

ITER/ BA成果報告会 2024
開催日時：2025年1月30日(木)
開催場所：イイノホール

ITER向け 高熱負荷機器 ダイバータへの挑戦 (Challenge to high heat flux component for ITER, -Divertor-)

原子力セグメント
核融合推進室
馬場 貴志

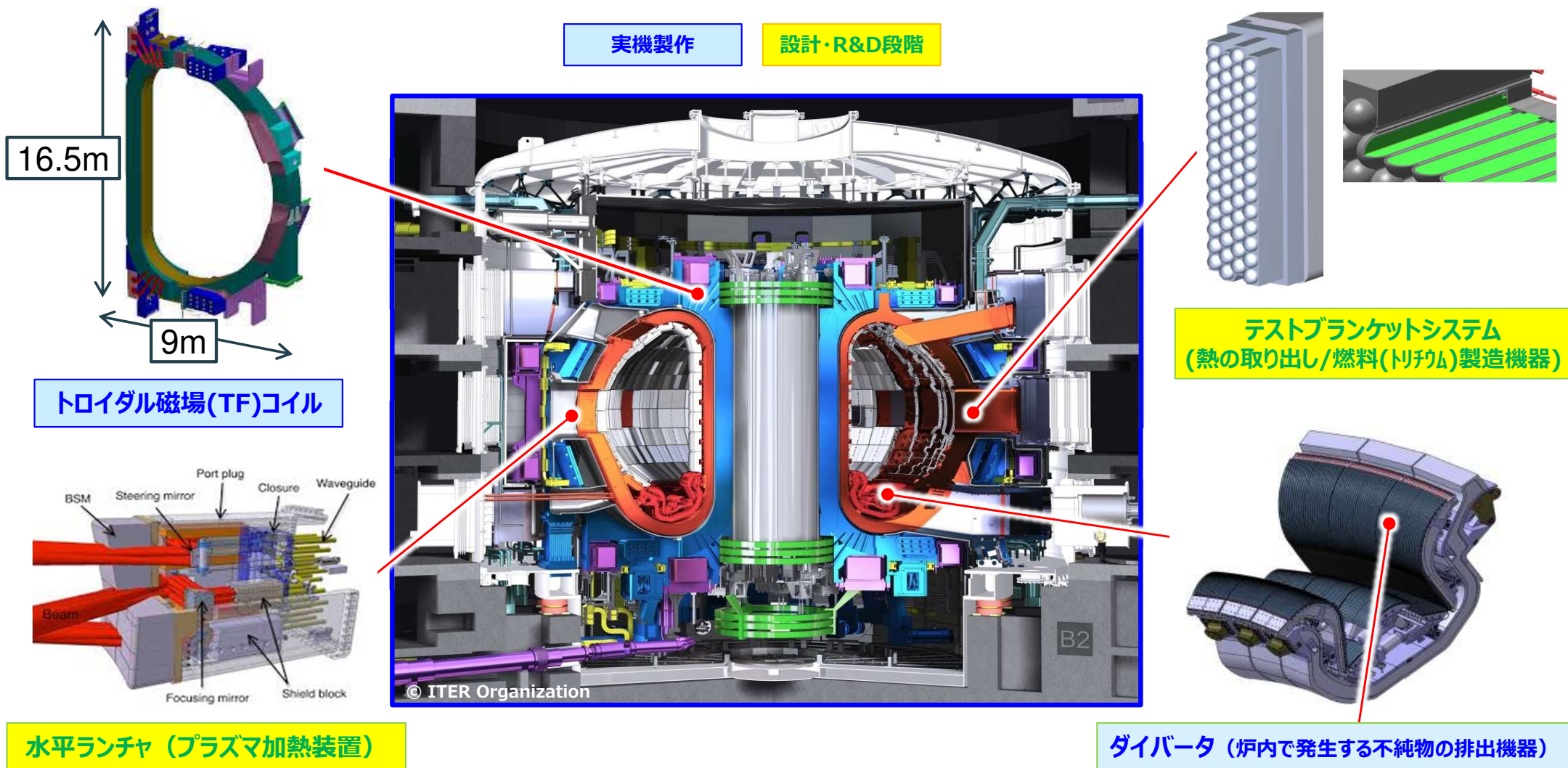
三菱重工業株式会社



- 三菱重工のITER/ BA活動への貢献
(Contributing to ITER project/ BA activity)
- 2023年までの活動内容
(MHI's activities until 2023)
- ITER向け高熱負荷機器ダイバータへの挑戦
(Challenge to high heat flux component for ITER, -Divertor-)
- まとめ
(Summary)

