

ITER ダイバータのR&D 進展

原子力機構 ブランケット工学

鈴木 哲

アウトライン

- ITERダイバータ開発（調達）の状況
 - 外側ターゲット実規模プロトタイプの製作
- フルタングステンダイバータについて
 - ITER機構における設計の進展
 - 原子力機構におけるR&Dの状況

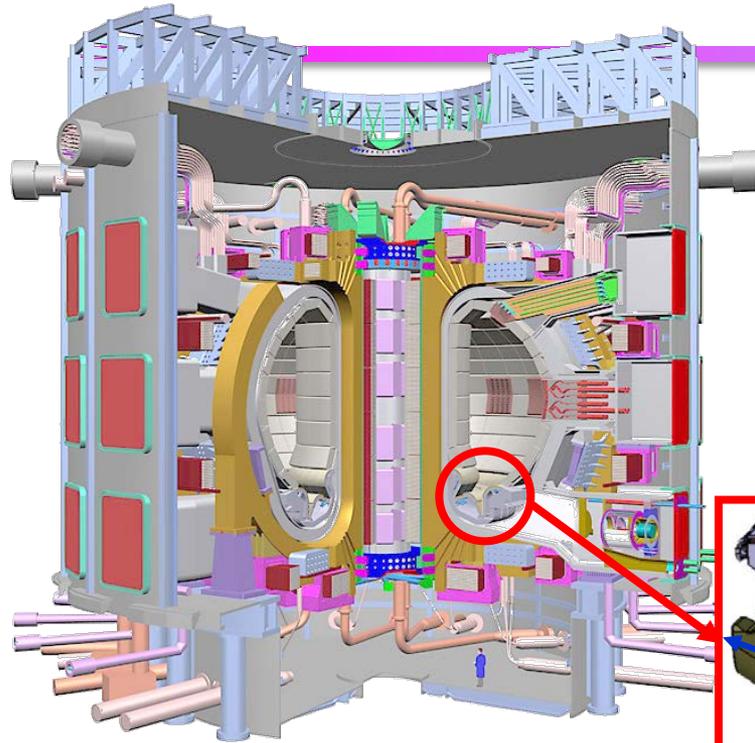


ITERダイバータを取り巻く状況

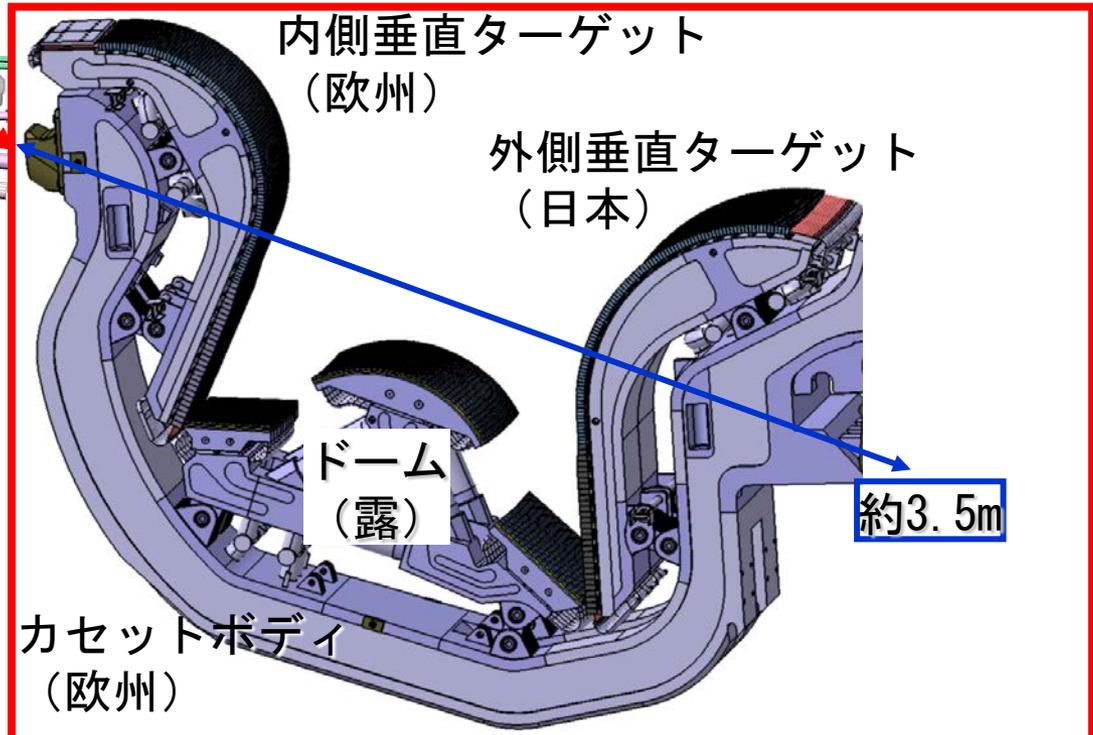
- ITERの建設が開始され、ダイバータ調達に関しても2009年末までに実機ダイバータ調達を予定する調達極（日本、欧州、ロシア）に対して、中型のダイバータ模擬試験体（Qualification Prototype）の製作及び高熱負荷試験を通じたPrequalificationと呼ばれる技術的能力に関する確認試験が完了した。
- 日本国内機関（JADA）となっている原子力機構はこのPrequalificationに合格し、2009年6月、ダイバータ外側ターゲットの調達に関する調達取り決め（Procurement Arrangement）をITER機構との間に締結して、ダイバータ外側ターゲットの調達を開始した。
- 一方、2011年10月に開催されたITERの諮問委員会（科学技術諮問委員会（STAC）、運営諮問委員会（MAC））において、ITER機構から運転当初から原型炉を志向したタングステンダイバータを装荷することが提案され、ITER理事会（IC）において、今後2年間を目処にタングステンダイバータ開発を集中的に実施し、ダイバータアーマ材の最終的な選定を実施することとなった。



