



プロジェクトレビュー ITER 計画の機器開発・製作の進展

2. ITER トロイダル磁場コイル用及び中心ソレノイド用超伝導導体の製作

2. Manufacture of Superconductors for Toroidal Field Coil and Center Solenoid in ITER

名原啓博, 諏訪友音, 尾関秀将, 布谷嘉彦, 磯野高明, 高橋良和, 奥野 清
 NABARA Yoshihiro, SUWA Tomone, OZEKI Hidemasa, NUNOYA Yoshihiko, ISONO Takaaki,

TAKAHASHI Yoshikazu and OKUNO Kiyoshi

* 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(原稿受付日: 2015年12月7日)

ITER トロイダル磁場 (TF) コイルに用いる超伝導導体は ITER 参加国が分担して製作し, 日本はその25%を担う。中心ソレノイド (CS) に用いる超伝導導体の製作は全て日本が担当する。これら TF 用及び CS 用超伝導導体を使用する Nb₃Sn 超伝導素線は, それぞれ長さ約 23,000 km と 26,000 km に及ぶ。TF 用のジャケット管は, 極低温下での高い耐力と伸びを両立するため, 低炭素化した SUS316LN を用いる。CS 用のジャケット管は, 高い疲労特性も要するため, 日本が特別に開発した JK2LB を用いる。Nb₃Sn を生成するための熱処理条件の最適化や, 素線を撚る際の撚りピッチを短くするといった改善を施し, 製作した超伝導導体は要求される超伝導性能を満たすことを試験によって確認した。TF 用超伝導導体は2014年に製作が完了し, CS 用超伝導導体は2015年10月の時点で約40%の製作を終え, 2017年に全製作を完了する予定である。

Keywords:

superconductor, Nb₃Sn, cable-in-conduit conductor, toroidal field coil, center solenoid, ITER

2.1 はじめに

ITER (国際熱核融合実験炉) の日本の国内実施機関として, 日本原子力研究開発機構 (原子力機構) は日本分担分であるトロイダル磁場 (TF) コイル用超伝導導体の25%と, 中心ソレノイド (CS) 用超伝導導体の100%を製作する。これら超伝導導体は, 1980年代から高性能化と量産化の研究開発を重ね [1-3], 2007年の調達取決めの締結後, 本格的な製作を開始した。2015年10月の時点で TF 用導体は全量を, CS 用導体は約40%を製作しており, 2017年に全製作を完了する予定である。

2.2 超伝導導体の製作方法と実績

TF 用及び CS 用の超伝導導体は, 超伝導状態の高い安定性と大きな電磁力を支えるため, 図 1 に示す強制冷却型の cable-in-conduit 導体の構造を取り, その製作は以下の 4 段階に分けられる。

- 1) 超伝導素線の製作
- 2) 超伝導撚線 (ケーブル) の製作
- 3) ジャケット管 (コンジット) の製作
- 4) 超伝導導体の製作 (撚線とジャケット管の一体化)

日本は, TF 用導体は長さ 760 m の導体を 24 本と 415 m の導体を 9 本製作し, CS 用導体は長さ 918 m の導体を 42 本と 613 m の導体を 7 本製作する。

