サテライトトカマク“JT-60SA”の超電導コイルの製作

野元一宏*
堀井弘幸*
板敷祐太郎*

Manufacturing Superconducting Coils for Satellite Tokamak "JT-60SA"

Kazuhiro Nomoto, Hiroyuki Horii, Yutaro Itashiki

要　旨

JT-60SAは，欧州との国際協力の下，国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構(QST)那珂核融合研究所で建設中の大型プラズマ実験装置である。プラズマの磁場閉じ込め及び制御のためトロイダル磁場(TF)コイル，中心ソレノイド(以下“CS”という。)，平衡磁場(EF)コイルの３種類の超電導コイルが設置される。欧州がTFコイル18台の調達を担当し，日本はEFコイル６台及びCS １台の調達を担当する。

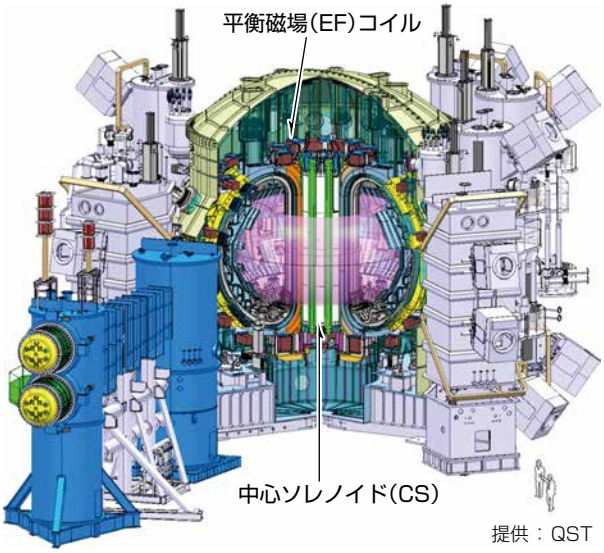
三菱電機は2009年から日本担当分全ての超電導コイル製作を担当した。これらのコイルは当社でも経験のなかった大型の超電導コイルであり，2009年から製作設備の製作・要素試作を始め，2016年８月にEFコイル，2019年３月にCSを完納した。

EFコイルは，ニオブチタンの超電導線材を用いたコイルであり，外径が最大12mと大きく陸送できないため，2012～2016年の間，QST那珂核融合研究所構内に製作設備を立ち上げ，現地生産を行った。

CSは，52層549ターンという多層ソレノイドコイルであり，高磁場下で使用するためニオブスズと呼ばれる超電導線材を用いる。ニオブスズは熱処理が必要であり，熱処理後に超電導特性を劣化させないため，設計と生産技術の両面で数多くの工夫を行った。

当社は，EFコイルとCSに加えて超電導コイルに電源供給するTFコイル用給電機器の製作も行った。

現在，QSTがこれらの機器の据付けを実施している。



提供：QST

JT-60SA

EFコイル

CS

JT-60SA

左図は欧州との国際協力の下，建設が進められている国内核融合実験装置JT-60SAの鳥瞰(ちょうかん)図であり，2020年ファーストプラズマの予定である。右上図は那珂核融合研究所内本体室搬入前のEF1・EF2・EF3コイルであり，一番手前のEF1コイルは直径12m，質量29t，ニオブチタンを使用した2019年時点で世界最大級の超電導コイルである。右下図は当社工場出荷前のCSであり，直径２m，質量100t，ニオブスズを使用した超電導コイルである。

　*電力システム製作所

1. まえがき

JT-60SAのEFコイルとCSは当社として実績のない大型超電導コイルであり，製造プロセスごとに製作設備を新規に設計・製作し，試作開発を行って課題を解決した。

本稿では，EFコイルとCS，及びTFコイル用給電機器の製作について述べる。

2. EFコイルとCSの特長

JT-60SAの超電導コイルの鳥瞰を**図1**に，EFコイルとCSの主要パラメータを**表1**に示す。EFコイルとCSで使用した超電導導体の方式はケーブルインコンジットと呼ばれ，ステンレス鋼のジャケットの中に超電導撚線(よりせん)と液体ヘリウムが流れるスパイラルが格納されており，運転時に導体にかかる電磁力を支持する(**図2**)。