ITERダイバータ (現設計)



- 除熱構造
 - ターゲット：炭素繊維複合材 (CFC)
 - バッフル、ドーム：タングステン (W)
 - 冷却管：銅合金
- 支持構造：ステンレス鋼
- カセット数：54個





調達スケジュール（1stセット）

• 段階的な調達（4つのStage）

– Stage 1：実規模プロトタイプ製作

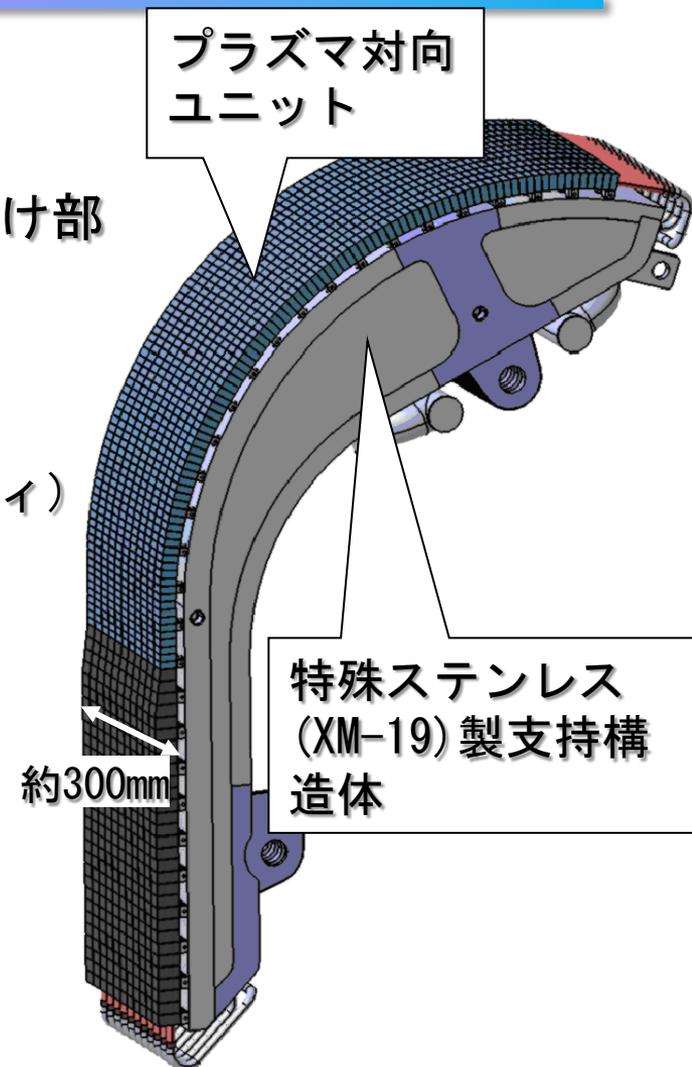
- クオリフィケーション（溶接部、ロウ付け部の強度試験等）
- プラズマ対向ユニット/支持構造体製作
- 試験検査
 - 非破壊検査（UT、RT、赤外サーモグラフィ）
 - 高熱負荷試験（エフレモフ研@ロシア）
 - 最終受入検査（JADA/欧州サイト）
- 実施期間：～2014年度