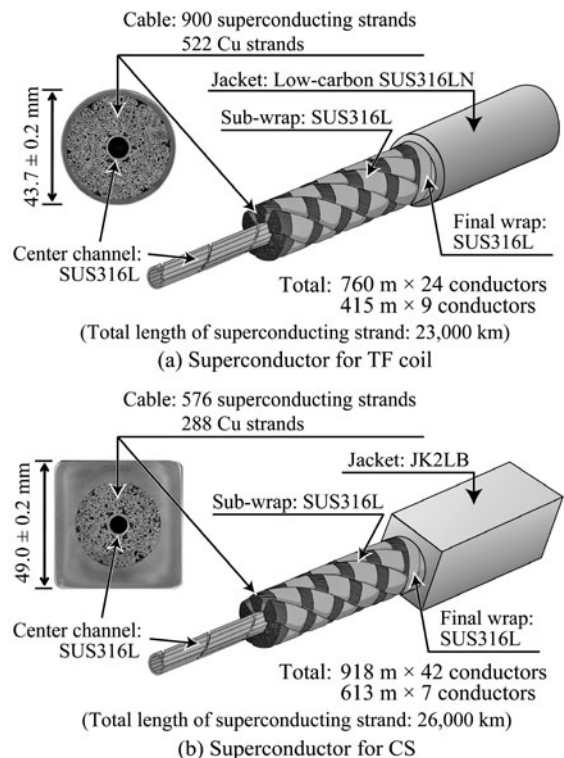


図 1 (a) TF 用超伝導導体と (b) CS 用超伝導導体の外観と内部構造。

* 現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

corresponding author's e-mail: suwa.tomone@qst.go.jp

2.2.1 超伝導素線の製作

超伝導素線は、図2のように例えば直径20 cm、長さ1 mのものを線引きして細くしていくと、最終的な直径がTF用素線で0.82 mm、CS用素線で0.83 mm、長さは約20 kmになる。素線の内部は非常に緻密な構造を持っており、直径が数 μm のフィラメントが約1万本あり、フィラメント間にブロンズ、それら周囲にSn拡散防止用のバリア、その外側に安定化銅が存在し、素線表面にはCrメッキが施されている。超伝導性能として、臨界電流 I_c （超伝導状態で流せる上限の電流）は高い方が、ヒステリシス損失 Q_h （変動磁場による発熱量）は低い方が望ましい（仕様： $Q_h < 500 \text{ mJ/cm}^3$ ）。この素線を650 $^\circ\text{C}$ 程度で熱処理すると、Nbフィラメントとブロンズ中のSnが反応し、超伝導物質である Nb_3Sn が生成される。このとき、Nbフィラメントが細い程、熱処理後に未反応のまま残存するNbが少なくなり、 I_c は高くなる傾向にある。また、バリア材がNbの場合、Taに比べて柔らかく価格も安いので、歩留まりの向上とコスト低減が可能である。ただし、フィラメントを細くすると Q_h も高くなる傾向があり、特にNbバリアはTaバリアに比べてかなり高くなってしまいうという欠点があり、注意深く最適化条件を設定する必要がある。

TF用素線は歩留まり向上とコスト低減を重視してNbバリアを用い、フィラメント径を約3 μm とし、 I_c は約220~250 A、 Q_h は約350~450 mJ/cm^3 を実現した[4]。一方、CS用素線は I_c を向上するためにフィラメント径を約2 μm まで細くし、 Q_h を低減するために内側がTaで外側がNbの2層バリアとした。これにより、 I_c は約270~330 A、 Q_h は約200~300 mJ/cm^3 を実現した。Taは硬くて脆い上、融点が2985 $^\circ\text{C}$ と極めて高いため素線の伸線中に焼鈍することもできず、長い間、歩留まりの低迷に苦労したが、改良を重ねて現在では約9割まで歩留まりを向上している。

一般に I_c は磁束密度 B 、温度 T 、機械的歪み ϵ に依存し、 $I_c(B, T, \epsilon)$ の関数が定式化されている（上述の I_c は $B=12 \text{ T}$ 、 $T=4.2 \text{ K}$ 、 $\epsilon=-0.25\%$ における値である）[5]。図3に、 $B=12 \text{ T}$ におけるTF用素線とCS用素線の $I_c(B, T, \epsilon)$ 特性を示す。ポロイダル磁場コイルに使われる超伝導物質のNb-Tiに比べ、 Nb_3Sn は高磁場下でも超伝導状態を維持できる利点があるが、 ϵ に対する I_c の低下が大きい。したがって、TFコイルやCSを製作する際、 Nb_3Sn の超伝導体は熱処理後に機械的変形を可能な限り加えないようにする必要がある。

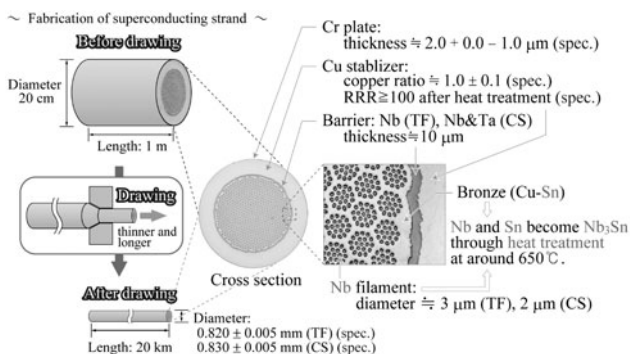


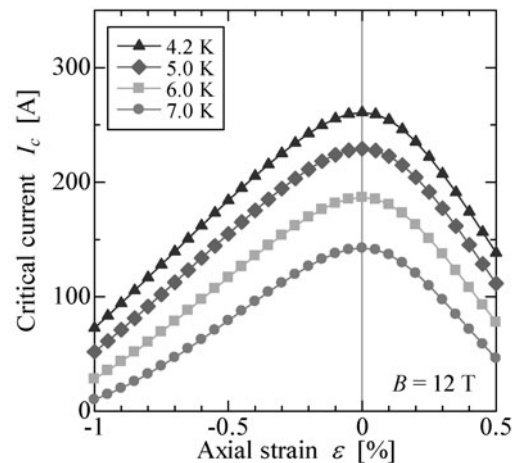
図2 Nb_3Sn 超伝導素線の製法（ブロンズ法）と内部構造。

ある。ただ、極低温下でのジャケット材や構造材との熱収縮差により、 $\epsilon = -0.7\%$ 程度の機械的歪みを受けることは避けられない。つまり、 I_c は $\epsilon=0\%$ での値に比べて半分程度に低下した状態でTFコイルやCSを運転することになる。コイル製作の難しさも考えると、今後の原型炉などには、 ϵ に対する I_c の低下が小さい Nb_3Al などを利用できれば、コイル製作がより容易になると期待できる。

