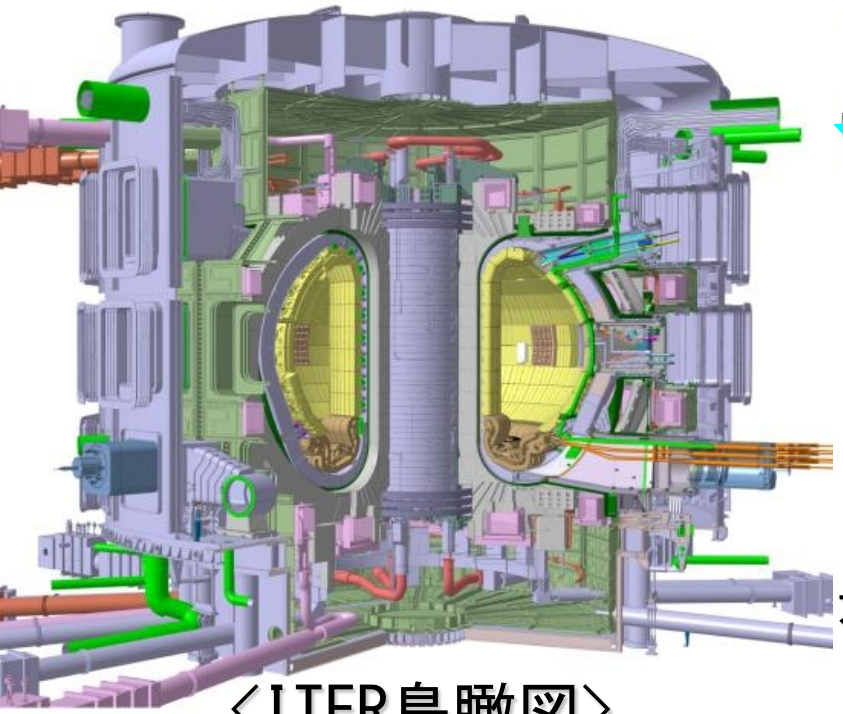
筑波大学プラズマ研究センターシンポジューム
双方向型共同研究「磁化プラズマ中の壁不純物粒子挙動とプラズマ特性への影響」
第1 回プラズマ物理クラスター・スクレープオフ層とダイバータサブクラスター
第1 回炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター
第2 回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター
平成26 年7 月31 日(木)～8 月1 日(金)
筑波大学　大学会館　国際会議室