↓ ITER機構による承認

- Stage 2：実機ターゲット6カセット分
- Stage 3：実機ターゲット18カセット分
- Stage 4：実機ターゲット36カセット分

※Stage 2～4の実施期間：

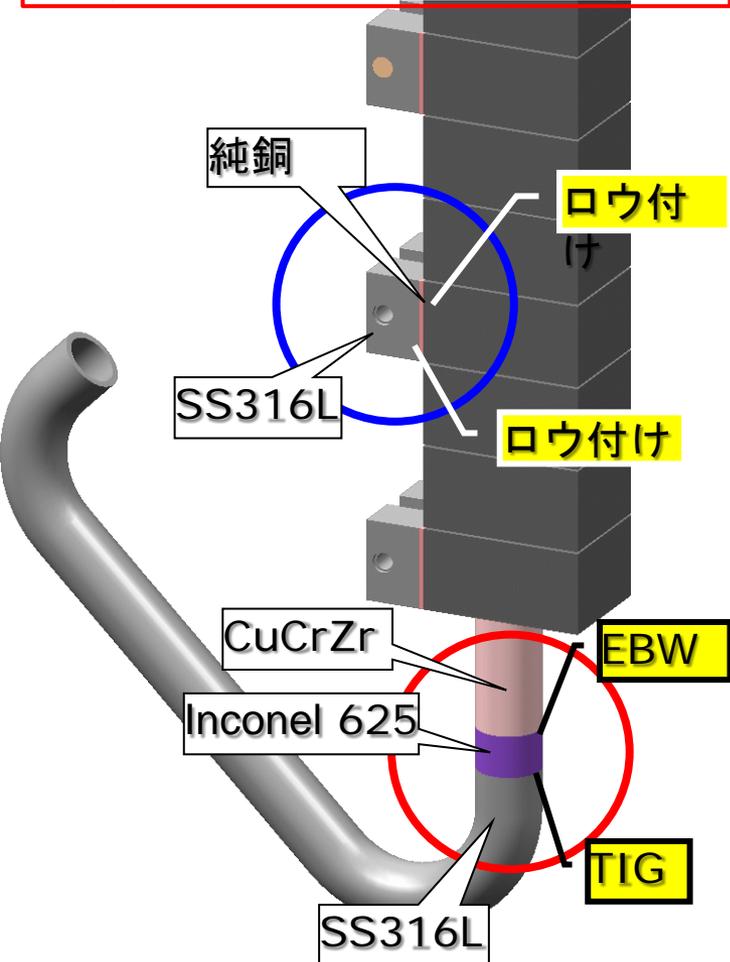
2014年度～2021年6月



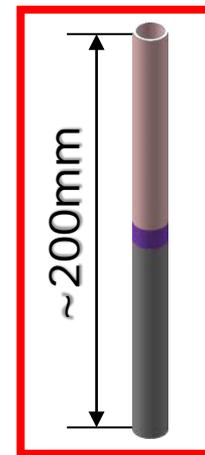
外側ターゲット実規模プロトタイプ
(0.5カセット分に相当：11流路)

実規模プロトタイプの製作 (要素技術のクオリフィケーション)

実規模プロトタイプは実機用の機器と同等の製作プロセス及び品質保証が求められている。

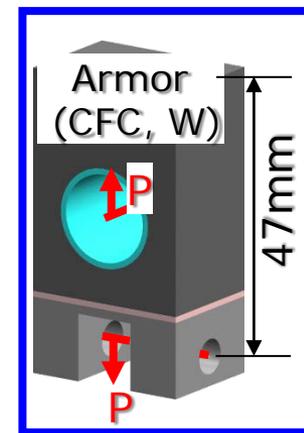


- CuCrZr/SS 316L異材管溶接部の強度試験
 - EBW (CuCrZr/Inconel), TIG (Inconel/SS316L)
 - 引張試験 (200MPa@150°C)
 - 曲げ試験 (表曲げ、裏曲げ)
 - 回転曲げ疲労試験 (20°C、10000回、0.1%ひずみ振幅)
 - Heリーク試験 (回転曲げ疲労試験の前後に実施
10⁻¹⁰ Pa m³/s以下)



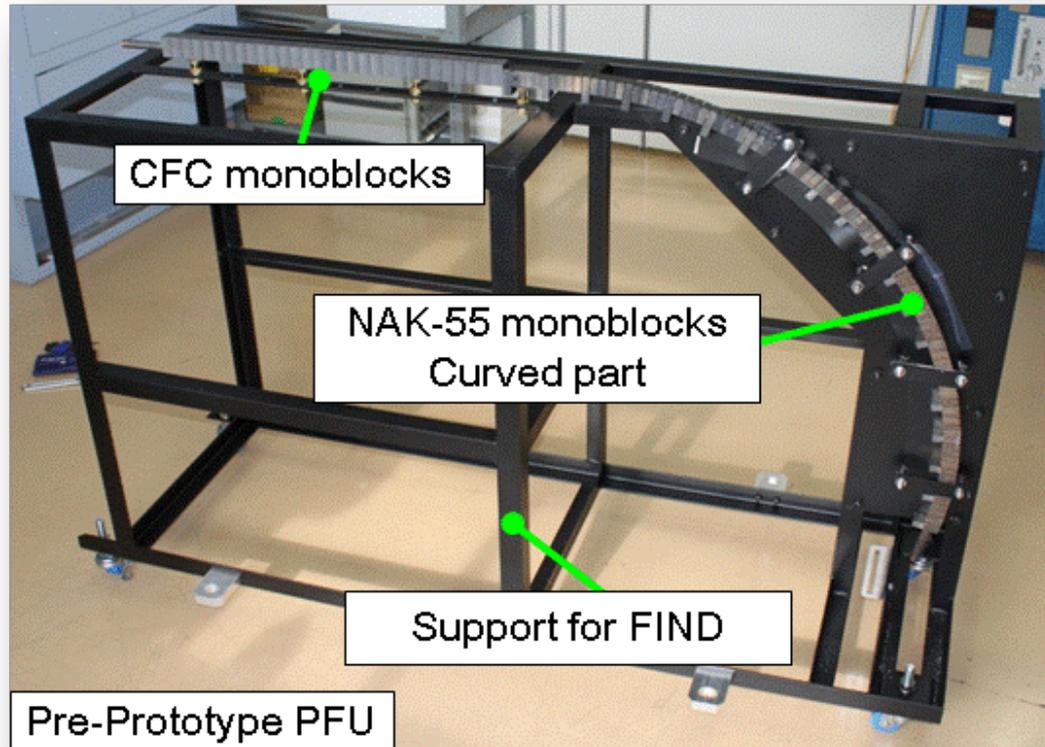
- プラズマ対向ユニット支持脚の荷重試験
 - CFC/Cu/SS316L
3kN < 引張荷重
 - W/Cu/SS316L
8kN < 引張荷重

