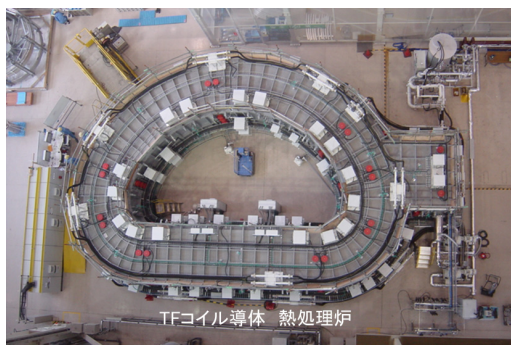


三菱重工の ITER への取組み

- 大型高性能超伝導コイル製作への挑戦 -

MHI's Efforts towards ITER

- Challenges to Build Large-size High-performance Superconducting Coils -



清水 克祐*1
Katsusuke Shimizu

澤 直樹*1
Naoki Sawa

山本 暁男*2
Akio Yamamoto

三宅 孝司*3
Takashi Miyake

岡本 健*4
Takeru Okamoto

坪田 秀峰*5
Shuho Tsubota

現在、ITER 機構が機器/設備の設計、建設、運転、廃止措置等を担い、参加7極が機器/設備の製作を担う“物納方式”が採択され、機器/設備の製作が進んでいる。日本は、プラズマ閉じ込め用磁場を作り出すトロイダル磁場(TF: Toroidal Field)コイルをはじめとして、ダイバータ、加熱装置、計測装置等の重要な機器を調達することになっており、当社はそのほとんどに関与している。本稿では、TF コイル実機製作のための検証試験等の結果と現況を述べるとともに、プラズマ安定閉じ込めになくてはならないダイバータへの取組み状況を概説する。

1. はじめに

核融合エネルギー開発は、国際熱核融合実験炉 ITER の建設が始まり、新たな一步を踏み出したところである。ITER 計画は 1986 年、当時の米ソ首脳(レーガン-ゴルバチョフ)会談の共同声明に基づき、1989 年から米国、旧ソ連(ロシア)、欧州、日本が参加し概念設計活動が始まった。1992 年から約9年間実施された工学的設計活動では、詳細設計、製作性検証試験、並びに新技術の開発が行われた。

2005 年に建設サイトがフランスのサン・ポール・レデュランスに決定した。このサイトは原子力・代替エネルギー庁(CEA)カダラッシュ研究所に隣接している。

2006 年 11 月 21 日、ITER 閣僚級会合がパリの大統領府において開催され、ITER 協定について署名が行なわれた。これに引続き、第1回暫定 ITER 理事会が開催され、ITER 協定の暫定適用のもとで国際事業体“ITER 国際核融合エネルギー機構(ITER 機構)”の活動開始が了承され、参加極(日本、米国、ロシア、中国、韓国、インド、欧州連合(EU)の7つの国と地域)の批准を経て、国際研究機構設立協定が 2007 年 10 月 24 日に発効され、ITER 機構が正式に発足した。ITER 機構が機器/設備の設計、建設、運転、廃止措置等を担い、参加7極が機器/設備の製作を担う“物納方式”が採択され、現在、機器/設備の製作が進んでいる。

日本は、プラズマ閉じ込め用磁場を作り出す TF コイルをはじめとして、ダイバータ、加熱装置、計測装置等の重要な機器を調達することになっており、当社はそのほとんどに関与している。特に、TF コイルは世界最大級の超伝導コイルであり、試作試験をほぼ終えて、実機製作に着手したところである。本稿では、TF コイル実機製作のための検証試験等の結果と現況を述べるとともに、プラズマ安定閉じ込めになくてはならないダイバータへの取組み状況を概説する。

*1 エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 プロジェクト部 主席技師

*2 エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 機器設計部 主席チーム統括

*3 エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 原子力工作部 主席技師

*4 エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 原子力工作部 *5 技術統括本部 高砂研究所 主席研究員

2. ITER 及び TF コイルの概要

(1) ITER について⁽¹⁾

ITER のミッションは、トカマク型核融合発電に不可欠な自己点火/長時間プラズマ燃焼の実証、並びに核融合炉工学技術の実証にあり、将来の発電実証のための原型炉設計・製作・建設等に資するデータの取得・蓄積に重要な役割を担っている。ITER の基本仕様は表1に示すように、重水素と三重水素を燃料とし、核融合出力 50 万 kW、プラズマ持続時間 400 秒以上、エネルギー増倍率(Q)*10 というように、核融合炉プラントの礎となる仕様となっている。

