

プロジェクトレビュー 日米科学技術協力事業 PHENIX 計画 - 6年間の成果と次期計画 -

2. タスク 1 プラズマ対向機器における総括熱流応答の解明

2. Task 1: Investigation of Overall Heat Flow Response in Plasma-Facing Component

横峯 健彦, 上田 良夫¹⁾, 徳永 和俊²⁾, 結城 和久³⁾, 秋吉 優史⁴⁾, 伊庭野 健造¹⁾

YOKOMINE Takehiko, UEDA Yoshio¹⁾, TOKUNAGA Kazutoshi²⁾, YUKI Kazuhisa³⁾,

AKIYOSHI Masafumi⁴⁾ and IBANO Kenzo¹⁾

京都大学, ¹⁾大阪大学, ²⁾九州大学, ³⁾山口東京理科大学, ⁴⁾大阪府立大学

(原稿受付: 2020年1月7日)

PHENIX 計画タスク 1 では, “安全”と“長期健全性”という観点から第一義的現象であるプラズマ対向機器 (PFC) における総括熱流現象を複合熱負荷実験と高熱負荷・高温・高圧伝熱実験によりモデル化することを目的とする. また, タスク 1 から 3 で得られる材料特性ならびにトリチウム挙動に対する中性子照射効果のデータに基づき PFC システムの総括熱流応答解析を行い, 安全な PFC 構築の評価基準を与える.

Keywords:

plasma facing components, tungsten plasma facing material, helium-cooled divertor, multiple-impinging jet heat transfer

2.1 研究背景と目的

プラズマ対向機器 (Plasma Facing Components: PFC) は定常/非定常の熱負荷と粒子負荷を同時に受ける. その結果, 熱応力や熱疲労, 水素/He などの影響が複合的にプラズマ対向材料に及ぼされ, 材料の損傷や脆化およびそれらに伴う異常損耗などによる PFC の健全性の劣化が懸念される. PFC での熱・粒子の流れは, ロバスト設計が要求される PFC において, 特に“安全”という観点から第一義的現象として捉えられている. PFC の総括的な熱流を実験的に模擬することが理想であるが, 核発熱の再現の困難さに加えて, 材料試験と冷却性能試験を同時に行うことは, 安全性の観点からも実施は不可能に近い. しかし, 各要素での熱流現象およびそれに対する材料の応答を PFC システム設計の各要素モデルとして捉え, それらを結び付けるモデリングができれば, PFC の総括熱流現象を解析することができる. よって, 本タスクでは, プラズマ対向材料の複合熱負荷実験と伝熱実験を行い, システム設計によって PFC の総括熱流現象を考慮したプラズマ対向材料の使用限界を把握し, 安全な PFC 構築に対して, 評価基準を与えることを目的とする.

熱負荷実験および伝熱実験の対象としては, 各々, タングステンプラズマ対向材料およびヘリウム冷却ダイバータとした.

2.2 使用施設

本タスクでは, 伝熱実験と熱負荷実験を異なる施設を用
Kyoto University, KYOTO 615-8540, Japan

いて行った.

2.2.1 伝熱実験—GIT 高温高圧ヘリウムループ

伝熱実験は, ジョージア工科大学 (GIT) 既存の高温高圧ヘリウムループを用いる (図 1). 高温高圧ヘリウムを用いた伝熱実験ができる実験装置は現在国内には存在しない. プロジェクト開始時のループの性能は, ガストーチに

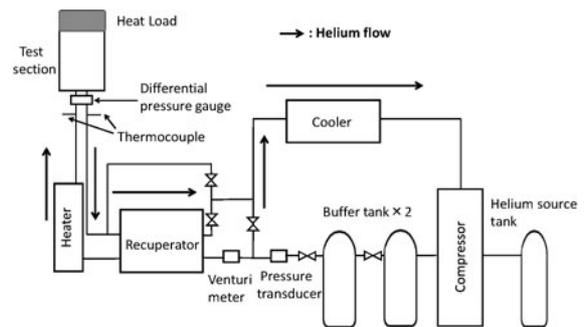


図 1 GIT 高温高圧ヘリウムループ.

