

テストブランケットモジュール用大面積熱負荷装置の開発の現状

量子科学技術研究開発機構（QST）

○管 文海, 廣瀬 貴規, 河村 繕範

背景-1、テストブランケットモジュール

- ✓ QSTは、水冷却固体増殖(WCCB)方式を採用したテストブランケットモジュール(TBM)の研究開発を進めており、ITERへの設置を計画している。
- ✓ 数値解析を実施し、**仏国の圧力容器規格との比較**を通じて、サブモジュールの**構造健全性を検証**した[1]。[1] W. Guan et al., FED, 2023.

Fig. 1 ITER真空容器断面(左)とWCCB TBM-setのCAD図(右)

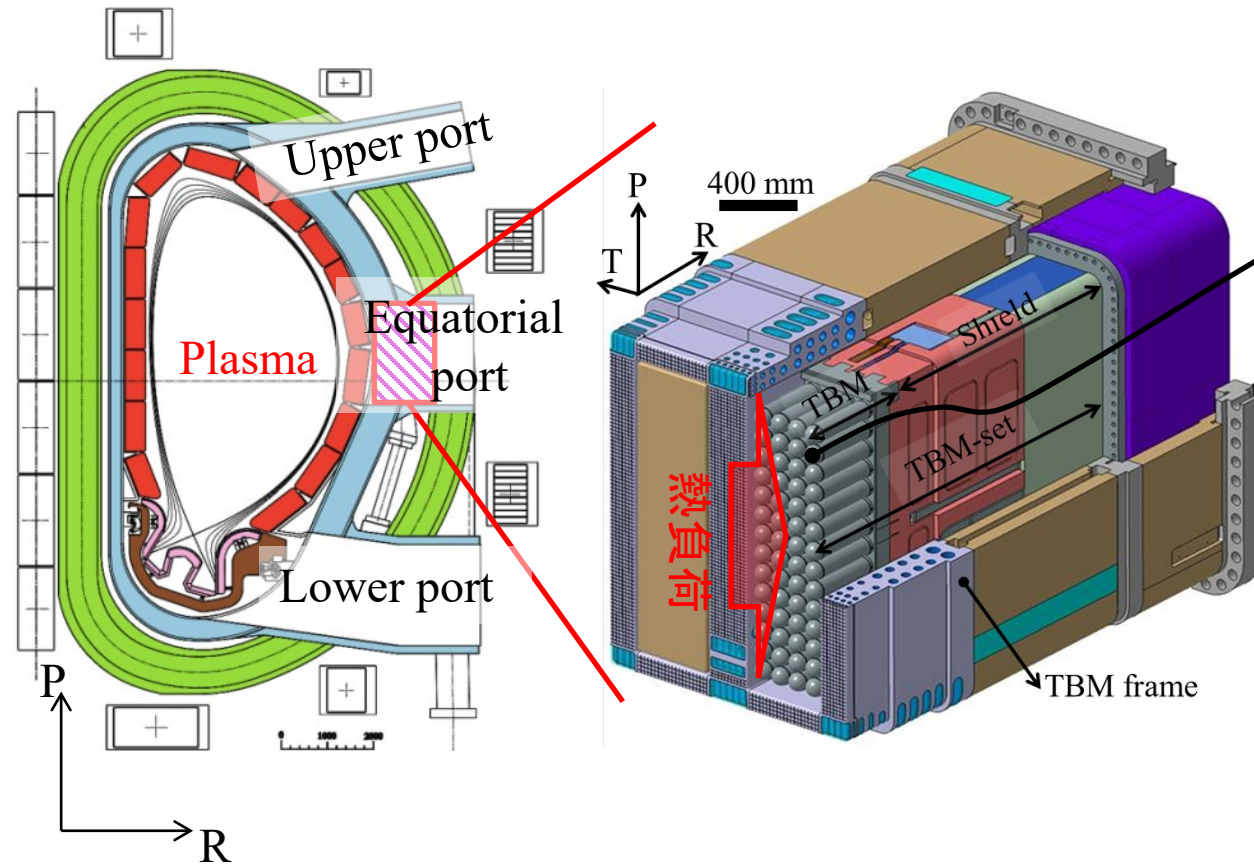


Fig. 2 サブモジュールの構造

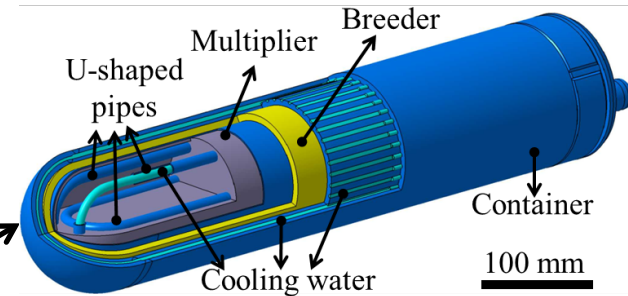


Fig. 3 サブモジュール試作体[2]



[2] T. Hirose et al., FED, 2023.