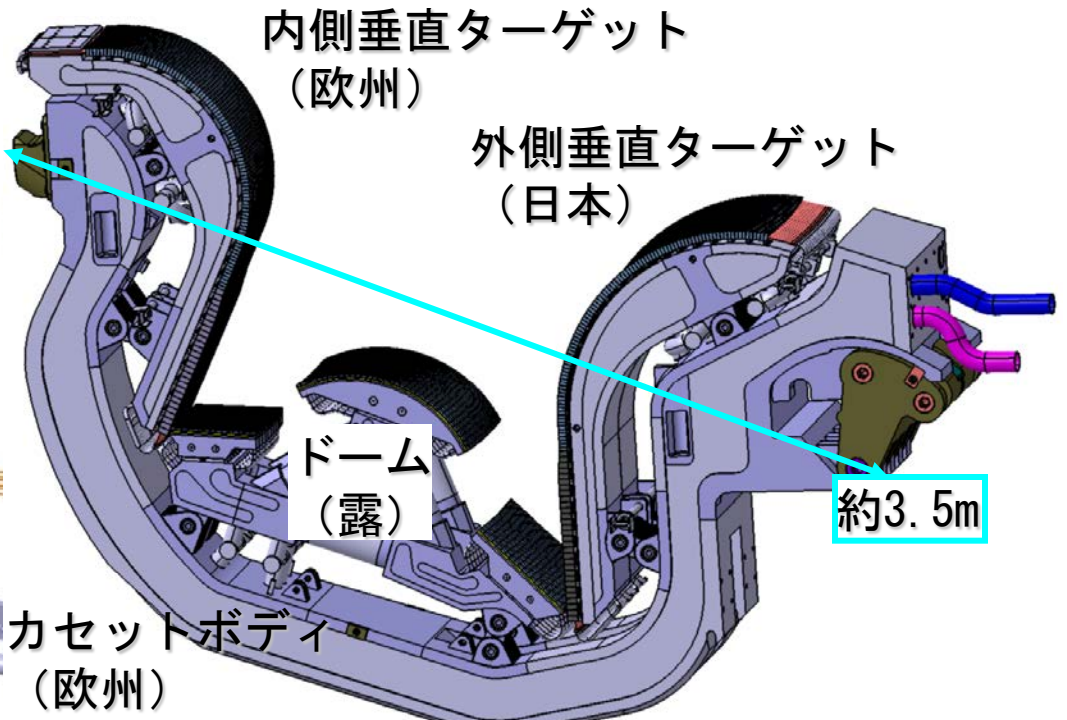
ITER ダイバータ製作の進展と課題

核融合研究開発部門
ITERトカマク本体開発グループ
鈴木　哲

ITERダイバータ



〈ITER鳥瞰図〉



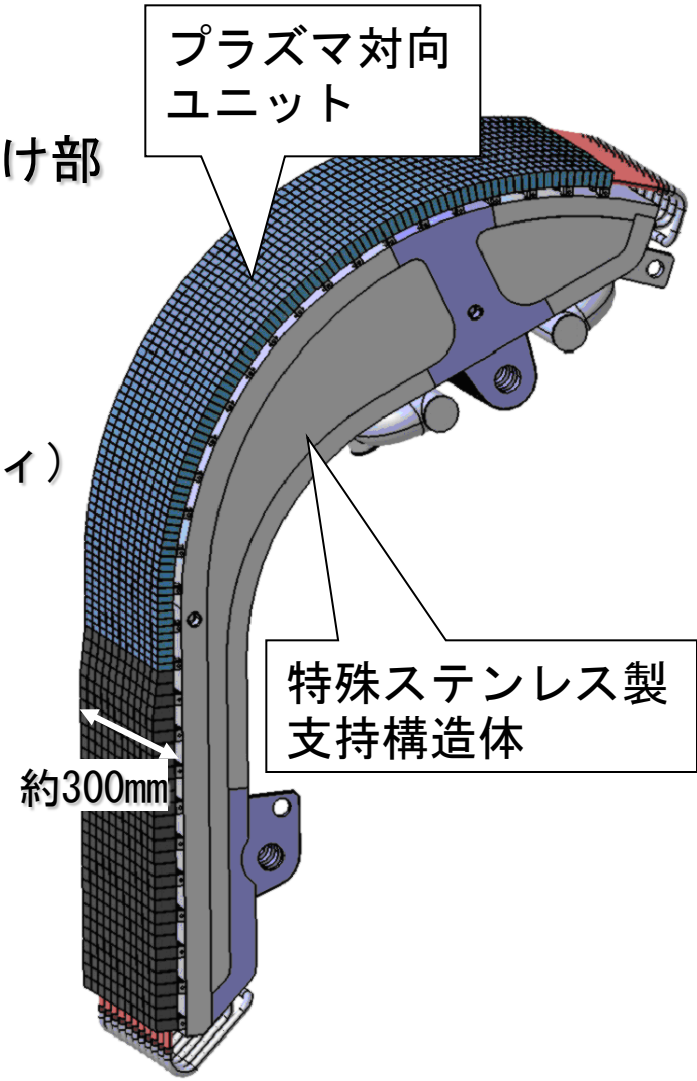
〈ダイバータ〉

ダイバータは右の図のようなカセット構造を有しており、カセットボディと呼ばれる冷却水マニフォールドを兼ねた支持構造に高熱負荷受熱機器（外側/内側垂直ターゲット、ドーム）が設置される。
ITERではこのようなカセット54個をトーラス状に設置してダイバータを構成する。
JADAは外側垂直ターゲットの全数（60.5カセット分）を製作する。
2009年6月、ITER機構と調達取り決めを締結し、外側垂直ターゲットの製作を開始した。

外側垂直ターゲット調達の概要

- 段階的な調達（4つのStage）
  - Stage 1：実規模プロトタイプの製作
    - クォリフィケーション（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）
        - 》2回の高熱負荷試験を完了
      - 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

