

原型炉に向けたダイバータ開発 ～ITERダイバータ開発より～

原子力機構ブランケット工学

鈴木 哲

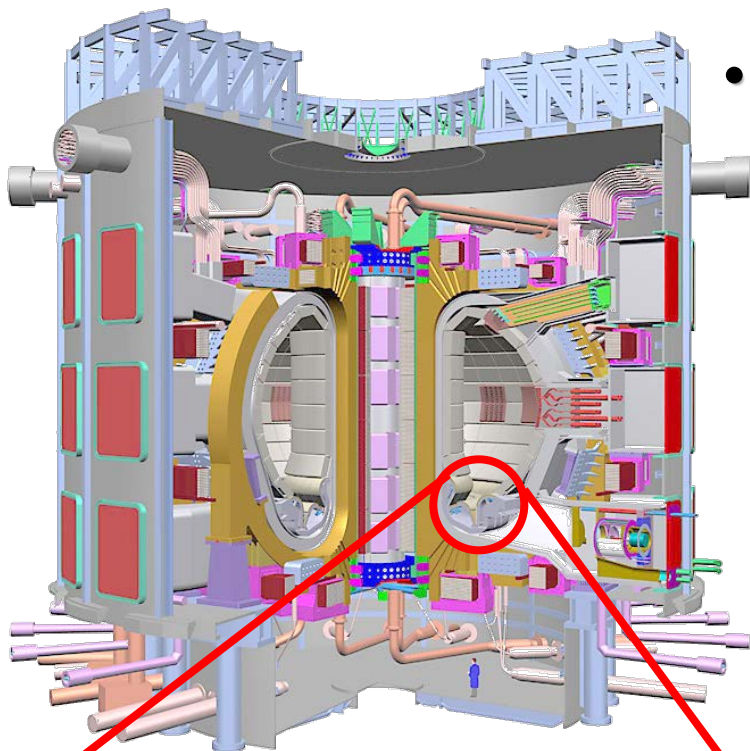


ITERダイバータを取り巻く状況

- 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ダイバータの設計
- ITERダイバータの調達
 - クオリフィケーション
 - 実規模プロトタイプ製作
- 原型炉固体壁ダイバータに向けたタングステンダイバータの開発

ITERダイバータ（現設計）



• FDR（フルサイズITER）からの設計の進捗

– 基本的な設計の変更はない

- 除熱構造：炭素繊維複合材（CFC）＋タングステン（W）＋銅合金
- 支持構造：ステンレス鋼
- カセット数：54個

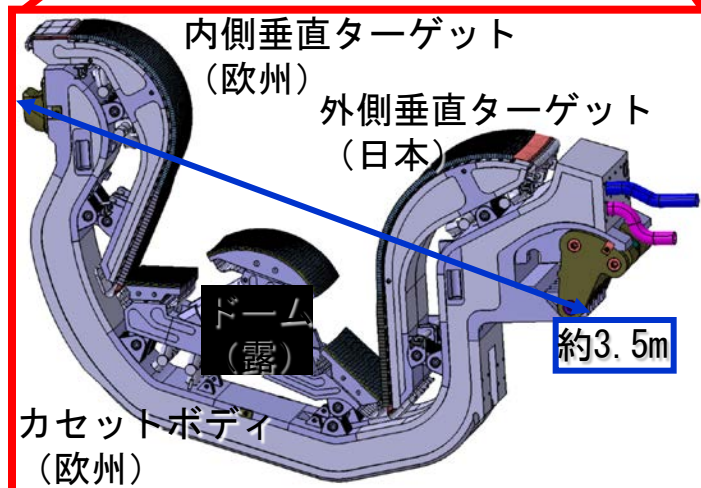
– ITERの小型化への対応

- カセットのサイズ：約5m→約3.5m

– 冷却管/熱シンク構造材の選択

- CuCrZrまたはDS-Cu→CuCrZrに決定

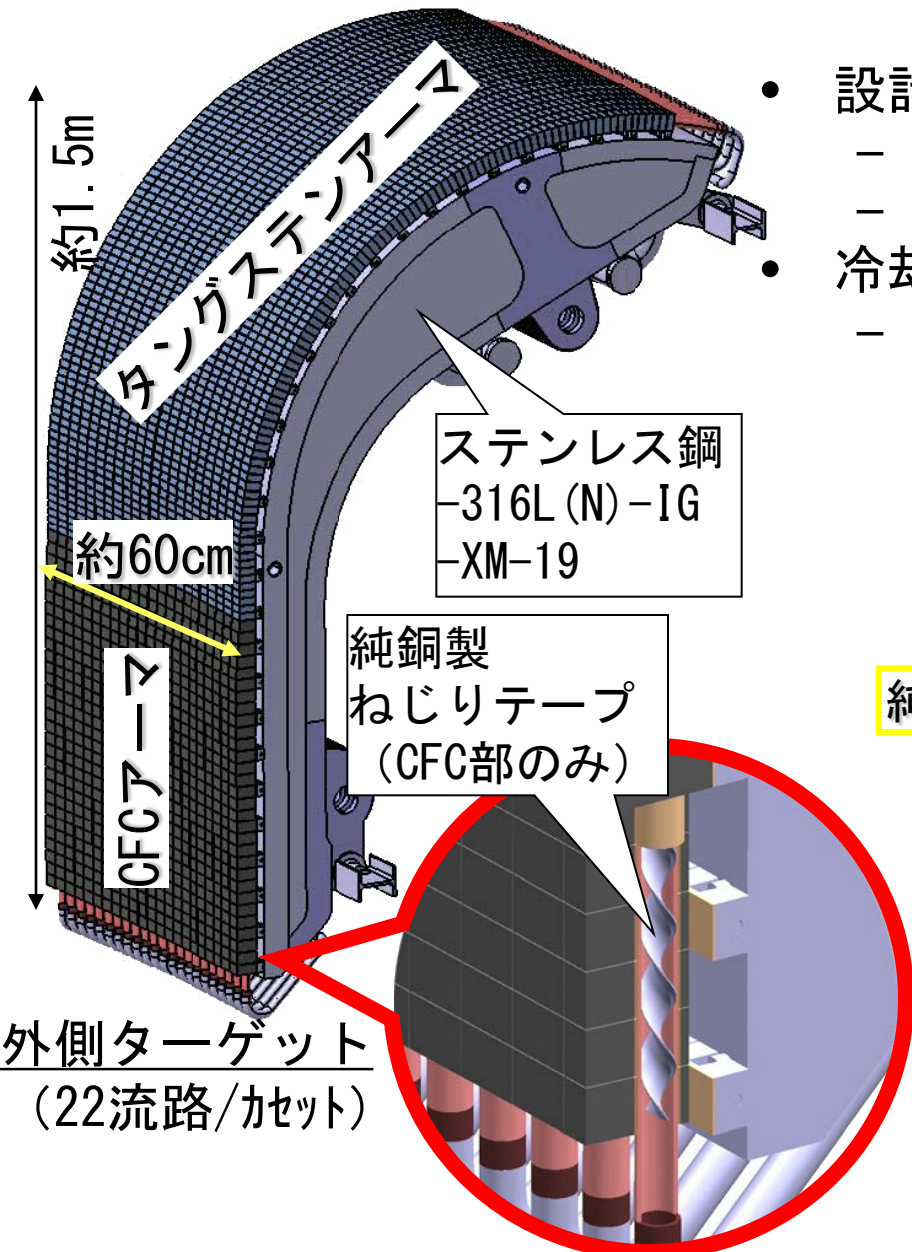
– STACからの提案を踏まえ、CFC部の領域の縮小（上端の位置を約10cm下側へ）、ドームの傘部の位置が変更（下側へ約10cm）された。（2008年3月）