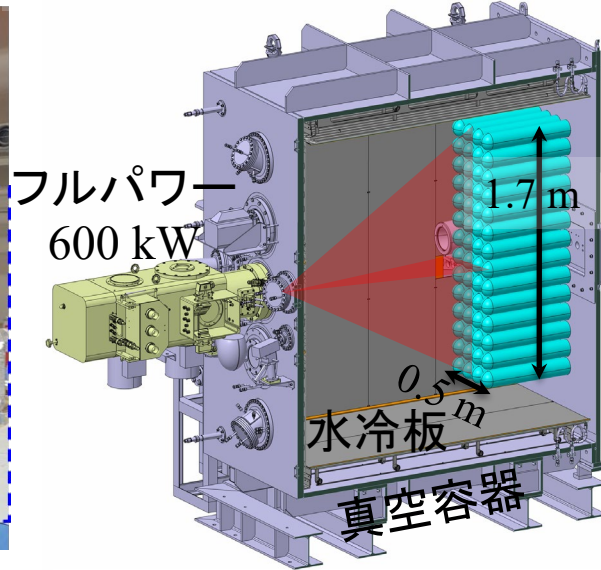
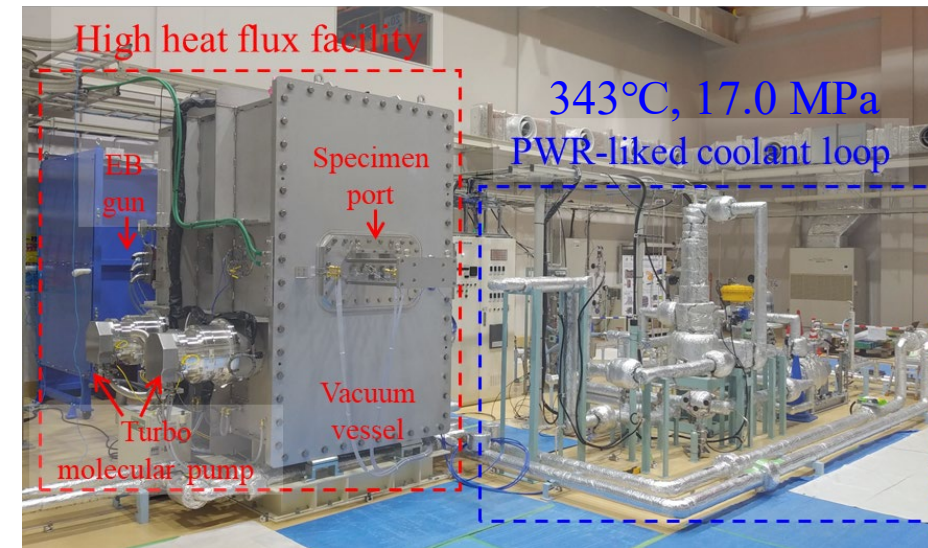
➤ **課題:**規格に明記されていない項目(冷却機能) : 試作体+実験により評価・検証を行う必要2