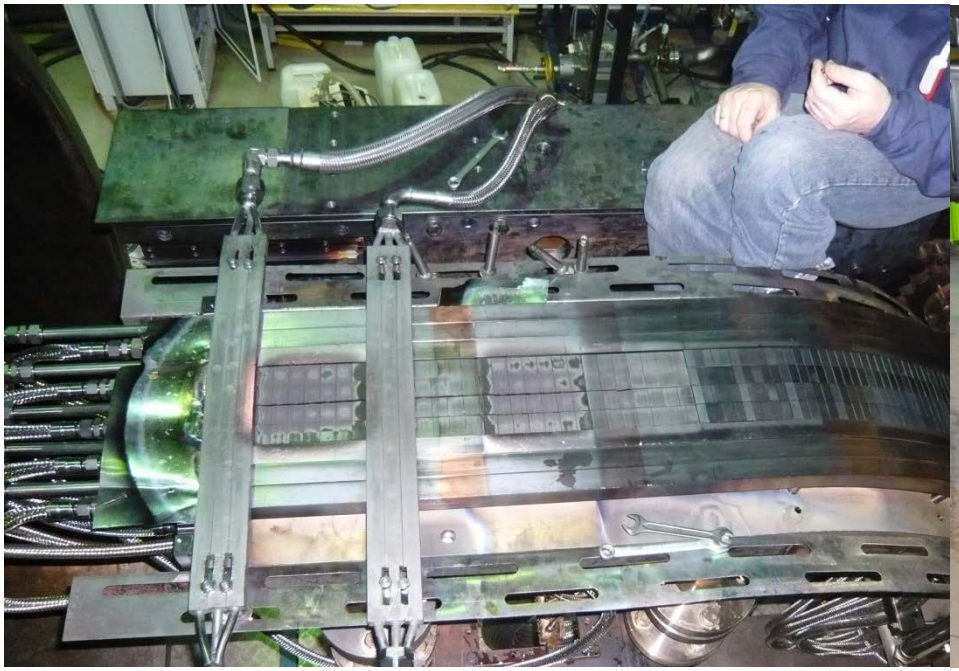
※Stage 2～4の実施期間：2014年度～2021年8月（暫定）



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）

プロトタイプ用プラズマ対向ユニット2号機の高熱負荷試験

- 実規模プロトタイプ用プラズマ対向ユニット2号機(PFU#2)を、RFDAに輸送して高熱負荷試験（第2回）をエフレモフ研究所にて実施。
- PFU#2では、CFCアーマ部及びWアーマ部に対して、所定の熱負荷条件（CFC材製ターゲット部：熱負荷10MW/m2×1000回及び20MW/m2×500回、タングステン製バッフル部：熱負荷5MW/m2×1000回）に対して、PFU#2は除熱性能の劣化もなく、無事、高熱負荷試験に合格。

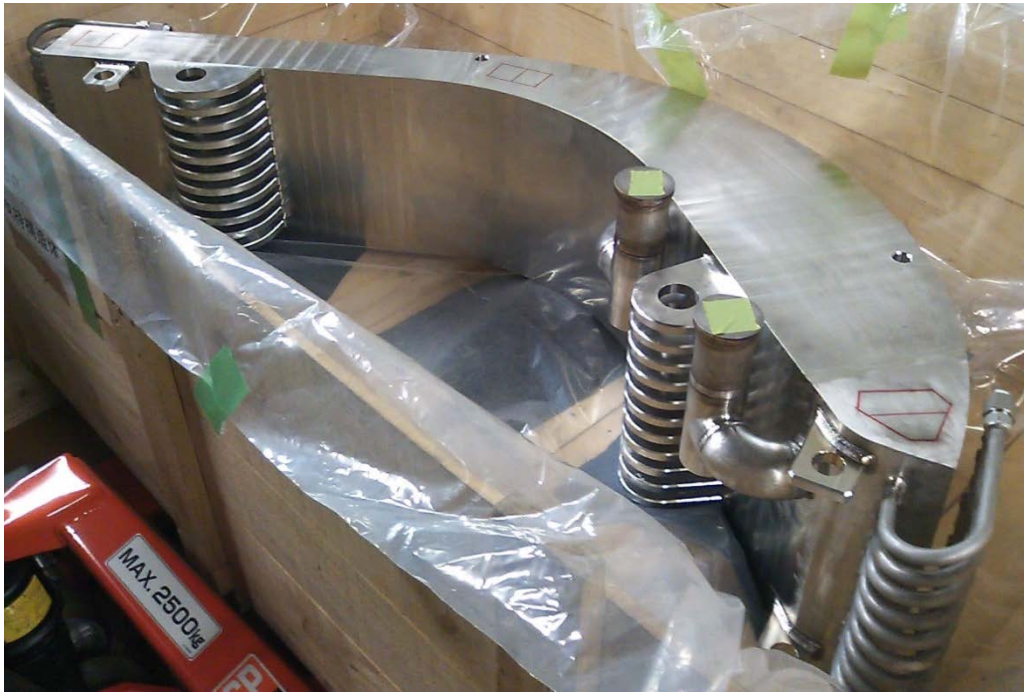


ITERダイバータ用電子ビーム試験装置(IDTF)におけるCFC部の高熱負荷試験実施後のPFU#2の様子と那珂研に返送されたテストアセンブリ

ステンレス製支持構造体の製作

- 2011年度より開始したステンレス製支持構造体の製作を完了。
- 製作期間中にはITER機構のQA担当者による溶接施工の検認作業や視察（Spot Check）を実施。
- 2013年12月にステンレス製支持構造体が那珂研に納入。

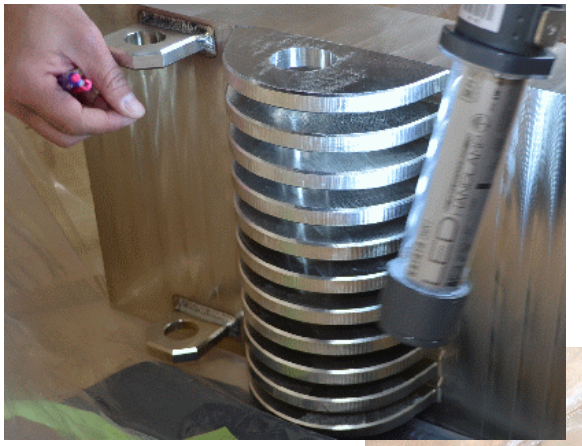
ITER機構QA担当者による溶接施工の検認
（2013年8月）

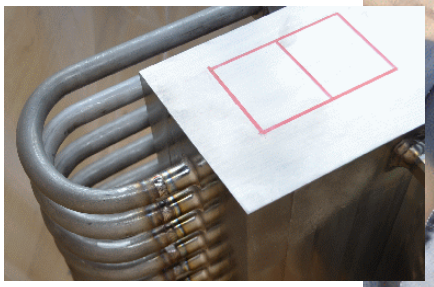


那珂研に納入されたステンレス製支持構造体
（2013年12月）

ステンレス製支持構造体製作過程において明らかになった課題と対処

- 製作施工
  - 支持構造体の機械加工：鍛造材の大きさによって加工のし易さ（加工用刃物の消耗量）や加工後の変形（昨年度既報）が大きく異なるため、鍛造材に代えて圧延板による製作の可能性も今後検討する