※2009年~2010年にプラズマ対向ユニット初号機 (PFU#1) 製作のためのクオリフィケーションを完了

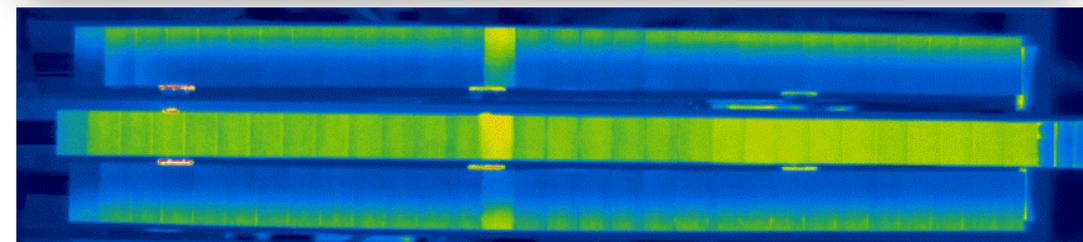




実規模“プリ”プロトタイプPFUの製作



- 緩衝材の変更を踏まえ、実規模プロトタイプ施工着手前の最終的な製作性検証として実施
- アーマ材
 - CFC部 : CX-2002U
 - W部 : 模擬材 (NAK-55)
- ロウ付け施工時のアーマ材/緩衝材/冷却管のズレ等は検出されず



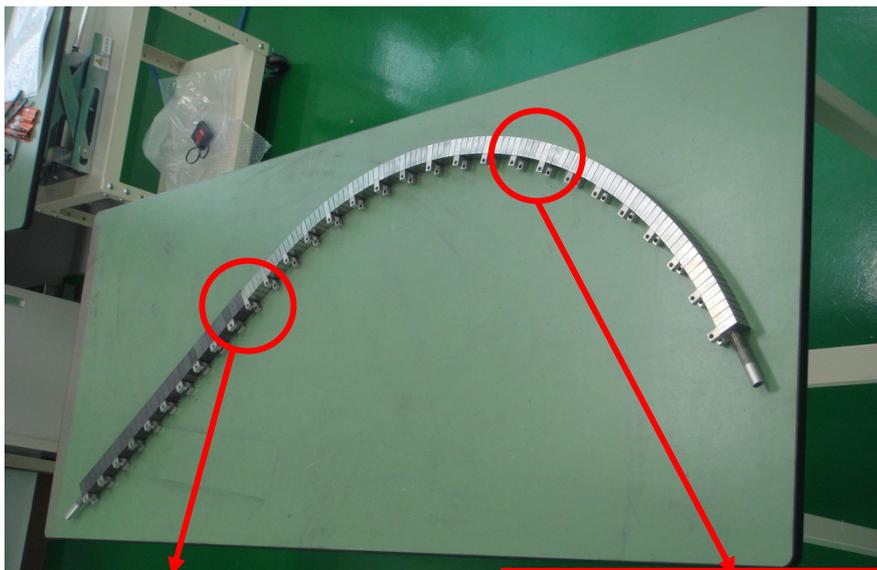
Pre-Protoの外観とCFCアーマ部の
赤外線サーモグラフィ検査結果

赤外線サーモグラフィ検査で、中央のCFCアーマ1枚に接合不良が確認された。

- 実規模プロトタイプPFU施工前に拘束治具を改良して対処

実規模プロトタイプ (初号機 ; PFU#1) の製作

要素技術クオリフィケーション及び実規模プリプロトタイプ製作の成果を踏まえ、2011年1月からロウ付け施工を開始した。



ITER機構担当者 (3名) による
施工状況の立会検査 (2011/2)



実規模プロトタイプ (初号機 ; PFU#1) の製作

- プラズマ対向ユニット (PFU#1:6体) の製作を2011年に完了
- 2012年秋に高熱負荷試験 (エフレモフ研) を予定



赤外サーモグラフィ検査用フレームに組み込まれたPFU#1 (3体のPFUを同時に検査可能 : 2011年6月)