背景-2、大面積熱負荷装置と目的

- ✓ 大面積熱負荷装置は六ヶ所研に設置された。
- ✓ 高温高圧水を循環させることで、TBM運転時のITER熱負荷を模擬する。

Fig. 4 大面積熱負荷装置の配置

Fig. 5 電子銃と真空容器の構造



ITER TBMの熱負荷条件	
通常運転時	0.30 MW/m ²
ピーク時	0.84 MW/m ²
ELM時	2.4 MJ/m ²

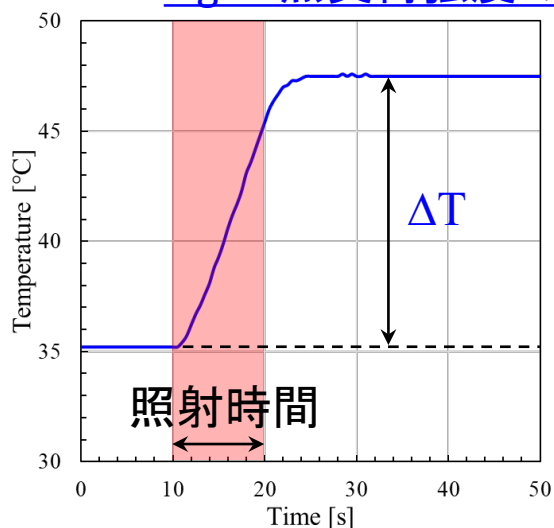
Fig. 6 熱負荷試験の手順



- 大面積熱負荷装置の開発の現状を報告する。
- 初期熱負荷試験の結果を報告する。

熱負荷強度の較正 カロリメータの設計・製作

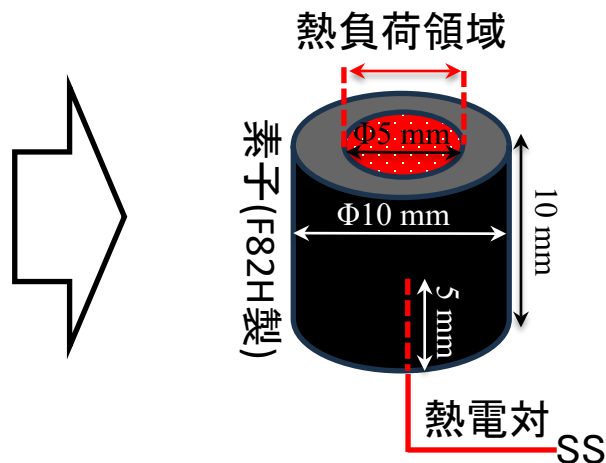
Fig. 7 熱負荷強度の較正原理



$$Q = \frac{C \cdot \rho \cdot V}{S} \cdot \frac{\Delta T}{\tau}$$

- Q : 熱負荷強度 [MW/m²]
- C : 比熱 [J/kg*K]
- ρ : 密度 [kg/m³]
- V : 素子体積 [m³]
- S : 受熱面積 [m²]
- τ : 照射時間 [s]
- ΔT : 温度差 [K]

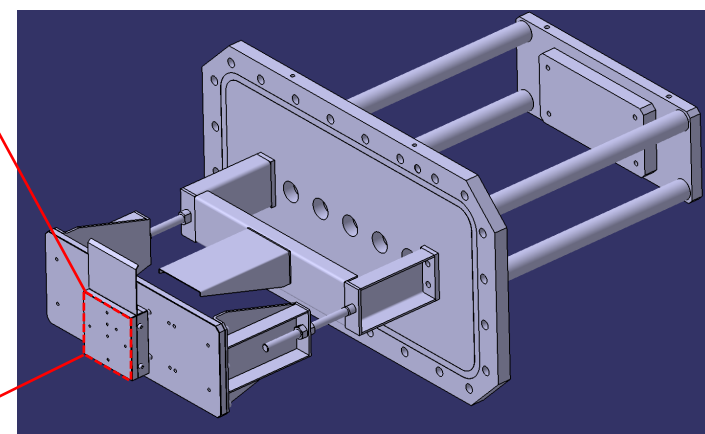
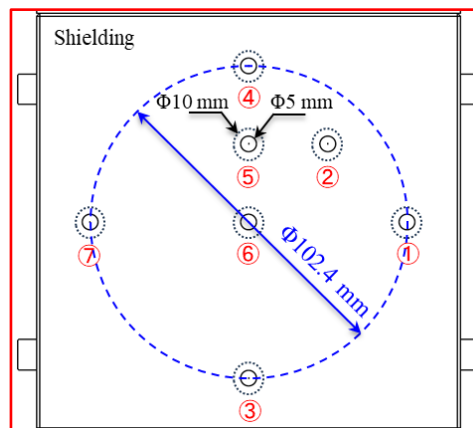
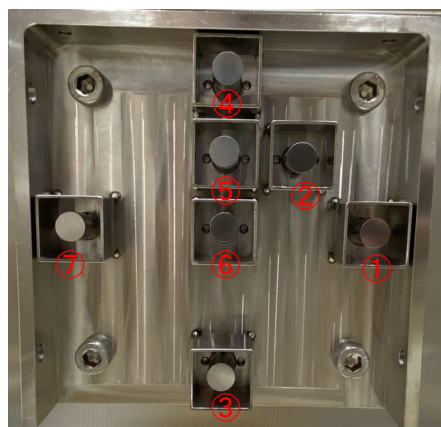
Fig. 8 素子の構造