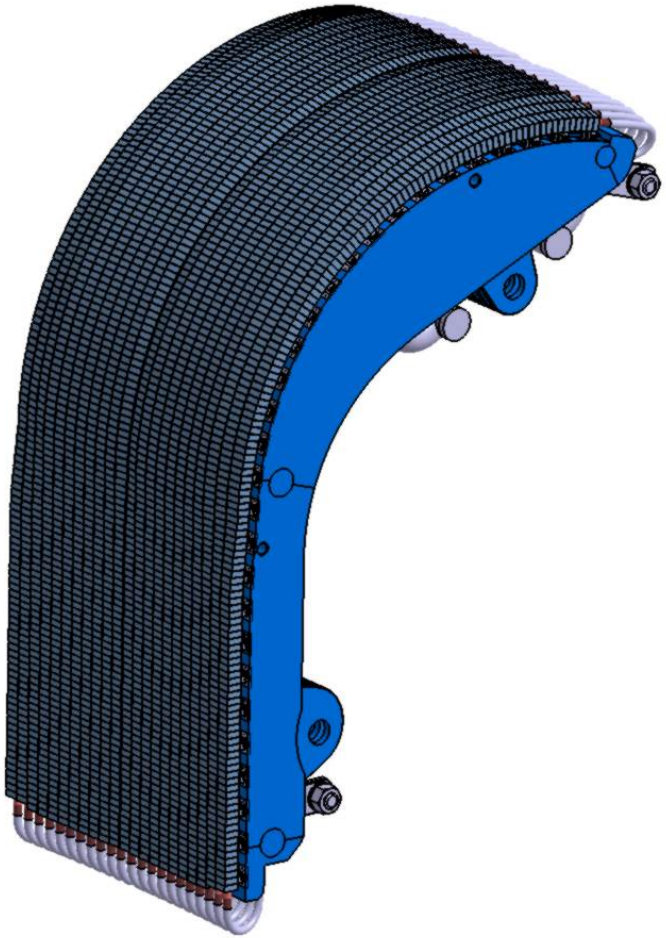




- 試験検査
  - 支持構造体のNDT：現状の設計では、非破壊検査用の<u>開口部（窓）</u>が別途必要となる点、また、接続配管の溶接と検査を接続配管1本ずつ交互に実施せざるを得ない点など、工程に影響を及ぼす検査作業があるため、その合理化を含め、製作設計及び施工要領の見直しを実施する

ダイバータターゲットの設計変更

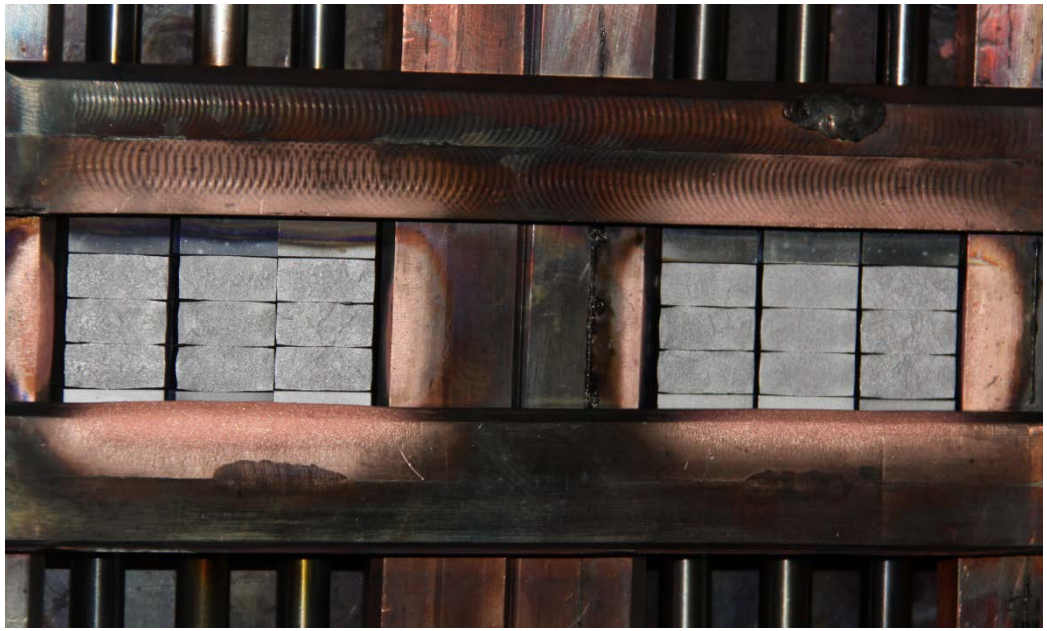
- 2011年10月に開催されたITERの諮問委員会（科学技術諮問委員会（STAC）、運営諮問委員会（MAC））において、ITER機構から運転当初から原型炉を指向したタングステンダイバータを装荷し、運転期に使用するダイバータの総セット数を3から2に減じるコスト低減案が提案され、ITER理事会（IC）において、今後2年間を目処にタングステンダイバータ開発を集中的に実施し、ダイバータアーマ材の最終的な選定を実施することとなった。
  - 上記のアーマ材の選定に向け、2012年12月に原子力機構はITER機構とタングステンダイバータに関するR&Dタスクを締結し、現行の調達取り決めに基づく実規模プロトタイプの製作と並行し、フルタングステン小型ダイバータ試験体の開発に着手した。
  - 2013年9月、タングステン小型ダイバータ試験体の高熱負荷試験（エフレモフ研）を完了し、全ての試験体（6体）が合格した。
- 2013年11月のICにおいて、運転当初からダイバータターゲットをフルタングステン化する旨の決定がなされた。



