



## プロジェクトレビュー ITER 計画の機器開発・製作の進展

### 7. ITER ダイバータ・ターゲットの開発

#### 7. Development of ITER Divertor Target

江里幸一郎, 鈴木 哲, 関 洋治  
EZATO Koichiro, SUZUKI Satoshi and SEKI Yohji

\* 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(原稿受付：2015年12月28日)

日本原子力研究開発機構（原子力機構）は ITER（国際熱核融合実験炉）計画実施の国内機関（JADA）として、国内メーカーと協力し、2012年から ITER 用タングステン（W）・ダイバータの製作技術開発に着手した。開発プログラムの第二段階として、2014年にダイバータ受熱部であるプラズマ対向ユニット（PFU）の実機長プロトタイプを製作し、試験した。本プロトタイプ製作を通じて PFU 製作性並びに超音波探傷といった非破壊検査による検査手法の適用性を実証した。PFU プロトタイプの寸法計測により、PFU への寸法要求が組み立てとギャップ制御の改善により達成可能な見通しを得た。製作した PFU プロトタイプは、ITER 機構（IO）立会のもとロシア・エフレモフ研究所において高熱負荷繰返し試験を実施し、ダイバータ中最も高い熱負荷に曝されるターゲット部において熱負荷要求条件  $20 \text{ MW/m}^2 \cdot 10 \text{ 秒}$  での設計サイクルの 3 倍以上に相当する 1000 サイクルに耐えることを実証した。

#### Keywords:

ITER, Divertor, Plasma-Facing Unit, Tungsten

#### 7.1 はじめに

ITER（国際熱核融合実験炉）ダイバータ（図 1）は ITER 計画参加 7 極のうち、日本、欧州（EU）、ロシアの 3 極が機器（外側、内側ターゲット、ドーム（リフレクタープレートを含む））を各々分担して製作し、製作した機器を EU がカセットボディに組み込み、ITER 真空容器内に装荷する計画となっている [1]。ITER ダイバータは真空容器下部に設置される。内側及び外側ターゲットは炉内機器の中で唯一磁場と交差するため、定常運転時の熱負荷として最大  $20 \text{ MW/m}^2$  に 10 秒間耐えることが要求されている。この高い熱負荷を除去するため、ターゲットは高速の冷却水（4 MPa,  $70^\circ\text{C}$ ,  $\sim 10 \text{ m/s}$ ）を銅合金（CuCrZr）製冷却管に流す強制冷却機器である。プラズマからの粒子負荷及びディスラプションや Edge Localized Mode (ELM) といった過渡的熱負荷による各種損傷（表面損傷や溶融）を防ぐため、銅合金製冷却管はブロック状の表面保護材（炭素系複合材料やタングステン製で、モノブロックと呼ばれる）に冶金的に接合されている。ITER ダイバータ外側ターゲット（Outer Vertical Target, OVT）では、約 2 m の冷却管に 140-150 個のモノブロックを接合する必要がある。ダイバータカセット 1 基あたり、22 流路（このポロイダル方向の各冷却要素をプラズマ対向ユニット（Plasma-Facing Unit, PFU）という）が設置される。ITER ダイバータは 58 カセットが真空容器内に装荷されるため、OVT 全体では予備も含めて約 20 万個のモノブロックを冷却管に接合する

\* 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

必要があり、ITER ダイバータ製作上最も困難な挑戦の一つである。

これまで原子力機構は、PFU 下部領域の表面保護材料候補であった炭素系複合材料（Carbon-fiber composite, CFC）を用いた強制冷却型ダイバータの開発を進め、国内実施機関（JADA）として、2009年に外側ターゲット調達