*エネルギー増倍率(Q):投入エネルギーに対する核融合出力エネルギーの比

表1 ITER の主な仕様

核融合出力	~50 万 kW (500MW)
燃焼時間	400 秒~3 000 秒
エネルギー増倍率	~10
プラズマ電流	~1500 万 A (15MA)
プラズマ体積	~840 m ³
寸法	直径約 30m、高さ約 30m
本体重量	約 23 000 トン

(2) TF コイルについて

ITER で採用されているトカマク型磁場閉じ込め方式では、ドーナツ状の真空容器内に流れる電流が作る磁場とドーナツ方向に対して垂直に配置されたコイルによる磁場とで、プラズマを閉じ込める。ここで、ドーナツ方向をトロイダル (Toroidal) 方向といい、ドーナツ方向と垂直に配置されたコイルはトロイダル方向に磁場を発生させるコイルということでトロイダル磁場コイルと呼ばれている。一方、ドーナツ断面の周方向をポロイダル (Poloidal) 方向といい、ドーナツ周方向に磁場を発生させるコイルはポロイダル磁場 (PF: Poloidal Field) コイルと呼ばれている。

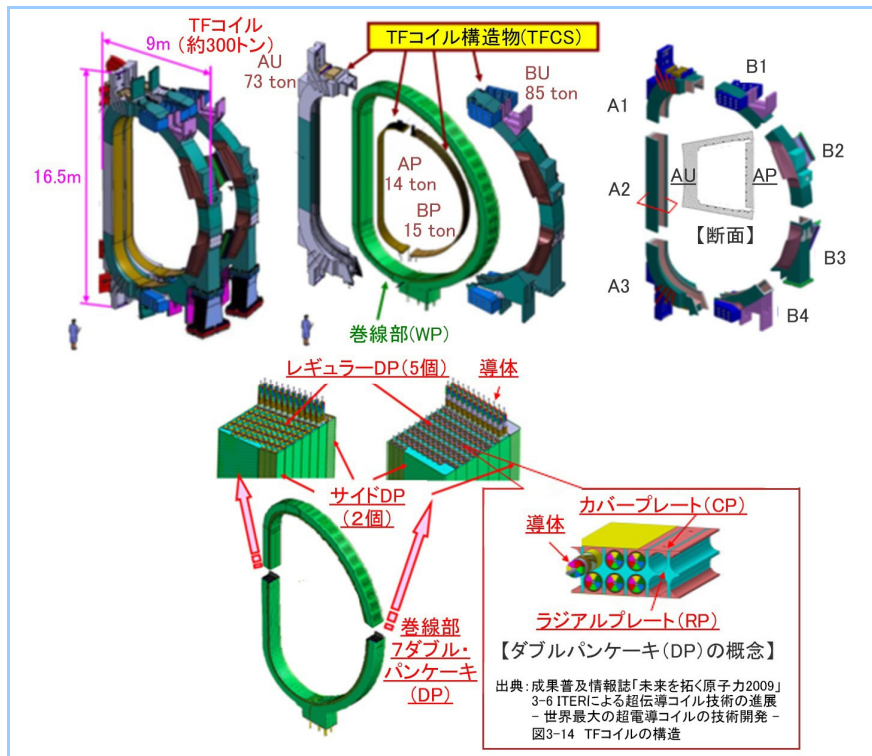


図1 トロイダル磁場コイルの概念図 (提供:(独)日本原子力研究開発機構)

TF コイルは、最大 11.8T、プラズマ中心で 5.3T の磁場を発生させ、高さ約 16m、幅約 9m、重量約 300 トンのD型コイル 18 本から成り、トロイダル方向に等間隔で設置される。プラズマの安定的な閉じ込めのため、許容される磁場の誤差は数ミリで、1 万分の 1 という高精度が要求される。これは TF コイルの寸法精度にも関わり、高さ 16m、幅 9m の大型溶接構造体に対してミリオ

ーダーの寸法精度が要求されることになる。また、TF コイル自身に作用する非常に大きな電磁力を支えるため、極厚板の溶接構造物となっており、-269℃という厳しい環境で使用されるため、特殊なステンレス鋼を構造材料としている。