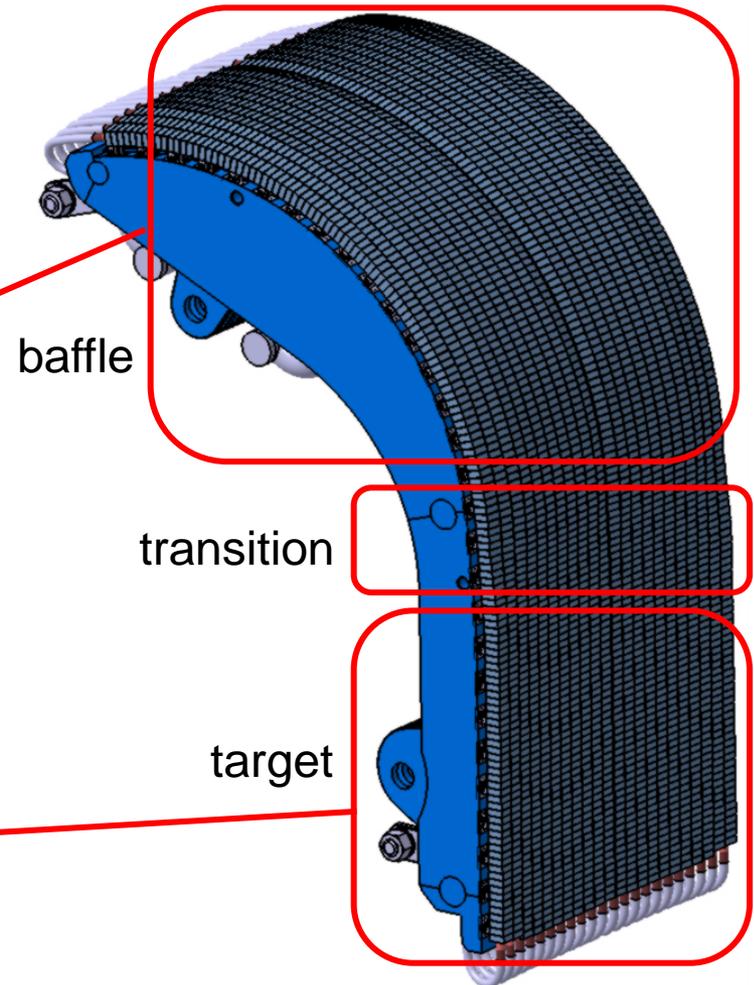
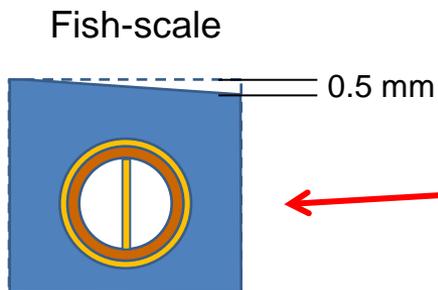
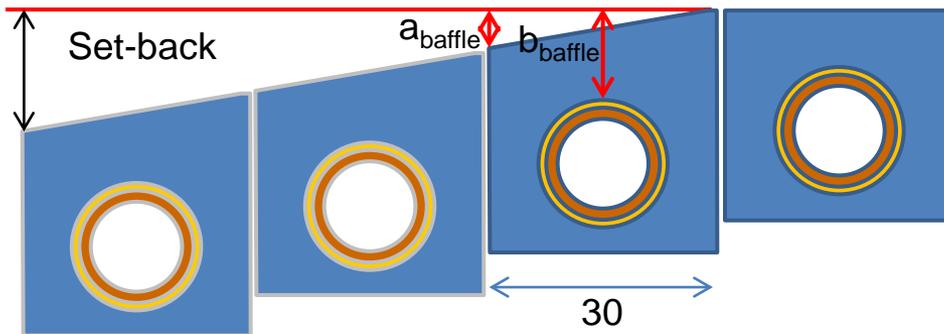
高熱負荷試験用のテストフレームに装荷されたPFU#1 (6体のPFUを同時に試験可能 : 2012年5月)