corresponding author's e-mail: yokomine.takehiko.5c@kyoto-u.ac.jp

よる熱負荷方式で熱流束は最大2.8 MW/m²、作動流体ヘリウムに関しては最高温度300℃、圧力10 MPa、流量8 g/sであった。ガス冷却は固有の安全性を有する反面、その伝熱性能の低さが弱点となる。そのため、ヘリウム冷却ダイバータ研究は、その伝熱促進技術に関する研究が従来数多くなされてきた。多くの伝熱促進方式が考えられてきたが、その中でも衝突噴流群が最も冷却性能に優れている。同方式は、EUにおいてはHEMJ (He-cooled modular divertor with multiple jet cooling) として開発が進められてきた[1-4]。また、米国においても、HEMJをはじめとした種々のヘリウムガス衝突噴流群を用いた概念設計案に関する開発研究を行ってきた[5]。しかし、そのほとんどが高伝導材をターゲット(衝突面)に用いて低温度条件(100℃以下)で行われた伝熱実験結果からの予測値あるいは外挿値で、ダイバータの条件下での冷却性能実証は行われていない。より原型炉に近い条件で伝熱実験、すなわち高熱流束負荷を高温、高圧のヘリウムガスで冷却するH⁴test (High heat flux removed by High temperature and High pressure of Helium) を伝熱実験のロジックとし、既存のGIT ループを改造した。4つの"H"のうち圧力(100気圧)、ヘリウムの2点は条件を満たしているが、熱流束およびヘリウムガスを大幅に増加させる必要があった。熱流束に関しては、当初ガストーチを用いて最大2.8 MW/m²であったが、アイダホ国立研究所(INL)のSTAR 施設から10 kW 高周波誘導加熱装置を借り入れ導入することで、6.6 MW/m²まで向上させた。ヘリウム温度に関しては、2つの4.5 kW カートリッジヒーターを使用して昇温した。しかし、ヘリウム温度が300℃以上で、試験部(WL10材使用部、後述)で激しい酸化が観測され、実験結果に影響を及ぼした。この酸化を防ぐために、試験部と高周波誘導加熱コイルは、実験中は41 kPaの真空に保つよう図2のようなパイレックス製チャンパーに改造された。

2.2.2 熱負荷実験—ORNL プラズマアークランプ

熱負荷実験にはオークリッジ国立研究所(ORNL)のプラズマアークランプ(PAL)施設を使用した(図3)。PALを用いた照射材の高熱負荷実験(HHFT: High Heat Flux

Testing)を行うために、試料ホルダー、計測システムなどを整備すると共に、熱負荷試験時の放射性物質の飛散を防止するために試料ホルダー部を密閉構造にする改造を行った。また、PHENIX プログラムの最初の3年間では、PALからの入射熱流束レベルは3.3 MW/m²に制限されていたが、リフレクターをアップグレードし、最大熱流束を16 MW/m²まで増加させた。さらに、図4(a)に示すように、PAL施設を使用することで、熱源を試験室から物理的に分離でき、高い熱流束下での中性子照射材HHFTを安全に行うことができるようになった。照射材試験片のHHFT中の対放射線安全性の向上は、冷却ロッド、試料ホルダーおよび照射材試験片を内包する高真空システム用の半球形キャップチャンパーによる二重閉じ込めによって達成される(図4(a))。ただし、照射材の高い放射線量のため、試験可能な照射材の寸法は厚さ数mmおよび直径10 mm未満のものに制限される。試験片は、図4(d)および(e)に示すように、水冷銅合金ロッドに取り付けられた耐熱金属製のホルダーにボルトで固定する。ボルト締め付け領域が高熱流束に直接曝されないため、試験片内の温度分布が不均一



