサルタン装置を用いて試験した。次に、各社製素線で 415m の導体を 1 本ずつ製作した(これらは実機 TF コイルに使用する)。実機導体の性能の確認を目的として、これらから 4m の導体を切り出してサンプルを製作し(sample 2)、同年 3 月に試験を行った。試作の sample 0 と併せ、これら量産の sample 1, 2 の試験結果を以下に示す。

3. 導体サンプルの性能試験結果

素線の平均臨界電流 I_c^{avg} に対する、初回の定格運転時の導体の T_{cs} を Fig.1 に示す。 I_c^{avg} は、導体に使用している各素線の I_c (12T, 4.2K での値)に、導体中の各素線長さで重み付き平均した値である。各導体の I_c^{avg} と初期 T_{cs} はほぼ正比例の相関が見られ、これは撚線化とジャケット化がある程度の均一性を持って実施した結果と考えられる。

ITER の運転における機械的負荷を模擬するために、印加磁場 10.78T の下で定格電流 68kA までの繰り返し通電後に適宜 T_{cs} を測定し、導体性能の低下度合いを評価した。その結果を Fig.2 に示す。縦軸は初期の T_{cs} 値で規格化した。A 社製素線を用いた導体は、試作と量産でほぼ同様の性能低下度合いになった。一方、B 社製素線を用いた導体は、sample 0 では A 社製素線の導体とほぼ同じ低下度合いだったが、量産の sample 1 及び 2 では初期の 50 サイクルで 4%程度の T_{cs} の低下が見られ、それ以降の低下度合いは他の 4 本の導体と同様の傾きとなった。初期のサイクルにおける T_{cs} の急な低下は他国のサンプルでも観測されており、これはサルタン装置の大きな磁場勾配に起因して生じ得る現象と考えられ、現在、調査を進めている。

4. まとめ

TF コイル用超伝導導体の量産を開始し、2 社の素線を用いた 2 組の導体サンプルの性能を測定した。試作導体も併せて比較すると、各導体の I_c^{avg} と初期 T_{cs} は概ね正比

例の相関が見られた。また、繰り返し通電試験では、A 社製素線を用いた導体は試作と量産でほぼ同じ T_{cs} 低下度合いだった。一方、B 社製素線を用いた導体は、試作導体に関しては A 社製素線の導体とほぼ同じ低下度合いだったが、量産導体の 2 本は初期の 50 サイクルで T_{cs} が約 4%低下し、それ以降は他の導体と同様の勾配となった。初期のサイクルにおける T_{cs} の急な低下は他国のサンプルでも観測されており、これはサルタン装置の大きな磁場勾配に起因して生じ得る現象と考えられ、調査を進めている。

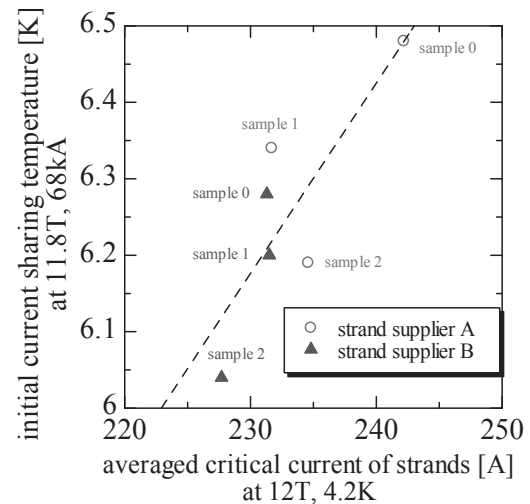


Fig.1 Initial current sharing temperature against averaged critical current of strands on each strand supplier.

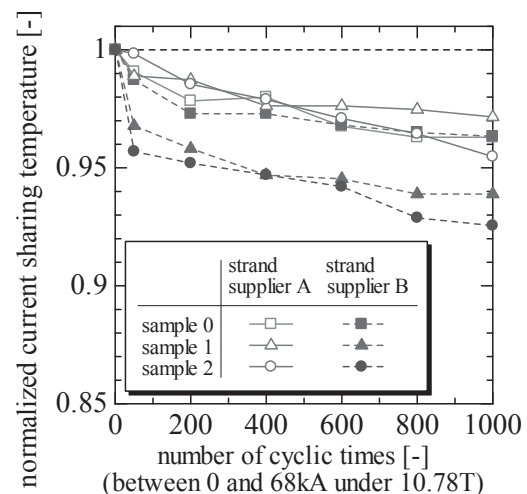


Fig.2 Normalized current sharing temperature against number of cyclic times on each strand supplier.