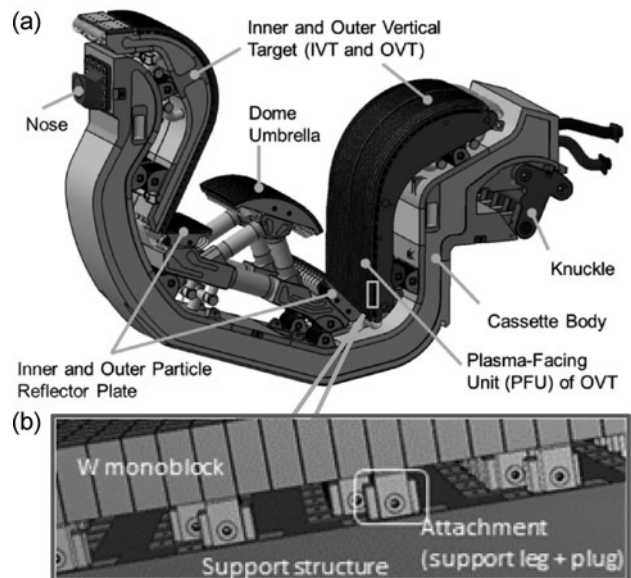


図 1 (a) ITER タングステンダイバータの概要及び (b) 支持構造体への W モノブロック固定構造。

Corresponding author's e-mail address: ezato.koichiro@qst.go.jp

契約をIOと結び、実機長プロトタイプ製作に着手した[1]。しかしながら、ITER計画の見直しの一環として、2011年、ITER機構(IO)は科学技術諮問委員会(STAC)および運営諮問委員会(MAC)において、これまでのターゲット部の表面保護材料として炭素繊維複合材料とタングステン(W)を用いた設計に変更し、ITER初期運転から、すべての表面保護材料をWとするフルWダイバータ・ターゲットの使用を提案した。ITER理事会(IC)は2年間のフルWターゲットに関する研究開発を了承し、2013年中にダイバータ表面(アーマ)材料の最終選定を行う事を決定した。これを受けて、JADAとIOはR&Dタスク契約(フルWターゲットの認証プログラム)を結び、JADAは日本産業界との協力のもと、ITERダイバータ用フルWターゲットの開発に着手した[1,2]。7.2で述べる小型試験体の結果及びIOによる設計・検討結果を合わせた最終設計レビュー会合が2013年6月に行われた。欧州製Wモノブロックに巨視的な割れが頻発していたことから、別途W材料特性を詳細に調べるR&Dプログラム[3]を立ち上げることを条件にWダイバータの設計が了承され、2013年11月にICはITER初期運転からダイバータにおけるすべての表面保護材料をWとする決定を行った[4]。本章は、本認証プログラム概要および実機長プロトタイプ製作および加熱試験の結果を報告する。

## 7.2 Wダイバータ認証プログラム[5,6]

本認証プログラムは2012年初めにIOが計画し、以下の2段階で構成される。

(1) 要素技術開発及び確証：本段階では小型試験体を用いたフルWダイバータ用PFUのWモノブロックと冷却管の接合技術開発とその加熱試験による確認及びWモノブロックのOVT支持構造体への接続部の荷重試験を実施した[2]。

JADAは、Wモノブロック5個がCuCrZr製冷却管に接合された小型試験体を6体製作した。これらの試験体に対し、ロシア・エフレモフ研究所(RFDA)に設置された電子ビーム加熱装置(ITER Divertor Test Facility, IDTF)[7]において、IO主導・立会のもと繰り返し高熱負荷試験が実施された。その結果、JADAが製作した6体の試験体の全てのWブロック及びそれらの接合部が $10\text{ MW/m}^2 \cdot 10\text{秒} \cdot 5000\text{サイクル}$ かつ $20\text{ MW/m}^2 \cdot 10\text{秒} \cdot 1000\text{サイクル}$ の熱負荷に耐えることが実証された[2,5,6]。この結果はICによるダイバータ表面材料決定の一役を担い、JADAは認証プログラムの第二段階に進み、2014年よりPFU実機長プロトタイプの製作に着手した。

(2) 実機長プロトタイプの製作及びその高熱負荷試験による技術実証：本認証プログラムの中で最も厳しい要求は、設計熱負荷に対する熱・機械疲労性能をプラズマ対向ユニット(PFU)実規模プロトタイプにより実証することである。実証目標は加熱条件を10秒加熱・10秒冷却として、設計熱負荷である $10\text{ MW/m}^2$ に対して5000サイクル及び $20\text{ MW/m}^2$ に対して300サイクルに耐えることである。JADAは国内メーカーと協力してPFUプロトタイプを製作

し、IO立ち会いの下RFDAが高熱負荷試験を2015年秋に実施した。

## 7.3 実規模プロトタイプによる実証

### 7.3.1 実機長PFUプロトタイプの製作

JADAは実規模PFUプロトタイプ7本を異なる国内メーカー2社(PFU製作社)と協力して製作した。このうち、6本はIOの品質保証管理下において製作し、残り1本を予備として製作した。この実規模PFUプロトタイプは、図2に示すように最も高い熱負荷を受けるターゲット部(直線部)に56枚、バッフル部(湾曲部)に90枚、合計146枚のWモノブロックが銅合金(CuCrZr)製冷却管に冶金的に接合されている。これらのWモノブロックはJADAの管理の下、IO材料仕様[1,3]に従って製造された圧延W板から製作され、W製造メーカーによりWモノブロックとCuCrZr冷却管接合に必須の無酸素銅(Cu)緩衝層(肉厚1.3mm)を接合されたものをPFU製作社に支給したものである。