図1に、ITER での TF コイルの構造概念を示す。TF コイルは超伝導導体が多層に積み重ねられた巻線部(WP:Winding Pack)とそれを収納する TF コイル構造物(TFCS:Toroidal Field Coil Structure)とから成る。WP 部は7層のダブルパンケーキ(DP:Double Pancake)から成り、それぞれの DP は導体と溝加工されたラジアルプレート(RP:Radial Plate)と溝を封止するカバープレート(CP:Cover Plate)から構成される。WP を収納する TFCS は、AU, AP, BU, BP と呼ばれるサブアセンブリに分けられ、それぞれ3~4個のベーシックセグメントを溶接して接合したものである。AU 及び BU には、隣接する TF コイルを連結するための支持構造物等の付属物が溶接によって取り付けられる。

3. TF コイル製作上の技術課題

TFコイルの構造材料は極低温用特殊ステンレス鋼のため、その材料特性に適した溶接技術、機械加工技術等の基盤技術の確立、加えて、ITER 要求仕様(精度)を満足する施工法を確立する必要がある。

(1) TF コイルへの要求精度について

TF コイルへの要求精度は、TFCS, DP の輪郭度 1mm, 平面度 1mm, 隣接コイル間のインターフェース面の平面度 0.4mm, RP の溝周長に対しては 34000±5mm となっている。

また、TF コイルの導体材料には、高磁場に耐えうる Nb₃Sn が採用されており、熱処理し超伝導化された素線に過大なひずみ(0.1%以上)を負荷しないように施工上の管理が要求される。

(2) TF コイル用構造材の特徴について^{[2][3]}

TFコイルの構造材料は、-269℃での 0.2%耐力が 1000MPa, 破壊靱性値が 200MPam^{1/2}を目標として開発が進められた。D型コイルの直線部には大きな力が働くため、最も高い強度を有する JJ1 と呼ばれる材料が使用される。その他の部位には、強度要求区分に応じて窒素含有量が異なる SUS316LNL/LNM/LNH の3鋼種が用いられる。表2に、JJ1 及び SUS316LN 系材料の化学成分、機械的特性を示す。

表2 各種材料の化学成分及び機械的性質

材料記号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	C+N	引張強さ (MPa)	降伏強さ (MPa)	破壊 靱性値 (MPam ^{1/2})
JJ1	0.030 以下	0.75 以下	9.00	0.035 以下	0.015 以下	11.00	11.00	4.00	0.21 ~ 0.27	-	>620	>300	>180
			~ 11.00			13.00	13.00	6.00			>600	>280	>180
316LNH	0.030 以下	0.75 以下	2.00	0.03 以下	0.020 以下	10.00	16.00	2.00	0.150 ~ 0.220	0.180 以上	>580	>280	>180
			~ 14.00			18.50	3.00	>560			>260	>180	
316LNM	0.030 以下	0.75 以下	2.00	0.03 以下	0.020 以下	10.00	16.00	2.00	0.100 ~ 0.170	0.130 以上	>550	>245	>180
			~ 14.00			18.50	3.00	>520			>230	>180	
316LNL	0.030 以下	0.75 以下	2.00	0.03 以下	0.020 以下	10.00	16.00	2.00	0.05 ~ 0.120	0.080 以上	>520	>210	>180
			~ 14.00			18.50	3.00	>480			>205	>180	
SUS316LN (JIS 規格材)	0.030 以下	1.00 以下	2.00	0.045 以下	0.030 以下	10.50	16.50	2.00	0.12 ~ 0.22	-	-	-	-
			~ 14.50			18.50	3.00	-			-	-	

注1) P+S<0.050 mass%

注2) 引張強さ及び降伏強さは室温における値

注3) 破壊靱性値は 4K における値(板厚, 上段:200mm 未満, 下段:200mm 以上)

(3) 溶接技術について

TFコイルの構造材料は、表2に示したように、窒素量を増やして強度を確保しているため、溶接によって窒素ガスが発生しポロシティ(空孔)が発生しやすい材料であると同時に、磁化を避けるためにフェライト組織を含まない完全オーステナイト鋼のため高温割れが発生しやすく、難溶接材となっている。

構造材料の特性を理解した上で、溶接変形を抑制するため入熱量が少ない溶接施工法である電子ビーム溶接、レーザービーム溶接、並びに狭開先 TIG 溶接を採用した。これらの施工条件の適正化を図り、プロセスの確立が必要となる。そのために、要素試験、小規模試験体によるプロセス検討、実規模試験体によるプロセス検証を実施した。

(4) 機械加工技術について

TFコイルの構造材料は機械加工(切削)においても、窒素含有のため、通常のステンレス鋼(SUS304)よりも切削性が悪くなっている。TFCS 及び RP は複雑な形状をしており、機械加工の効率化、加工変形抑制のためには、適切な工具の選定、切削条件の設定及び加工プロセスの確立が必要となり、溶接技術と同様に、要素試験による加工性把握、小規模試験体によるプロセス検討、実規模試験体によるプロセス検証を実施した。