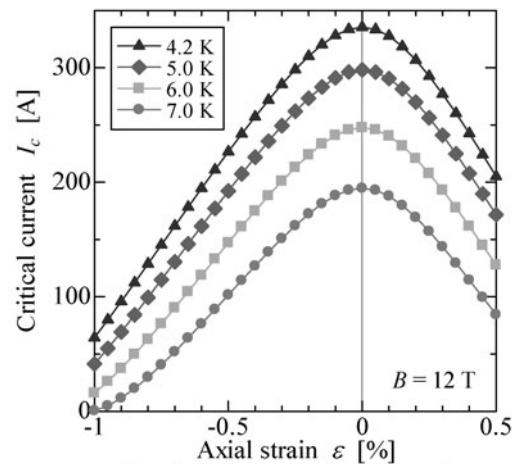
TF用素線はトータルで長さ23,000 km、CS用素線は26,000 kmにも及ぶかつてない程の量産を行うため、品質管理が非常に重要となる。量産においては、ISO規格に適合した品質保証計画の下で製作し、原材料の調達先も変更しない。それでも量産すると前述のように I_c は50 A程度、 Q_h は100 mJ/cm^3 程度のばらつきが生じる[4]。したがって、素線性能などの管理項目は全てデータベースに登録し、それらを統計的に管理し続けている。さらに、素線性能は原子力機構でもダブルチェックを行い、素線メーカーの測定値の妥当性を検証している。

2.2.2 超伝導燃線の製作

超伝導素線と銅線は図4に示すように5段階で撚り合わせて燃線（ケーブル）化する[6,7]。例えばCS用燃線の場合、まず2本の超伝導素線と1本の銅線を撚りピッチ20 mmで撚り合わせて1次燃線を製作し、次に3本の1次



(a) Critical current of TF strand



(b) Critical current of CS strand

図3 (a)TF用素線と(b)CS用素線の12 Tにおける臨界電流。

	1st stage	2nd stage	3rd stage	4th stage	5th stage
cross-sectional view of cable					
constitution	3 strands	3 first-stage-cables	5 second-stage-cables	5 third-stage-cables with Cu core cable	6 forth-stage-cables
twist pitch (mm)	80±5	140±10	190±10	300±15	420±20

(a) Superconducting cable for TF coil

	1st stage	2nd stage	3rd stage	4th stage	5th stage
cross-sectional view of cable					
constitution	3 strands	3 first-stage-cables	4 second-stage-cables	4 third-stage-cables	6 forth-stage-cables
twist pitch (mm)	20±5	45±10	80±10	150±15	450±20

(b) Superconducting cable for CS

図4 (a)TF用燃線と(b)CS用燃線の5段階の製作過程と撚りピッチ。

燃線を撚りピッチ45mmで撚り合わせて2次燃線を、次に4本の2次燃線を撚りピッチ80mmで撚り合わせて3次燃線を、次に4本の3次燃線を撚りピッチ150mmで撚り合わせて4次燃線を、最後に6本の4次燃線を撚りピッチ450mmで撚り合わせて5次燃線を製作する。図2に示した通り、超伝導素線は直径約0.57mmのブロンズの中にNbの極細フィラメント(直径約2~3μm)が1万本以上も分散した非常に緻密な構造を持つため、撚り合わせる際に超伝導素線を過度に変形させてしまうと、超伝導性能を損なう恐れがある。また、図5に示すように、1本が数百mに及ぶ5次燃線を製作する中で、製作が適切でないとき蛇行するようなうねりが生じる。その場合、2.4節で述べる後工程のジャケット管への引き込み時に摩擦が過大になって大きな引き込み力を要し、超伝導性能を損なう恐れがある。燃線を製作する際、6本の4次燃線の各バックテンションを均一に保ち、これら素線に過度の変形や燃線のうねりが生じないようにすることが非常に重要である。