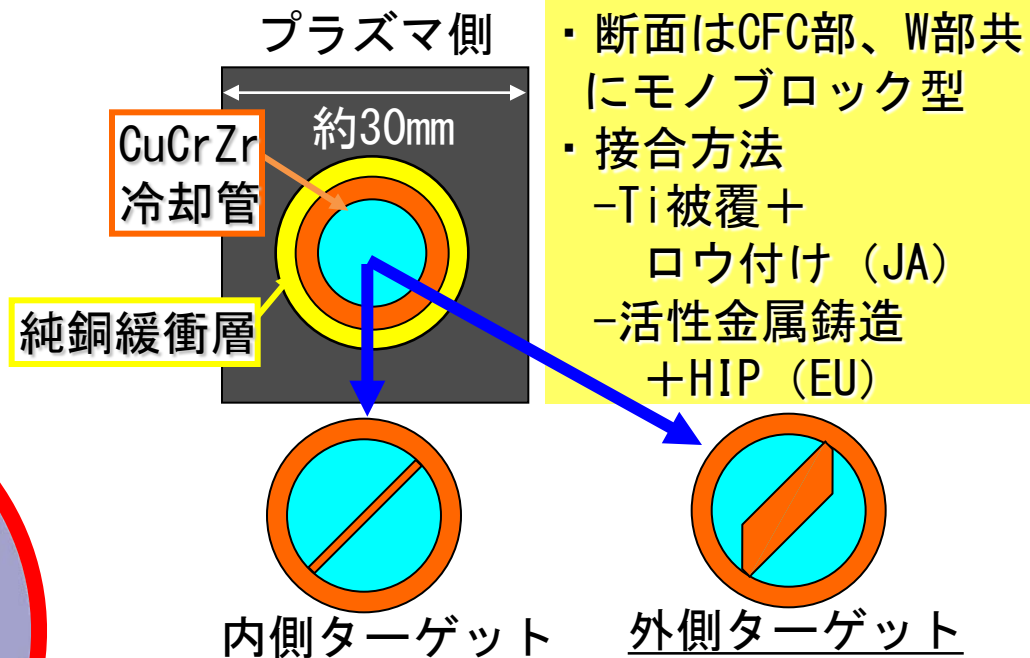
ITERダイバータ設計パラメータ (外側垂直ターゲット; OVT)

Heat flux	Design heat flux	~10 MW/m ² (at striking point, steady state) ~20 MW/m ² (transient) ~5 MW/m ² (at baffle region)
	Critical heat flux margin	1.4
Materials	Armor	Carbon Fiber Composite, CFC (lower straight part of OVT) Tungsten (upper baffle region of OVT)
	Bonding interlayer	Copper alloy (pure copper, copper-tungsten)
	Swirl tape	Pure copper
	Cooling tube (armored part)	CuCrZr-IG (ITER grade)
	Cooling tube (pipe fitting part)	Austenitic stainless steel (SS 316L)
	Cassette body and steel support structure	Austenitic stainless steel (SS 316L(N)-IG, XM-19)
	Pins (mechanical fixation)	Nickel-Aluminum-Bronze (C63200)
Coolant	Temperature	70 °C (at inlet of cassette body)
	Pressure	4.0 MPa (at inlet of cassette body)
	Allowable coolant flow rate	870 kg/s (for 54 cassettes)
	Allowable pressure drop	1.35 MPa (at the cassette pipe stubs, which interface with the Tokamak Cooling Water System)

垂直ターゲット（内側：EU、外側：JA）



- 設計熱負荷
 - CFC部：10MW/m²（定常）、20MW/m²×10秒以下
 - W部：5MW/m²（定常）、10MW/m²×2秒以下
- 冷却水条件
 - 入口圧力：4MPa、入口温度：70°C



1セット当たりの流路数が内側（16本）と外側（22本）で異なるが、供給される冷却水総流量は同一。このため、外側用には厚肉のねじりテープを採用して流路断面を縮小し、軸流速（10m/s）を等しく保つ。