4. 技術検証とその成果

TFCS と RP の製作に係る溶接技術及び機械加工技術に関する研究開発成果の概要を以下に記す。

4.1 TFCS の製作技術にかかわる技術検証とその成果

段階的な試験を通じて、ポロシティ発生を抑制する溶接条件を見出し、溶接変形を抑制する施工法を開発することで、実機へ展開することができた。

(1) 要素試験について

TFCS の板厚は 70 mm 超で、最も厚い部位では 200 mm を超える厚板溶接となるため、入熱の少ない狭開先 TIG 溶接及び電子ビーム(EB)溶接を選定し、その適用性を検討した。

狭開先 TIG 溶接については、溶着速度の高速化による溶接効率の向上を目標として試験を行い、既存の溶接機を用いて下向き姿勢で 20g/分の溶着量で健全性を確認することができた。

電子ビーム(EB)溶接については、溶接深さをパラメータとして特性試験を行い、40 mm 厚であれば、ポロシティの発生がない条件の見通しを得た。

(2) 小規模試験体によるプロセス検討試験について

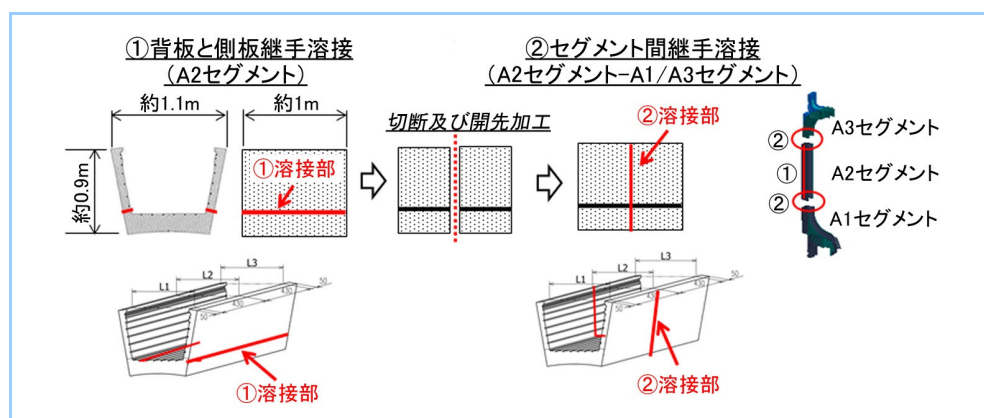


図2 小規模試験体及び試験計画

AU 直線部と同等な断面を有する 1m 長の小規模試験体(図2)を用いて溶接変形の確認及び溶接変形を極小化できる施工方法の確立を図った。以下に、主な結果を記す。

- 背板と側板の継手溶接試験では、EB 溶接時に発生した変形を、両側からの狭開先 TIG 溶接で調整し、施工完了後の変形を極小化した。

- ・セグメント間継手溶接試験では、両側溶接を適用し、内外面の溶接手順を調整することにより側板、背板の角変形を極小化することができた。
- ・非破壊検査において指示は検出されず、断面観察においてもマイクロ割れ等は観察されず、良好な溶接を行うことができた。

(3) 実規模部分モデル試験について

TFCS 実機の施工方法確立のため、要素試験及び小規模試験の結果を踏まえて、AU 曲線部、直線部の実規模モックアップを製作した。また、BU の模擬体も製作し、AU とBU とのサブアッセンブリ間の溶接試験を行った。

溶接変形を強固に拘束する治具は用いずに、両側から溶接を行うことで変形のバランスを取りつつ施工した。AU 直線部は、EB 溶接と狭開先 TIG 溶接との組み合わせ工法とし、AU 曲線部は、形状の制約から、両側からの狭開先 TIG 溶接工法を採用した。試作したモックアップの外観及び変形記録を図3に示す。



図3 実規模部分モックアップ(AU 曲線部とAU 直線部)

4.2 RP の製作技術に関する技術検証とその成果

TF コイル導体を収納するRPは、両面にらせん状の溝を設けた製品であり、素材の約80%を切削し製作する。材質は SUS316LNH(表2参照)で、これまで施工実績のない高強度高窒素ステンレス鋼であり、通常のステンレス鋼に比較して溶接性、切削性が非常に悪い。したがって、実機製作に先立ち、溶接条件の選定、切削条件の選定、機械加工方法の確立及び組立要領の確立を図った。以下に主な結果を記す。