2.2.3 ジャケット管の製作

超伝導導体は1本が長さ数百mに及ぶが、そのジャケット管は短尺のものを大量に製作し、次節で示すように溶接によって繋ぎ合わせ、長さ数百mの1本のジャケット管にする。ジャケット管のステンレス鋼は化学成分や機械特性を厳しく管理する必要があるため、そのインゴットは、まず1次溶解を電気炉で行った後、Ar-O₂精錬装置により脱炭し、介在物を低減するために、2次溶解として電気スラグ再溶解(ESR)による精製工程を用いて製作する。TF用及びCS用のジャケット管に要求される機械特性の一例として、冷間加工と熱処理(650℃×200時間)を経た材料の、4.2Kにおける要求性能を表1に示す。冷間加工は、次節で述べる後工程のコンパクションとソレノイド状の巻き

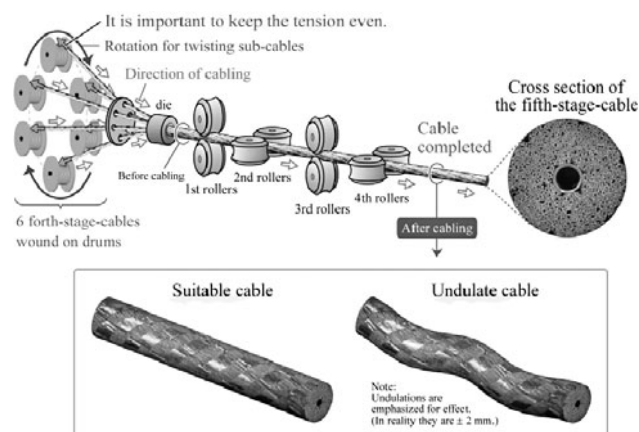


図5 5次燃線の製作工程と発生し得る燃線のうねり。

表1 冷間加工と熱処理を経たジャケット材の4.2Kにおいて要求される機械特性。

	TF jacket	CS jacket
0.2% yield strength (MPa)	>950	>850
Ultimate tensile strength (MPa)	-	>1150
Elongation at failure (%)	>20	>25
Fracture toughness K_{IC} (MPam ^{1/2})	-	>130

取りを模している。650℃×200時間の熱処理は、前述のNb₃Snを生成するための熱処理を模している。一般にステンレス鋼ではこの温度領域で長時間の熱処理を行うと鋭敏化によって延性が大きく低下するため、650℃×200時間の熱処理を経た上での機械特性は重要である。

TF用のジャケット管はSUS316LNを低炭素化したシームレス円筒管で、1本の長さは13mである[8]。CS用のジャケット管は極低温下での高い疲労特性と0.2%耐力を両立する必要があるため、日本が特別に開発したJK2LBのシームレス角形円孔管を用い、1本の長さは6mである[9]。TF用導体は通電時の電磁力を主に周囲の構造材によって支持するのに対し、CS用導体は主にジャケット管だけで支持する設計なので、ジャケット管は厚い(図1参照)。

導体内に流す冷媒のヘリウムは最小の単原子分子なので、極めて小さな欠陥からも漏れ出てしまう。したがって、欠陥を検出する非破壊検査が重要である[8,10]。特にCSは高い疲労特性が必要なので非破壊検査が非常に重要であり、ジャケット管の外表面から超音波フェーズドアレイ検査(PAUT)を、さらに内表面及び外表面から渦流探傷試験(ET)を行っている。

2.2.4 超伝導導体の製作

超伝導燃線は所定の長さで製作するが、前節で述べた通りジャケット管1本1本は短尺なので、溶接で接続して1本の長尺なジャケット管(TFでは760mまたは415m, CSは918mまたは615m)にする必要がある。溶接後、その箇所欠陥が無いことを浸透探傷試験(PT)と放射線透過試験(RT)により確認する。また、溶接によってジャケット管の内面に溶接材が突出していると、後工程の燃線の引き込み時に燃線の摩擦を増大させ、またコンパクション時に燃線にダメージを与えてしまう。したがって、ジャ

ケット管内へのゲージの挿入試験や、CCDカメラによる目視検査を行って、溶接材の突出が無いことを確認する。さらに、各溶接部の前後をバルーンで仮封止した状態で3 MPaのヘリウムを加え、溶接部からヘリウムがリークしないことを確認する[8]。

次に、図6に示すようにワイヤーで撚線をジャケット管の中へ引き入れる。両者の隙間は約2 mmしかなく、撚線がうねっていると摩擦が大きくなって引き込み力が高くなり、撚線の超伝導性能を損ね得る。したがって、図5の5次撚線製作時にうねり量を常時レーザー計測で管理している。製作当初は全く予想していなかったが、この引き込み中に撚線が回転し、加えていた5次撚りが戻る（5次撚りピッチが伸びる）ことがわかった。図7(a)に示すように、この回転は撚線先端に設置したセンサーで測定しており、回転数は数十回にも及ぶ。引き込み中に撚線が回転するのは、主に引き込み力（TF用撚線で最高約37 kN、CS用撚線で最高約30 kN）に起因すると考えられる。