- 目標熱負荷値を算出するためIc (カソード電流) とUb (ビーム電圧)をパラメタとしてΔTを測定した。

- 熱電対以外、素子は真空中に設置され、断熱状態になる。

Fig. 9 カロリメータの構造



- サブモジュールの熱負荷を計測できるカロリメータを設計・製作した。

熱負荷強度の較正 カロリメータの試験結果

Fig. 10 素子の昇温評価

目標熱負荷: 0.3 MW/m²
5.5秒間連続熱負荷

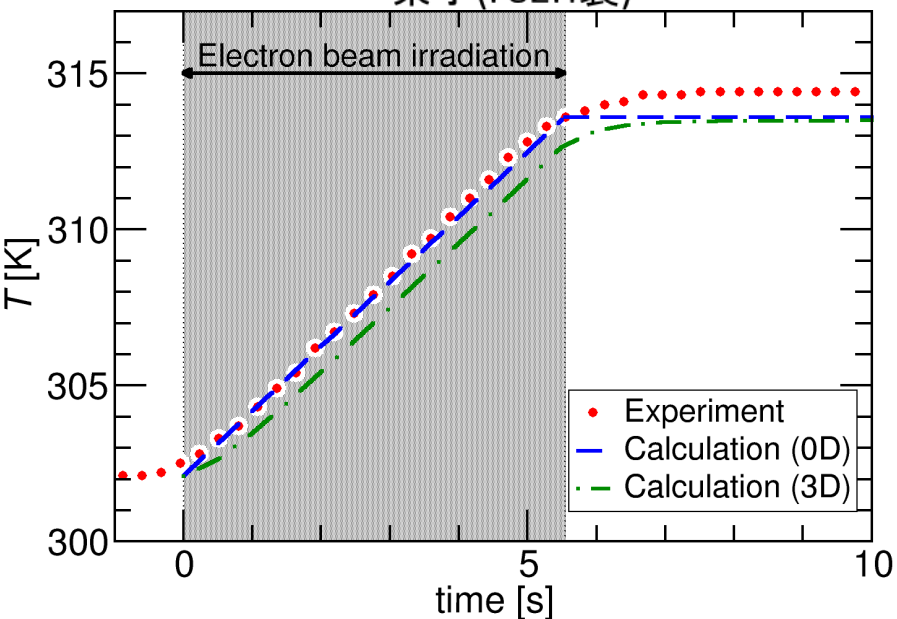
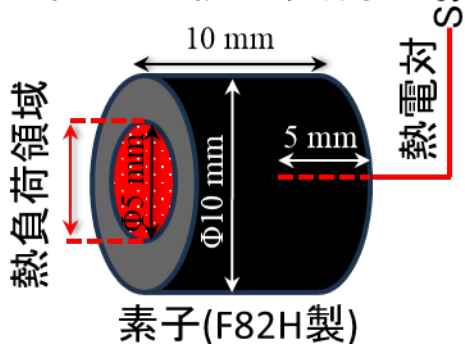
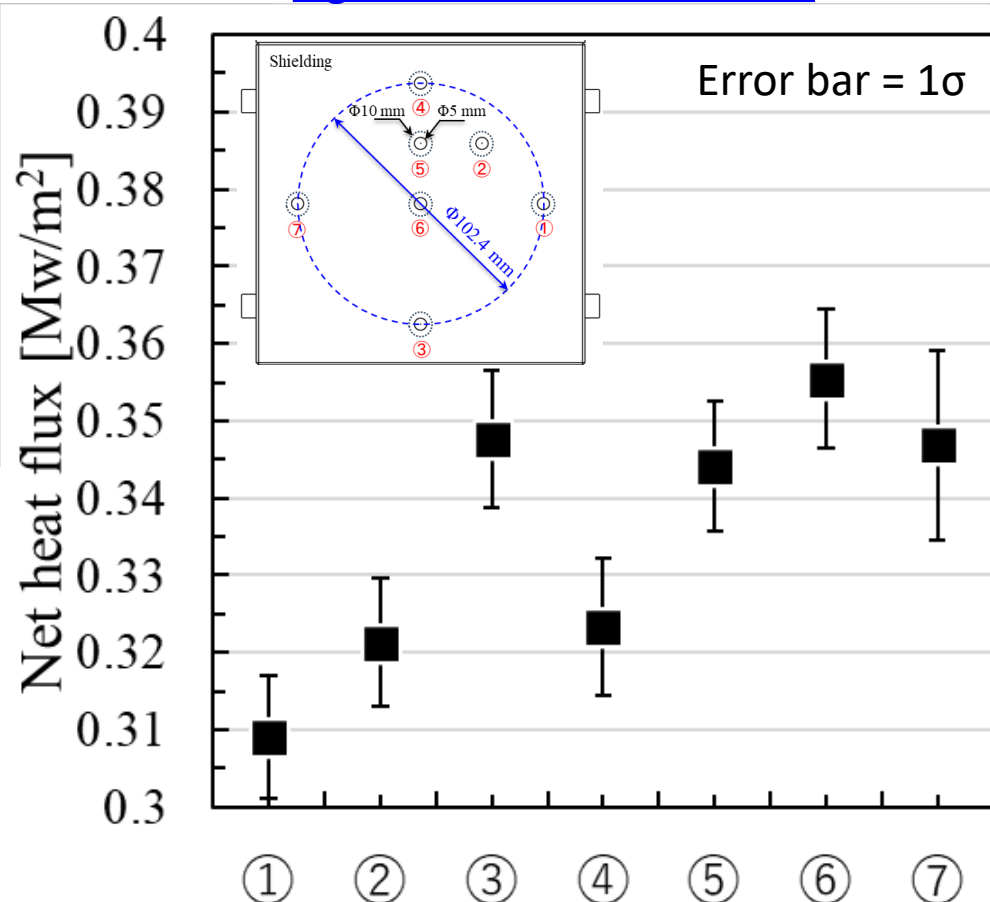