図2 改造後のH⁴test試験部。



図3 ORNLのプラズマアークランプ施設。

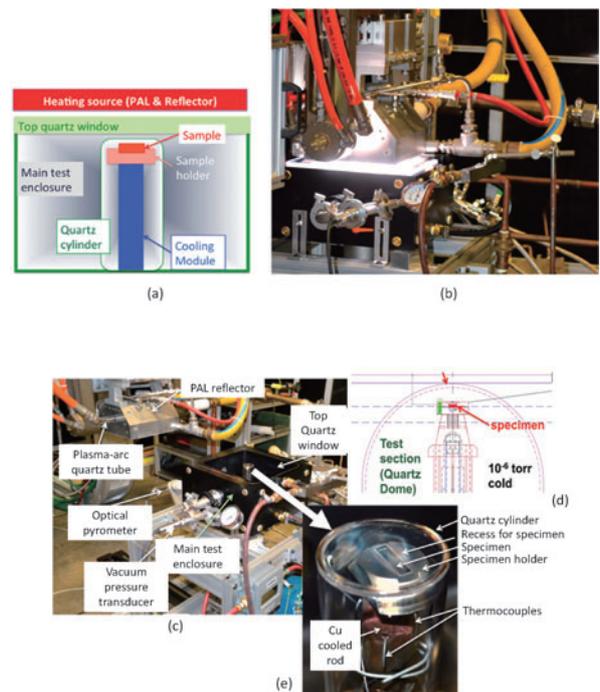


図4 プラズマアークランプ施設の詳細。

になる可能性があり、試験片のボルト締めが熱応力および変形に及ぼす影響は微小薄肉試験片にとっては無視できない。そのため、HHFT中の熱サイクルにおける発生応力シミュレーションのための熱力学的モデルを開発し補正を行った。

2.3 H⁴testの成果

熱負荷試験の結果に関しては、次の第3章に合わせて載せているため参照していただきたい。ここでは、伝熱実験に関して成果を報告する。

前半3年間で衝突噴流群の伝熱特性を調べるための基本的な流れ場形状は、先行研究であるHEMJの設計に基づくこととした。衝突噴流群伝熱特性には非常に多くのパラメータが影響する。本実験では、高熱流束除去の観点からパラメータに重要度をランク付けするPIRT (Phenomena Identification and Ranking Table)を行い、その中でノズル-伝熱面間距離、噴流レイノルズ数、ノズル出口での乱流強度および層流化発生条件を重要パラメータとした。層流化とは、上流で十分に乱流であった流れが何らかの作用によって、乱れが減衰して層流状態に近づく現象で、流体の物性によるところが大きい。そのため、ヘリウムの層流化に関する情報を他の代替流体を用いた実験から得ることは難しい。試験部の詳細を図5に示す。HEMJ試験部はAISI 302ステンレス製のジェットカートリッジがWL10製のスリーブ(thimble)の中に設置してある。Thimbleの上面に高周波誘導加熱による熱負荷がかかる。ジェットカートリッジ上面には中央に直径(D)1.04mm、その周辺に六角形状に24個の直径0.6mmの小孔計25個が開いてあり、そこからヘリウムガスが噴出される。中央の小孔(ノズル)直径Dとノズルと噴流衝突面間の距離Hの比H/Dは0.25から1.5まで変化させた。また、ヘリウム温度は、室温から400℃まで、噴流レイノルズ数は1.3×10⁴から5.4×10⁴までそれぞれ変化させた。ここでは、その一部を紹介する。