次に、図7(b)に示すように、撚線とジャケット管をコンパクションローラーで圧縮成型して一体化する。撚線を引き込む際にジャケット管との隙間を狭くしているのは、この一体化工程でのジャケット管の変形量を極力抑えるためである。製作当初は全く予想していなかったが、このコンパクションの間にも撚線は回転し、加えていた5次撚りの撚り戻りが発生する。この撚り戻りも製作当初は全く予

想していなかったもので、撚線尾端に設置したセンサーで測定したところ、回転数は数十回にも及ぶ。コンパクション中に撚線が回転する原因は、下記のように考えられる。コンパクションすると、TF用ジャケット管は長手方向に6.0%、CS用ジャケット管は4.5%伸びるのに対し、撚線はほとんど伸びない。その結果、相対的にジャケット管が撚線表面を滑って動くことになり、その摩擦によって撚線が回転すると考えられる。このように、撚線が引き込みとコンパクションの間に回転し、5次撚りピッチが伸長することは全くの想定外の事象であり、最も製作が進んでいた日本で最初に発覚したが、ITER機構と共に試作・試験を繰返し、問題とならないことを他国に先駆けて明らかにした。

コンパクション後は、後工程のコイル製作の工場へ輸送できるように、直径4 mのソレノイド状に巻き取る。そして、コンパクションと巻き取りの過程でジャケット管に欠陥が生じなかったことを確認するために、再び非破壊検査を実施する。まず、全溶接部に対してPTを行う。さらに、導体全体を大型真空容器に入れて真空排気し、導体内部に3 MPaのヘリウムを加えて、ヘリウムが真空容器内に漏れ出さないことを確認する[8]。一般にステンレス鋼は500~800℃の熱処理によって粒界に Cr_{23}C_6 が析出し、その分、Cr含有量が低下する部分が生じ、そこが腐食され易くなる。前述の Nb_3Sn を生成するための熱処理はこの温度範囲にある。特にCS用ジャケット管であるJK2LBは元々Crの含有量が低いため、ジャケット管の溶接部等で応力腐食割れ等を起こさないよう、上述の全工程及び後のコイル化の工程でハロゲン化物等を含む物を使用しないことが重要である。

導体の完成後、携帯型のX線透過検査装置を行い、5次撚りピッチの分布を導体全長に亘って調べた[11]。その結果、撚線引き込み時の先端の5次撚りピッチが最も長く、TFは元々420 mmが最長で約470 mmまで、CSは元々450 mmが約550 mmまで伸びたことがわかった。この撚りピッチの伸長を完全に防止することはできていないが、次節の超伝導導体の性能試験により、現状の100 mm程度の伸長では性能にほとんど影響が現れないことを確認している。