Fig. 11 熱負荷強度の評価



- Ic = 550 mA, Ub = 30 kVに設定した時、素子の位置に関わらず、0.3 MW/m²の熱負荷値強度を達成した。
- サブモジュールに対して、ITER通常運転時の熱負荷を模擬できる。

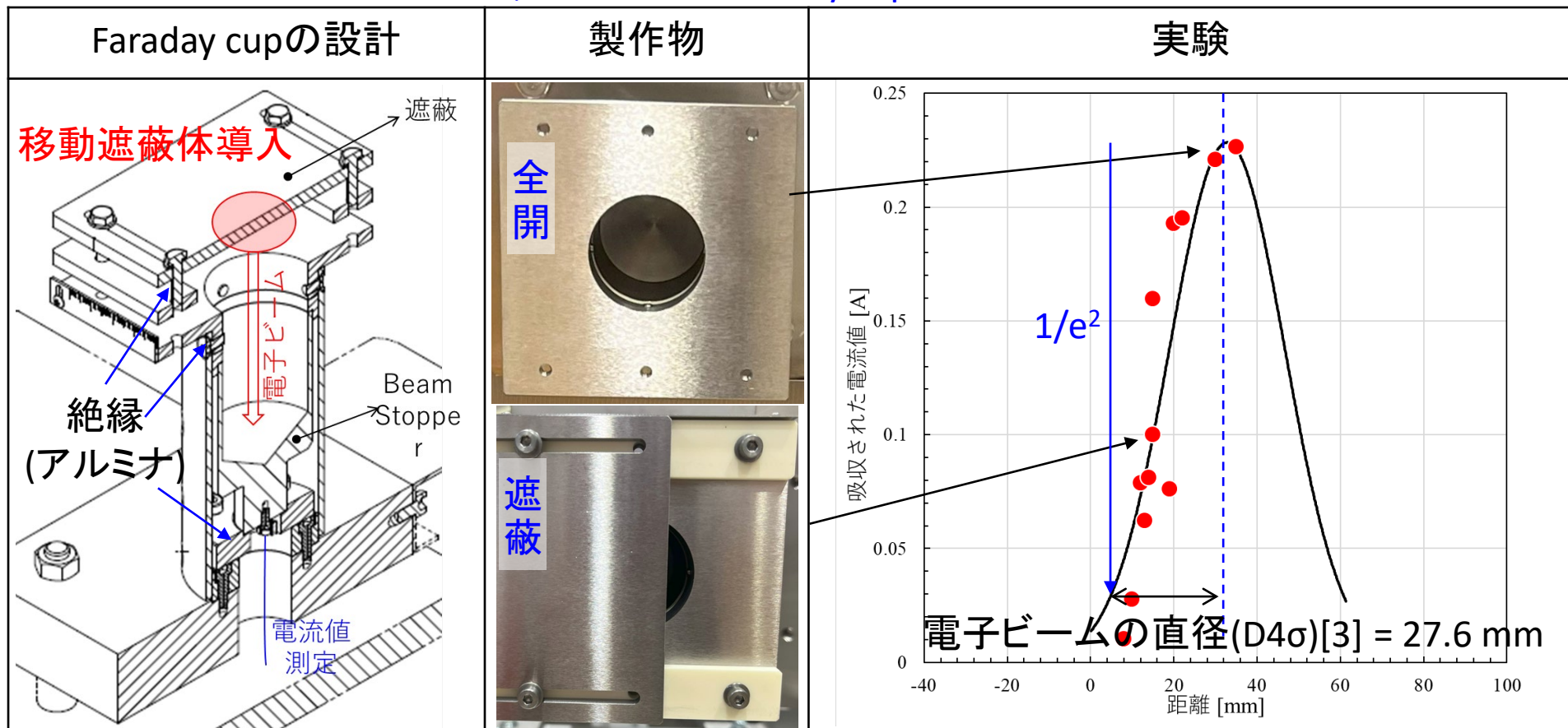
➤ 理論計算、FEM温度解析と実験結果に比べて、一致することが確認された。

ビームプロファイルの評価

Faraday cupの設計・製作・結果

- ビームプロファイル:ビーム径と電流値の関係。
- ビームプロファイルによって、電子銃の照射パターンを設定する。
- $I_c = 550 \text{ mA}$, $U_b = 30 \text{ kV}$ に設定した時のビームプロファイルを定量的に評価する。

図12, 設計されたFaraday cupの実験結果



- 移動遮蔽体を有するFaraday cupを設計し、電子ビームの直径とエネルギー分布(2次分布)を明らかにした。

[3] ISO11146 Beam Size Definitions.