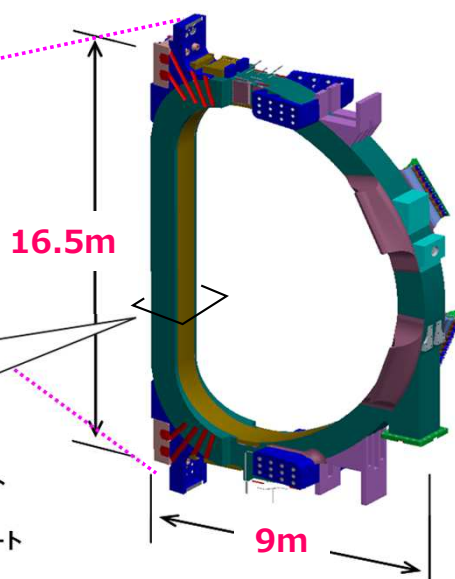
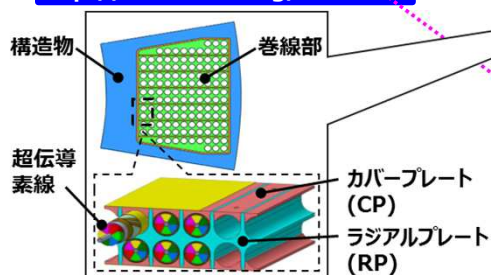
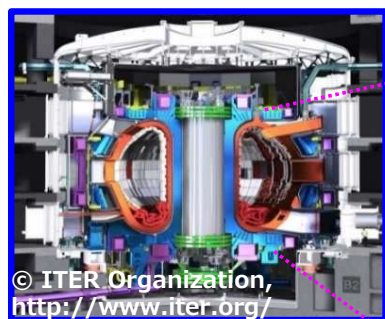
三菱重工のITER/ BA活動への貢献 (*Contributing to ITER project/ BA activity*)

- '80年代から続く核融合開発の中心的プレーヤーとしてITERに参画
- 当社のモノづくり力を活かして、核融合炉の重要機器であるトロイダル磁場(TF)コイルやダイバータ、プラズマ加熱装置、ブランケット等を開発・試作段階から参画し核融合発電の実現に貢献



2023年までの活動内容 (*MHI's activities until 2023*)

- **2012年よりITER向けトロイダル磁場(TF)コイルの製作に着手**。2018年まで、ITER/ BA成果報告会にて部分試作・解析等を用いた製作合理化の検討や、巻線やコイルケース等の実機製作進捗を報告
- **強い電磁場（数万トン）に耐え、プラズマ性能を保つため厚肉構造で高い精度が必要**。また、**高精度のプラズマ閉じ込め磁場形成のため巻線部にも高い精度が必要**
- 全19基(うち1基は予備コイル)のうち、**日本所掌9基**(欧州が10基)のうち**MHIは5基製作**。コイルケースのうち**インボードは全て当社にて製作し、最終組立メーカへ供給**



項目	仕様
形状	高さ16.5m×幅9m
重量	コイルケース : 約210ton/基 巻線 : 約100ton/基
材質	極低温用ステンレス鋼(高窒素含有)
数量	18基 (+ 予備 1 基)

一体化

巻線位置合せ : **0.2mm**
溶接後の最終機械加工
精度 : **平行度0.4mm**

構造物(コイル容器)

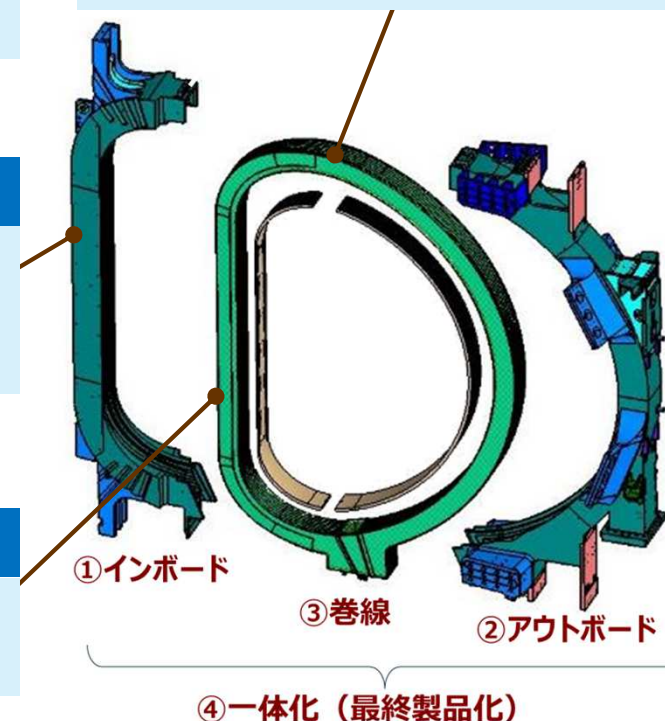
14m×9mの溶接構造物で
輪郭度2mm以内
構造物は全数 日本が調達

ラジアルプレート (RP)