図6は、ヘリウム温度が300℃以下の場合の、H/D=0.5~1.0における噴流レイノルズ数に対する平均ヌセルト数Nuの変化を示す。平均ヌセルト数は、

$$Nu = 0.085Re^{0.59} \kappa^{0.19} \quad (1)$$

で整理できる[6]。ここで、Reは噴流レイノルズ数、 $\kappa = k_s/k_f$ で、 k_s は衝突面温度における衝突面材料(ここで

はWL10)の熱伝導率、 k_f はノズル出口温度におけるヘリウムの熱伝導率である。

従来の研究では、H/Dが小さくなるにつれて伝熱性能が増加する。そのため、更なる伝熱性能の向上を狙って、H/D=0.25での伝熱実験を行った。図7は、H/D=0.25および0.5の場合のレイノルズ数およびヘリウム温度に対する平均ヌセルト数の変化を示している。H/D=0.5の場合、温度の上昇またはレイノルズ数の上昇とともに平均ヌセルト数は増加する。これは従来の100℃以下で行われた実験結果と傾向が一致する。一方、H/D=0.25の場合、ヘリウム温度が100℃以下のときには、H/D=0.5の場合の平均ヌセルト数を上回り、従来の研究結果と一致する。しかし、200℃以上の高温域では、H/D=0.5の場合よりも熱伝達率が低下した。さらに同じH/D=0.25で比較すると、低温域よりも熱伝達率が減少するという従来結果では見られない現象が生じた。この原因として、層流化が考えられる。

ヘリウム温度、ノズル-伝熱面間距離等についてその影響を調べ、平均ヌセルト数に関して以下の実験式を導いた[7]。これは、先述の(1)とは異なり、伝熱面の熱物性(熱伝導率)に依存しない。

$$Nu = 0.180Re^{0.625} \left(\frac{H}{D}\right)^{-0.625} \left(\frac{s}{D}\right)^{-0.375} \left(\frac{T_c}{T_i}\right)^{0.637((T_c/T_i)-1)} \quad (2)$$