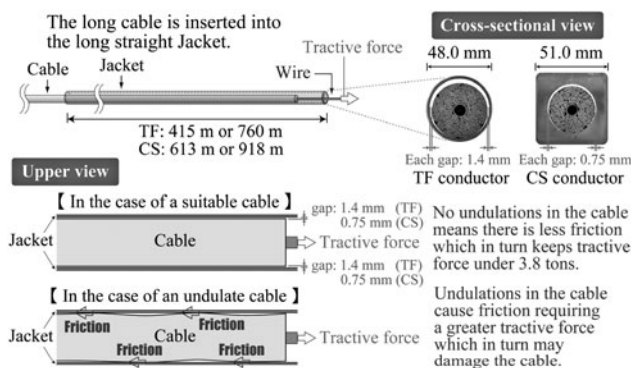


図6 ジャケット管への撚線の引き込み。

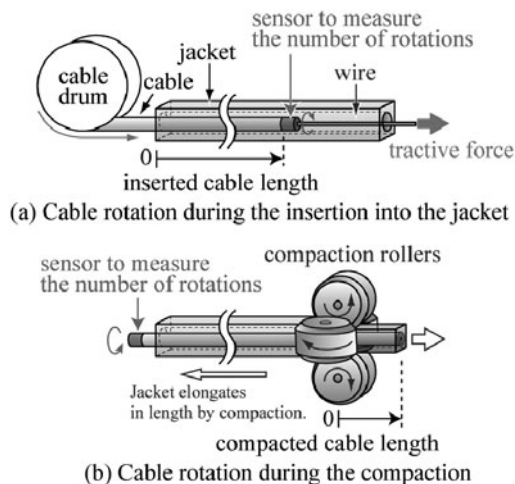


図7 (a)引き込みと(b)コンパクション中に回転する撚線。

2.3 超伝導導体の性能試験

製作した超伝導導体がITERの要求性能を満たすことを確認する必要があるため、導体製作後、その性能試験を行っている。導体の端部の余長から長さ約4 mを切断し、その導体のサンプルとする。図8のように、2本の導体サンプルをジョイントで繋いで直状短尺導体サンプルとし、その超伝導性能をスイスにあるSULTAN試験装置を用いて試験する。SULTAN試験装置は図8に示すように、印加磁場が均一な領域は $z=0.5$ m近傍の幅約0.5 mである。この領域に電圧タップと温度センサーを設置して導体性能を評価する。性能を表す重要なパラメータとして分流開始温度(T_{cs})（超伝導状態を維持できる最高温度）があり、 T_{cs} が高いほど運転上の裕度大きいと言える。性能試験では、ITERの20年間の運転を想定し、導体サンプルに繰

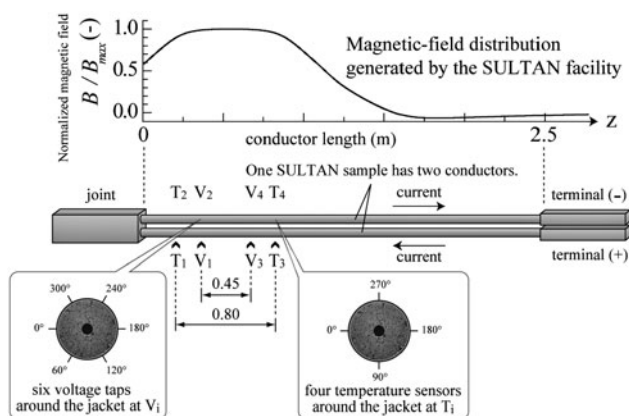


図8 導体性能試験用サンプルの外観とセンサーの配置及び導体長手方向の印加磁束密度分布。

返し通電を行った上で、 T_{cs} が合格基準を満たすことが求められる。

2.3.1 TF 用導体の性能試験

TF 用導体に関しては、1,000 回の繰返し通電の間、68 kA、11.8 T における T_{cs} が 5.8 K 以上を維持することが要求されている。しかし実際に試験を行うと、一部の導体で合格基準を満足できないことが判明した。合格基準を満たさなかった導体の試験結果の一例を、図9の三角で示す。50回の繰返し通電で 5.8 K を下回り、その後、繰返し通電に対してほぼ直線的に T_{cs} が低下した。

T_{cs} の低下原因を調べるために、試験後の導体サンプルを分解した。高磁場領域 (図8の $z=0.5$ m 近傍) にあった導体の断面と撚線の側面の写真を図10に示す。図10(a)の断面写真から、僅かに撚線が右側に偏っていることがわかる。これは通電中に各超伝導素線に電磁力 (左から右の方向) が加わったためである。また、図10(b)の側面写真から、Side II は変形が見られないのに対し、Side I は大きく蛇行するように波打った変形が見られる。なお、低磁場領域 (図8の $z=2.0$ m 近傍) では電磁力が小さいため、導体を分解してもこのような変形は見られなかった。図3に示した通り、 Nb_3Sn は機械的な変形を受けると I_c が大きく低下する (導体の T_{cs} も低下する)。この Side II での撚線の変形が、繰返し通電による T_{cs} の低下の原因であることを、日本が他国に先駆けて明らかにした。

要求性能を満たさなかった導体の性能を向上するため、 Nb_3Sn を生成するための熱処理条件の最適化を行った。ジャケットの機械特性や、TF コイルの製作時間短縮の観点から、熱処理時間は短い方が望ましい。したがって、元々は 250 時間を上限として調査し、570°C で 150 時間の後、650°C で 100 時間の熱処理が最適と分かり、図9の三角にはこの熱処理パターンを施した。導体性能を向上するため、450 時間を上限として再調査した結果、570°C で 250 時間の後、650°C で 100 時間の熱処理の方がより高い性能になることがわかった。 I_c は Nb_3Sn の結晶粒界が多いほど高くなる傾向にあり、低温の 570°C の熱処理時間を長くすることで微細な結晶粒を多数生じさせることができたと考えられる。この最適化した熱処理条件を施した場合の導体の試験結果を図9の丸で示す。 T_{cs} の初期値を 0.2 K 高めるとともに、繰返し