非接触・非破壊式の温度計測 IRカメラの校正

図13, 温度校正用試験体

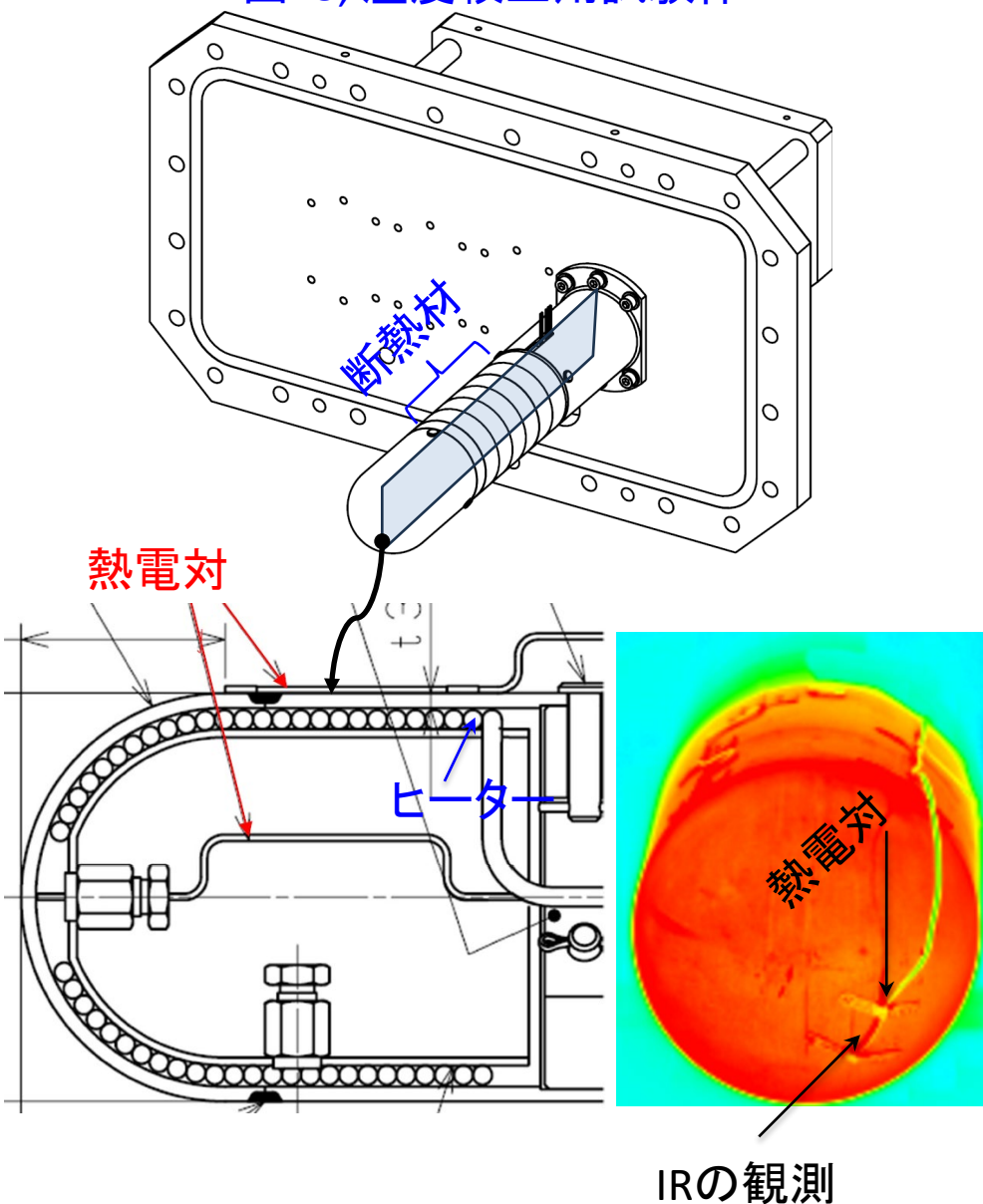
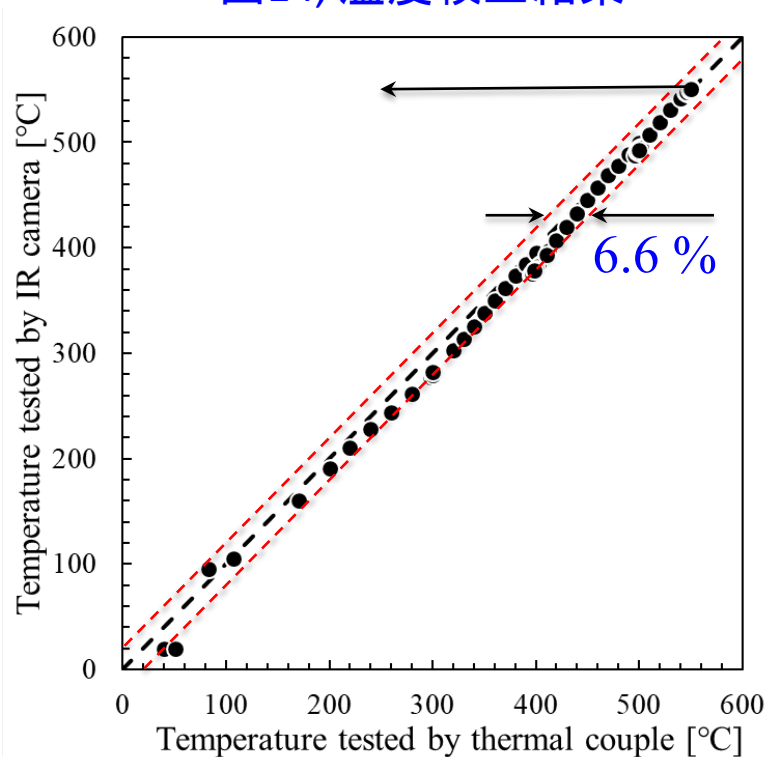