参考文献

1. Y. Nabara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.188

ITER TF コイルの巻線試作結果 Result of winding trials of ITER TF Coil

松井 邦浩, 小泉 徳潔, 辺見 努, 高野 克敏, 井口将秀, 中嶋 秀夫(原子力機構)

MATSUI Kunihiko, KOIZUMI Norikiyo, HEMMI Tsutomu, TAKANO Katsutoshi, IGUCHI Masahide, NAKAJIMA Hideo (JAEA)

E-mail: matsui.kunihiko@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構は、実機 TF コイルの製作に先駆けて製造設計、中規模及び実規模の試作をメーカーと協力して段階的に実施している[1]。この試作のうち高い巻線精度が要求される巻線技術に関して、模擬導体及び TF 導体を用いて TF コイルの 1/3 規模の大きさの巻線を試作し、巻線製作技術の検証及び巻線精度の評価を行った。本講演では、これらの試作の結果について報告する。

2. 1/3 規模巻線の巻線形状と導体長さ

巻線の試作では、これまでに巻線精度の検証、巻線システムの動作確認、シングル・パンケーキの試作を実施している[2]。今回試作した 1/3 規模巻線は 6 ターンのダブル・パンケーキ巻線で、その大きさは実機 TF コイルの約 1/3 である。1/3 規模巻線としては、模擬導体を用いた含浸試験用巻線と、TF 導体を用いた熱処理試験用の 2 体を試作した。試作した含浸試験用巻線を Fig. 1 に示す。

巻線後の 1/3 規模巻線の形状は、ラジアル・プレートの溝を模擬した導体受台の溝に挿入することにより確認した。試作した 2 体の巻線は、僅かな力でその形状を補正することで、導体受台の溝に挿入することができた。このことから、1/3 規模巻線をほぼ所定の形状に巻線できることが確認できた。

導体長さについては、直接測定することが困難であるため、導体受台の溝形状、及び、Fig. 2 に示す溝と導体間の両側（巻線の内側と外側）の隙間をそれぞれ測定し、これらから評価することとした。導体受台の形状はレーザー・トラッカー、溝と導体間の隙間は隙間ゲージにより測定した。溝と導体間の両側の隙間については、6 つのターンに対して、導体長手方向の 34 点で測定を行い、このうち巻線内側の隙間の測定結果を Fig. 3 に示す。これらの測定結果から導体の長さを評価し、巻線の設計上の導体長さと比較すると、その差は約 0.011% であり、目標の $\pm 0.01\%$ 程度を達成した。なお、6 つのターンの隙間測定結果は、ほぼ同様の傾向にあり、このことから均一に巻線を実施できていることが確認できた。

3. ブラスト処理の巻線製作への影響

TF コイルの製作では、導体絶縁に用いる樹脂の導体への接着性を向上させるために、導体表面にブラスト処理を行うこととしている。ブラスト処理による表面粗さ (R_z) は、 $60\mu\text{m}$ を目標としている。

1/3 規模巻線の試作の前に、ブラスト処理を行った導体の直線化試験を実施した。その結果、Fig. 4 に示すように、長さ 2m の導体に対して許容範囲を大きく超える 10mm 近い曲げが残った。また、バンダーのローラーの表面が導体表面のブラストにより傷付き、この傷が逆にブラスト済みの導体表面を傷付けるという事象が発生した。これらから、ブラスト処理を行った長尺の導体を用いて実機 TF コイルを製作することは困難である。そのため、今後、ブラスト処理の巻線や熱処理への影響調査、及び、ブラスト処理の実施の有無の検討を行い、ブラスト処理を実施する場合には、実機 TF コイルと同規模の巻線の製作において、最終的に確認する予定である。

謝辞

TF コイルの調達活動にご協力頂いていた(株)東芝並びに関連会社に、厚く御礼申し上げます。

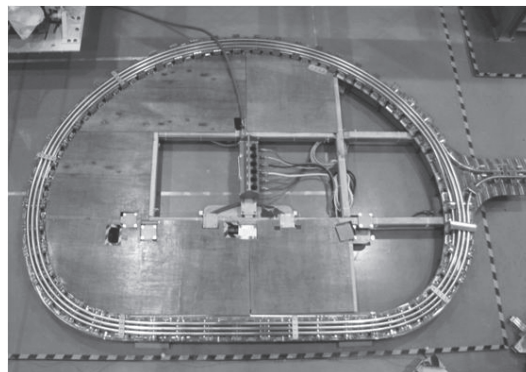


Fig. 1 Fabricated 1/3 scale winding for insulation/impregnation trial using a dummy conductor.

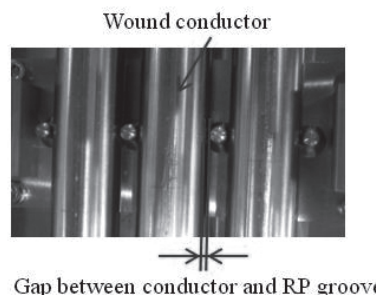


Fig. 2 Gap measured for the estimation of conductor length.

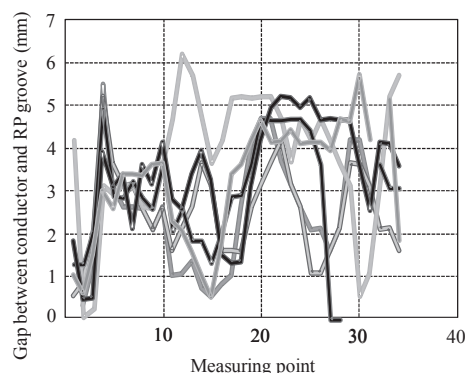


Fig. 3 Measured gap between conductor and RP groove of 1/3 scale winding using a dummy conductor.



Fig. 4 Blasted conductor after the straighten process.