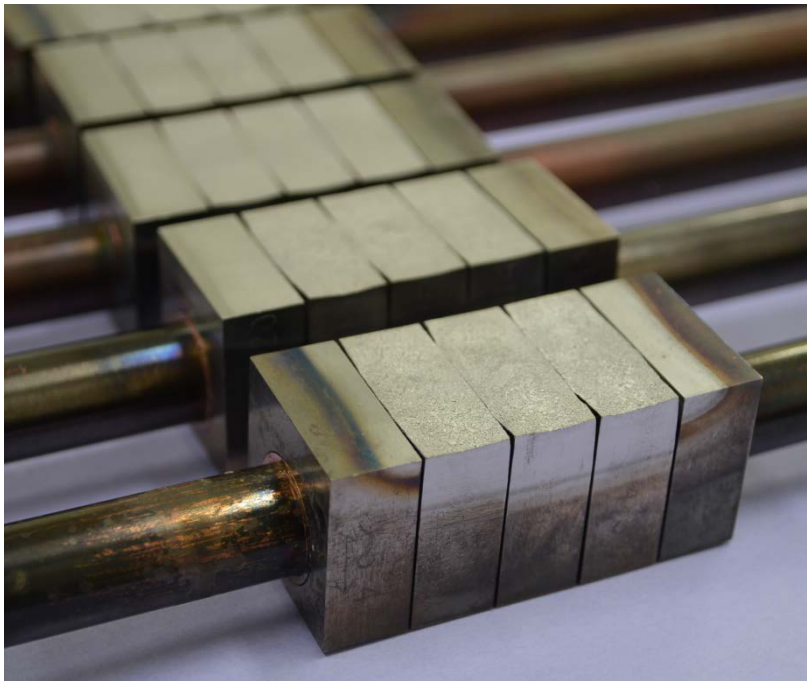
フルタングステンダイバータ外側ターゲットの構造（バッフル部にRoof-shapingと呼ばれる台形状のタングステンアーマを採用）

フルタングステンダイバータターゲット開発（R&Dタスク）

- フルタングステンダイバータ開発に関するタスク取り決めに基づく活動
  - 2013年、小型試験体によるクォリフィケーションを完了→高熱負荷試験を実施した6体の小型試験体では、タングステンアーマの割れもなく、全てが合格と判定され、2014年より実規模プロトタイプの製作に移行した。