外側垂直ターゲットの調達

- 日本は外側垂直ターゲットの全数を調達する。

– 全数=60.5カセット分

内訳

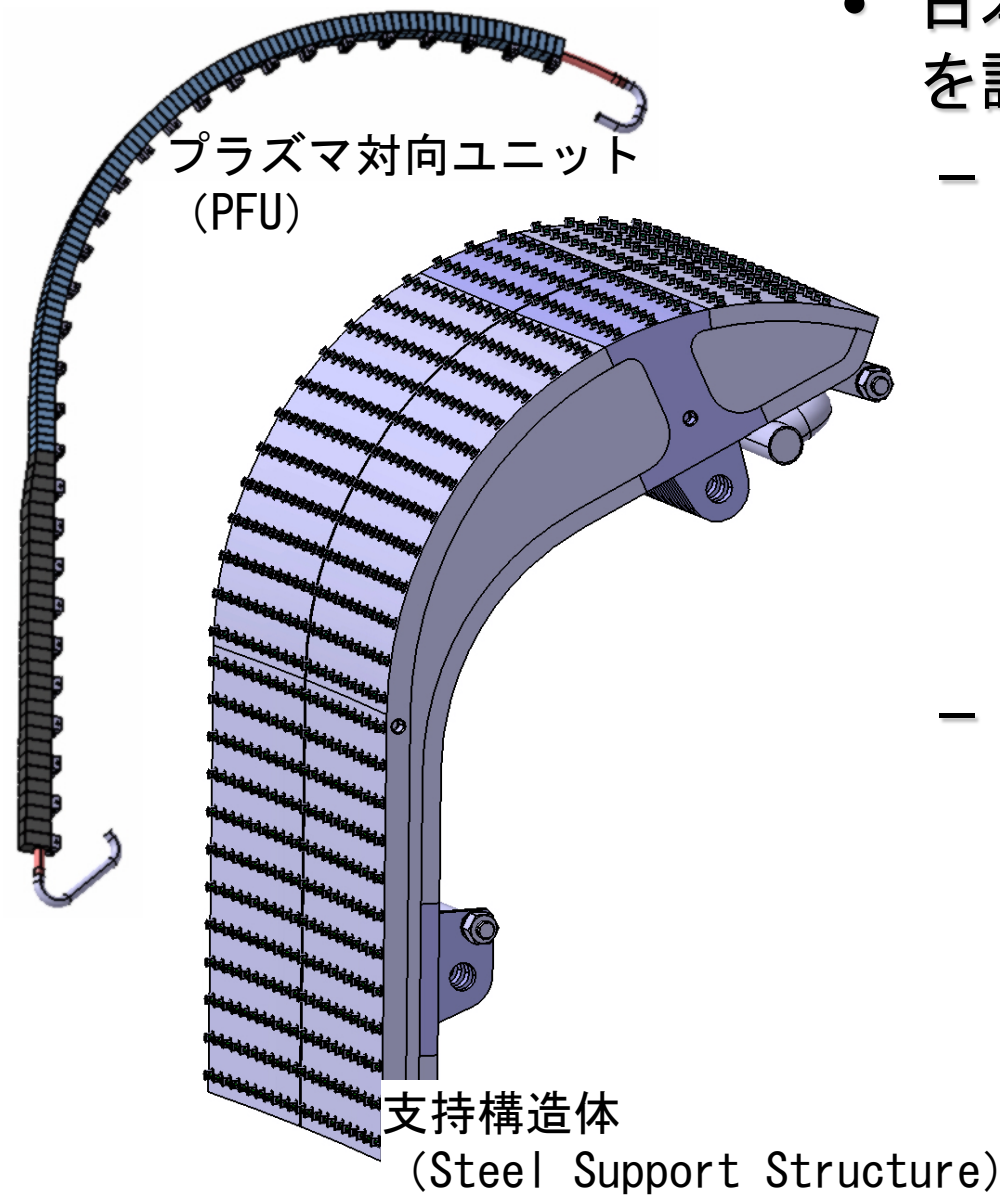
54カセット（炉内装荷用）

6カセット（スペア）

0.5カセット（実規模プロトタイプ）

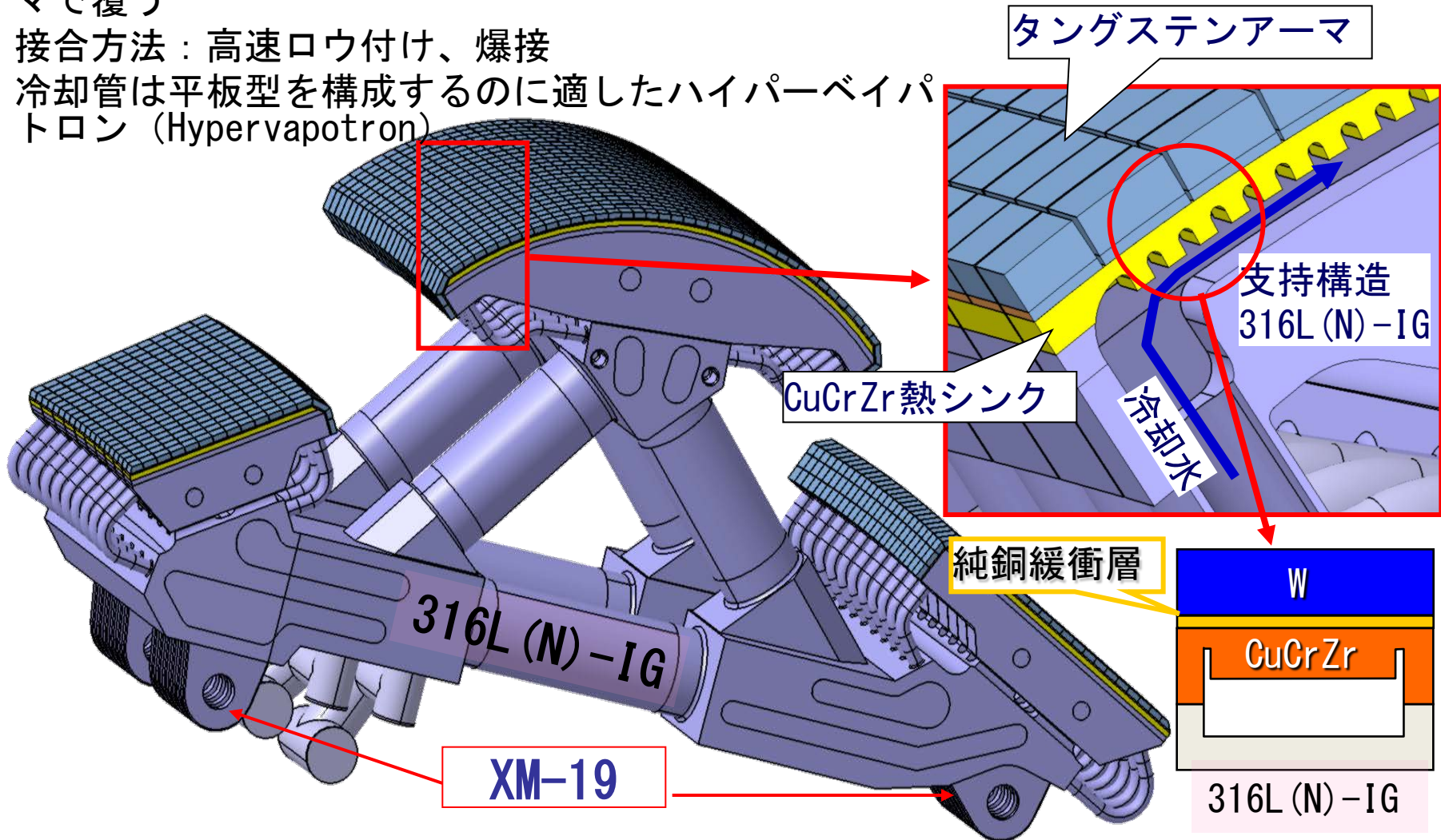
– 60.5カセット分=1,331本のプラズマ対向ユニット

- 同一仕様/形状のプラズマ対向ユニット及び支持構造体の量産
- 不良品の発生率を0と仮定



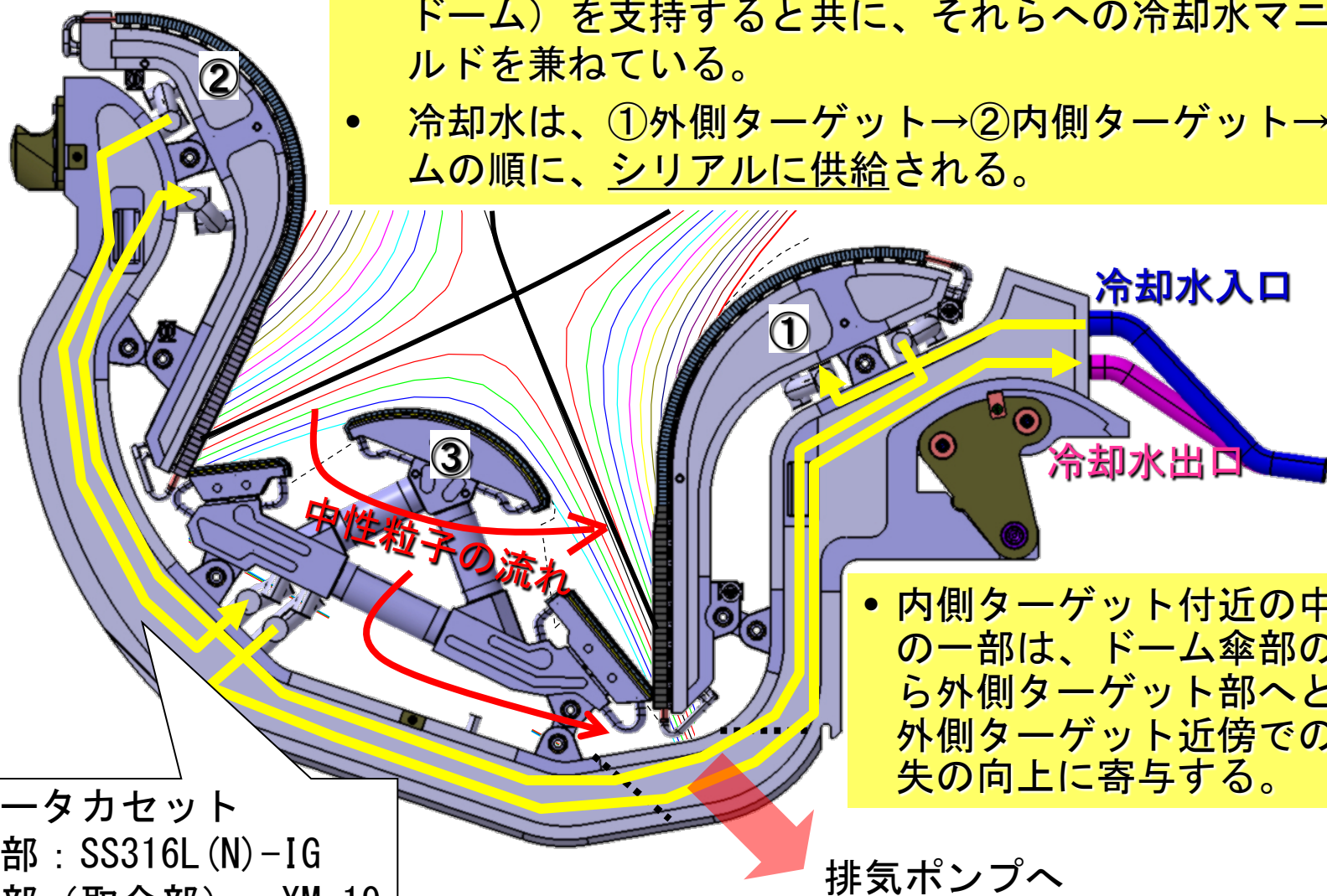
ドーム (RF)

- 設計熱負荷
 - $5\text{MW}/\text{m}^2$ (定常)、 $10\text{MW}/\text{m}^2 \times 2$ 秒以下
- ターゲットに比べ、熱負荷が低いため、断面は平板 (Flat tile) 型を採用し、すべてタングステンアーマで覆う
- 接合方法：高速ロウ付け、爆接
- 冷却管は平板型を構成するのに適したハイパーベイパトロン (Hypervapotron)



カセットボディ (EU)

- カセットボディはステンレス鋼 (SS316L (N)-IG、XM-19) 製で、高熱負荷機器 (内側ターゲット、外側ターゲット、ドーム) を支持すると共に、それらへの冷却水マニフォールドを兼ねている。
- 冷却水は、①外側ターゲット→②内側ターゲット→③ドームの順に、シリアルに供給される。