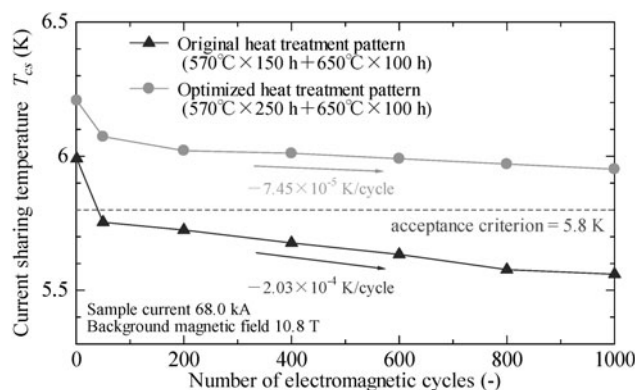


図9 TF 用導体の繰返し通電に対する分流開始温度。

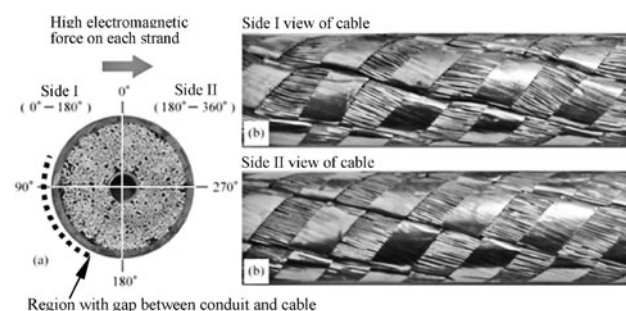


図10 高磁束密度領域にあった性能試験後の (a) TF 用導体の断面と (b) TF 用撚線の側面。

通電回数に対する T_{cs} の低下率を -2.03×10^{-4} K/cycle から -7.45×10^{-5} K/cycle に抑えることができた [12]。これにより、1,000 回の繰返し通電の間、合格基準である 5.8 K を維持することに成功した。

2.3.2 CS 用導体の性能試験

TF コイルは定常運転を行うので、性能試験での繰返し通電回数は 1,000 回であった。一方、CS はパルス運転を行うため、性能試験の繰返し通電回数は 6 万回行うことが望ましい。しかし、6 万回の繰返し通電はスケジュール的に困難なため、1 万～2 万回間に T_{cs} が低下しなくなることが要求された。しかし実際に試験を行うと、図11の三角で示すように、1 万回の繰返し通電の間、 T_{cs} はほぼ直線的に低下した。また、この導体は 4 回の昇温・再冷却 (4.2 K の導体を室温まで昇温し、再び 4.2 K まで冷却すること) を経ているが、その際も T_{cs} は低下した。

試験後の導体サンプルを分解したところ、やはり撚線の変形が見られた。この導体の断面と撚線の側面の写真を図12に示す。図12(a)の断面写真から、撚線が右側に偏り、左側に空間が生じていることが明確にわかる。また、図12(b)の側面写真から、Side II は変形が見られないのに対し、Side I は大きく蛇行するように波打った変形が見られる。これらの変形が図10に比べて大きいのは、CS 用導体の繰返し通電回数が 10 倍以上も多いためと考えられる。

T_{cs} の低下を抑えるためには、この変形を抑える必要がある。そこで、低次 (1 次～4 次) の撚りピッチを短くすることで素線同士の結びつきを強めれば、個々の素線が電磁力によって隙間に移動 (変形) することを抑制できると考えた。原設計の 1 次から 5 次の撚りピッチは $45 \times 85 \times$