ターゲット部のWモノブロックの寸法は、幅27.8mm、高さ28mm、軸方向厚さ12mmであり、冷却管頂上からWブロック表面までの肉厚は7.7mmである。バッフル部寸法は幅のみが0.5mm刻みで27.8mmから31.5mmまで段階的に増加する。本PFUプロトタイプにおけるWモノブロック表面は、熱負荷試験を主眼とするため、リーディング・エッジでのWブロック端部の溶融を防ぐのに必要とされる、角の面取りやトロイダル方向の傾斜は再現されていない。

WモノブロックとCu緩衝層の接合技術はW製作メーカーにより異なるが、これまで共同で直接鋳造法、高温等方加圧(HIP)法および単軸拡散接合法を開発してきた[1,2]。これまでの試験結果では、前2者の接合方法がITER要求を満足できる見通しを得ている。単軸拡散接合法に関しては、より接合強度を高めるよう開発を続行している。これらのW/Cu接合部はW製作メーカーにより超音波探傷を行い、欠陥のないものをPFUプロトタイプへの組み立て・接合に使用した。CuCrZr冷却管は外形15mm、内径12mmであり、内表面の平滑度は $Ra < 1.6\mu\text{m}$ である。

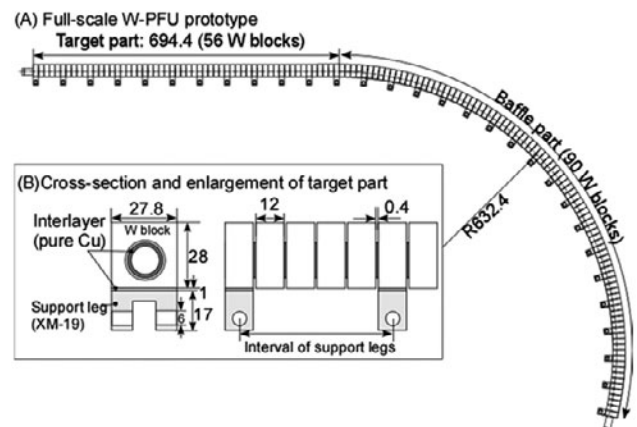


図2 実規模長フル・タングステン・プラズマ対向ユニット・プロトタイプの概要。

CuCrZr は析出強化型銅合金であるため、その機械的特性は熱処理に大きく依存する。そのため、ITER 用 PFU 冷却管に使用する CuCrZr 管は W モノブロック接合後において機械強度および結晶粒径に関する IO 仕様[1]を満たすように銅合金メーカーと共同で開発したものである。

PFU の組立・接合工程の概略は以下のようなものである。

1. CuCrZr 管の両端にステンレス製支持構造体に接続するためのステンレス配管を溶接する。ただし、CuCrZr はステンレス系材料との直接溶接が難しいため、Ni 基合金（ここでは Alloy 625）を介して溶接する。溶接部は放射線探傷検査（RT）や浸透探傷検査（PT）の非破壊検査を行い、溶接品質を確保する。
2. 全146個中30個の W モノブロックに特殊ステンレス XM-19[1]製ブロックを、Cu 緩衝層を介して HIP やロウ付けにより接合する。接合部に対して超音波探傷検査（UT）を行う。検査に合格した XM-19製ブロック部は図 1、図 2 に示すような支持脚最終形状に加工される。
3. W モノブロックに予め接合されている Cu 緩衝層内部にロウ材と CuCrZr 冷却管を挿入する。ロウ材は、中性子により蒸気圧の高い元素に核変換されることを防ぐため、銀・金を用いない Ni-Cu-Mn 合金系箔を使用する。W モノブロック間のギャップはスペーサを挿入することにより管理する。W モノブロックの管軸方向厚さは公差内のバラツキがあるため、ギャップはスペーサ厚みを変えて調整する必要がある。ロウ付け熱処理後のギャップ測定結果は7.3.2.3で紹介する。
4. バッフル部に相当する W モノブロック90枚に挿入されている CuCrZr 冷却管を、専用ジグを用いて所定の曲率になるよう曲げる。
5. 組み上げた PFU プロトタイプを真空炉で熱処理する。熱処理は CuCrZr の溶体化温度にあわせてロウ付け温度980℃に保持した後、ガス冷却する。さらに CuCrZr の時効処理温度480℃で再加熱・保持した後、ゆっくりと冷却する。ガス冷却速度は約 1℃/s を目指し、W/Cu/CuCrZr の健全な接合と CuCrZr 管の強度回復を両立させている。熱処理の際、CuCrZr 管のサンプルを同時に熱処理し、製作熱処理後の CuCrZr 管の強度を確認する。今回の PFU プロトタイプ製作後に測定した、CuCrZr 管の機械特性を次節で紹介する。
6. 熱処理後の W/Cu, Cu/CuCrZr の全接合部に対し