- 内側ターゲット付近の中性粒子の一部は、ドーム傘部の下側から外側ターゲット部へと移動し、外側ターゲット近傍での輻射損失の向上に寄与する。

ダイバータカセット

- 薄灰部 : SS316L (N)-IG
- 薄青部 (取合部) : XM-19

- ・ ITERダイバータの設計

- ・ ITERダイバータの調達

 - クオリフィケーション

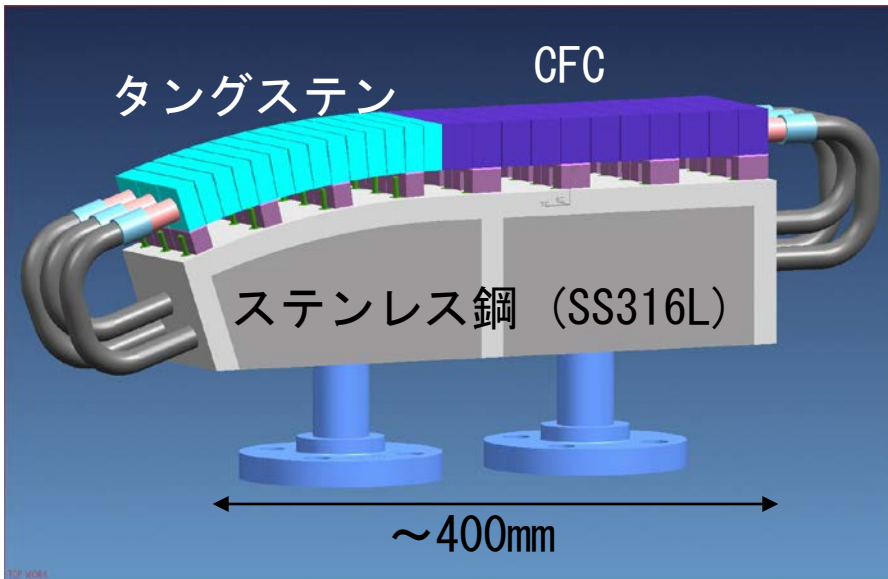
 - 実規模プロトタイプ製作

- ・ 原型炉固体壁ダイバータに向けた
タングステンダイバータの開発



ダイバータ評価試験体 (Qualification Prototype; QP) の製作/試験を通じたクオリフィケーション

- ダイバータの調達参加極 (JA、EU、RF) は調達開始前に、各自の技術的能力が調達の遂行に十分なものであることをQPの製作/試験を通じて実証する必要がある。



垂直ターゲットQP

- ・モノブロック型
- ・JAとEUが製作

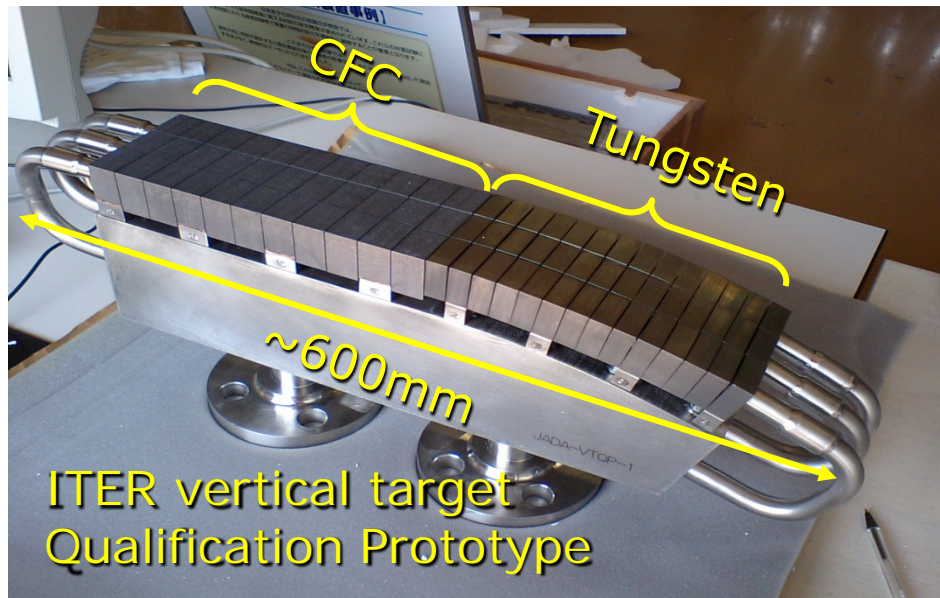
JA及びEUは左図のQPを2～4体製作する。調達極は以下の条件が満たされた場合、調達資格を有すると判定される。

- 少なくとも2体のQPを仕様通り (検査基準を満たす) に製作できる。
- 少なくとも1体のQPが、ロシアのエフレモフ研究所にて実施される高熱負荷試験において耐久性を実証できる。



QPの製作と高熱負荷試験

- ロウ材：Ni-Cu-Mn (980°C×30分、ガスクエンチ)
- CFCのメタライズ層：7.5~10%-Ti含有
- 時効処理：475°C×2時間



- 製作したQPをロシアのエフレモフ研究所に輸送し、2008年10月～2009年2月に高熱負荷試験を実施。
- 下記の熱負荷条件に対する耐久性を確認；
 - CFC部：10MW/m²×1000サイクル、20MW/m²×1000サイクル
 - タングステン部：3MW/m²×1000サイクル、5MW/m²×1000サイクル
- この結果、ITER機構は原子力機構の技術的能力を認定し、ダイバータ外側ターゲットの調達開始の準備が整った。→2009年6月に調達取り決めを締結



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

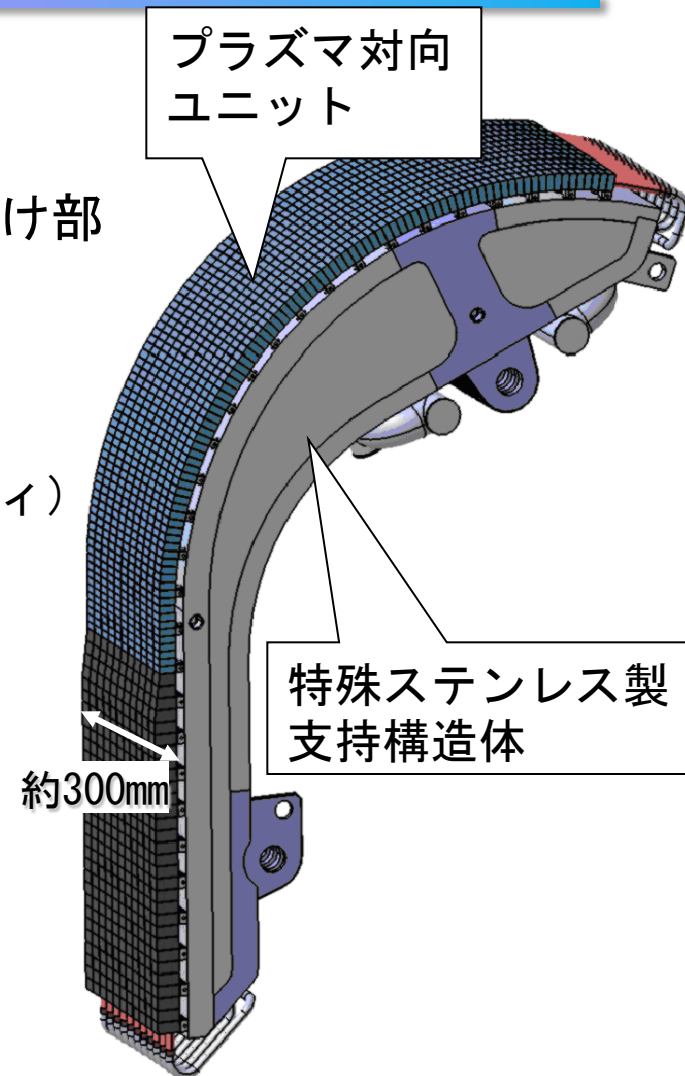
- クオリフィケーション（溶接部、ロウ付け部の強度試験等）
- プラズマ対向ユニット/支持構造体製作
- 試験検査
 - 非破壊検査（UT、RT、赤外サーモグラフィ）
 - 高熱負荷試験（エフレモフ研@ロシア）
 - 最終受入検査（JADA/欧州サイト）
- 実施期間：～2014年度