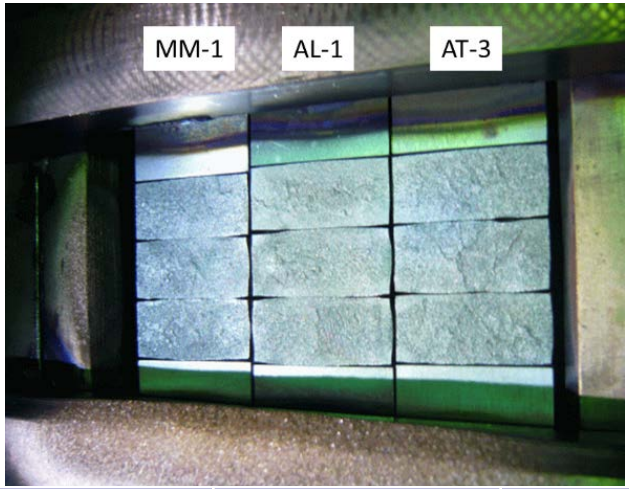


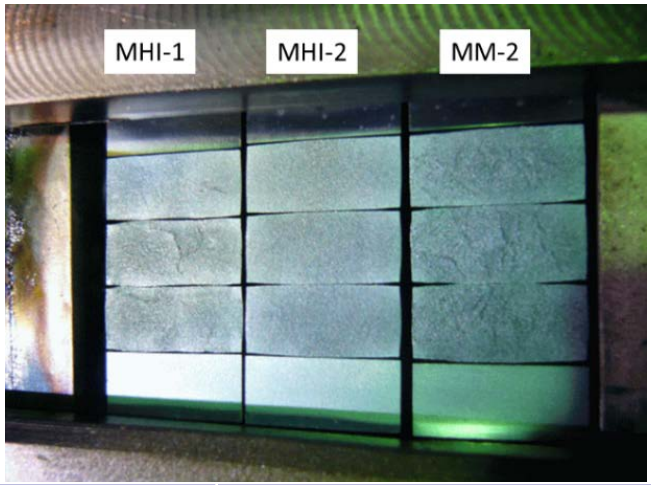
IDTFにおいて高熱負荷試験を実施中の小型試験体
（6体を一括して試験可能）



高熱負荷試験後の試験体の外観
（加熱面側に再結晶が進行しているものの亀裂は発生していない）

タングステン小型ダイバータ試験体の概要



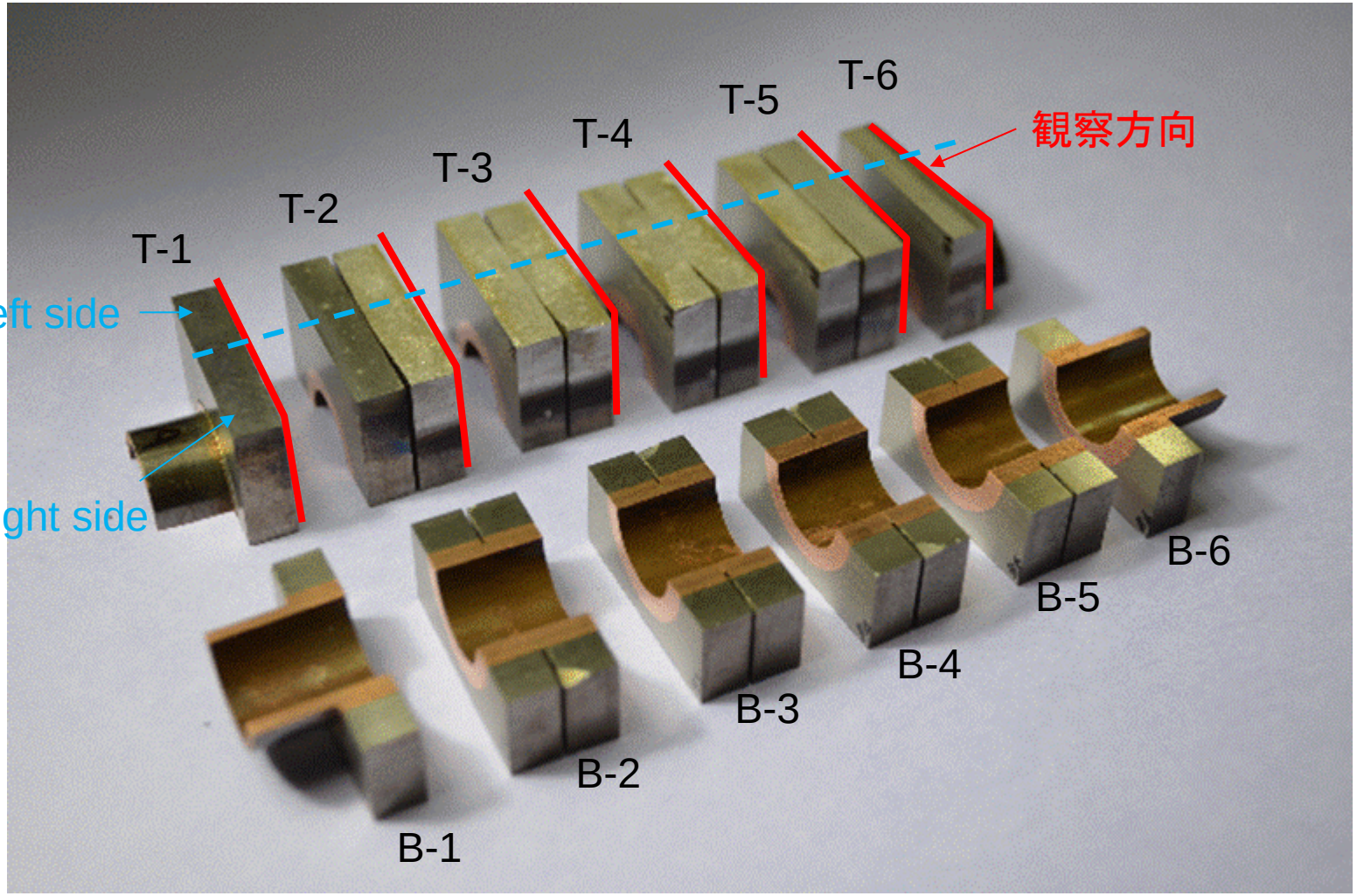


加熱試験終了後の試験体
- 5000 cycles at 10 MW/m^2
- 1000 cycles at 20 MW/m^2

試験体ID	製作メーカー	Wメーカー	Remarks
MM-1	KHI	MMCMI	加熱試験後に切断検査
AL-1	KHI	ALMT	加熱試験のみ
AT-3	KHI	AT&M(China)	加熱試験後に限界熱流束試験を実施し、切断検査
MHI-1	MHI	ALMT	加熱試験のみ
MHI-2	MHI	ALMT	加熱試験後に切断検査
MM-2	KHI	MMCMI	加熱試験のみ