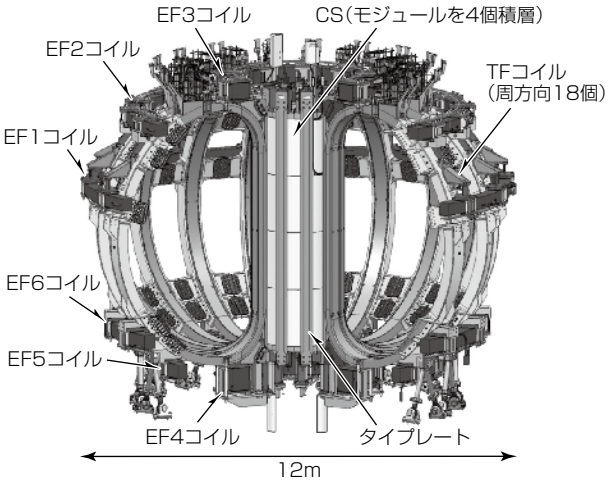


図1．JT-60SAの超電導コイル(提供：QST)

表1．超電導コイルの主要パラメータ

	EF(6種類)	CS
超電導線	ニオブチタン	ニオブスズ(熱処理必要)
外径(m)	4.4～12.0	2.0
内径(m)	2.0～11.0	1.3
高さ(m)	0.5～1.5	12.0
製品質量(t)	20～25	100

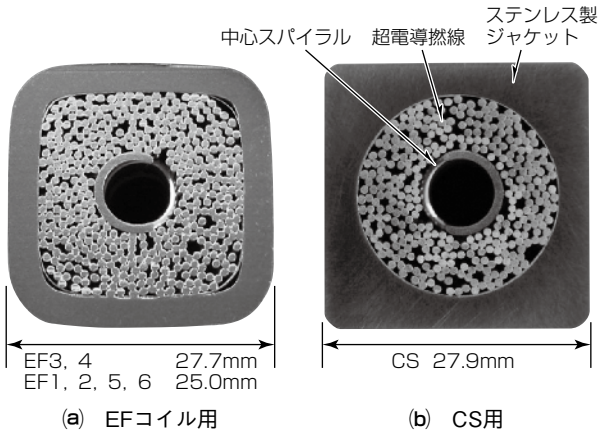


図2．超電導導体断面図(提供：QST)

3. EFコイルの製作

EFコイルはプラズマの形状と位置を制御するため，コイル電流中心の真円度と平面度の確保が技術課題である。EFコイルの製作手順を**図3**に，積層後の断面を**図4**に示す。

巻き線は2層を一塊とするダブルパンケーキ(DP)巻き線を採用しており，精度の良いDPを製作できるかが，コイル電流中心精度に影響する。EFコイルは寸法を**表1**に示すように各DPが直径に対し非常に薄い円盤である。樹脂加熱硬化時の熱歪(ひず)みや製造過程の輸送による物理的な歪みが生じた場合，積層時にコイル電流中心精度を調整できない可能性があった。

そこで，次の対策を行って高精度のDP製作を行った。

(1) 導体曲げシミュレーションコード開発(CSと共用)
(2) 高精度巻き線対応の巻き線ヘッド開発(CSと共用)
(3) 連続自動巻き線
(4) 加熱硬化容器(導体と同じ熱伸びとし，寸法を確保)
(5) 樹脂選定と試作・検証

EFコイル巻き線を上から見ると**図5**(a)のように一定R部とターン渡り部で構成されるパンケーキ巻きとなっている。EFコイル製作に使用する超電導導体の剛性は高く，