↓ 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

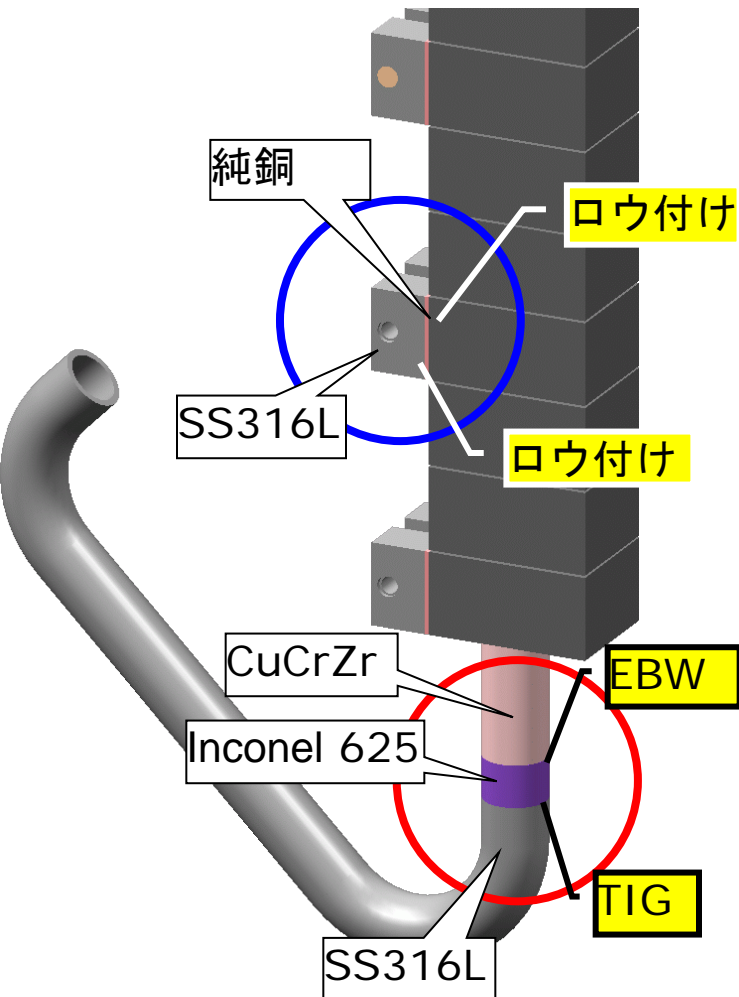
※Stage 2～4の実施期間：

2014年度～2021年8月（暫定）



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)

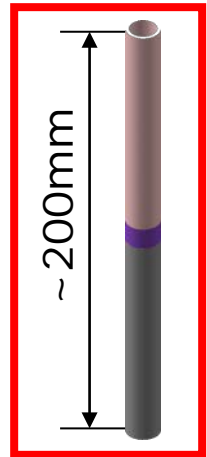
実規模プロトタイプの製作 (要素技術のクオリフィケーション)



- CuCrZr/SS 316L異材管溶接部の強度試験

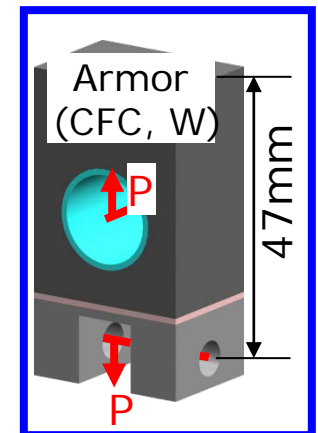
- EBW (CuCrZr/Inconel), TIG (Inconel/SS316L)

- 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

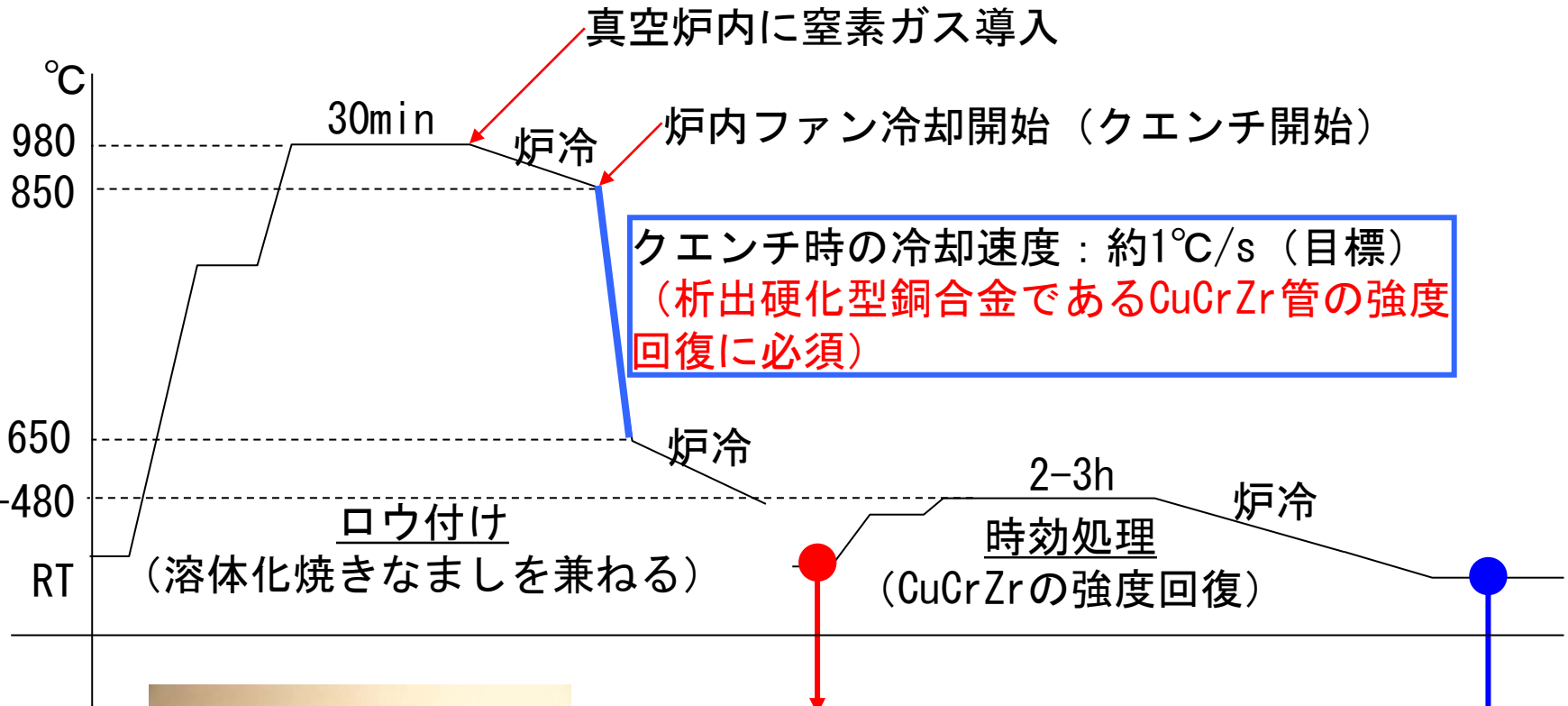
- CFC/Cu/SS316L
3kN < 引張荷重
- W/Cu/SS316L
8kN < 引張荷重



- 接合技術の改良

実規模プロトタイプの製作 (接合技術の改良)

PFU製作時の温度履歴



小型ダイバータ試験体

「時効処理前」の赤外線サーモグラフィ検査

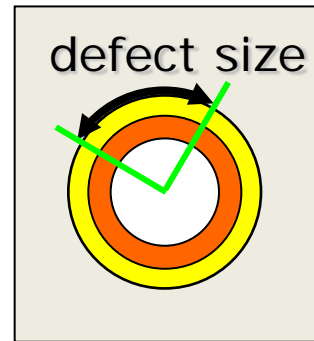
「時効処理後」の赤外線サーモグラフィ検査



実規模プロトタイプの製作 (接合技術の改良)

- ・ CFC/緩衝材/CuCrZr冷却管の口ウ付け接合部における時効処理の影響

ID	Braze filler thickness (mm)	Interlayer (mm)	"before aging"	"after aging"
1	0.1	Cu 1.5	defect size 50°-60°	defect size > 70°
2	0.1	Cu 1.5	defect size 60°-70°	defect size > 70°
3	0.1	Cu 1.5	defect size 60°-70°	defect size > 70°
4	0.1	Cu 1.5	defect size 60°-70°	defect size > 70°
5	0.05	Cu 1.5	defect size 40°-50°	defect size > 70°
6	0.05	Cu 1.5	defect size < 30°	defect size > 70°
7	0.05	W-Cu 1.0	defect size < 30°	defect size < 30°
8	0.05	W-Cu 1.0	defect size < 30°	defect size < 30°
9	0.05	W-Cu 1.0	defect size < 30°	defect size < 30°
10	0.05	W-Cu 1.0	defect size < 30°	defect size < 30°