(1) 要素試験について

① RP 向け溶接施工条件の選定

RP の溶接厚さは 120 mm で、大型のD型形状(14m×9m)となるため、真空チャンバーが必要となるEB溶接ではなく、レーザービーム(LB)溶接と狭開先TIG溶接との組み合わせ工法を採用した。30kWファイバーレーザー(汎用では世界最大級の出力)を用いたLB溶接の適用範囲を検証し、50mm厚を両側から溶接することとした。残部は狭開先TIG溶接とし、要素試験にて要求平面度を確保できる見通しを得た。図4に溶接部断面マクロを示す。

② 機械加工条件の選定

溝加工方法の確立を目的として、数種類の工具による切削性及び寿命検証試験を行い、良好な結果を得た工具については粗加工の切削条件向上のため切削性検証試験を行った。

・切削性及び寿命検証試験

検証試験で行った加工を図5に示す。溝加工の工程は大きく4工程に区別されるが、加工の多く(約70%)を占める粗加工の結果を表3に示す。その中で、最も良好な加工性を示した工具は1種類のみであった。

・ 溝粗加工の切削条件向上試験

上記試験にて良好な結果を示した工具の切削性向上を目指し試験を実施した。その結果、1分間あたりの切削量を 1.35 倍向上させることができ、工具寿命も 40 分以上となり、安定して加工できる目処を得ることができた(図6)。

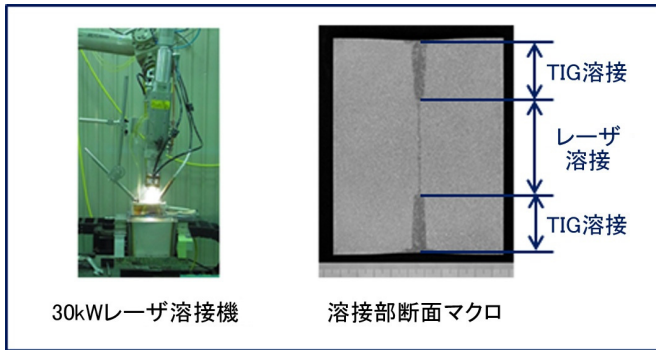


図4 RP用溶接の要素試験

表3 粗加工工具の選定結果

試験 No.	工具 メーカー	使用工具	安定性	切粉排出量 [cc/min]	工具寿命 [min]	総合 評価
1	A社	φ40 ショルダーカッタ	○安定	61.2	20 以上	◎
2	B社	φ25 プランジカッタ	○安定	36.0	13	×
3	C社	φ25 高送りカッター-1	○安定	24.7	20	△
4	C社	φ30 高送りカッター-2	○安定	50.0	25	△
5	D社	φ42 高送りカッタ	×欠損	81.4	4	×



図5 RP溝加工の要素試験

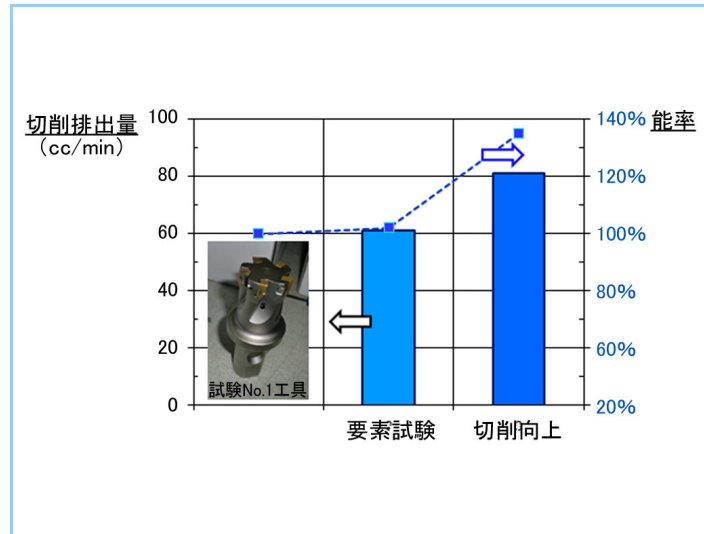


図6 切削向上試験の結果(試験 No.1 工具)

(2) 小規模試験体によるプロセス確認試験について

RP セグメントの機械加工試作に関する結果を以下に記す。

本試験では、異なる2条件の異形鍛造によって製作された材料を最終断面形状まで機械加工を実施し、機械加工特性について確認を行うとともに、変形抑制のためのプロセスを検討した。以下に主な結果を記す。