14m×9mの溶接構造物で
平面度 1mm以内

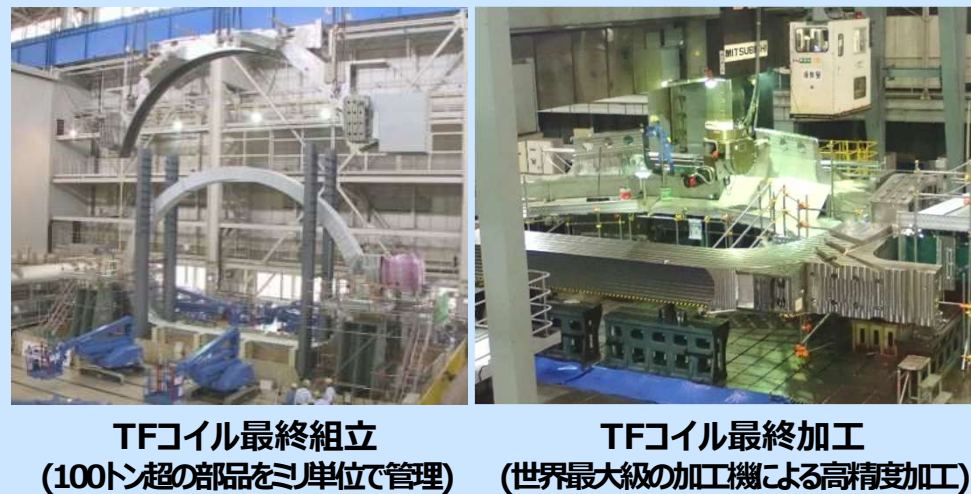
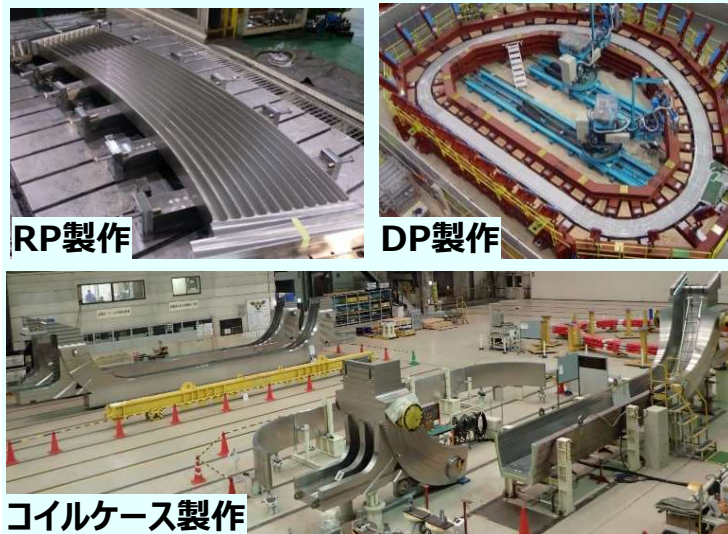
巻線部 (WP)

周長約30mに対する**許容値 : 8mm**
曲率に合わせ**262種類のカバープレート**

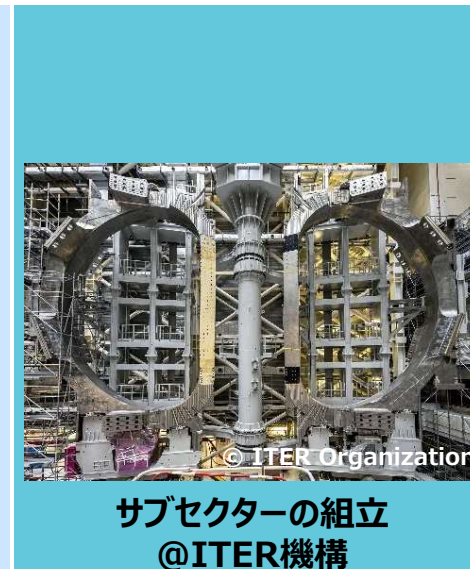


これまでの活動成果 (MHI's activities)

- 2019年より、TFコイル一体化組立作業を開始。2020年1月に初号機(世界初)、2023年8月に5号機(MHI最終号機)が完成
- 2022年5月、MHI納入の初号機/ 2号機を組み立てた真空容器サブセクターがピットへ搬入
(のちに真空容器・熱遮蔽版の補修が必要となったため、ピットから取り出し。現在、補修完了し組立作業再開)