て、UT を実施する。その結果を7.3.2.2で紹介する。

その他、耐水圧試験（圧力7.15 MPa）や真空リーク試験（許容リーク率： $1 \times 10^{-10}$  Pa/m<sup>3</sup>/s）を実施する。その後、除熱性能を高めるため、ねじりテープ（Cu 製）を冷却管に挿入し、固定する。

今回の PFU プロトタイプの製作では7本のプロトタイプを製作し、W モノブロックと Cu 緩衝層の接合法として、単軸拡散接合と HIP を採用している。表 1 に示す試作したプロトタイプの U013, U014 及び U017 は前者の接合方法を、U015, U016, U018 及び U019 は後者の接合方法を使用した。

### 7.3.2 熱処理後の PFU プロトタイプ試験検査結果

#### 7.3.2.1 熱処理後の CuCrZr 管の機械強度

前述のように CuCrZr は析出硬化型銅合金の一種であるため、その機械特性は熱処理状況（保持温度・時間・冷却速度）に影響を受ける。そのため、接合熱処理後の CuCrZr の機械特性が IO 要求値を満たしているか、確認する必要がある。表 1 は PFU プロトタイプのロウ付け・時効処理と一緒に熱処理された CuCrZr 管の室温と250℃における機械特性の計測結果を示す。左のカラムは PFU プロトタイプの識別番号を示しており、U013~U016とU017~U019は別々の PFU 製作社で製作されたものである。U014とU015, U018とU019の組はそれぞれ、同じ熱処理バッチでロウ付けされたものである。U013とU016を製作した際に熱処理した試験片において、0.2% 耐力が若干 IO 要求値を下回っている他は、引張強度、伸びともに IO 要求値を満たしている。この0.2% 耐力の要求値は、ロウ付け温度保持からの冷却速度が速い U016 及び U018/U019 の熱処理バッチで満足できているため、今後の熱処理では冷却速度を増加させる予定である。

#### 7.3.2.2 接合部の超音波探傷試験(UT)

W/Cu/CuCrZr の接合部は、冷却管内を水で満たし、UT プローブを管内部で挿引・回転させてこれら2箇所の接合面を同時に試験する。UT プローブの検査能力は各接合面において直径2mmの人工欠陥（機械加工した平底穴）を有する較正用サンプルを用いて、検証している。図 3 (a) は試験の一例として、接合欠陥を有する PFU プロトタイプ (U013) における UT 結果（接合部の超音波反射波強度を二次元で示した C スキャンマップ）を示す。図では周方向角度を縦軸（受熱面を180度縦軸中心）、管軸方向位置を横軸にそれぞれ取り、各接合面における反射波強度（欠陥があ

表 1 ロウ付け熱処理後の CuCrZr 管の機械試験結果（表中 Hv はビッカース硬さを表す）。

プロトタイプ番号	Hv300 g	室温			250℃		
		引張強度 [MPa]	0.2% 耐力 [MPa]	伸び[%]	引張強度 [MPa]	0.2% 耐力 [MPa]	伸び[%]
IO 要求値	—	280	175	15	220	150	14
U013	102	325	166	31	242	145	28
U014, U015	123	345	183	31	252	151	30
U016	112	326	167	33	238	140	28
U017	104	380	226	28	282	188	26
U018, U019	106	377	220	28	279	183	25