参考文献

1. N. Koizumi, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 84 (2009) p.210
2. K. Matsui, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.41

ITER TF コイルの熱処理試験結果 Result of heat treatment trials of ITER TF Coil

松井 邦浩, 小泉 徳潔, 辺見 努, 高野 克敏, 井口将秀, 中嶋 秀夫(原子力機構)

MATSUI Kunihiko, KOIZUMI Norikiyo, HEMMI Tsutomu, TAKANO Katsutoshi, IGUCHI Masahide, NAKAJIMA Hideo (JAEA)

E-mail: matsui.kunihiko@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構は、ITER 計画における日本国内機関として、9 個のトロイダル磁場(TF)コイルの調達を担当しており、実機コイルの製作に先駆けて製造設計、中規模及び実規模の試作をメーカーと協力して段階的に実施している[1]。この試作のうち熱処理に関して、熱処理による导体伸縮量及び巻線形状の変化を踏まえた巻線技術を開発するために、TF 导体の伸縮量及び巻線形状の変形の評価を行った。本講演では、これらの試作の結果について報告する。

2. 直状导体, ソレノイド巻線, 1/3 規模巻線

熱処理による伸縮量を評価するサンプルとして、巻線形状の効果を見るために直状导体及びソレノイド状巻線の 2 種類を用意した。また、巻線形状の変形評価のために、1/3 規模巻線を用意した。

直状导体は 1.4m 長さの导体であり、この長さ測定には、原子力機構が開発した直状导体熱歪測定装置を使用した[2]。

ソレノイド巻線は直径が 2m で 3 ターンの巻線であり、この長さは、Fig. 1 に示すように、巻線を測定器具に巻き付けて固定した後に、巻線の 1/4 ターン毎の导体表面に付けた罫書きと基準位置とを比較することにより求めた。

1/3 規模巻線は TF コイルの約 1/3 の大きさで 6 ターンのダブル・パンケーキであり、この形状測定には 3 次元デジタイザを使用した。熱処理時には、D 形状が崩れることを防ぐために、直線部赤道面の导体を导体受台と固定、その他の直線部の导体は長手方向にのみ動けるように固定、曲線部の导体は長手及び径方向に動けるように导体受台と固定しなかった。

これらの熱処理には、直状导体については原子力機構が所有する管状熱処理炉、ソレノイド及び 1/3 規模巻線については大型の熱処理炉を使用した。また、これらの导体の両端には、熱処理時のジャケットと撚線の滑りを防ぐために、端部拘束治具が取り付けられている。

3. 熱処理による导体長及び巻線形状の変化

熱処理中における直状导体の長さの測定結果を Fig. 2 に示す。この結果、熱処理後の导体の伸縮量は約 0.064%であった。一方、ソレノイド巻線の导体伸縮量は、8 ヶ所の測定点の平均値として約 0.074%となり、巻線の形状により导体の伸縮量に差が生じることが明らかとなった。ただし、今回の試験ではサンプル数が少なかったことから、実機 TF コイル製作までにサンプル数を増やして同様の試験を実施し、より正確に导体伸縮量の評価する予定である。

熱処理後の 1/3 規模巻線を Fig. 3 に示す。この巻線の形状を熱処理の前後に測定し、比較した。Fig. 4 は、Fig. 3 に示す A-A 断面(曲線部赤道面)の巻線形状の変化を示しており、この結果は巻線が外側に変形していることを示している。その他の個所でも同様に熱処理前後の巻線形状を比較した結果、巻線全体としては D 形状が曲線部方向に膨らむように変形していることが分かった。今後、詳細にこの巻線の変形を評価し、実機 TF コイルと同規模の巻線の熱処理試験により最終的な巻線の変形を確認する予定である。

謝辞

TF コイルの調達活動にご協力頂いていた(株)東芝並びに関連会社に、厚く御礼申し上げます。

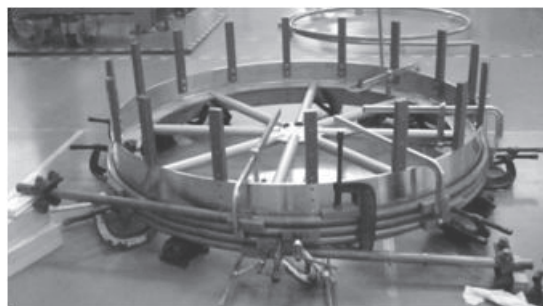


Fig. 1 A solenoid winding measuring conductor length.

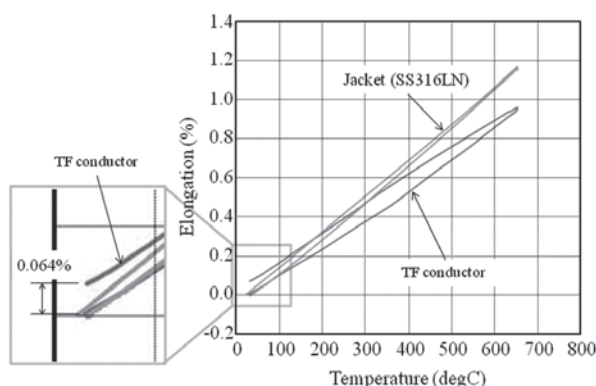


Fig. 2 Elongation of a straight TF conductor due to the heat treatment.



Fig. 3 Heat treated 1/3 scale winding.