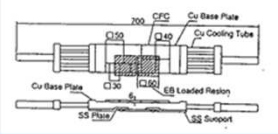
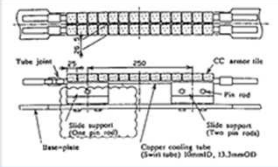
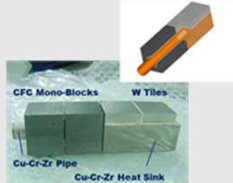
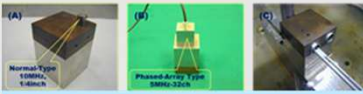
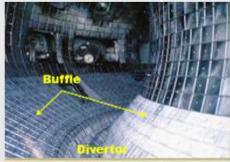
当社HPに製作動画があります
https://www.mhi.com/jp/products/energy/fusion_reactor.html



ITER向け高熱負荷機器ダイバータへの挑戦

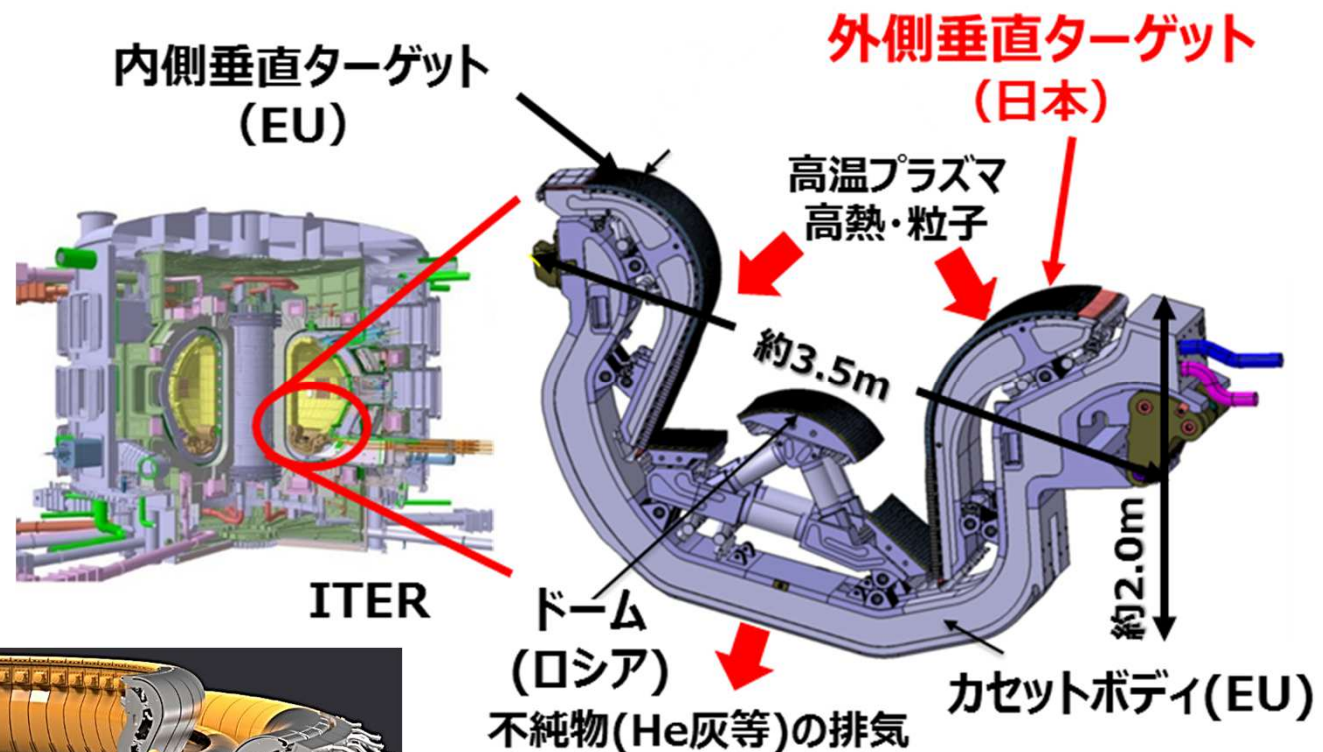
(Challenge to high heat flux component for ITER, -Divertor-)