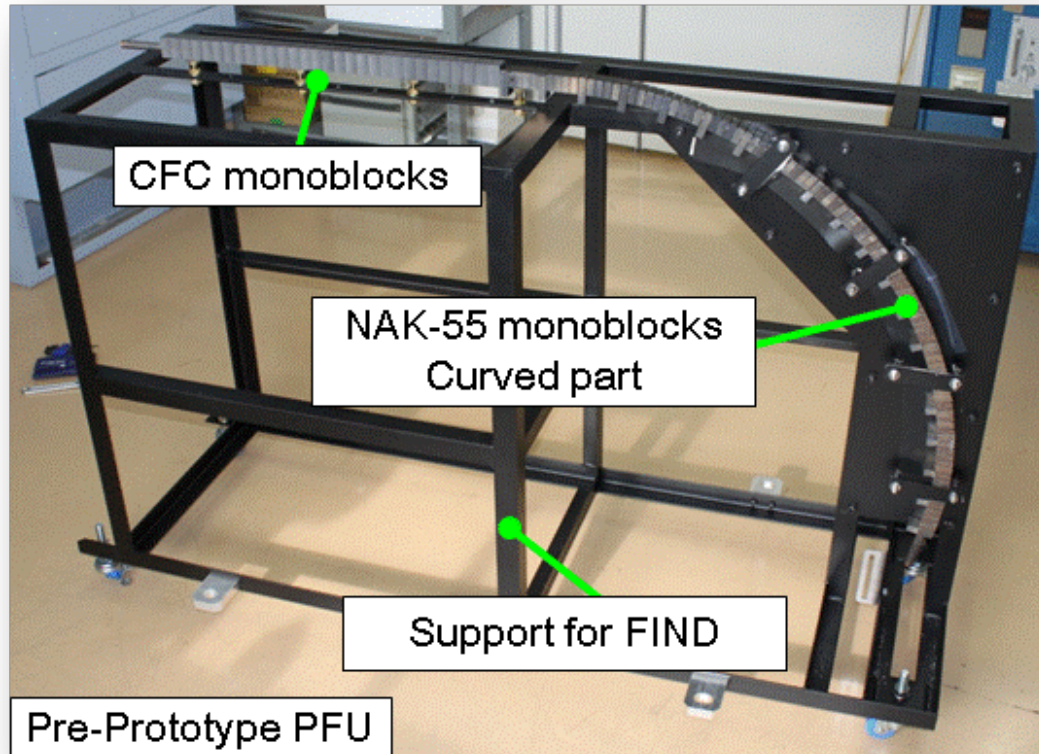


純銅を緩衝材（Interlayer）とした試験体では、時効処理後の接合状態が全て劣化した。→純銅製の緩衝材では、時効処理によって強度が回復したCuCrZr冷却管の変形を吸収する能力が不十分で、CFCの割れが発生した。

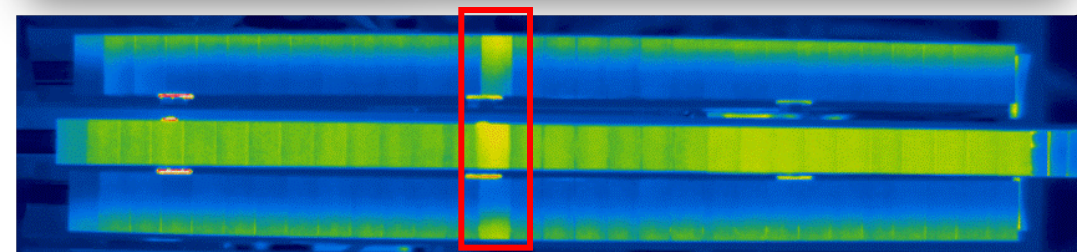
タングステン-銅を緩衝材とした試験体では、時効処理の前後での接合状態に変化は見られなかった。→高強度のタングステン-銅によって、CuCrZr冷却管の変形が抑制され、CFCが保護された。→緩衝材をタングステン-銅に変更。



実規模“プリ”プロトタイプの製作



- 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



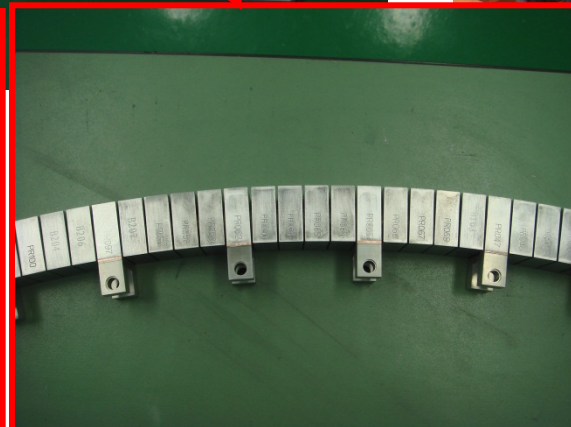
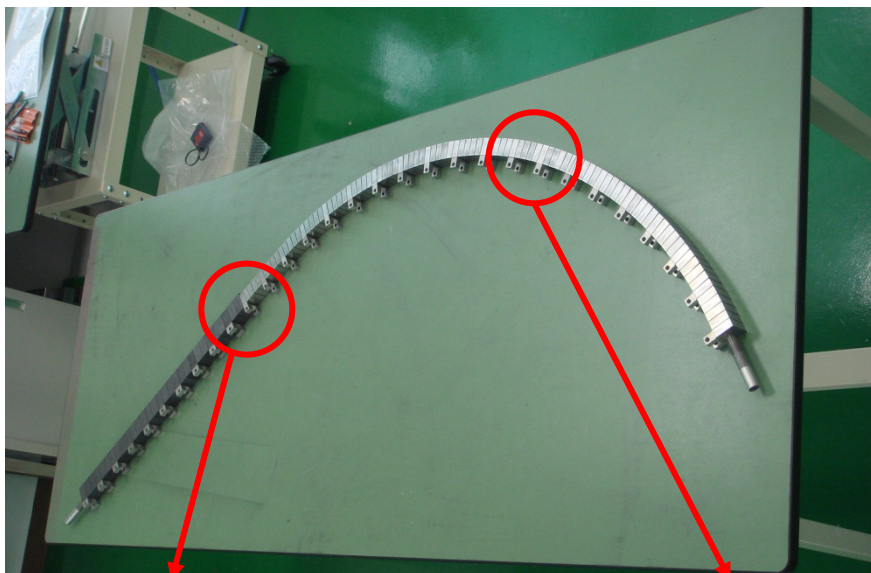
Pre-Protoの外観とCFCアーマ部の
赤外線サーモグラフィ検査結果

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

接合クオリフィケーションの成果を踏まえ、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) の製作を完了
 - 東日本大震災による影響で、製作が若干遅れ、2011年6月に製作を完了しJADAに納品



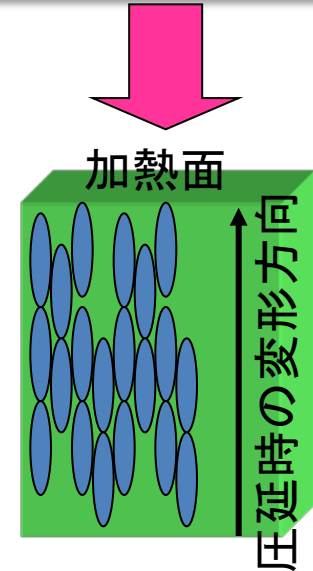
赤外サーモグラフィ検査用架台に組み込まれたPFU#1
(3体のPFUを同時に検査可能)

- ・ ITERダイバータの設計
- ・ ITERダイバータの調達
 - クオリフィケーション
 - 実規模プロトタイプ製作
- ・ 原型炉固体壁ダイバータに向けたタングステンダイバータの開発



原型炉固体壁ダイバータに向けた タングステンダイバータの開発

- タングステンの主な仕様（ITER）
 - ASTM B760-86規格に従う純タングステン
 - 圧延材（圧延方向は右図参照）
 - 加熱面となる面においてASTMの粒度番号3もしくは、それ以上の細粒
 - 硬度は、ビッカース硬さ（HV₃₀）として410以上
 - 密度は19.0g/cm³以上
- 上記の仕様は既にQP製作において要求されており、国内外の複数のタングステン製造メーカーにて製作可能であることを確認済み。

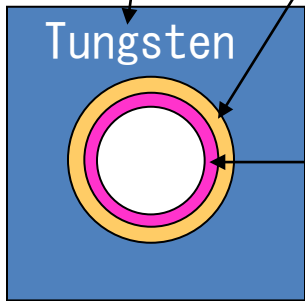




フルタングステンダイバータの開発 -無酸素銅製造層をもつHIP型タングステン-


“エスタン”