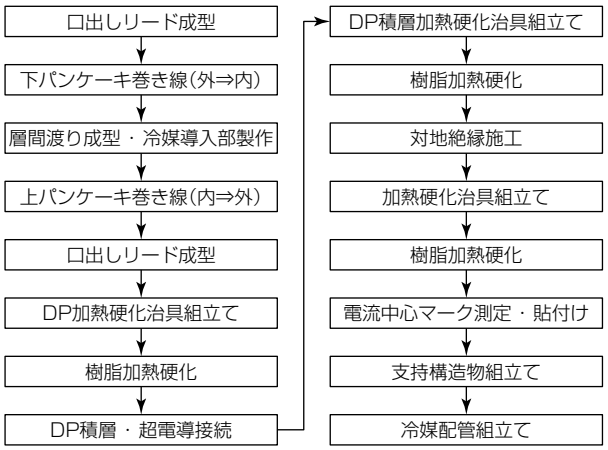


図3．EFコイルの製作手順

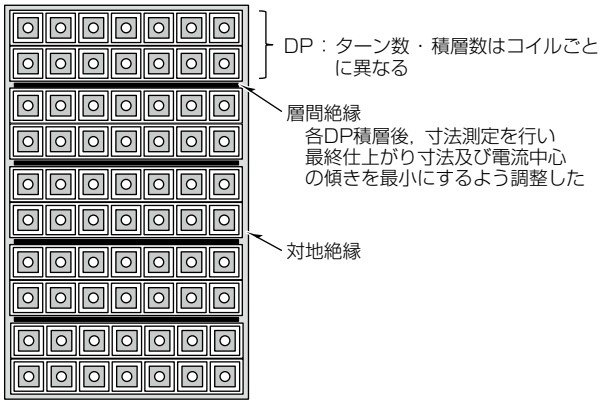
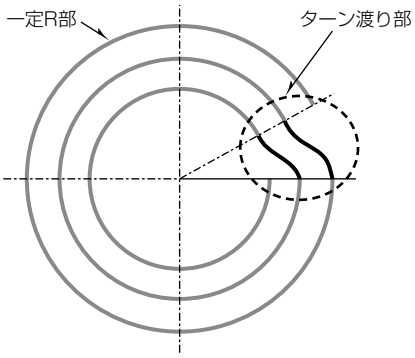
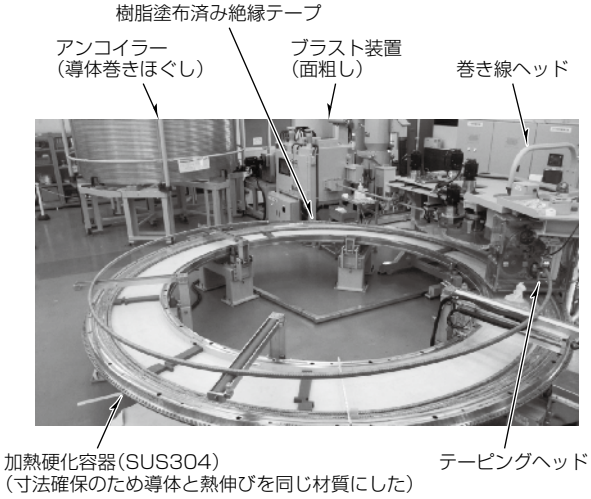


図4．EFコイルの断面図(例)