当社のプラズマ対向機器開発への取り組み (R&Ds for Plasma Facing Component) 三菱重工

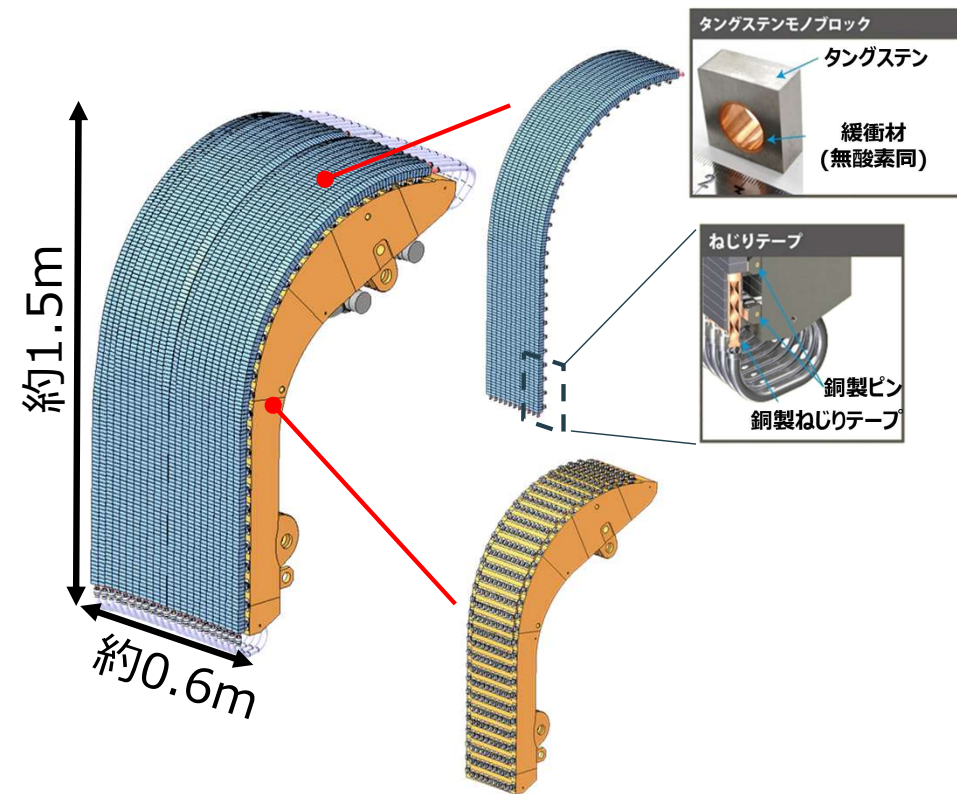
	1980年代	1990年代	2000年代	2010-現在
ITER計画	ITER-CDA CDA(Conceptual Design Activities):概念設計活動 EDA(Engineering Design Activities):工学設計活動		ITER移行時期 * *サイト選定に向けた活動	ITER建設段階
核融合実験炉用 プラズマ対向機器の 開発	材料、ロウ付け技術、プラズマ対向機器構造の開発 - 黒鉛-ステンル/銅等との接合技術（ロウ付け、ロウ材） - 銀フリーロウ材による接合技術 - 高機能炭素複合材（高強度・高熱伝導）の開発 - 設計ツール（伝熱・熱応力解析コード等）の開発 ● プラズマ対向機器構造の開発(ダイバータ/第一壁)  スライド機構を有するダイバータ試作 大型黒鉛タイトルのロウ付け試作		 小型モックアップ試作 (CFCとW)  接合界面の検査技術	ITER用ダイバータの開発  CFC・WPFUモックアップ試作 ▼2013年 ITER要求の除熱性能達成 ↓ 設計変更(2013年) フルWモックアップ試作 ▼2015年 ITER要求の除熱性能達成 ↓ 実機製作準備 フルW-OVTプロトの製作
	核融合実験装置用 プラズマ対向機器 の開発	▼JFT-2M真空容器(1983年) 【主な保守/改造工事関連】 - 内部品改造工事（第一壁黒鉛化、1987年） - フェイライト鋼板設置（2001年） - 内部品定期検査（1回/年）		JT-60SA用ダイバータ設計検討
その他のプラズマ 対向機器開発	▼JT-60U真空容器(1991年) - ダイバータ設計・製作 - 第一壁設計 		JT-60Uプラズマ対向機器 2005年まで内部品定期検査 (1回/年)	注記) JFT-2M：2004/3 停止 JT-60U：2008/8 停止
	▼TEXTOR用ALT-II ポンプリミタ (1986年、名大に納入、国際協力)		▼JT-60U用W型ダイバータ工事(1998年)	

- 高温プラズマからの高い熱負荷と粒子負荷を受け止め、炉心プラズマ中の不純物であるHe灰（衝突過程でエネルギーを失ったヘリウムイオン）等を外部へ排気するための装置。日本は外側ターゲットを担当
- トカマク型装置の中で**唯一プラズマを直接受け止める機器**であり、運転中の熱負荷は**スペースシャトルが大気圏突入時に受ける熱負荷の約30倍**
- 熱負荷に耐えながら機能を維持させるため、表面は**複雑な形状を有しており、かつ高精度の製作技術が要求**される