図14, 温度校正結果

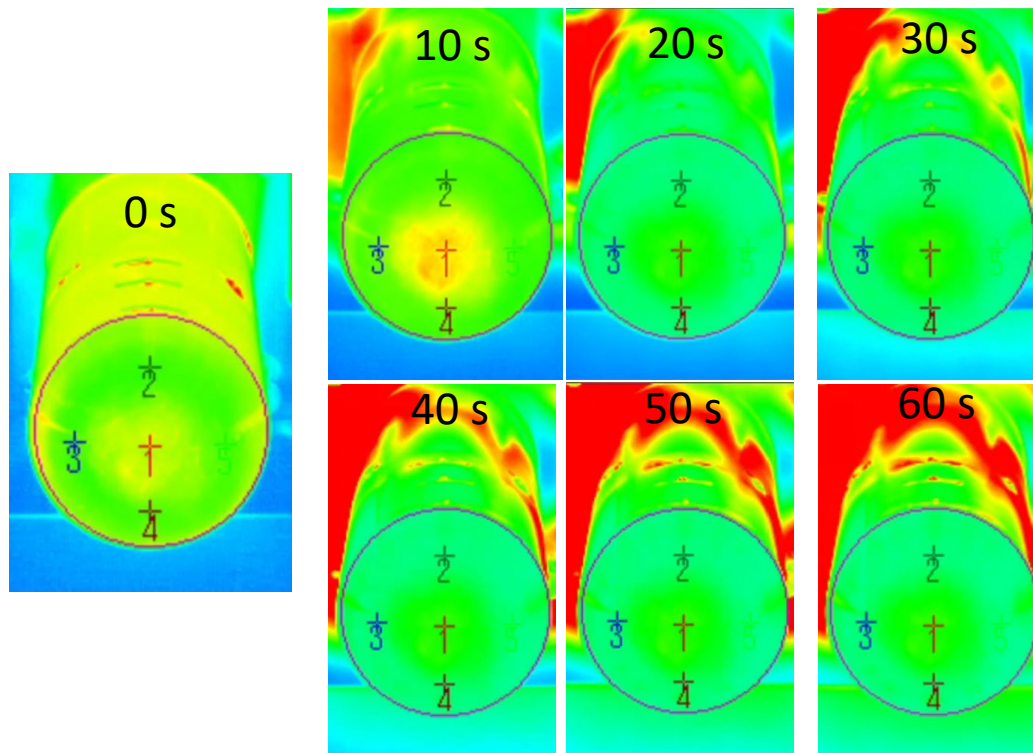
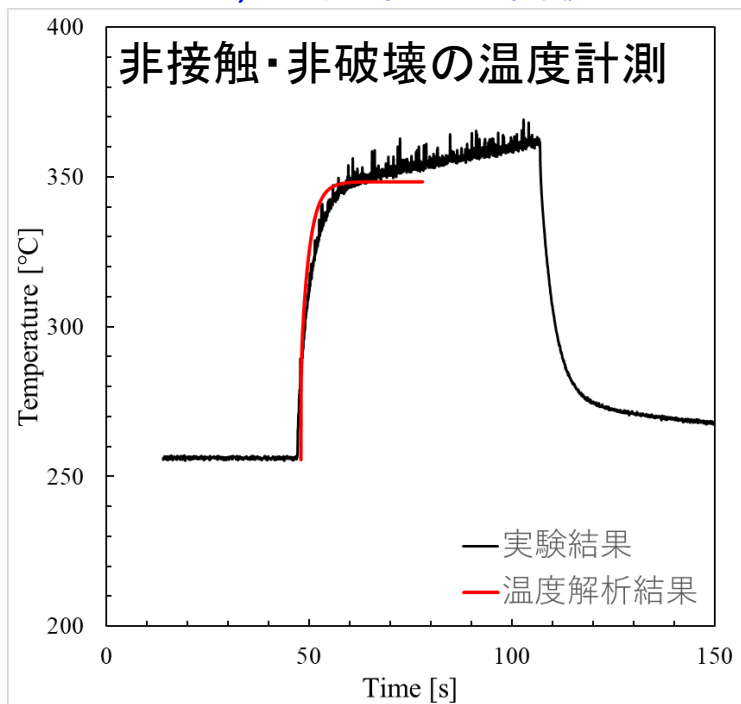


- 熱電対の温度計測(横軸)に比べて、非接触・非破壊のIR温度計測(縦軸)の違いは6.6%以内に抑えられる。

サブモジュール試験体の初期熱負荷試験の結果

➤ 高温高圧水を循環しながら、0.3 MW/m²の60秒間の連続照射を実施した。

図15, 天頂部の温度履歴



熱負荷試験後の評価基準(暫定) → ITER Divertor参照[4]

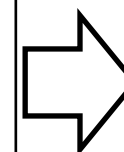
溶融と温度変動(20%以上)

水漏れ

表面損傷

ホットスポット

見られなかった



✓ 限られた試験体+試験条件では、サブモジュールの設計妥当性が示唆された。

[4] T. Hirai et al., JNM, 2015.

本報告では、開発を進めているWCCB方式TBMの設計妥当性検証の一環として、冷却能力を評価するために実施した大面積熱負荷装置の開発状況を示す。得られた成果は以下のとおりである。



- ITER通常運転条件における熱負荷強度 0.3 MW/m^2 を再現するための電子銃の運転条件を決定した。
- ビームプロファイルを定量的に評価した。
- 非接触・非破壊手法により、F82H製サブモジュール試験体の温度変化計測を実現した。



サブモジュールを用いた60秒間の熱負荷試験により、冷却機能の妥当性が確認された。