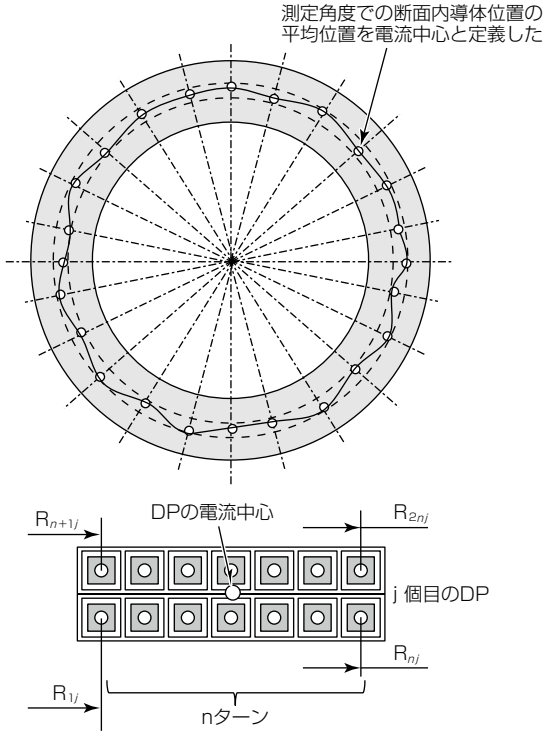


(a) パンケーキ巻き線の模式図



(b) 巻き線装置(FE4製作時)

図5．パンケーキ巻き線と巻き線装置



■DP m個からなる，ある角度位置での電流中心位置は次のとおり

$$\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{1}{2n}\sum_{i=1}^{2n}R_{ij}\right)$$

図6．電流中心の定義

表2．EFコイル電流中心真円度測定結果(単位：mm)

	EF1	EF2	EF3	EF4	EF5	EF6
真円度	0.3	0.4	0.2	0.6	0.6	1.3
仕様	8以下	7以下	6以下	6以下	7以下	8以下

巻き線ヘッドで曲げ加工した導体を真下へ降ろしていく方法を採った。専用の巻き線ヘッドとシミュレーションコードを開発し，一定R部とターン渡り部を連続巻き線することで，加工時間の短縮，成型ばらつきの抑制を行うことができた(**図5**(b))。

次に電流中心の定義を**図6**に示す。この工事での電流中心は各測定断面での幾何学的な導体の中心であり，プラズマの性能に直結するパラメータである。電流中心の測定結果は**表2**に示すとおり，全てのEFコイルで仕様値を大きく下回る真円度を達成できた。

4. CSの製作

CSは独立した電流制御を行うためCSモジュールと呼ばれる52層のコイル四つを積層した構成である。JT-60SAのトカマク中心に設置され，8.9Tもの高磁場下で，交流運転による電磁力に耐える構造となっている。極低温での運転時コイル間にギャップが生じないようタイプレートと呼ばれる構造物でモジュールを予備加圧(プリコンプレス)している。CSの製作手順を**図7**に示す。

4.1 CSモジュールの製作

CSの超電導線は熱処理(650℃×100h)が必要なニオブスズであり，熱処理後は過大な歪みを与えると超電導特性が劣化する。そのため，熱処理後に導体に与える歪みが0.1%以下となるように製作設備を設計し，コイル製作を行った。導体はジャケット厚さ及び材質のばらつきによって曲げ半径が変化するため，巻げ半径を測定し，巻き線ヘッドにフィードバックをかける方式にすることで高精度での巻き線を可能にした(**図8**)。

CSモジュールの製作精度もEFコイルと同様に電流中心(**図6**)の真円度で評価する。真円度の測定結果を**表3**に示す。真円度の要求仕様4mm以下に対し0.6mm以下の精度でモジュールを製作できた。

4.2 CSモジュールの積層

CSモジュール4個の積層ではモジュール間に絶縁スペーサを挿入することで位置決めと高さ調整を行い，各モジュール上面で平面度1mm以下を達成した。またCSモジュールの電流中心測定結果から算出される幾何中心を位置度φ1mm以下に設置できた(中心軸位置度仕様：φ2mm以下)(**図9**)。