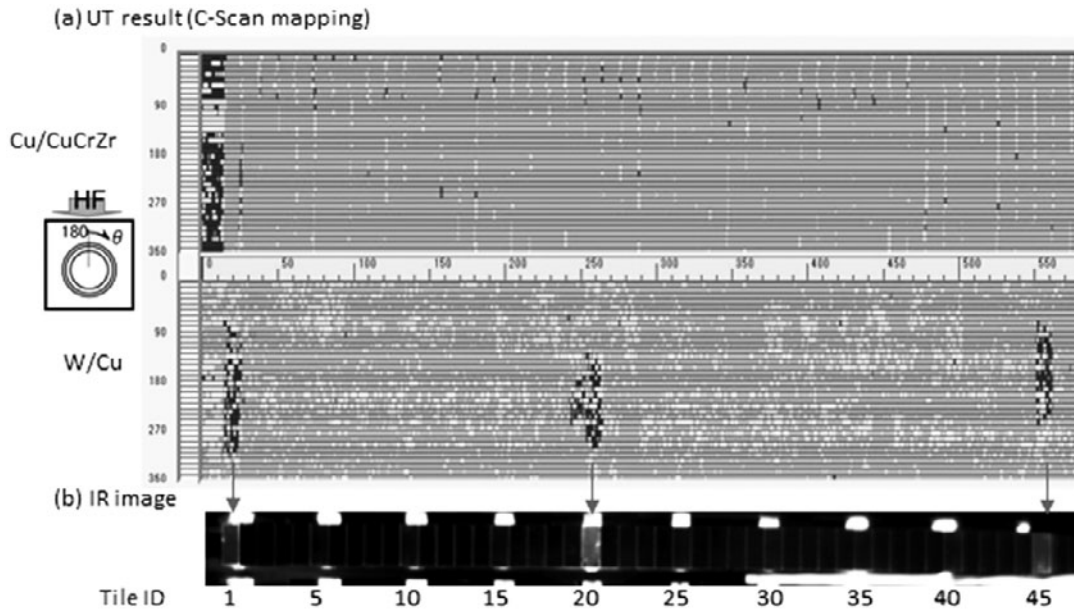


図3 PFU プロトタイプ U0013 のターゲット部 (直線部) に対する UT 結果 (a) と赤外サーモグラフィ (b) の比較.

る箇所では他の接合箇所と比較して反射波が強くなる) を表示している. 図では3段階に色分けし, 黒色部は接合欠陥が存在している箇所を示している. 図3 (a) の結果では, ターゲット (直線) 部のタイル番号 1, 20, 45 のタイルにおいて受熱面側に W・Cu 接合面に欠陥が検知されている.

この UT 結果を除熱の観点から検証するため, 赤外サーモグラフィ試験[8]を実施した結果を図3 (b) に示す. 本試験では, PFU プロトタイプ冷却管内に温水 (95℃) を通水することにより, W モノブロックを加熱し, その表面温度が温水温度となったところで, 冷水 (5℃) を急に通水した際の W モノブロック温度変化を赤外カメラで計測し, その挙動から欠陥の有無を推定する方法である. 除熱性能に影響を及ぼす接合欠陥がある場合, 冷却速度が相対的に遅くなるため, その W モノブロックは赤外カメラで検知できる. 図3 (b) は冷却開始3秒後の PFU プロトタイプ受熱面の赤外熱画像を示す. UT で欠陥有りと示された W タイル 1, 20, 45 は他のタイルより高温のタイル (周囲より色の薄いタイル) として検知されている. 両者は良い一致を示しており, 管内プローブによる UT が W モノブロック形状に対して, 信頼しうる欠陥検知能力を有することを確認することができた. 同様の比較は, バッフル (湾曲) 部に対しても既に行い, 同様の結果を得ている.

W/Cu 接合界面は W 製作メーカーにおいて, W/Cu 接合後に実施された UT を合格したものであるから, これらの欠陥発生は, 冷却管への接合時, すなわち溶体化処理を兼ねたロウ付け熱処理及び時効熱処理を経て強度が回復した CuCrZr の収縮に W/Cu の接合強度が耐えられなかったものと考えられる. 現在, この欠陥が生じた W/Cu 接合方法 (前述の単軸拡散接合) の改善に W 製作メーカーと取り組んでいる. 一方, W/Cu 接合に直接鋳造法を用いた W モノブロックを接合した PFU プロトタイプ 4 本では, 584 枚 (146 ブロック/PFU×4 本) において, W/Cu, Cu/CuCrZr の全接合面において UT および赤外サーモグラフィによ

る欠陥の検出は無く, 検査は全数合格であった.

### 7.3.2.3 PFU プロトタイプの寸法計測結果

完成後の PFU プロトタイプに対して, 2 種類の寸法検査を行った. 一つはノギスやメジャーを使った PFU 単体の長さ, 曲率, 並びに W モノブロック間ギャップ及び支持脚間距離を計測したもの, もう一つは ITER ダイバータ支持構造体の表面形状を模擬した高熱負荷試験用支持架台に, 製作した PFU プロトタイプを設置し, W モノブロックの表面輪郭度に対して光学式 3 次元計測を行ったものである. PFU プロトタイプは実機と同じ寸法/形状の加工が施された溝付き支持脚を有し, 試験架台の表面に設置された凸部 (プラグ) に嵌め合わせ, 貫通開口部にアルミナ青銅製のピンで機械締結される. これらの溝幅, プラグ幅, 貫通開口部の直径, ピン外径の加工公差は厳しく管理するものの, 実際に製作して組み合わせられるか, さらに W モノブロックの表面輪郭度要求 (全ての W モノブロック表面位置が  $\pm 0.3$  mm の範囲に収まること) を満たせるかを確認することも本 PFU プロトタイプ製作の大きな目的の一つである.