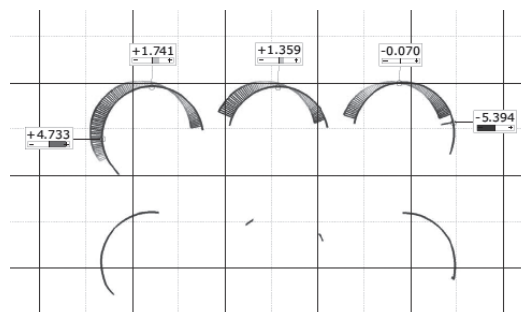


Fig. 4 Comparison of winding shape before and after heat treatment at outboard region of 1/3 scale winding.

参考文献

1. N. Koizumi, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 84 (2009) p.210
2. K. Matsui, et al.: TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn.), 42 (2007) 311

ITER TF コイルの絶縁含浸試作結果

Insulation and impregnation trials for the ITER TF coils

辺見 努, 松井 邦浩, 小泉 徳潔, 高野 克敏, 井口 将秀, 中嶋秀夫 (原子力機構)
 HEMMI Tsutomu, MATSUI Kunihiro, KOIZUMI Norikiyo, TAKANO Katsutoshi,
 IGUCHI Masahide, NAKAJIMA Hideo (JAEA)
 E-mail: hemmi.tsutomu@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構は、実機 TF コイルの製作に先駆けて、製造設計、中規模及び実規模の試作をメーカーと協力して段階的に実施している[1]。この試作のうち絶縁含浸に関して、TF コイルに照射される 10^{22} n/m² の高速中性子に耐える耐放射線性樹脂を用いた絶縁含浸技術を開発するために、1/3 規模ダブルパンケーキ(DP)の絶縁含浸試作試験を実施し、絶縁含浸プロセスの検証を行った。

2. 絶縁試作

絶縁含浸試験に用いる 1/3 規模 DP は TF コイルの約 1/3 の大きさで模擬導体を用いた 6 ターンの巻線と模擬ラジアルプレート(RP)から構成される。製作手順は以下のとおりである。
 1) 巻線を絶縁する(導体絶縁)。2) 巻線を模擬 RP に挿入する(トランスファー)。3) 模擬 RP 溝にカバープレートで蓋をする。
 4) 1/3 規模 DP を絶縁する(DP 絶縁)。

約 1m の D 型形状モデルを用いた含浸試験の結果から絶縁構成及び含浸条件は決定した[2]。絶縁材は、ボロンフリーの S ガラス(G)及びガラス・ポリアミド接着(GK)テープを 1/2 ラップで使用し、耐放射線樹脂及びテープの接着剤は 4:6 で混合したシアネートエステル(CE)・エポキシ混合樹脂とした。ターミナル部はテーピングが困難であるため、シート状の絶縁材を使用した。TABLE I に絶縁材の構成を示す。

3. 含浸試験

含浸試験のセットアップを Fig.1 に示す。1/3 規模 DP は 100°C × 24 時間の真空乾燥(10 Pa)を行った後、容器内を CO₂ で置換し、真空度は 40Pa~100Pa、温度は 55°C~60°C に保持した。含浸中は Fig.2 に示す樹脂の注入量及び導体と RP 間の静電容量で内部の含浸度を評価した。樹脂の注入速度は約 4 L/h であり、開始初期は樹脂の自重と入口バルブで調整し、後半は入口側樹脂液面の圧力により調整した。Fig.2 より、含浸開始後、約 35 時間で静電容量の変化は止まり、1/3 規模 DP の含浸が完了したことがわかる。樹脂が出口タンクまで溜まった後、大気圧に戻してから大気圧と 3 気圧の圧力スイングを 3 回実施した。このとき、静電容量は変化しておらず、樹脂に気泡が無く含浸されたと考えられる。

含浸後、100°C × 18 時間及び 150°C × 32 時間の熱処理を行い、樹脂を硬化させた。Fig.3 に容器及びモールド治具を取り外した後の 1/3 規模 DP を示す。導体-RP 間に DC 2.2 kV (5 分間)及び AC 50 Hz 0.4 kV (1 分間)、アルミ箔を DP に巻いて DP-対地間に DC 3.4 kV (5 分間)及び AC 50 Hz 0.8 kV (1 分間)の耐電圧試験を行った結果、異常は検出されなかった。

4. まとめ

絶縁含浸試作試験の結果から、TF コイルの絶縁施工及び CE・エポキシ混合樹脂を用いた含浸、硬化の一連のプロセスについて確認した。今後、実機と同サイズの模擬 DP の製作により最終確認を行った後、実機コイルの製作を開始する計画である。

TABLE I Insulation materials of the 1/3-scale DP

Conductor insulation	DP insulation
1 layer G t0.13 mm	1 layer G t0.13 mm
3 layers GK t0.17 mm	2 layers GK t0.17 mm
1 layer G t0.25mm	1 layer G t0.25mm

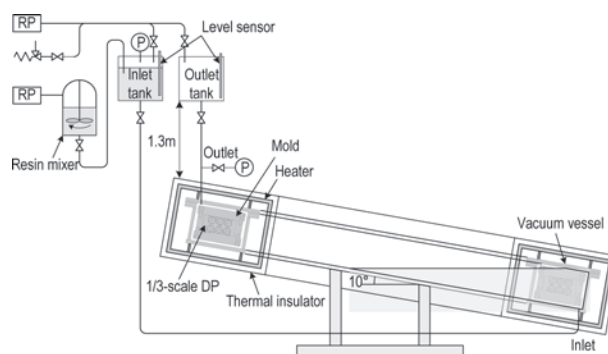


Fig.1 Set-up for the impregnation of the 1/3-scale DP.