Near-net-
shape HIPing
（“エスタン”）



無酸素銅製造層
（NDB法）

CuCrZr冷却管
（NDBによる無酸素銅層施
工後にロウ付け）

Type	ST01
Microstructure	
W content (%)	Above 99.95
Density (g/cm ³)	19.20
Relative Density (%)	99.5
Hardness (HRA)	71.5 equiv. 410 (Hv)
Bending strength (GPa)	1.5
Thermal conductivity (W/m/k)	176
Application	* melting pots , deposition electrodes * nuclear power parts , nuclear fusion parts

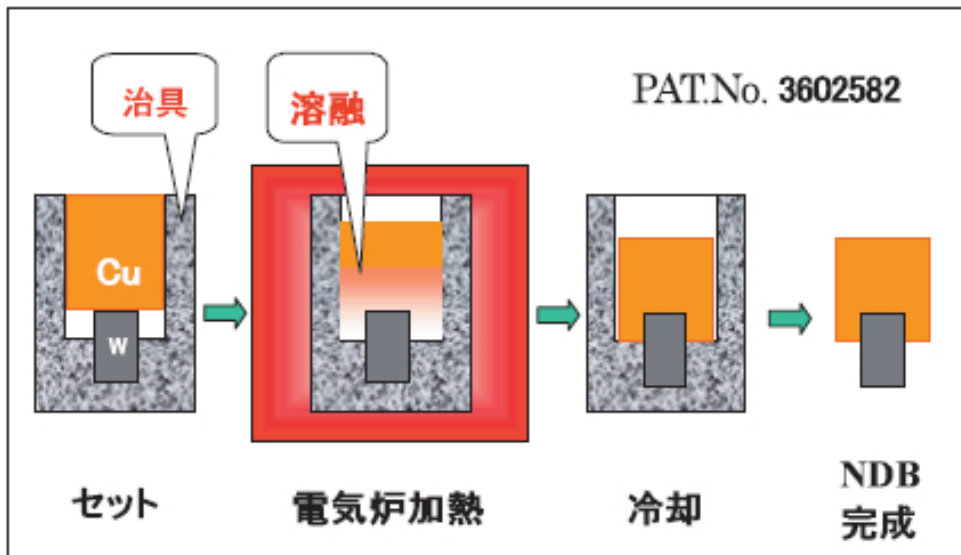
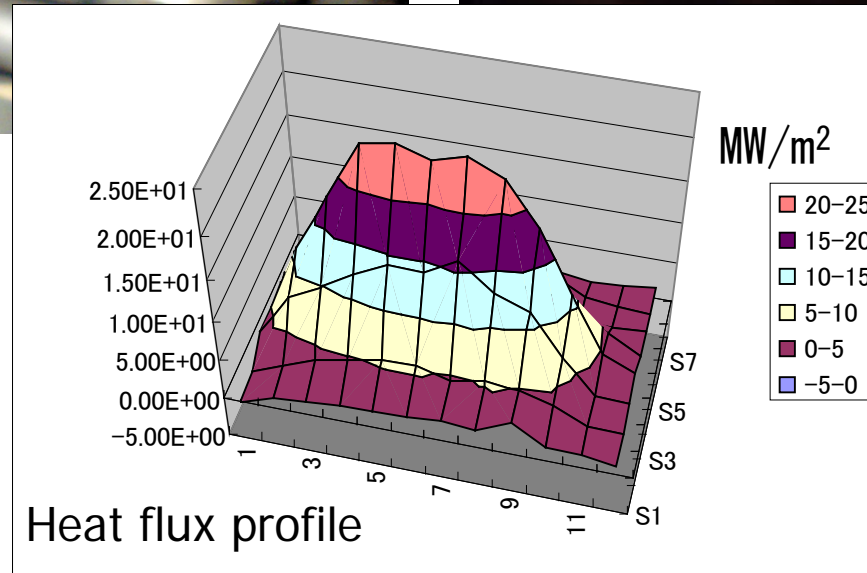
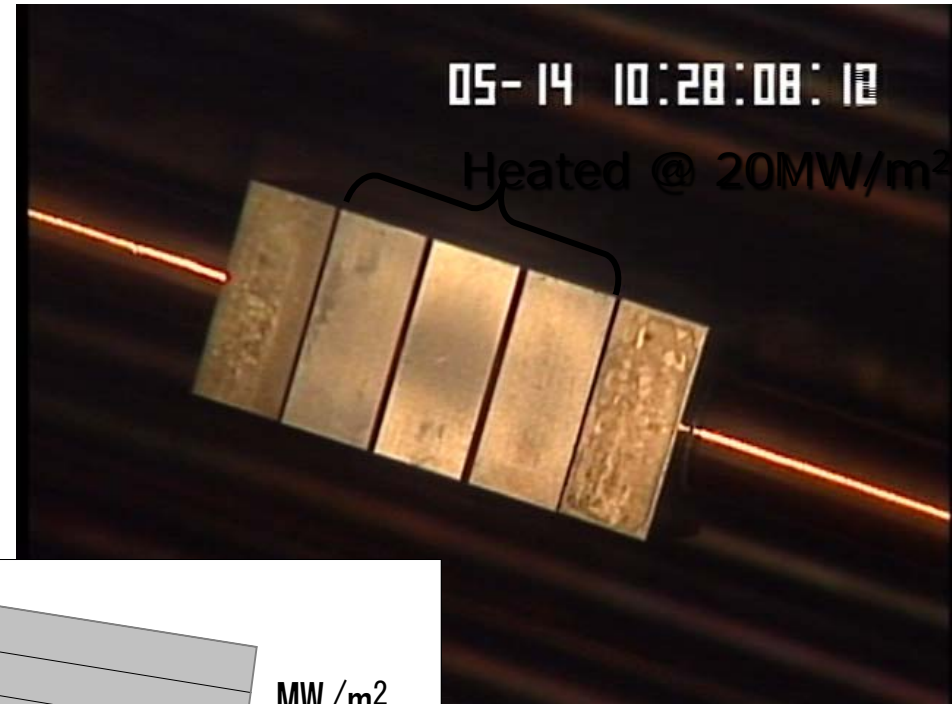
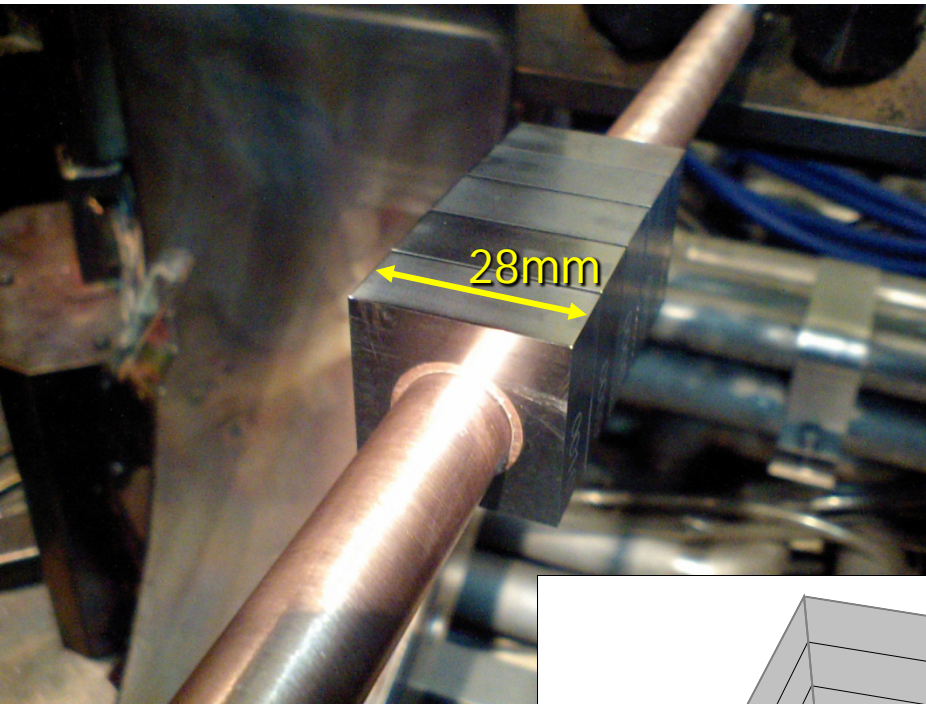