図4 (a) から図4 (f) は PFU プロトタイプ単体の寸法測定結果, すなわちターゲット (直線) 部長さ (設計値: 694.4 mm), バッフル (湾曲) 部曲率 (同: 632.4 mm), W モノブロック間ギャップ (同: 0.4 mm (ターゲット部) および 1.1 mm (バッフル部), 支持脚ピン挿入用孔中心距離 (同: 61.4 mm (ターゲット部)) をまとめたものである. PFU プロトタイプのターゲット部長さは設計値と比較してプラス 1.8 mm, マイナス 2.9 mm の範囲内に分布しており, 設計値との誤差は 0.5% 未満である. バッフル部曲率は 2 グループ (U013~U016, U017~U019) に分かれている. これらの違いは PFU 製作社におけるバッフル部曲げ工法やギャップ管理の違いに起因するものである. それぞれのグループにおいて, 曲げ加工および熱処理後, 設計曲率に対して数 mm の範囲内でほぼ一定であることから, PFU

のバッフル部曲率を設計値に更に近づけることは十分に可能であると考えられる。同様のことは、Wモノブロック間ギャップや支持脚ピン挿入孔位置間隔の計測結果についても言える。実機シリーズ製作の際、PFU組立・接合工程に関して改善の余地は残されているものの、上述したようなPFU形状の寸法管理は十分に達成可能である。

図5は6本のPFUプロトタイプを熱負荷試験用試験架台に載せたもの（テストアセンブリという）の外観とその状態でのWモノブロック表面輪郭度、特に最も高い熱負荷を受けるターゲット部に対する表面輪郭度の計測結果を示したものである。PFUプロトタイプの熱負荷試験は電子ビームで行うことから、架台の過熱を防ぐため、テストアセンブリには銅製ダミーユニットをPFUプロトタイプの両脇に2本ずつ載せている。3次元計測の基準点は試

験架台側壁の加工した孔とし、計測結果はCADモデルと比較して表示した。図中の濃淡分布は実物の表面位置とCADデータと比較した結果、具体的には、プラス側がCADデータより凸となっている箇所、マイナス側は凹となっている箇所を示す。図5右側は、PFUプロトタイプのターゲット部の拡大を示している。ターゲット部においてほとんどのWモノブロック表面はCADデータと比較してプラス側0.25mmの範囲内に入っている。また、バッフル部では、図5中央に示されているように、Wモノブロック表面はCADデータより下側に位置している。これは、試験架台の製作途中に変形が生じたためであり、プロトタイプ本体の変形によるものではない。今回製作したPFUプロトタイプの3次元計測結果から、ITERダイバータ外側ターゲットにおけるWモノブロックの表面輪郭度に対するIO

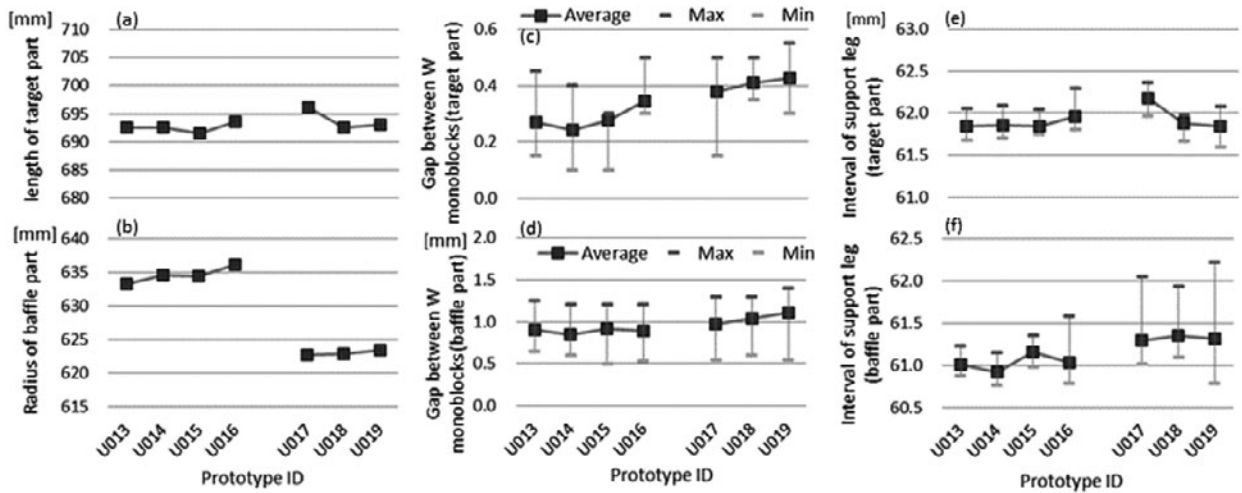


図4 PFUプロトタイプの寸法計測結果 (a)ターゲット（直線）部の長さ、(b)バッフル（湾曲）部の曲率、(c)ターゲット部のWモノブロック間ギャップ、(d)バッフル部のWモノブロック間ギャップ、(e)ターゲット部の支持脚間隔および(f)バッフル部の支持脚間隔。