項目	仕様
形状	約高さ2.0m×幅1.5m×長さ3.5m
重量	約8ton
材質	タングステン クロムジルコニウム銅 無酸素銅 ステンレス (XM-19、SUS316L)
数量	54体



OVT = ①PFU+②SSS



- ①PFU (Plasma Facing Unit: プラズマ対向ユニット)
- OVT1基あたり、PFU22本。
 - PFU1本あたり、約150個のWブロックをCuCrZr冷却管へ貫通させロウ付け後、曲げ加工。
 - 異材配管の溶接、ねじりテープの挿入



キー技術： Wブロックと冷却管のロウ付け、曲げ

- ②SSS (Steel Support Structure: 鋼製支持構造体)
- 複雑な形状 (6分割水室構造)。
 - XM-19 (オーステナイト) 鍛造品を機械加工。
 - PFUの支持と冷却水供給構造物。



キー技術： 突き合せ溶接・RT検査・低ひずみ溶接

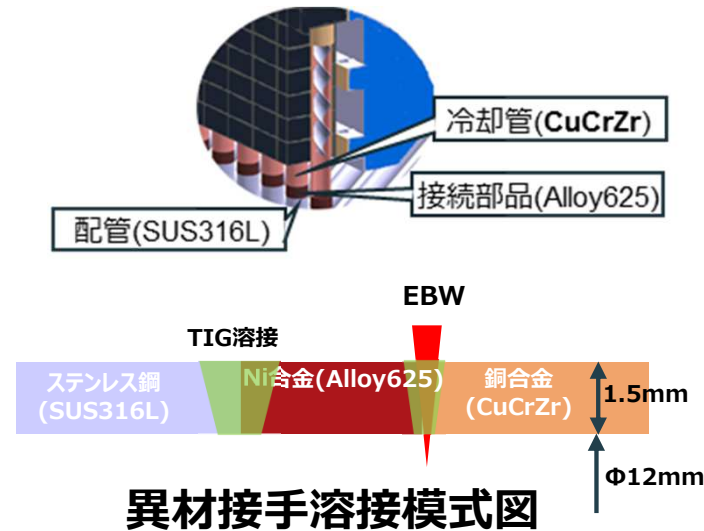
OVT組立

- 左右SSSへのPFU各11本最終組立て後に、Wモノブロックのプラズマ表面の0.1mmオーダーの厳しい公差要求を満足
- Wモノブロック約3200個(約150個 × 22 PFU)に対する輪郭度、ギャップ、段差の計測が必要
- 真空容器内に設置するため、厳しいリークチェックが必要

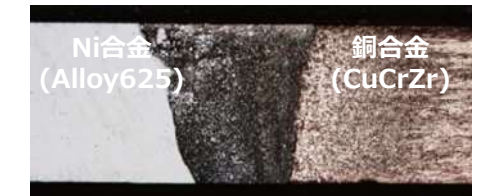
機能	仕様/要求性能
熱防護性能	材質：タングステン PFU：22本(約150ブロック/本) プラズマ対向面 輪郭度：±0.25mm
冷却性能	冷却管材質：銅合金(CuCrZr) 高熱伝導：冶金的接合(ロウ付け等) 冷却性向上：ねじりテープによる冷却水旋回流

PFU冷却管異材継手溶接

- 電子ビーム溶接(EBW)採用による溶接変形の最少化及び安定した高品質の溶接継手を実現
- 冷却管の銅合金とNi合金の異材継手溶接技術を開発



異材継手部外観



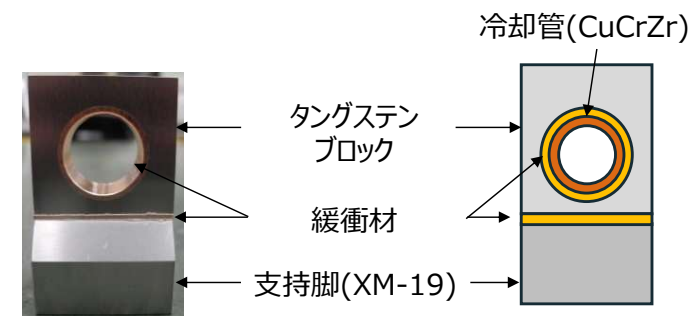
異材継手部詳細

PFU冷却管ロウ付け

- ロウ付け後の真空熱処理中の熱伸び差を踏まえ、治具の最適化と厳密なロウ付け施工技術を確立
- タングステンブロック間の隙間 ($0.4 \pm 0.1\text{mm}$) を実現