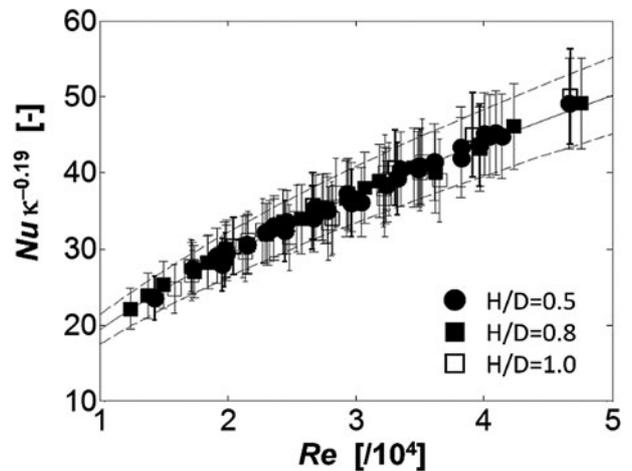


図6 H/D = 0.5~1.0でのマルチ衝突噴流平均熱伝達率。

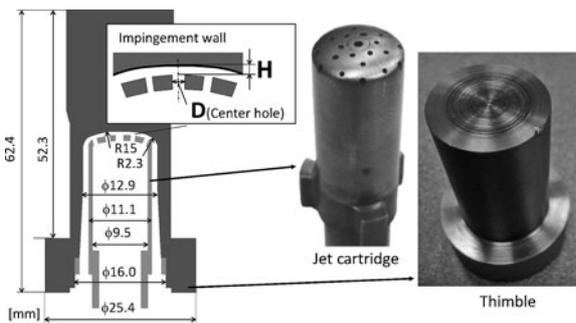


図5 HEMJ試験部詳細。

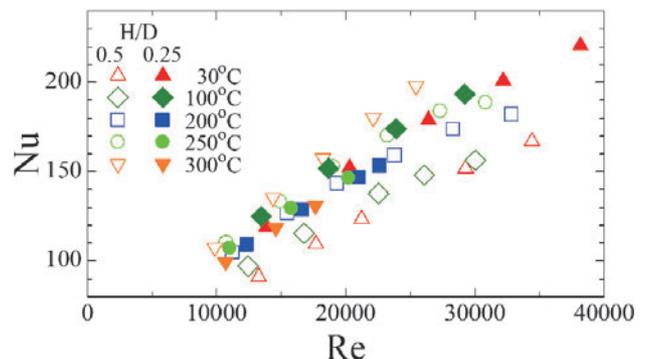


図7 H/D ≤ 0.5でのマルチ衝突噴流熱伝達。

図8は、HEMJ流れ場の数値シミュレーション結果を示す。温度場も同時に計算しているが、複雑な流れ場における層流化を再現できる乱流モデルは現時点ではないため、主に流れ場の様子を調べるための計算である。外周の2つの噴流に着目すると、 $H/D = 0.5$ の場合は噴流構造を維持しているのに対して、 $H/D = 0.25$ の場合は対称的な噴流構造は崩れ、噴流下流に強い加速領域を形成していることがわかる。この噴流群外周部で、急激に加速されることによって生じる加速層流化と衝突面近傍のヘリウムガスが局所的に高温になることによる物性の変化に起因する加熱層流化とが相乗的に生じている可能性がある。これは、 H/D を小さくしなければ避けられる問題ではなく、高温条件のみでも高速流領域を形成する可能性もあり、層流化の発生条件確認と乱流モデリングが重要となる。

HEMJは、 10 MW/m^2 を超える熱流束に耐えることが実験的に示された唯一の設計であるが[8]、両方の内側ジェットカートリッジに2つの異なる曲率半径の曲面（噴流噴出面および冷却面）を持つ複雑な形状を有する。さらに、タングステン合金の OUTER SHELL (エンドキャップ) や2つの異なる直径の25個の噴流ノズルなど、実際の炉で使用（製作）することを考えると、構造を少しでも単純化することが望ましい。そのため、CFDとFEMを用いてダウンセクションを行い、最適形状を求めた。図9はダウンセクションの候補形状である。すべての候補形状の噴流ノズル開口面積は等しくなっている。図中IがHEMJの基本設計形状である。またJからOでは噴流噴出面が曲面ではなくフラットになっており、それに対応し冷却面もフラットとしている。この15種類の形状とノズルピッチ（図中Sおよびj）、 H/D の組み合わせで計75ケースの計算を行うことによって図9中Kの噴出面をもつ最適形状を導いた。図10はその計算結果の一例であり、左から冷却面温度分布、カートリッジ応力分布、熱膨張分布である。熱膨張は H/D に影響を与える。

図11はダウンセクションで抽出した最適形状である。6個のノズルを有し、ノズル径はすべて1.18 mmである。従来のHEMJより形状が簡素化され、平均熱伝達率は6.5%向上し、圧力損失も小さくなった。このカートリッジ（図11 (b)）を用いて、再度 $H^4\text{test}$ を行い（図12）、本形状