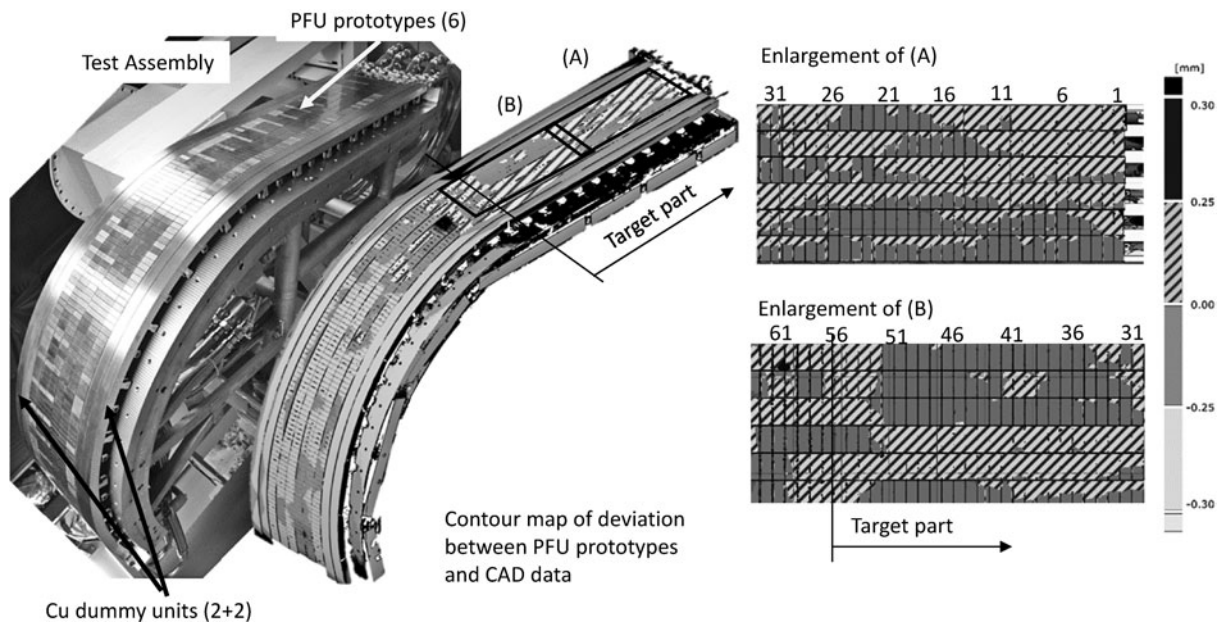


図5 高熱負荷試験用テストアセンブリとテストアセンブリ状態におけるPFUプロトタイプ表面の三次元測定結果。三次元計測結果はCADデータからのPFUプロトタイプ表面の変位を示している。



要求値達成は実現できる見通しを得た。

#### 7.4 PFU プロトタイプの高熱負荷試験

PFU プロトタイプは上記の計測の後、小型試験体と同様 RFDA の IDTF に送付され、IO 立会のもと繰り返し加熱試験を行った。本試験は調達各極の技術能力を確認する為のものであり、試験実施は各機器製作担当極ではなく、IO とロシア側試験担当者による製作側から独立した認証試験である。冷却条件は ITER ダイバータと同じ  $4 \text{ MPa} \cdot 70^\circ\text{C}$  の冷却水を各 PFU に流速約  $10 \text{ m/s}$  で供給する。加熱条件は熱流束  $10 \text{ MW/m}^2$  及び  $20 \text{ MW/m}^2$  (ターゲット部のみ) を10秒間照射、10秒間冷却を繰り返す。熱流束は W モノブロック表面への入射熱流束ではなく、冷却水の温度上昇から算出される吸収熱流束で定義される。合格条件はそれぞれの加熱条件において5000及び300サイクルの試験期間中、W モノブロック表面に巨視的な溶融が発生しないこと、冷却管からの水漏れが無いこと、周囲の正常な W モノブロック表面温度から温度上昇が30%以下であること、加熱試験前後の各ブロック表面温度変化が20%を越えないことである。20  $\text{MW/m}^2$  の条件に対しては JADA の要望により、合格条件の3倍以上である1000サイクルまで試験を継続した。試験装置の都合上、すべての W モノブロックを一度に加熱することができないため、プロトタイプを幾つかの領域に分割し、領域毎に試験が行われた。本試験は2015年11月末に完了し、PFU プロトタイプは日本へ返還されている。

図6にターゲット部の加熱領域と  $20 \text{ MW/m}^2 \cdot 300$  サイクル及び1000サイクル後の W モノブロック表面の様子を示す。W モノブロック/Cu 緩衝層の接合を直接鋳造法で行った PFU プロトタイプ 4 体 (U015, U016, U018 及び U019) の W モノブロック 5 枚  $\times$  PFU4 本 = 20 枚が 1 領域、W モノブロック 6 枚  $\times$  PFU4 本 = 24 枚が 4 領域 (図6 白枠内) の合計116枚すべてが試験合格条件を満たした。