❒ 目視可能な亀裂や表面溶融はなく、除熱性能も劣化なし。
❒ 熱疲労による冷却管からの冷却水漏洩ない。

MM-2試験体の切断検査

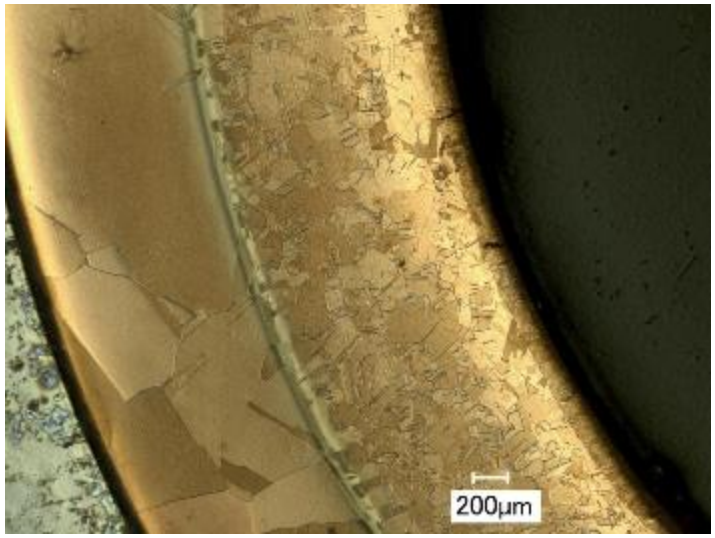


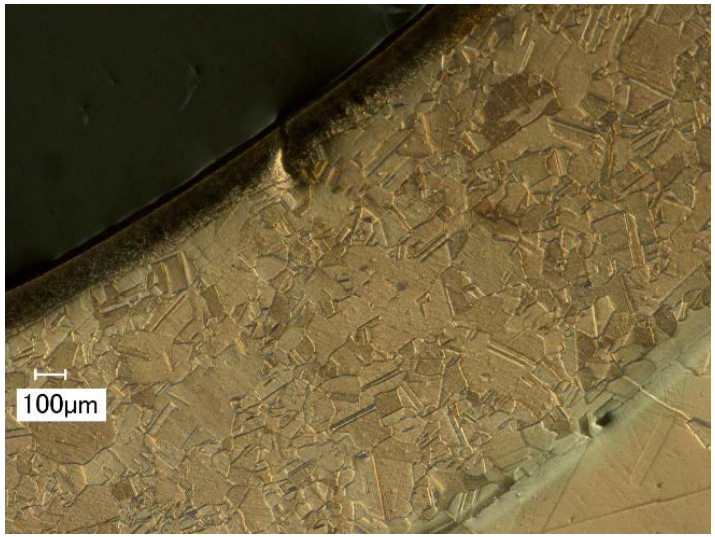
W/無酸素銅/CuCrZr冷却管接合界面の金相観察

- CuCrZr冷却管の結晶粒径は試験後も100ミクロン以下
- W/無酸素銅界面及び無酸素銅/CuCrZr界面に接合欠陥は観察されなかった
- CuCrZr冷却管に大きな塑性変形
- CuCrZr冷却管内壁の酸化層に微小な亀裂

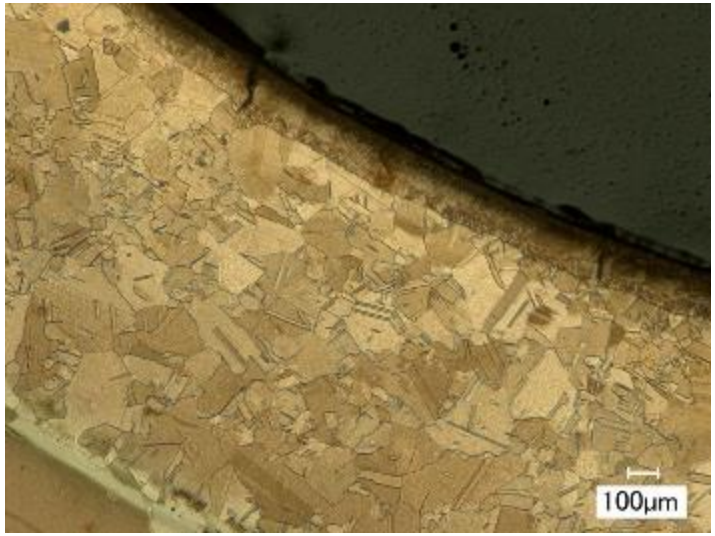
1. 微小亀裂の多くは酸化層とCuCrZr母材の界面で停留
2. 酸化層とCuCrZr母材の界面を超えて進展した微小亀裂もCuCrZrの最初の結晶部分で停留
3. 現在、CuCrZr冷却管製作メーカーと冷却管内壁の酸化層の除去のための試作を行っているところ