図1 NDBの工法

- “エスタン”はHIP材のため結晶方向は等方的→ITERの要求仕様外（要求仕様は圧延材）
- “エスタン”&“NDB”：日本タングステン株



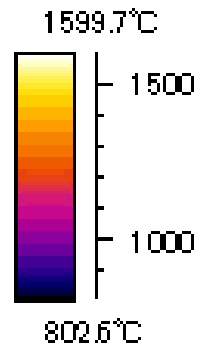
“エスタン+NDB”ダイバータ試験体



“エスタン+NDB”ダイバータ試験体の 高熱負荷試験

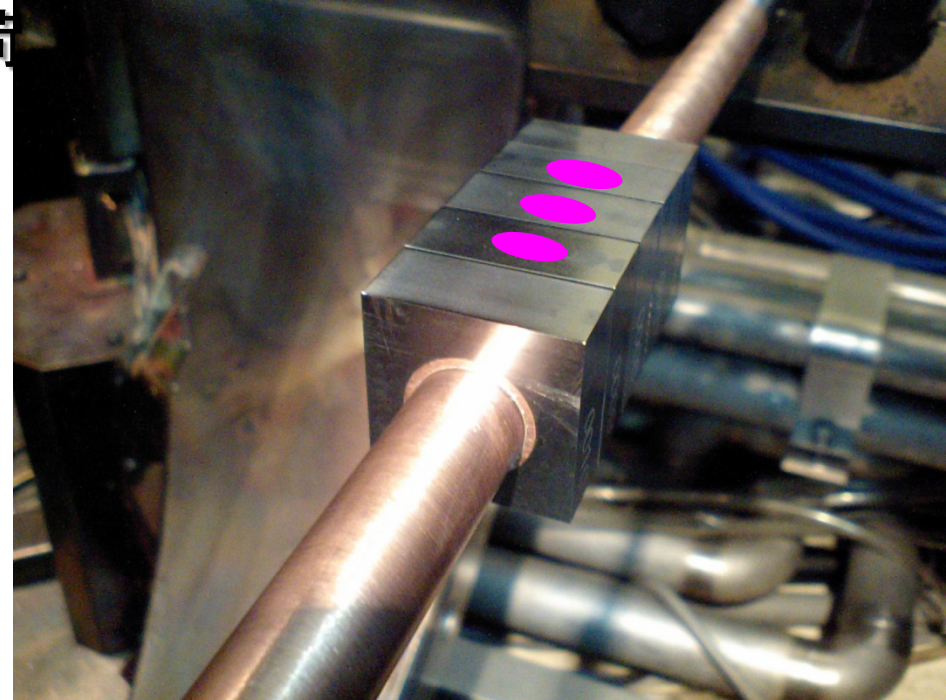
- 熱負荷 : 5 MW/m² x 1000 cycles → 変化なし
- 熱負荷 : 10 MW/m² x 350 cycles → 変化なし
- 熱負荷 : 15 MW/m² x 1000 cycles → 再結晶開始?
- 熱負荷 : 20 MW/m² x 1000 cycles → 再結晶進行
- 加熱時間 : 10秒間電子ビーム加熱 / 20秒間休止
@ 20MW/m²

05-14 11:50:43.21



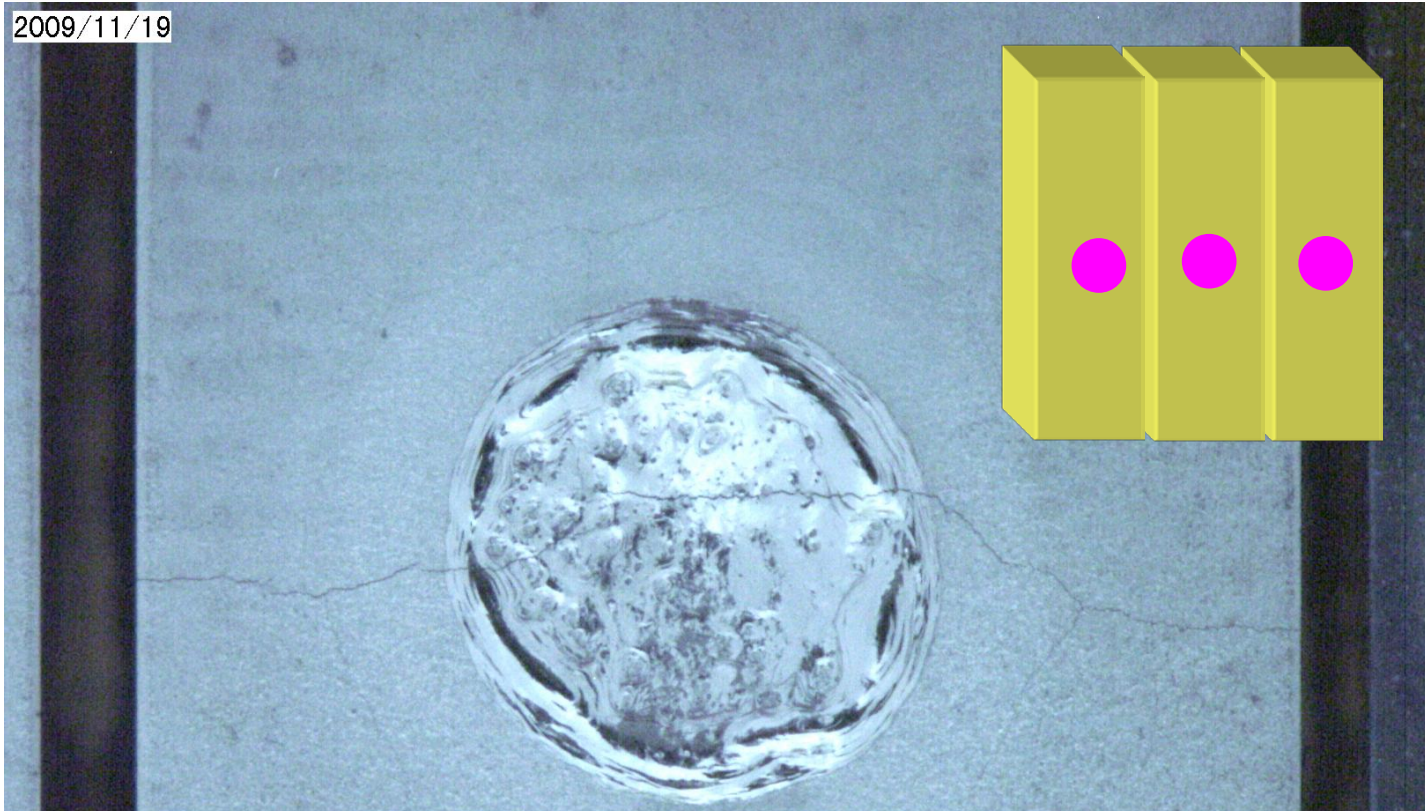
熱負荷20MW/m²での加熱時の表面最高温度は、タングステンの再結晶温度を超える1600°C以上となったが、2体の試験体は共に、1000サイクルの繰り返しに対して、亀裂やホットスポットを生じることはなかった。²⁴

- HIP材のディスラプション熱負荷に対する溶融/破壊挙動の確認
 - 再凝固層に生じる凝固割れ
- 熱負荷： $\sim 2\text{GW}/\text{m}^2$
- 加熱時間： $\sim 3\text{ms}$
- 繰り返し数：1回



“エスタン+NDB”ダイバータ試験体に発生した亀裂

2009/11/19



- 再凝固層に生じた凝固割れが、再凝固層だけでなく未照射部表面にも進展。
- 粉末冶金/HIP材の等方的な性質から割れが進展しやすい傾向にある。
- →ITERでは「圧延材」が要求仕様
- →圧延材+NDB法を用いたタングステンアーマを実規模プロトタイプで試験予定。



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。
- CFCアーマの接合技術開発の結果、従来の無酸素銅に代え、タングステン銅材を緩衝材として採用し、ITER機構に了承された。
- 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。（震災影響のため）
- PFU#1の非破壊検査において判明したCFC部の接合不良の原因調査を実施し、ガスクエンチ時のCFC部の過度な冷却速度に起因することを明らかにすると共に、対策を実施してPFU#2の製作要領に反映した。
- 原型炉に向けたタングステンドイバータ開発の一環として、HIP成形＋無酸素銅鑄造型タングステンを用いた小型試験体を開発し、最大20MW/m²の繰り返し加熱1000サイクルに対して耐久性を確認した。