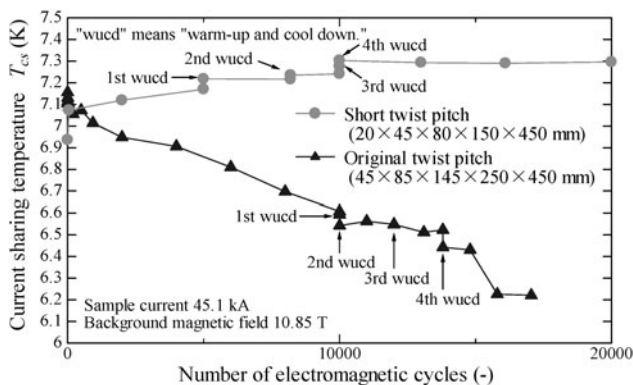


図11 CS用導体の繰返し通電回数に対する分流開始温度。

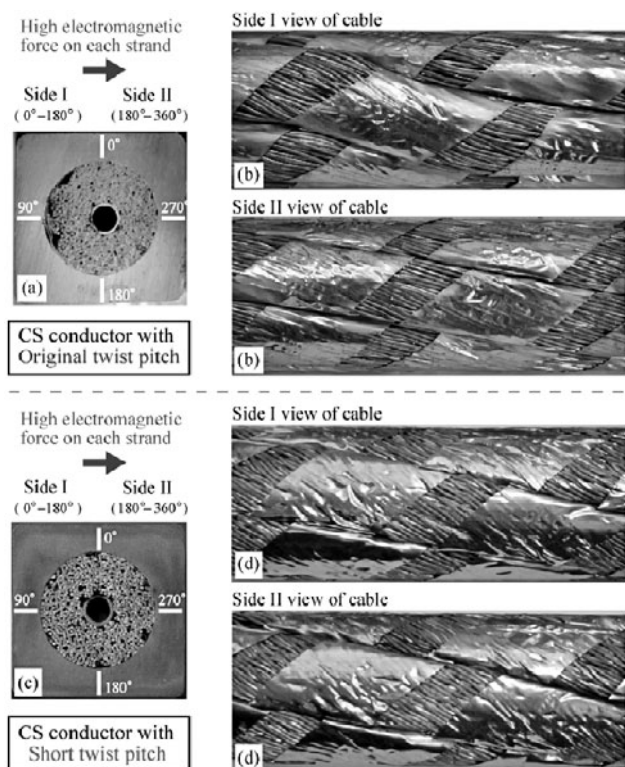


図12 高磁束密度領域にあった性能試験後のCS用導体の断面とCS用撚線の側面。

((a), (b)は原設計の撚りピッチ, (c), (d)は短い撚りピッチの導体)。

145×250×450 mmであったが、図4 (b)に示した通り、20×45×80×150×450 mmと1次から4次の撚りピッチを約半分に短くした。その結果を図11の丸で示す。2万回の繰返し通電と4回の昇温・再冷却を経ても、 T_{cs} が低下することはなく、要求性能を満たすことに成功した[13, 14]。試験後、この短い撚りピッチの導体を分解したところ、図12(c), (d)に示す通り、撚線の変形は見られず、予想通り、低次の撚りピッチを短くすることで変形を抑えられることが示された。

なお、TFコイルの最高磁束密度である11.8 TはSULTAN試験装置で発生できるが、CSの13 Tは発生させることができない。また、CSはソレノイド状なので通電時にフープ力による機械的歪み加わるが、図8の直状導体で

はこれを再現できない。さらに、SULTAN試験装置では最高磁束密度の領域が約0.5 mと狭いことも懸念事項であった。そこで、長さ約80 mの導体をソレノイド状にしたサンプルを製作し、2015年3月から4ヵ月余りかけて那珂核融合研究所のCSモデル・コイル試験装置を用いて試験を行った。本装置は数十mの導体長に亘って最高磁束密度13 Tを印加できる。その結果、16,000回の繰返し通電と3回の昇温・再冷却を経ても、40 kA, 13 Tにおける T_{cs} は設計値(5.2 K)に対して1.5 K以上の大きな裕度があることを明らかにした。

2.4 まとめ

TF用及びCS用の Nb_3Sn 超伝導素線は合計長さ49,000 kmと、これまでにない規模の量産を行う上で、品質管理は非常に重要である。 I_c や Q_h などの素線性能は、素線メーカーと原子力機構で測定値が異なる場合があり、原因を調べるのに時間がかかった。また、撚線が引き込み中やコンパクション中に回転し、5次撚りピッチが伸長することは誰も想定していなかったため、初めて導体製作後に端部を分解検査して5次撚りピッチが伸びていることがわかった時は原因究明に苦勞した。導体の性能試験では、ITERの要求性能を満たさないことがあったが、熱処理条件や低次の撚りピッチを変更することで克服できた。また、2011年3月の東日本大震災や2013年2月の雪害によって超伝導素線と撚線の工場が被災・崩壊し、製作に多大な影響を及ぼしたが、競合会社同士の助け合いもあって乗り越えることができた。今後の製作はCS用導体の約6割を残すのみであり、予定通り2017年の完了をめざす。

参考文献

- [1] T. Tsuji *et al.*, Nucl. Fusion **41**, 645 (2001).
- [2] K. Okuno *et al.*, Nucl. Fusion **47**, 456 (2007).
- [3] Y. Takahashi *et al.*, Nucl. Fusion **51**, 113015 (2011).
- [4] 名原啓博 他：低温工学 **47**, 140 (2012).
- [5] L. Bottura *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19**, 1521 (2009).
- [6] 磯野高明 他：低温工学 **47**, 147 (2012).
- [7] Y. Takahashi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014), Art. ID. 4802404.
- [8] 濱田一弥 他：低温工学 **47**, 153 (2012).
- [9] K. Hamada *et al.*, Cryogenics **47** 174, Mar. (2007).
- [10] Y. Takahashi *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015), Art. ID. 4200904.
- [11] Y. Nabara *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015), Art. ID. 4200305.
- [12] Y. Nabara *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014), Art. ID. 6000605.
- [13] Y. Nabara *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014), Art. ID. 4200705.
- [14] T. Suwa *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2015), Art. ID. 4201704.