- ・ φ40 のプランジ加工により、安定した加工を行うことができた。また、さらなる工具の長寿命化を図る基礎データを取得することができた。
- ・ 平面度は試験#1 で 0.39 mm、試験#2 で 0.14 mmとなり、1 mmの公差内に収めることができた。

実機への適用に向けて、改善点等も抽出することができ、高精度加工プロセスのデータベースを整えることができた。

(3) 実規模試験について

実機 RP の製作性を検証するため、実規模 D 型形状の sRP (s はサイドの略) の試作を行い、製作プロセスの検証を行った。

図7に示すように、AU 側は4セグメント、BU 側は6セグメントからなる。加工中の変形程度を確認しつつ、各セグメントの加工を行った。

各セグメント間は、TIG 溶接と LB 溶接により接合し、最終加工前までに4つのセクターとする。最終加工は、図8(a)に示す専用機械により、熱処理された巻線の周長を確認後、施工した。実規模 D 型形状 sRP の最終平面度は 0.95mm となり、要求公差である 1mm を満足するものであった。周長についても、要求公差 $\pm 0.01\%$ 以下であった。したがって、ここで採用した加工プロセスの妥当性を検証することができた。

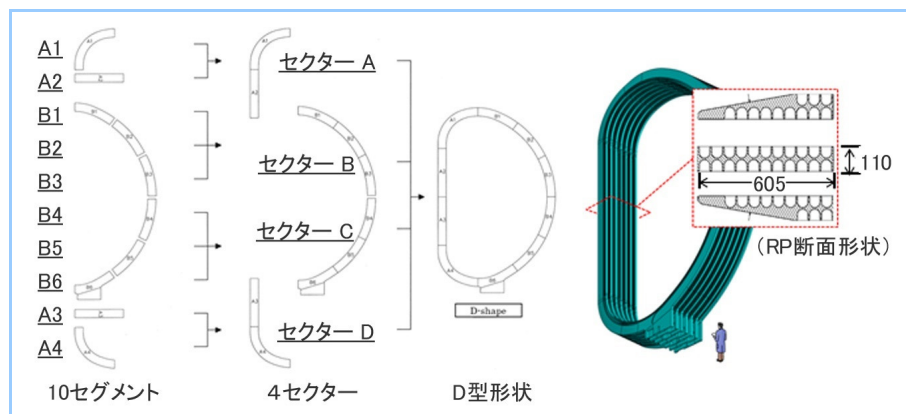


図7 RP のセグメント概念 (提供:(独)日本原子力研究開発機構)

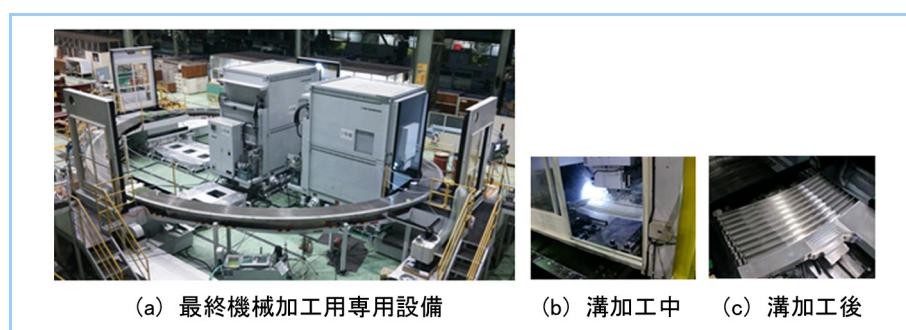


図8 sRP の最終機械加工

5. 実機への取組み状況

2012年8月に TF コイル1基目の契約を結び、合計して5基の TF コイルを受注した。溶接施工法の取得、各種モックアップ試作による施工プロセスの検証を行いつつ、2013年10月にラジアルプレート(RP)、2014年4月に TF コイル構造物(TFCS)の実機製作に着手した。

TF コイルの製作では、巻線部の製作は三菱電機(株)に担当頂き、当社は TF コイル巻線部を収納する構造物(TFCS)、導体を収納する RP、導体の熱処理、カバープレート(CP)の溶接、及び最終組立を担当する。なお、構造物の一部(BU 及び BP)は、韓国の現代重工業(株)にて製作している。