アウトライン

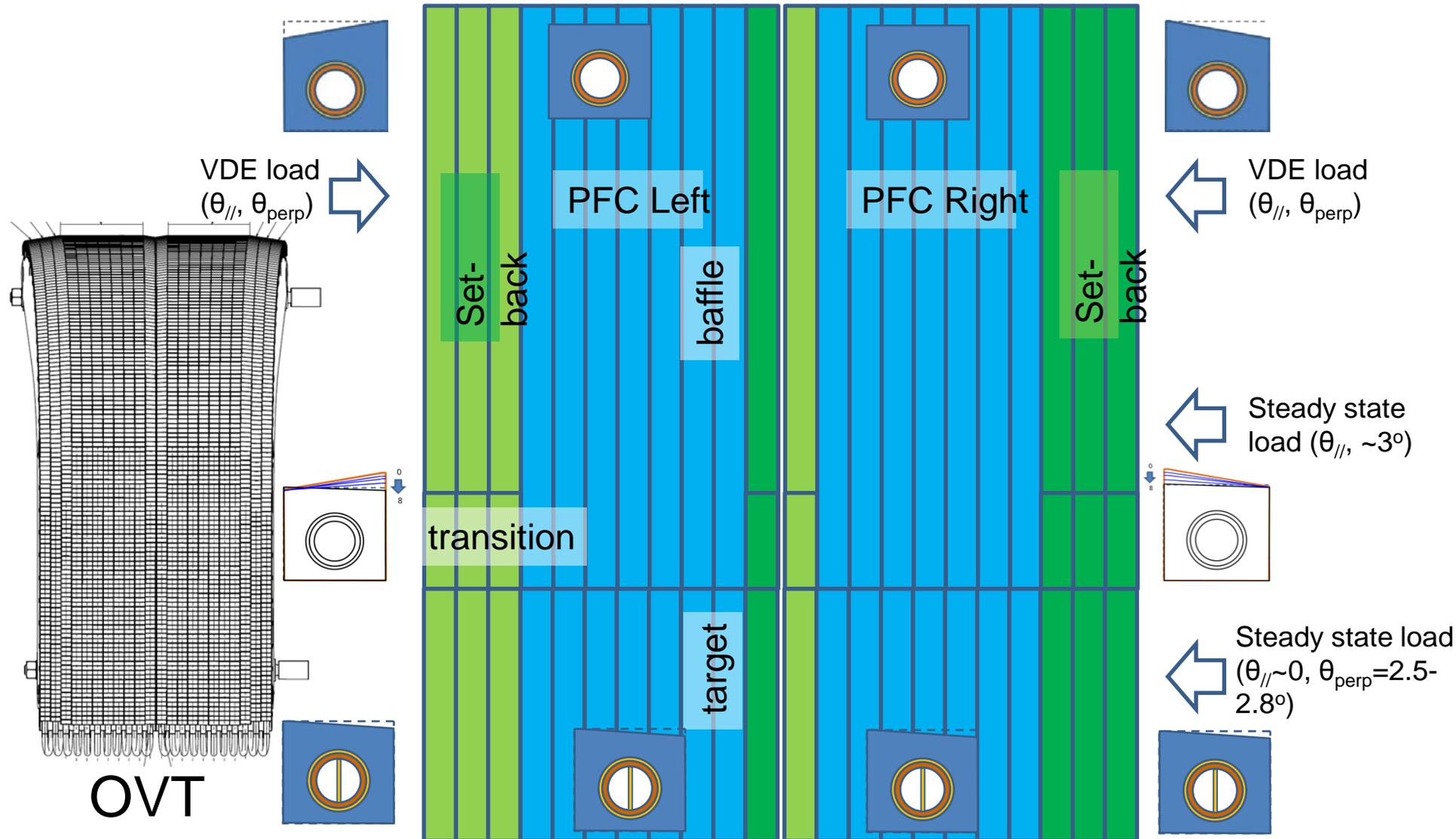
- ITERダイバータ開発（調達）の状況
 - 外側ターゲット実規模プロトタイプの製作
- フルタングステンダイバータについて
 - ITER機構における設計の進展
 - 原子力機構におけるR&Dの状況

OVT:

- Implement roof shaping and tilting at baffle, tilting and fish-scale (local) shaping at target
- Simple chamfered Monoblock shape (to be optimized) at baffle set-back
- Roof shaping by 3 PFUs at each side
- Simple PFU coolant tube profile

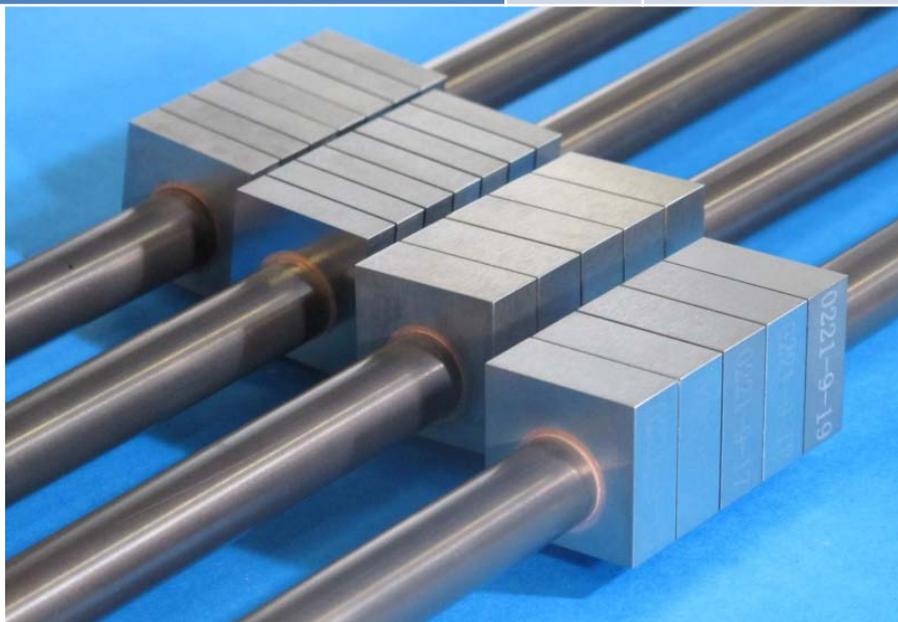


Overall monoblock distribution at OVT



タングステンダイバータ小型試験体

試験体ID	員数	メーカー	タングステン厚さ [mm]	タングステン軸方向長さ [mm]	タイル数
I11-W-AL-1, -2, -3	3	ALMT	16.5	12	5
I11-W-AL-4, -5	2	ALMT	15	12	5
I11-W-AT-1, -2	2	AT&M	16.5	8	7
I11-W-MM-1, -2, -3	3	MMC	16.5	12	5
I11-W-AT-3, -4	2	AT&M	16.5	12	5