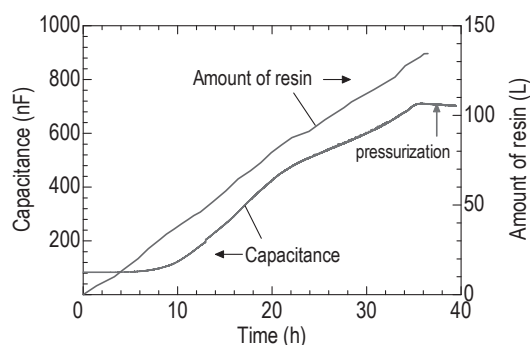


Fig.2 Capacitance and input amount of the resin at the impregnation of the 1/3-scale DP.

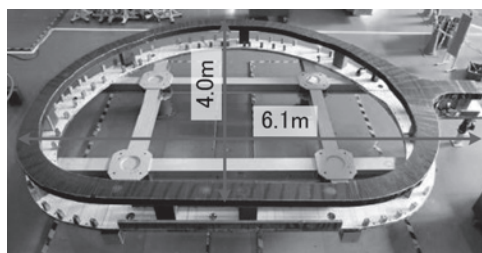


Fig.3 Impregnated and cured 1/3-scale DP.

謝辞

TFコイルの調達活動にご協力頂いていた(株)東芝並びに関連会社に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

1. N. Koizumi, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 84 (2009) p.210
2. T. Hemmi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.43

ITER・TFコイルの実規模ラジアル・プレート試作結果 Radial plate trial manufacture result of the ITER TF coil

高野 克敏, 小泉 徳潔, 松井邦浩, 辺見努, 中嶋 秀夫 (原子力機構)

TAKANO Katsutoshi, KOIZUMI Norikiyo, MATSUI Kunihiro, HEMMI Tsutomu, NAKAJIMA Hideo (JAEA)

E-mail: takano.katsutoshi@jaea.go.jp

1. はじめに

TF コイルの巻線部で使用するラジアル・プレート(RP)は、高さ13m、幅9m、厚さ10cmの大型構造物であり、ITERの製作工程の要求から、部分セグメントを並行して製作し、これらを溶接して1枚のRPを組立てる計画である[1]。一方、RPの製作では、数mmの高精度の製作公差が要求されている。そこで、著者らは、高精度、かつ、合理的な製作方法の確立を目指して、実規模RPの試作試験を実施した[2]。

2. RP組立に必要な技術検証

RPの組立は、1枚のRPを10分割した部分セグメントを厚肉のステンレス鋼板から、最終の断面形状まで機械加工で製作し、これらをD型に配置して、レーザー溶接で組立てることとした。本製作方法の組立技術を実証するための技術的検証項目として、1)各セグメント間を隙間なく配置可能な冶工具の開発、2)溶接変形、時間を軽減する合理的な溶接手順、3)溶接による変形量の把握、がある。原子力機構では、これらの製作技術の確立を目指した実規模試作試験に先立ち、小規模試作試験を実施し、実規模試作の製作公差を満足するために必要なデータの取得を行った。

3. 小規模試作試験

セグメント間をレーザー溶接するため、次のような機能を備えた冶工具が必要となる。1)両セグメントを隙間なく突き合わせることができる、2)上下左右の眼違いを調整できる、3)溶接による面外変形を拘束できる。これらの機能を満足する冶工具として、Fig.1に示す冶工具を開発した。また溶接による収縮変形を抑制するため、溶接手順についても最適化した。これらの検証のために、二つの短尺RPセグメントを用いた小規模試作試験として実施した。試験の結果、セグメント間の隙間を約0mmに突き合わせることができ、また、溶接部の収縮量を約0.5mm以下に抑制することもできた。以上の試験結果により、実規模試作によるRP組立では、製作公差を満足できる見通しを得ることができるとともに、本冶工具が適用可能であることを実証した。

4. 実規模試作試験

実規模試作試験では、架台上に各RPセグメントをD型に配置し、小規模試作試験で実証した冶工具、溶接手順を基にRP組立試験を実施した(Fig.2)。試験の結果、一継手当りの溶接収縮量は約0.4mm、RPの輪郭度約1mmを達成した(Fig.3)。以上より、実機RPの高精度組立技術を確認することができた。

5. まとめ

実規模RPの組立試験で、1)継手部冶工具の開発、2)溶接変形量の把握、3)数mmの高精度での溶接変形量の抑制を達成し、実機RPの製作に目途を立てた。今後、今回の試作で得られた開発成果を基に、最も合理的な製作手法で実機RPを製作する計画である。

謝辞

TFコイルの試作では、株式会社 東芝殿の多大な御協力をいただいております。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 高野克敏, 他, 2010 秋季低温工学会講演概要集, p.42.
[2] 小泉徳潔, 他, 2011 春季低温工学会講演会, 2B-a01.