当社の神戸造船所の本工場及び二見工場にて、TF コイル製作に必要となる設備を製造、設置し、実機の製作を進めている。本工場では、RP の製作用の各種専用設備(LB 溶接機、自動 TIG 溶接機、RP の最終形状加工機)を備えた。二見工場では、既存の溶接装置、工作機械に加え、コイルの巻線装置、導体の熱処理炉、導体トランスファー装置、CP 溶接用ロボット、電気絶縁用テープ巻線機、含浸装置等を備え、実機製作に運用を開始している。図9に、設備の一例として、当社製作の熱処理炉及び三菱電機(株)製作の巻線装置を示す。

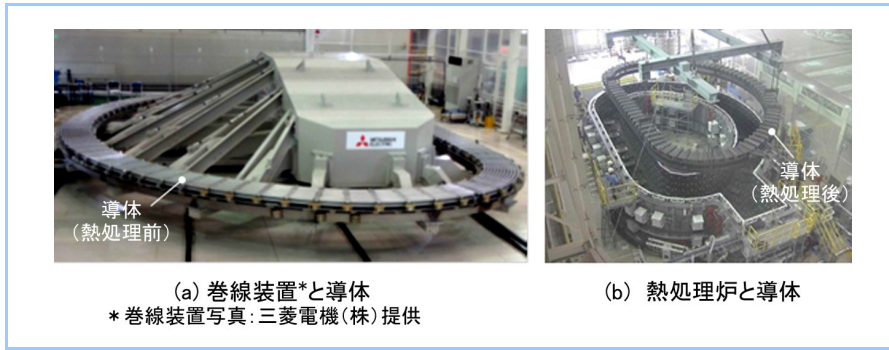


図9 TF コイル用専用設備の一例

TFCSについては、モックアップ試験が終了しその結果を反映し、A1, A2及びA3セグメントの実機製作を進めている。

RPは350セグメント(5基×7枚×10セグメント)のうち2基分相当の140セグメントの製作が完了し、140セクター(5基×7枚×4セクター)のうち10%程度の製作が完了もしくは加工中で、順調に進捗している。図10にTFCS及びRP等の製作状況を示す。

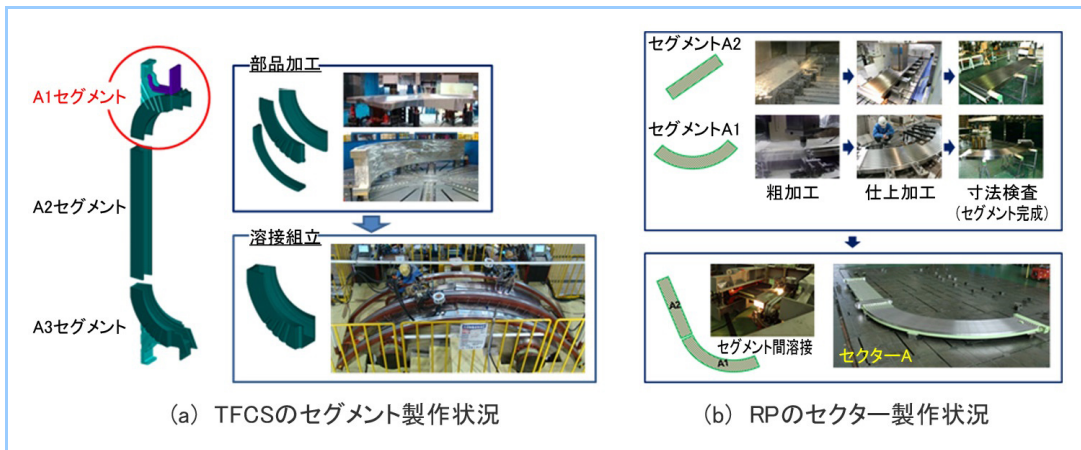


図10 実機の製作状況

6. その他:ダイバータへの取組み

核融合炉におけるダイバータは、核融合反応で生じたヘリウム灰、燃え残りの燃料、その他不純物を除去する機能を有し、プラズマを安定に閉じ込めるための重要な機器となる。さらに、ダイバータのプラズマ対向面では数十 MW/m²の高熱負荷に耐える必要がある。