#### 7.5 まとめ

原子力機構は PFU プロトタイプ製作を通して、PFU 製作性並びに超音波探傷といった非破壊検査技術の適合性を実証した。製作した PFU プロトタイプの寸法計測により、PFU への寸法要求が組み立てとギャップ制御の改善により達成可能な見通しを得た。

実機支持構造体を模擬したテストフレームに設置された PFU プロトタイプ外形を光学式 3 次元計測の結果、W モノブロックの表面輪郭度は CAD データからプラス側 (凸方向) に  $0.25 \text{ mm}$  の範囲内に納められていることを確認した。これは W モノブロック端部の溶融防止のため、ITER ダイバータ実機外側ターゲットに課せられている輪郭度の厳密な公差要求  $\pm 0.3 \text{ mm}$  を満たすものである。本プロトタイプは  $10 \text{ MW/m}^2 \cdot 5000$  サイクル、 $20 \text{ MW/m}^2 \cdot 1000$  サイクルの高熱負荷試験において、W モノブロックの接合部の接合劣化に伴う表面温度上昇、W モノブロックの巨視的な割れや溶融、冷却管からの水漏れは発生せず、IO が実施した認証試験に合格した。

これらの結果は JADA および製作メーカの PFU 製作に関する技術的な成熟度が ITER ダイバータ機器の製作に着手可能なレベルに到達していることを示すものである。

#### 参考文献

- [1] 鈴木 哲: プラズマ・核融合学会誌 87, 607 (2011).
- [2] K. Ezato *et al.*, Fus. Eng. Des. 98-99, 1281 (2015).
- [3] T. Hirai *et al.*, J. Nucl. Materials 463, 1248 (2015).
- [4] M. Merola *et al.*, Fusion Eng. Des. 96-97, 34 (2015).
- [5] T. Hirai *et al.*, Fusion Eng. Des. 88, 1798 (2013).
- [6] T. Hirai *et al.*, Phys. Scr. T159, 014006 (2014).
- [7] V. Kuznetsov *et al.*, Fusion Eng. Des. 89, 955 (2014).
- [8] Y. Seki *et al.*, Fus. Eng. Des. 85, 1451 (2010).

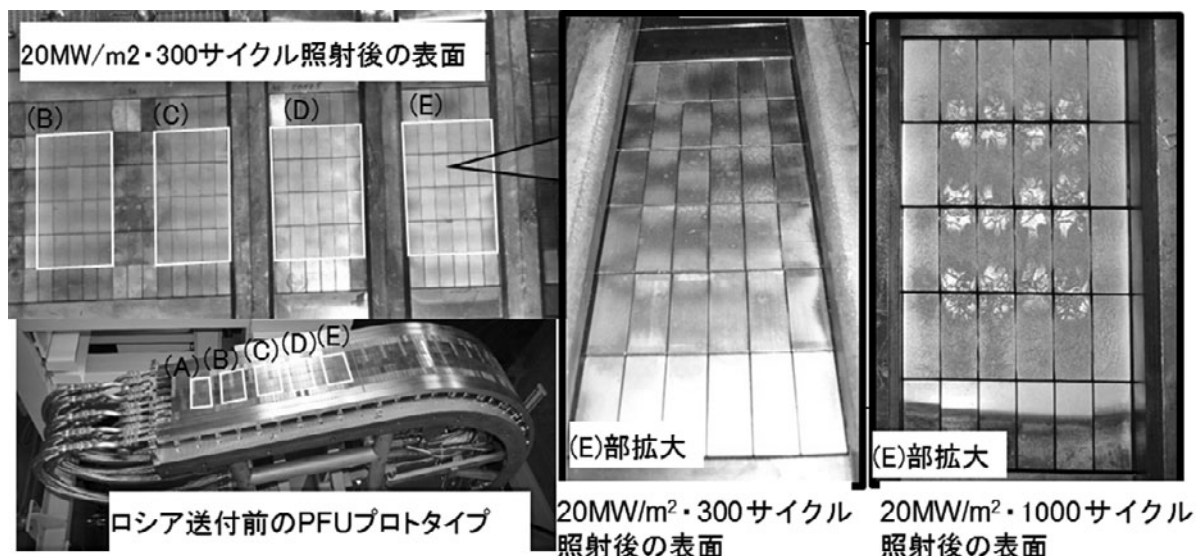


図6 PFU プロトタイプの繰り返し加熱試験領域 (ターゲットに対する  $20 \text{ MW/m}^2$  を照射した領域のみ、白枠内) 及び  $20 \text{ MW/m}^2 \cdot 300$  サイクルおよび1000サイクル照射後の W モノブロック表面の様子。