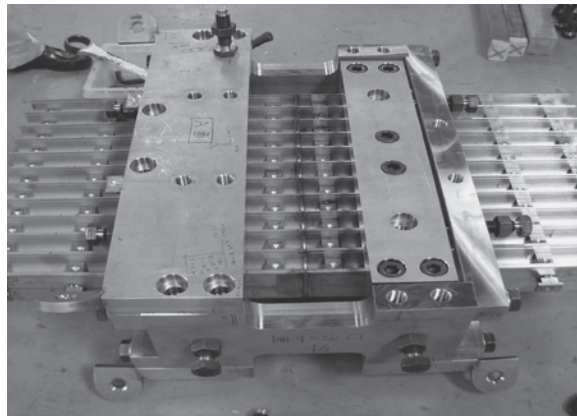


Fig. 1 Small-scale trial RP laser welding tool.

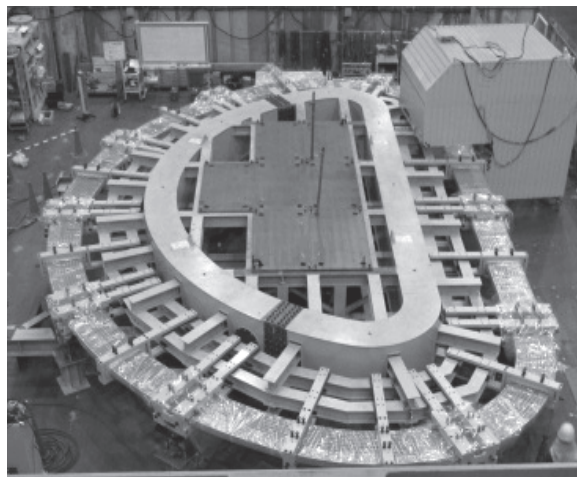


Fig. 2 Full-scale trial RP manufacture.

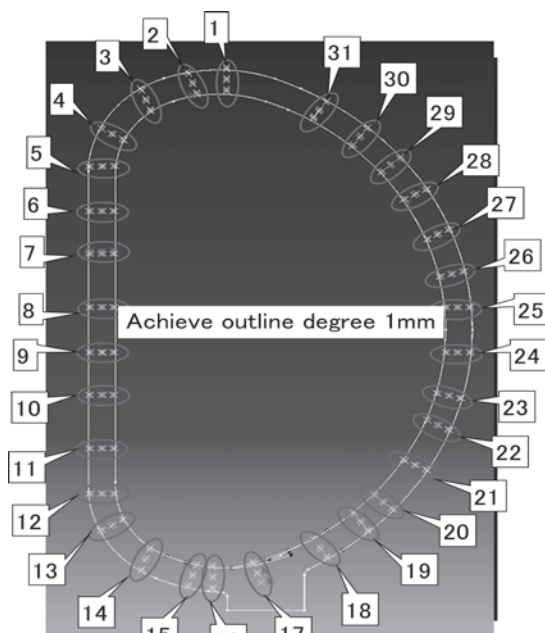


Fig. 3 Full-scale trial RP manufacture result.

ITER TF コイル用構造材料の 4K 品質確認試験結果

Qualification test results of structural materials for ITER TF Coils at 4K

井口 将秀、齊藤 徹、河野 勝己、高野克敏、堤 史明、千田 豊、中嶋 秀夫(原子力機構)
IGUCHI Masahide, SAITO Toru, KAWANO Katsumi, TSUTSUMI Fumiaki, TAKANO Katsutoshi,
 CHIDA Yutaka, NAKAJIMA Hideo (JAEA)
 E-mail : iguchi.masahide@jaea.go.jp

1. はじめに

日本原子力研究開発機構(原子力機構)は、19 機分のトロイダル磁場(TF)コイル構造物(TF 構造物)の製作を担当している。これまで原子力機構は実機 TF 構造物製作技術の確立と合理化を目的として、実規模試作を行ってきた。その中で試作した構造材料の極低温での機械試験を実施し、各素材の品質確認を行ってきた。本報告では前報告(2010 年度秋季低温工学・超電導学会 1B-p13)に引き続き、これまで実施した極低温機械試験結果について報告する。

2. 供試材及び試験条件

Fig.1 に TF 構造物 B3 セグメントの形状を示す。また、Table 1 に各部分の名称、素材種類、板厚、板幅、を示す。Fig. 1 に示すように、B3 セグメントは左右ウィングと外板の 3 種類の部材で構成されており、左右ウィング部はコイルケース側板とコイル間支持構造物へと繋がる三角柱形状の部分とが一体となった構造である。

Table 1 に示すように、供試材は「日本機械学会核融合設備規格 超伝導マグネット構造規格 JSME S KA1-2008」(JSME 規格)に規定されている極低温での強度を高めるために窒素を添加したステンレス鋼を使用しており、左右 B3 ウィングは FM316LNH (C+N=左:0.231%, 右:0.224%)を、B3 外板は FM316LNM (C+N=0.151%)を使用し、鍛造により製造した。

品質確認試験として液体ヘリウム温度(4K)での引張試験、破壊靱性試験、及び疲労き裂進展試験を実施した。引張試験及び破壊靱性試験は JIS 規格に準拠して実施した。疲労き裂進展試験は応力比 0.1、周波数 10Hz の荷重制御にて実施した。