図11の概念図を示すように、ダイバータの調達は日本、欧州、ロシアが担当し、日本は外側ターゲット(OVT:Outer Vertical Target)を分担する。

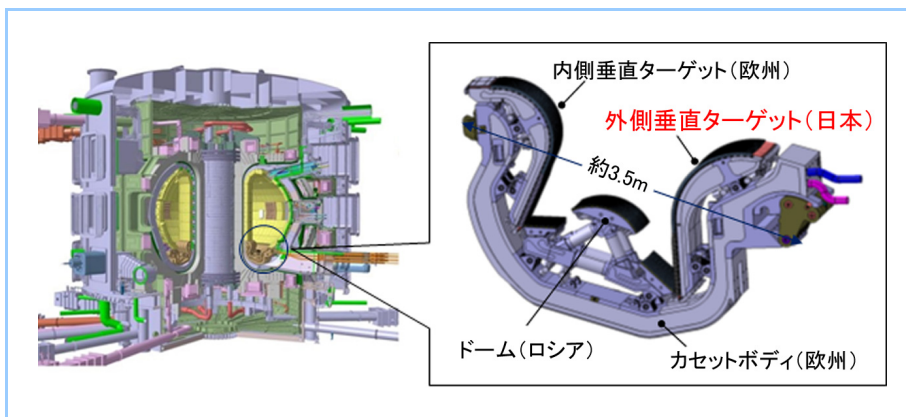


図11 ITER ダイバータの構造概念 (提供:(独)日本原子力研究開発機構)

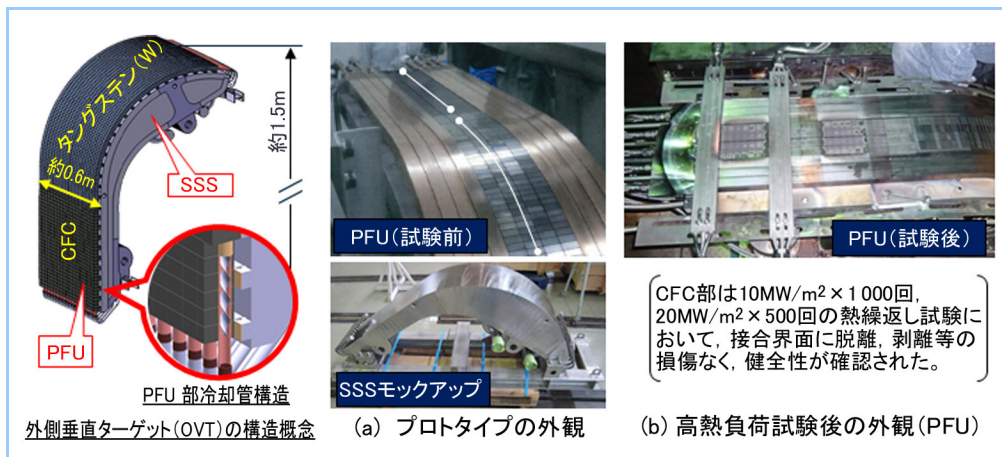


図 12 外側ダイバータのプロトタイプの試作及び試験 (提供:(独)日本原子力研究開発機構)

当社は ITER 向けダイバータの OVT プロトタイプ製作に参画し、高熱負荷受熱部であるプラズマ対向ユニット(PFU: Plasma Facing Unit)及びそれを支持する鋼製支持構造体(SSS: Steel Support Structure)のモックアップを試作し製作性の確認を行った。図 12(a)に、モックアップの外観を示す。PFU 部は、ロシアのエフレモフ研究所にある高熱負荷試験装置で熱的な耐久性試験が行われ、ITER における熱負荷の要求条件を満足する成果が得られた。耐久性試験後の外観を図 12(b)に示す。

PFU の高熱負荷部位には炭素繊維複合材(CFC)を採用していたが、プラズマ照射時に発生する不純物の評価が見直され、CFC をタングステン(W)に置き換えるという設計変更があり、現在、W-PFU のモックアップを製作している。

7. まとめ

ITER 向け TF コイルは世界最大級の超伝導コイルで、要求精度も高く、製作するのは非常にチャレンジングであるが、要素試験、検証試験を行うことで製作の基盤技術を確立し、実機製作を着実に進めている。

ITER で重要機器となるダイバータにも取り組んでおり、その玉成に向けて(独)日本原子力開発機構と連携し、製造技術の確立を図っている。

参考文献

- (1) 日本原子力研究開発機構: <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/index.php>
- (2) 西村 新, 中嶋秀夫, “核融合炉用超伝導マグネット構造の構造材料規格の開発”, 日本機械学会, 日本機械学会論文集(A編)78 巻 790 号(2012-6), 8004-807
- (3) 濱田一弥, “小特集磁場閉じ込め核融合炉に向けた超伝導マグネット材料工学 2. 極低温構造材料”, プラズマ・核融合学会, Vol.83, No.1, P33-38, 2007