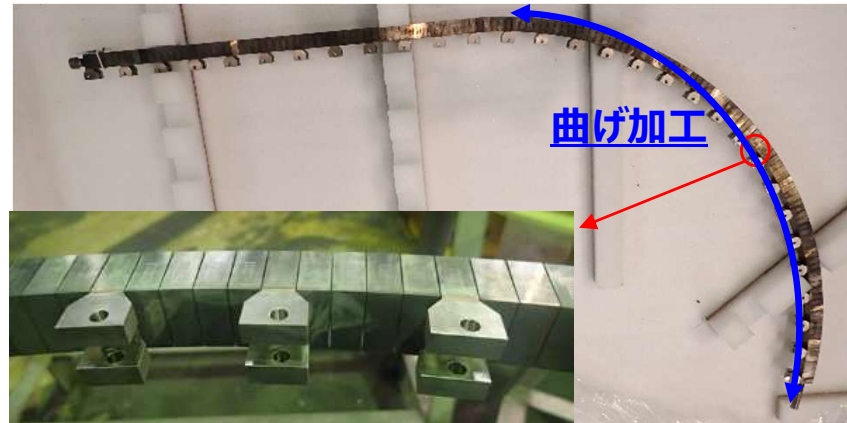
PFUろう付けモックアップ°



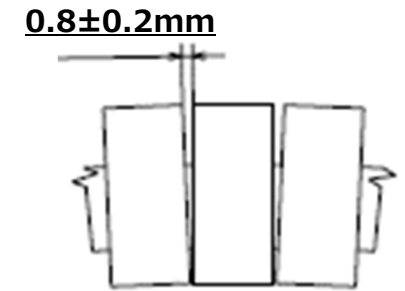
支持脚ろう付けモックアップ°

PFU冷間曲げ加工

- 厳しい輪郭度($\pm 0.5\text{mm}$)と曲げ部タングステンブロック間の隙間公差($\pm 0.2\text{mm}$)の高精度要求を達成
- 高精度曲げ工法を開発



曲げ加工



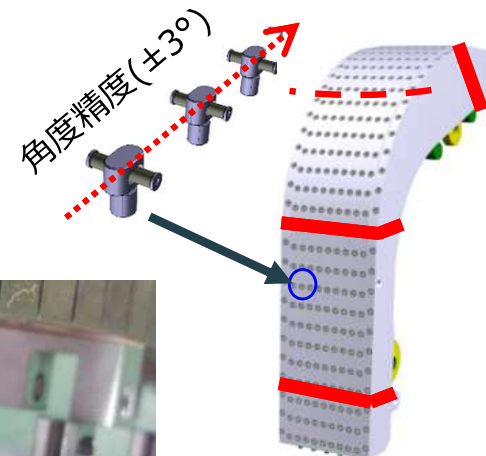
隙間計測

SSS機械加工・溶接

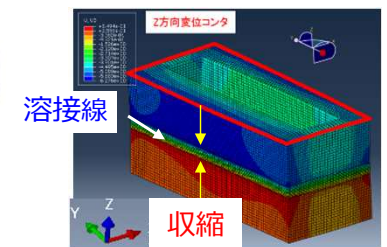
- 3次元曲面でのM12ネジ穴位置精度($\pm 0.1\text{mm}$)やプラグ締め付け後の向き角度精度($\pm 3^\circ$)の厳しい要求を実現
- 溶接変形解析及びモックアップによる最適 溶接工法確立