JSME 規格では TF 構造物で使用する各材料の室温から 4K までの設計強度曲線を規定している。JSME 設計強度曲線と本試作で製作した素材の室温、77K 及び 4K での引張強度結果を比較することで、JSME 設計強度曲線を TF 構造物設計に適用することの妥当性の確認を行った。

3. 試験結果

Fig. 2 及び Fig. 3 に各温度での引張試験結果の平均値と JSME 規格の設計強度曲線を示す。ITER に要求される室温及び 4K での 0.2%耐力(YS)値も合わせて図示する。また、凡例に試験片採取箇所の板厚を示した。試験結果を JSME 設計曲線及び ITER 要求値と比較すると、今回の実規模試作で製作した素材は全て JSME 規格、ITER の要求値とも満足していることが分かる。

Table 1 に 4K での破壊靱性試験結果の平均値を示す。ITER 要求値である $180\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ を全て満足している。しかし、今回の試作材では FM316LNH と FM316LNM との間で、値は大きく変わらない結果となった。

4K での疲労き裂進展試験結果を Fig. 4 に示す。左右 B3 セグメントと B3 外板の試験結果を比較すると、両者でき裂進展挙動が若干異なり、B3 外板(FM316LNM)においてはき裂が進展しにくいことが分かる。

以上の結果から、B3 セグメント実規模試作用素材の 4K 機械特性はそれぞれの鋼種に対する設計値及び要求値を満足しており、実機製造に必要な品質を有していることを確認した。

Table 1 Material properties and fracture toughness test at 4K

Name of part	Material	Maximum Thickness	Maximum Width	Fabricator	Average of K_{IC} [$\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$]
B3 Wing Left	FM316LNH	1000mm	922mm	Company A	257
B3 Wing Right	FM316LNH	1000mm	922mm		260
B3 Outer Plate	FM316LNM	140mm	840mm	Company B	255

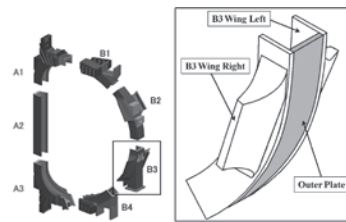


Fig. 1 Trial fabrication of B3 segment of ITER TF Coil Structures

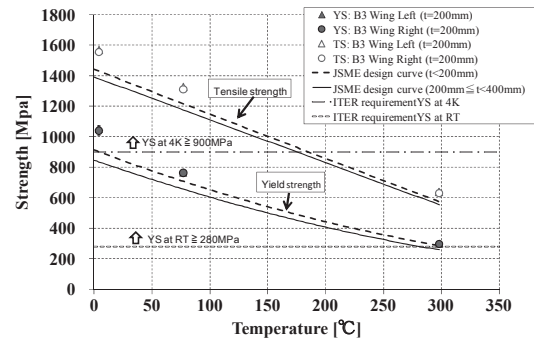


Fig.2 Comparison of mechanical strengths with JSME design curves and ITER requirements for FM316LNH

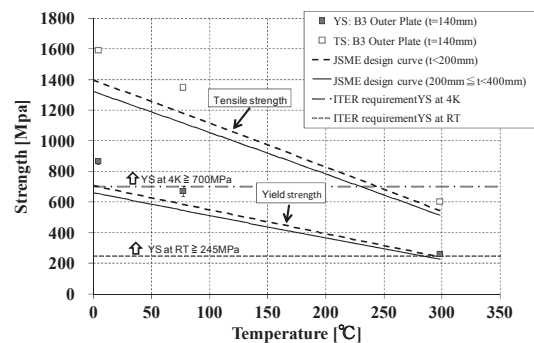


Fig.3 Comparison of mechanical strengths with JSME design curves and ITER requirements for FM316LNM

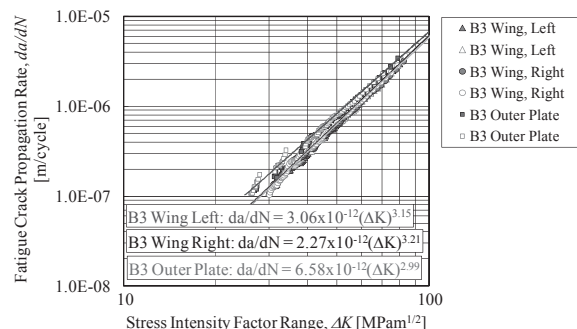


Fig.4 Fatigue crack propagation test results at 4K

CIC 導体間のジョイント部における超電導素線と銅スリーブ間の接触の検討

Investigation on contact lengths between superconducting strands and copper sleeves at CIC joint

荒井 大地, 中澤 忍, 手島 翔太郎, 宮城 大輔, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大学);
 谷貝 剛(上智大学); 布谷 嘉彦, 小泉 徳潔(原子力機構); 尾花 哲浩, 高畑 一也(NIFS)
 ARAI Daichi, NAKAZAWA Shinobu, TESHIMA Shotaro, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto,
 HAMAJIMA Takataro (Tohoku University); YAGAI Tsuyoshi (Sophia University)
 NUNOYA Yoshihiko, KOIZUMI Norikiyo (JAEA); OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya (NIFS)
 E-mail: chapa@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