冷却管内壁に生じた微小亀裂の様子

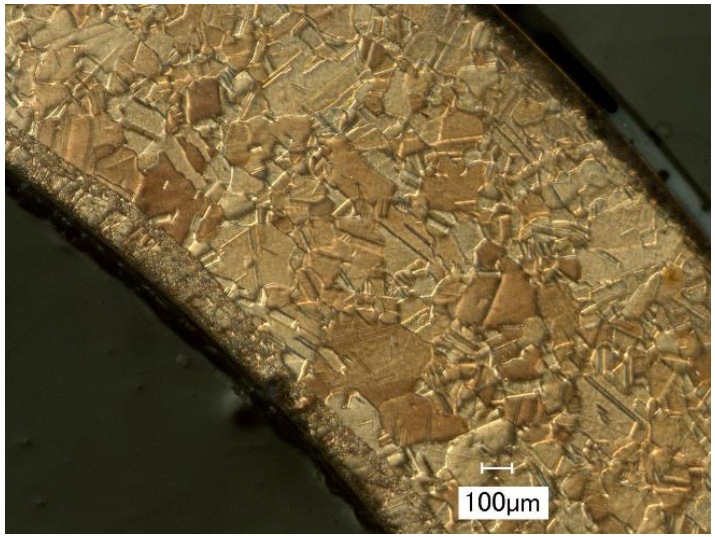




B-5-Left



B-4-L



B-6-Left

Results of HHF testing for full W pre-qualification

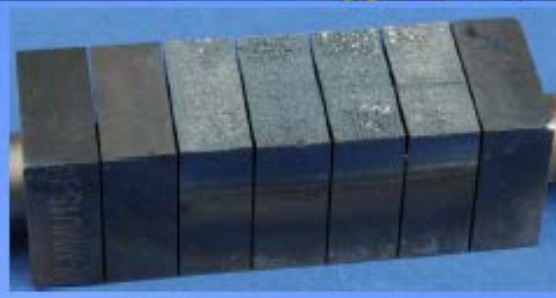
IDTF-Efremov

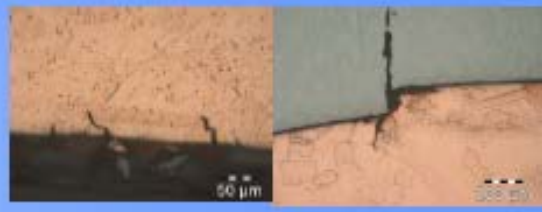
3 Plansee and 3 Ansaldo mock ups tested at Efremov IDTF facility (5000 cycles at 10 MW/m^2 + 300 cycles at 20 MW/m^2 + Critical Heat Flux > 28 MW/m^2

3 W PLANSEE mock-ups, (nominal (5000 cycles at 10 MW/m^2 + 300 cycles at 20 MW/m^2)**Full W qualification test plan + 700 cycles @ 20 MW/m^2) → 2 leakages after 529 and 713 cycles at 20 MW/m^2**

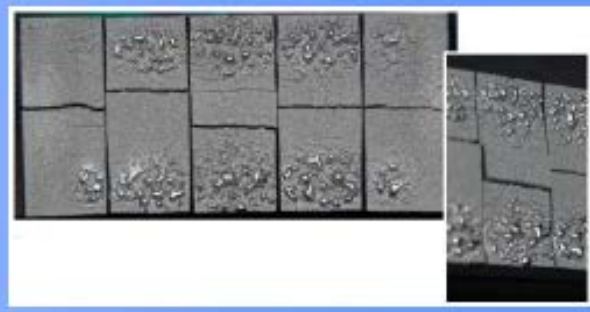
FE 200:

- **5 W ANSALDO mock-ups and 3 W PLANSEE mock-ups, (nominal Full W qualification test plan + 700 cycles @ 20 MW/m²) → No leakage** but W macrocracking and surface alteration, CuCrZr small cracks.





- 3 W PLANSEE mock-ups → (nominal Full W qualification test plan + 700 cycles @ 20 MW/m²) → No leakage but W macrocracking and surface alteration.



- **PLANSEE medium size prototype (reached 5000 cycles @ 10 MW/m², 616 cycles @ 20 MW/m²** with leakage)

まとめ

- 現行の調達取り決めに基づく実規模プロトタイプの製作の進捗
  - PFU#2の高熱負荷試験の実施と合格
  - ステンレス製支持構造体単体の製作を完了

  ※ダイバータターゲットのフルタングステン化設計変更を受け、上記の活動をもって現行の調達取り決めに基づく活動を完了

- タスクに基づくフルタングステンダイバータターゲットの開発
  - 小型ダイバータ試験体を用いたクォリフィケーションを完了
  - 2014年度より実規模プロトタイプ用プラズマ対向ユニットの製作を開始
  - 2015年度初頭に上記の実規模プロトタイプ用プラズマ対向ユニットをエフレモフ研に輸送し、高熱負荷試験を実施予定

- 今後のダイバータ調達の進め方に関して、ITER機構と協議中
  - なお、フルタングステン化に伴うコスト増に関して、関連する国内機関（JA、EU、RF）及びITER機構が協力し、WGを設置してコスト低減設計の検討を行っている