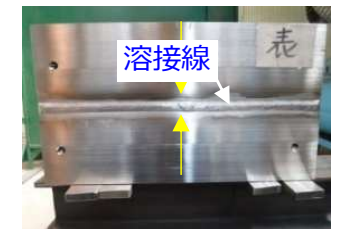
プラグ組立



プラグ締め付け



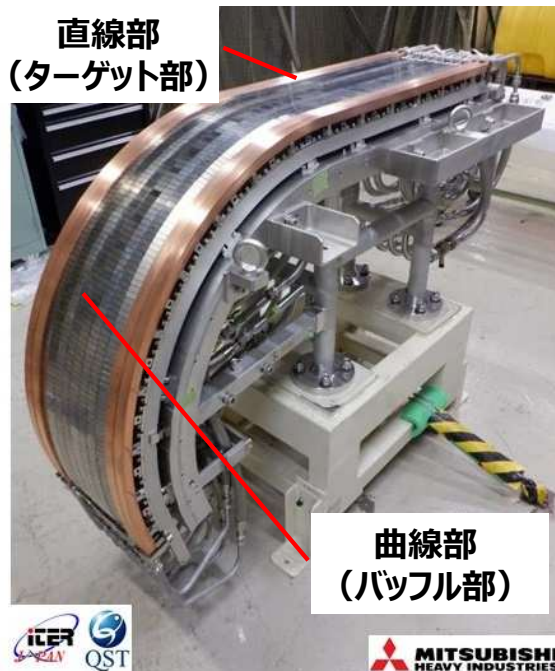
溶接変形解析



モックアップ外観

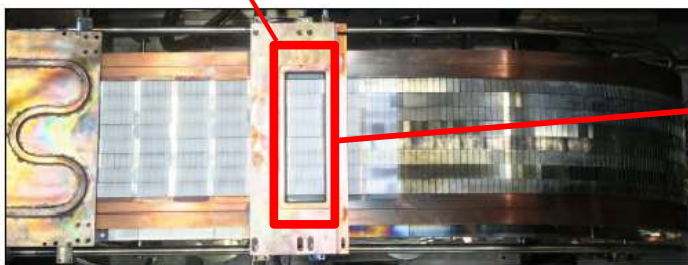
ダイバータ (PFU、OVT) プロトタイプ完成 (Completion of Prototypes)

- 2023年7月、ITER機構が実施した熱負荷試験に合格(左図)。他極に先駆けて、実機PFU (タングステン-CuCrZr配管のロウ付け) 製作に着手。日本分担機器製作の着実な進展に貢献
- 2024年3月、実機大OVTモックアップ(右図)の製作完了。同年7月にITERへ納入、受入試験合格



PFUプロト 外観

ビーム照射範囲 (範囲外は銅板でマスキング)



熱負荷試験

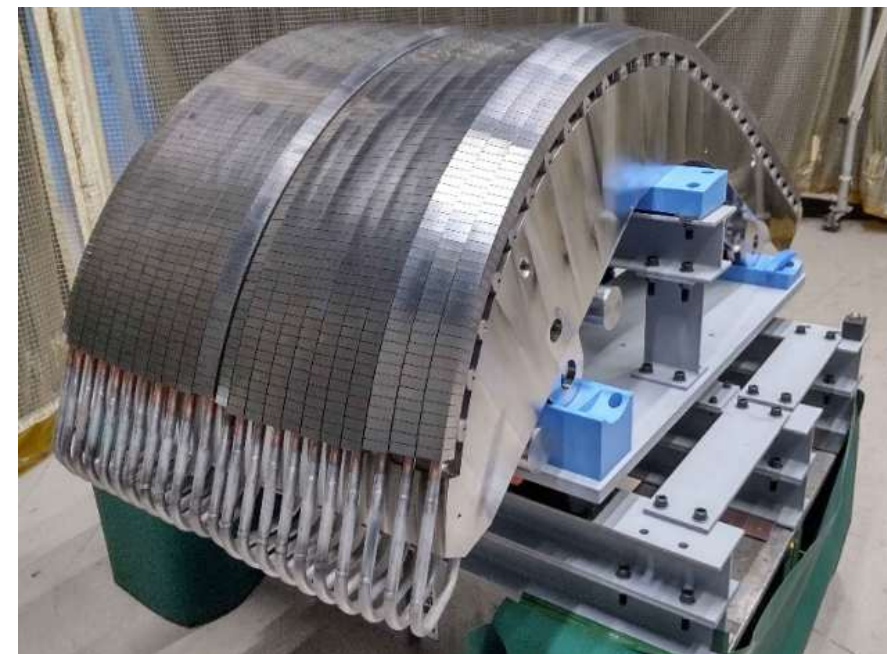
試験条件	【直線部】 10MW/m² 5000サイクル 20MW/m² 300+700*1サイクル *1) 日本独自の条件 【曲線部】 5MW/m² 5000サイクル
	合格基準 - 除熱性能の劣化がないこと - 熱サイクル試験中に局所的な温度上昇の発生が無いこと - 熱サイクル前後のマッピング結果にて著しい温度差が無いこと。 - 熱負荷面であるタングステンに溶融が認められないこと(外観)。



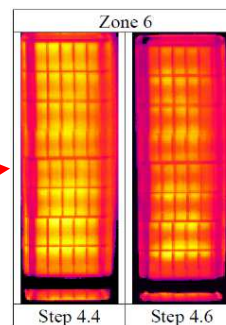
機械加工



三次元寸法計測



OVTプロト外観



マッピング結果

- 2012年から着手した**TFコイル5基は2023年に全号機完成**。ITER機構では**真空容器・熱遮蔽版とのセクター組立が開始**しており、ITERプロジェクトの進捗に貢献しています
- 核融合炉の重要機器となるダイバータ **OVTは、プロトタイプを通じて実機製作に必要な2種類のプロトタイプが完成**。ITER機構が要求する納入時期に向けシリーズ生産を開始しました
- その他、プラズマ加熱装置やブランケットに関しても、量研機構殿と協調しながら着実に開発を進めています
- 三菱重工は**全ての技術をMade in Japanで推進**。引き続き**国内技術で核融合エネルギーの社会実装に貢献**していきます