ITER TF コイルに用いられる CIC 導体のジョイントは、導体からコンジットを取り除いた 2 本のケーブルを、最終撚りピッチの長さのボックス型の銅に収納した構造が検討されている。このジョイント部分で電流は、一方のケーブル表面に現れる超電導素線から銅へと流れ込み、さらに銅からもう一方のケーブルの超電導素線へと流れる。しかし実際の導体製造時には、撚りピッチによって、全ての素線が均等に銅と接触していないことが考えられ、これが原因で、導体に偏流が発生する可能性がある。

そこで、本研究では 81 本の素線で構成した CIC 導体の 3 次元素線配置を測定し、そのデータを基に数値解析し、ジョイント部分でケーブル表面に現れる素線と銅の間の接触状態を調査比較した。また、撚りピッチを変化させることによって接触状態の最適化を行った。

2. 実測と解析による導体内素線配置の調査

今回調査に用いた CIC 導体(81 素線導体)の諸元を表 1 に示す。

Table1. Specifications of CIC conductor

Strand diameter	0.823 mm
Number of strands	3 x 3 x 3 x 3 = 81
Twist pitch	65/90/150/270 mm
Cable diameter	9.73 mm
Void fraction	42.0%
Conductor length	1031.6 mm

3 次元計測のために、導体の素線位置をエポキシ樹脂で固定し、導体長手方向(z 方向)に 10mm 間隔で分割した。各試料両断面の素線位置を計測し、素線間の抵抗測定から素線の対応関係を決定した。このような方法で得られた 10mm 間隔の離散的な素線位置を基に、Spline 関数を用いて補間することで実際の CIC 導体の素線配置を求めた。

最終撚りピッチである 270mm をジョイント部とした場合の素線と銅スリーブとの接触状態を調べた。

その後、開発した素線配置プログラム[1]を開いて、長さ z=270 mm 分の素線配置を解析的に求め、先と同様に素線と銅スリーブとの接触状態を調べた。

実際の素線配置データから求めた接触状態と、解析的な素線配置から求めた接触状態を比較した結果の一例を Fig.1 に示す。なお、グラフの横軸は接触長、縦軸は素線数である。平均接触長は実測時で 54.1mm、解析時で 51.9mm であった。また接触長の最大・最小値は、実測時で最大 97.6mm、最少 7.5mm、解析時で最大 100mm、最少 8mm であった。また標準偏差は実測時で 19.5mm、解析時で 21.0mm であった。また非接触素線数(銅スリーブに一度も接触しない素線の本数)は実測、解析共に 1 本であった。以上のデータと Fig.1 より、解析値は実測値に比較的良く一致した。これによって、素線の

接触状態の評価において、解析的に求めた素線配置を用いることの妥当性が示された。

3. 撚りピッチによる接触状態の最適化

解析的な素線配置を用いた場合において、撚りピッチを変化させることによって接触状態の最適化を行った。なお今回の最適化では、接触長のばらつきを示す標準偏差が最小になるようにした。これは、各素線の銅との接触長が不均一になると、素線と銅との接触抵抗が不均一となり、これが偏流の原因となるためである。最適化結果を Fig.2 に示す。最適化前の撚りピッチが 65/90/150/270mm であったのに対し、最適化後の撚りピッチは 45/70/120/270mm であった。この時非接触素線数は最適化前が 1 本に対し、最適化後が 0 本となり、標準偏差は最適化前が 21.0 に対し、最適化後が 15.7 となった。以上により、撚りピッチを変化させることによって、素線と銅スリーブの接触状態を改善できることが示された。

4. まとめ

数値解析方法を用いて素線配置を求めた。このとき素線と銅の接触状態は実測データから求めたものと比較的良く一致した。またこの解析モデルにおいて、撚りピッチを変化させることによって、接触状態の最適化を行った。これにより撚りピッチを変化させることによって、接触状態が改善できることが示された。

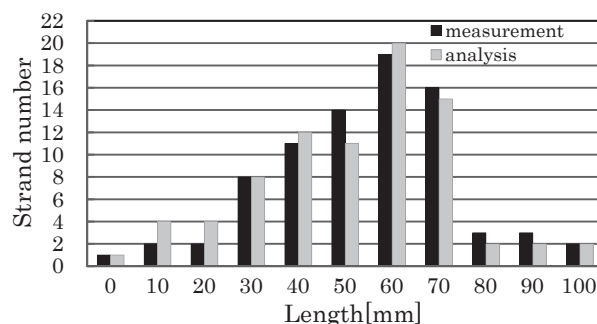


Fig.1 Strand contact lengths

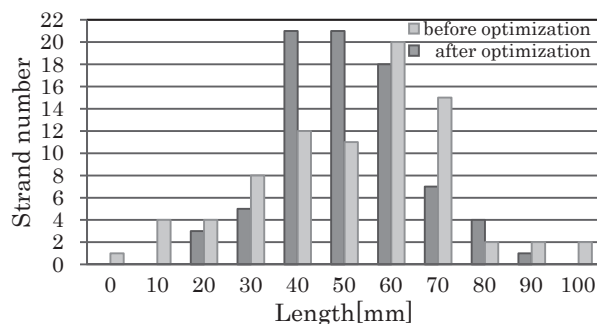


Fig.2 Optimization of contact condition

参考文献

1. S. Nakazawa, et al.: ASC-11-020, (2011)