4.3 プリコンプレス

プリコンプレスとは，極低温でのコイル熱収縮量相当分を常温状態であらかじめコイルを圧縮しておくことである。

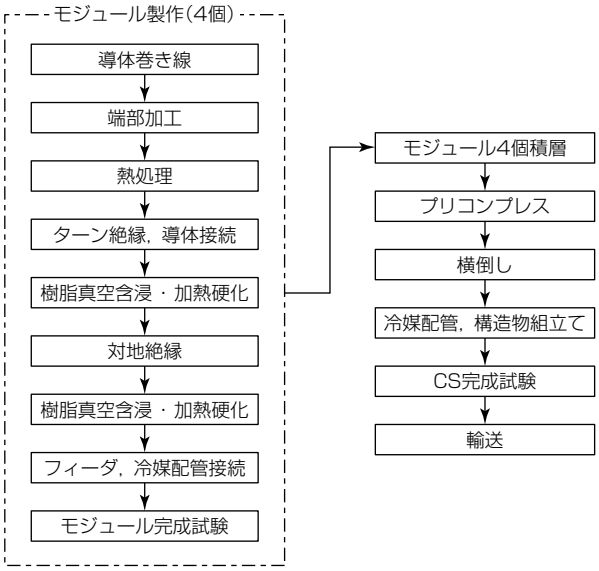


図7．CSの製作手順

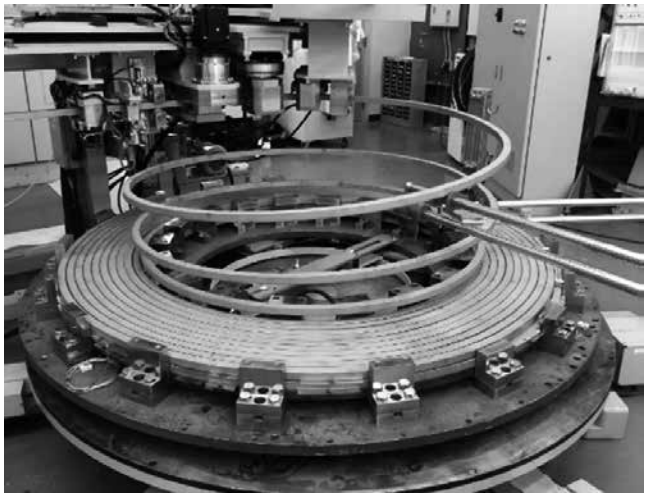


図8．CS巻き線装置

表3．CSモジュールの電流中心真円度測定結果(単位：mm)

モジュール	CS1	CS2	CS3	CS4
真円度(仕様4以下)	0.4	0.6	0.6	0.3

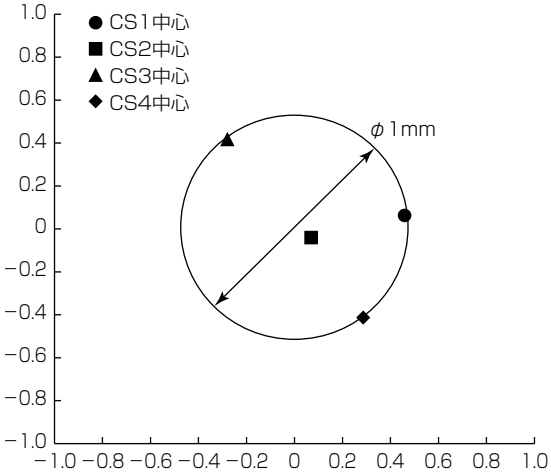


図9．積層後のCSモジュール幾何中心位置

図10．CSの横倒し(提供：QST)

図11．CSの現地輸送・縦起こし後のトカマク本体への挿入(提供：QST)

タイプレートと呼ばれるステンレス製の構造材をコイル内外に全周9か所の計18本設置し，コイルに37.5MNの荷重を与える。荷重を均等に与えるようタイプレートに設置した歪みゲージで荷重を管理し，24時間保持後に荷重が抜けていないことを確認した。

モジュール積層，プリコンプレスは縦置状態で組立てを行ったが，那珂核融合研究所に輸送するためには一度横置状態にする必要がある。製作工程内での変形を構造計算で評価し，製品での横倒しと縦起こしを実施し，横置状態にしても寸法変化がないことを確認した(**図10**，**図11**)。