これらの試験体については、主として原子力機構の電子ビーム試験装置 JEBISにて加熱試験の予定。一部を、IEA炉工協定に基づき、ユーリツヒ研（ドイツ）の電子ビーム試験装置 JUDITHにてELM-likeな繰り返し熱負荷試験を実施するべく調整中。

製作方法

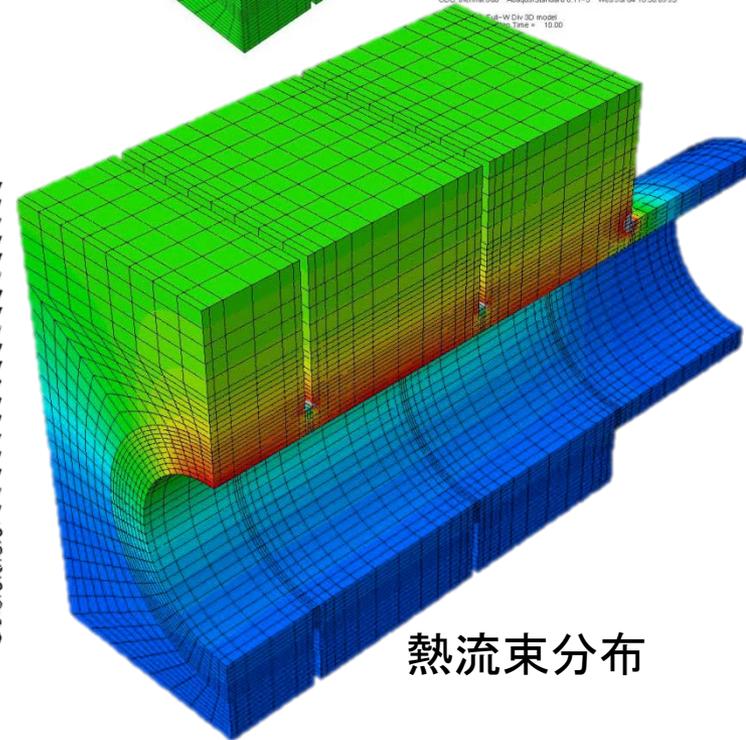
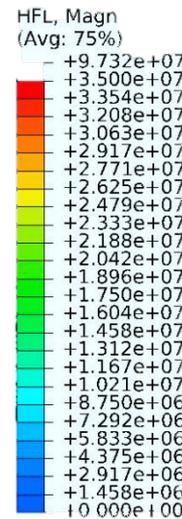
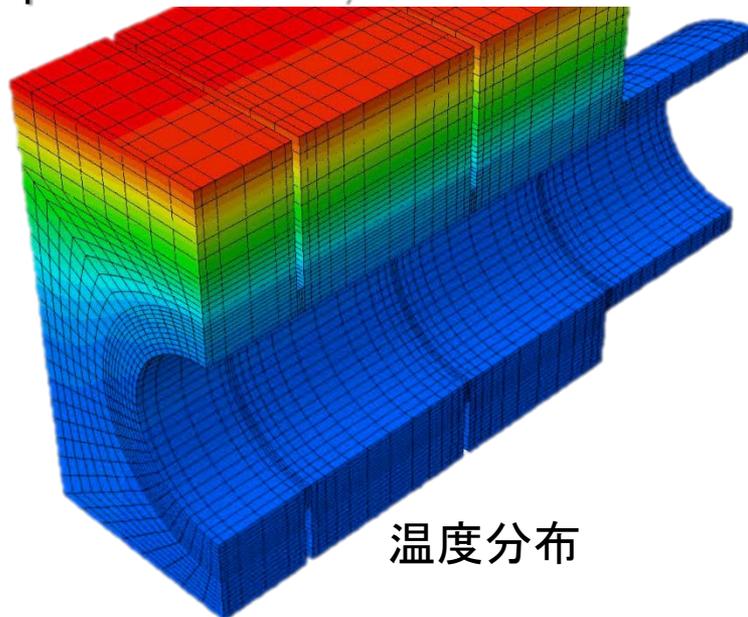
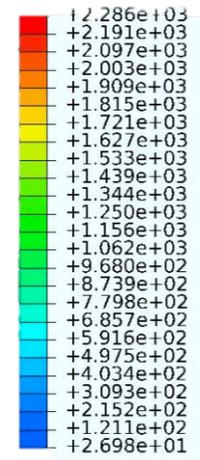
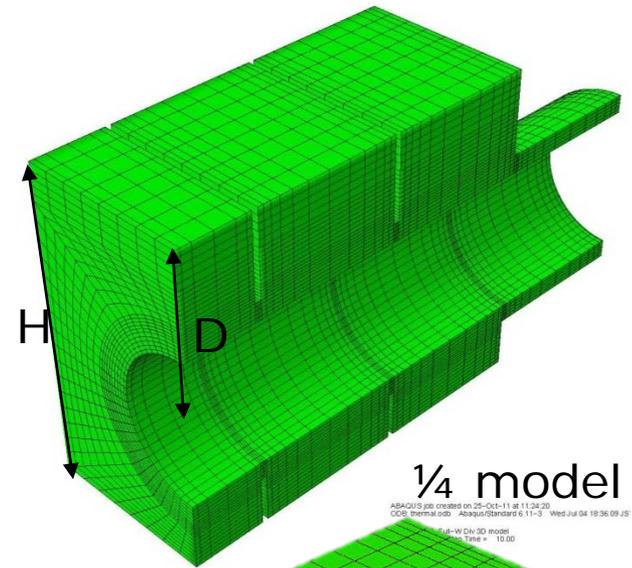
- タングステンの仕様：ASTM B760-86規格材
- 冷却管接合部への無酸素銅緩衝層の接合
 - ALMT：無欠陥接合法（NDB法）
 - AT&M：HIP接合法
 - MMC：拡散接合法
- ロウ付け接合時におけるCuCrZr冷却管の強度回復のためのクエンチ速度の実測値