5．TFコイル用給電機器の製作

極低温の超電導コイルと常温の電源とを接続するために，高温超電導電流リード(HTS-CL)と超電導導体を用いた専用の給電機器が5台使用される。当該給電機器はコイルターミナルボックス(CTB)と呼ばれる(**図12**，**図13**)。当社はTFコイル用CTB 1台の製作を担当した。

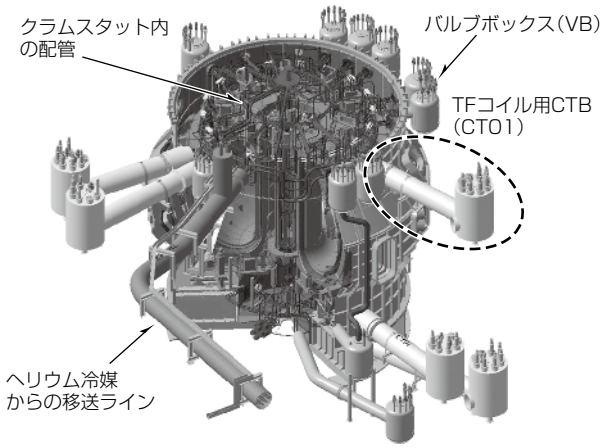


図12. CTBの組立て状態(提供：QST)

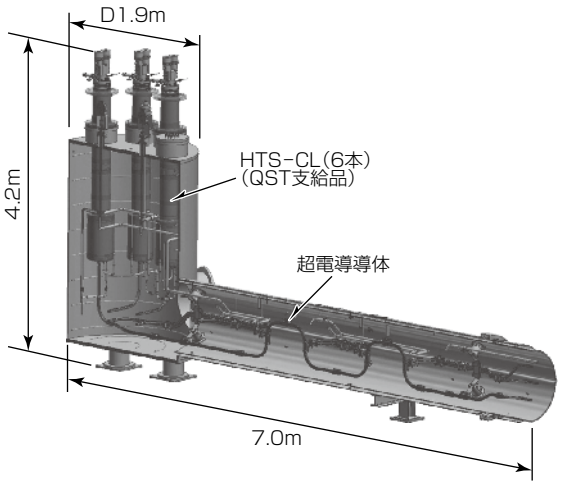


図13. TFコイル用CTB(提供：QST)

この機器の特徴は，各HTS-CLに対して１本ずつ長尺の超電導導体を曲げたフィーダを接続し，電流の行きと戻りのフィーダを対にしている点である。当社ではEFコイル製作の実績を生かした高精度な曲げ加工によって，HTS-CLと無理なく接続できた(**図14**)。

図14. CTBフィーダ曲げ形状例

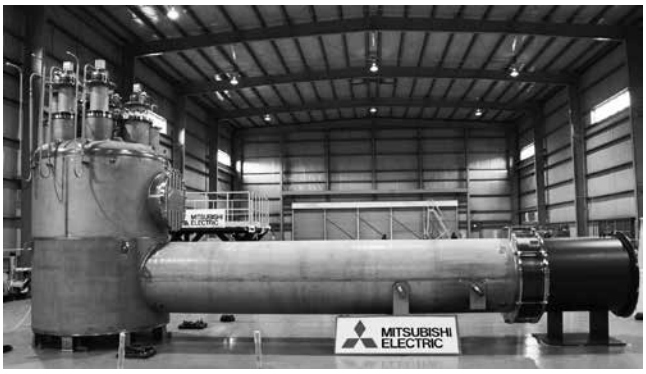


図15. TFコイル用CTB完成時外観(提供：QST)

6. む す び

QSTの多大なる協力でJT-60SA EFコイルとCS及びTFコイル用CTBの製作を無事完遂した(**図15**)。今回のものづくりで得られた知見を生かし，今後も核融合発電の実現に向けて貢献していく。

参 考 文 献

(1) 野元一宏，ほか：核融合大型超電導コイルの製作，三菱電機技報，**87**，No.11，652～655 (2013)