	986°C -> 867°C	867°C->622°C	ビッカース硬さ
1st batch	0.12°C/s	4.9°C/s	104 Hv _{300gf}
2nd batch	0.10°C/s	3.2°C/s	94.6 Hv _{300gf}
	炉冷（ヒータOff）	N ₂ ガス導入 ＋ファン冷却	



タングステンダイバータ小型試験体の 予備解析（熱解析）

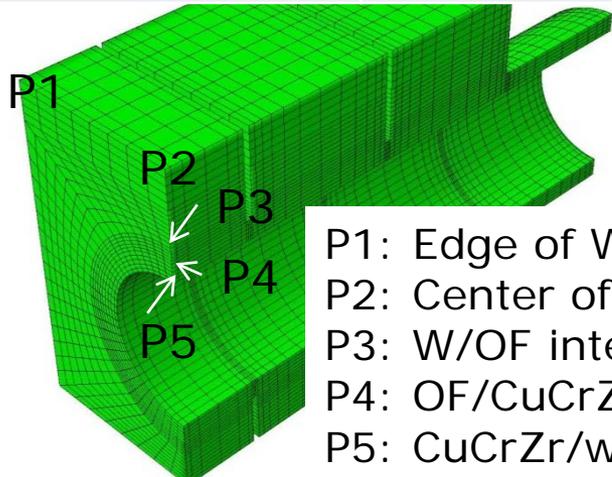
- Code: ABAQUS v.6 (ISO 9001 :2008, ANSI/ASME NQA-1)
 - Height of W tiles(H): 25.0, 26.5, 28.0(ref)mmH
 - Distance from PF surface to center of tube(D): 13.5, 15, 16.5(ref)mm
 - Heat load at PF surface: 5, 10 and 15MW/2 for 15s, 20 MW/m² for 10 s
 - Cooling condition: 25oC, 2MPa, 10m/s, HTC depends on T_{wall}, Radiation: e=0.3



解析例: H: 28mmH, D=16.5 mmH, EoH of 20MW/m²

タングステンダイバータ小型試験体の熱解析(2)

20MW/m ² , 1 0s	温度 (°C)					熱流束
	P1	P2	P3	P4	P5	P5
H28.0D16.5	2290	2124	509	415	275	36.2MW/m²
H26.5D15.0	2014	1775	427	412	275	35.5
H25.0D13.5	1830	1475	506	415	275	36.0
10MW/m ² , 1 5s	温度 (°C)					熱流束
	P1	P2	P3	P4	P5	P5
H28.0D16.5	1102	1026	314	272	210	15.2
H26.5D15.0	982	878	276	270	208	15.1
H25.0D13.5	878	735	311	269	209	15.1



- P1: Edge of W surf.
- P2: Center of W surf.
- P3: W/OF interface
- P4: OF/CuCrZr interface
- P5: CuCrZr/water interface

まとめ

- 2009年度からダイバータ外側ターゲットの調達を開始した。調達活動の最初のステップとして外側ターゲット実規模プロトタイプの製作を開始した。
- 2011年度に実規模プロトタイプ用プラズマ対向ユニット PFU#1の製作を完了した。2012年度中にPFU#1をロシア（エフレモフ研）に輸送し、高熱負荷試験を実施予定である。
- 2013年秋に予定されるアーマ材の最終選定に向け、タングステンダイバータ小型試験体の高熱負荷試験をJEBISにて開始した。さらに、IEA炉工協定に基づき、ユーリッヒ研（ドイツ）の電子ビーム試験装置JUDITHにてELM-likeな繰り返し熱負荷試験を実施するべく調整中。
- 現状のタングステンモノブロック断面では、熱負荷 $20\text{MW}/\text{m}^2$ においてタングステン表面が再結晶温度（ $1300\text{--}1400^\circ\text{C}$ ）を超えると共に、限界熱流束マージンが小さくなるため、今後、ITER機構と協力して熱構造設計に関する検討をすすめる。