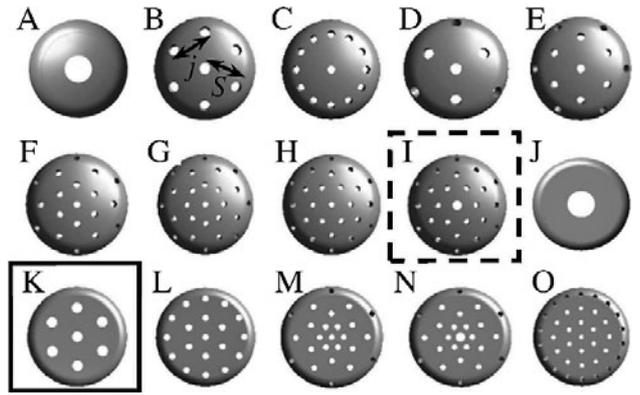


図9 最適形状ダウンセクションの候補。

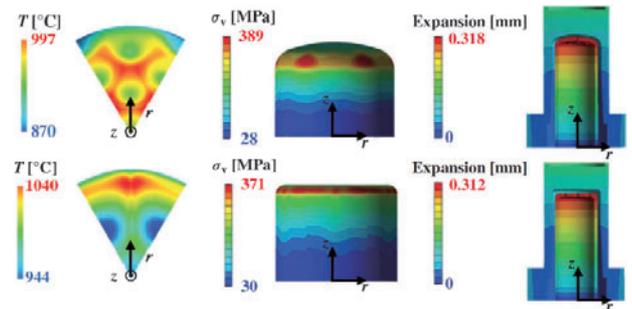


図10 CFDおよびFEM結果の一例（IおよびK）。

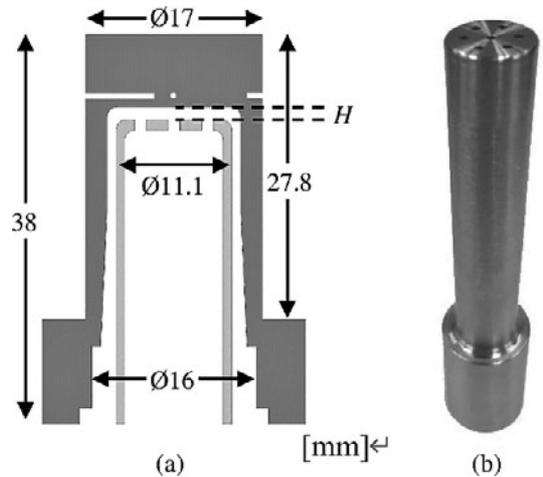


図11 He ガスダイバータ最適形状。

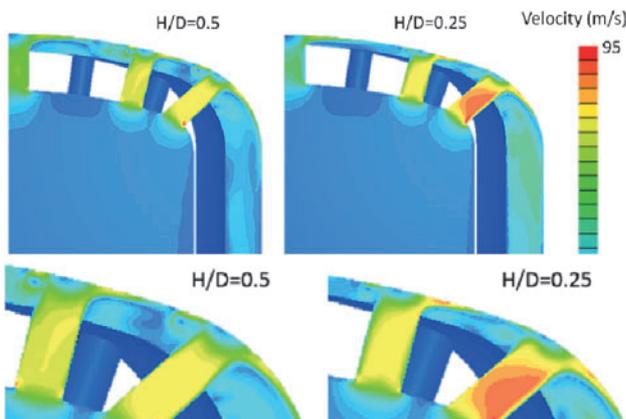


図8 HEMJ試験部の衝突面近傍流れ場。

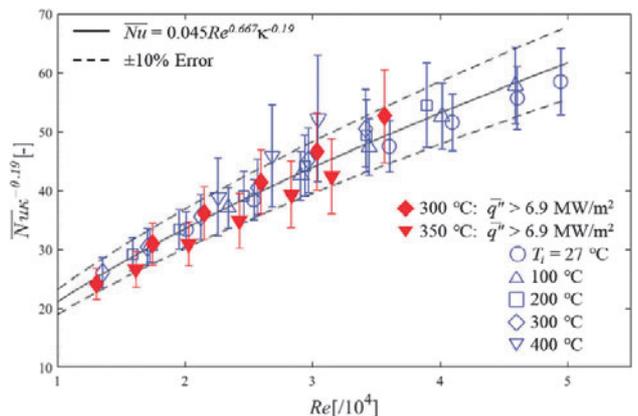


図12 提案ダイバータカートリッジを用いた伝熱実験結果。

に関して以下の平均ヌセルト数に関する実験式を導いた。

$$Nu = 0.045Re^{0.667} \kappa^{0.19} \quad (3)$$

2.4 まとめ

伝熱実験に関しては、H⁴test は計画通りに終了した。GIT では、複数個のカートリッジを用い、広領域での冷却性能の実証 H⁴test を現在引き続き行っている。

また、各タスクの6年間の成果を集約し、本タスクで提案した He ガスダイバータ設計に基づき、中性子照射後の材料特性を組み入れた PFC システムの総括熱流応答解析

を行い、PFC 設計条件や使用限界（構造健全性）の明確化に取り組んでいる。

参考文献

- [1] B. Koncar *et al.*, Fusion Eng. Des. **86**, 167 (2011).
- [2] P. Norajitra *et al.*, Fusion Eng. Des. **86**, 1656 (2011).
- [3] B. Koncar *et al.*, Fusion Eng. Des. **88**, 1831 (2013).
- [4] P. Norajitra *et al.*, Fusion Sci. Technol. **67**, 732 (2015).
- [5] M.S. Tillack *et al.*, Fusion Eng. Des. **86**, 71 (2011).
- [6] B. Zhao *et al.*, Fusion Sci. Technol. **72**, 294 (2017).
- [7] T. Yokomine *et al.*, Fusion Eng. Des. **109-111**, 1543 (2016).
- [8] P. Norajitra *et al.*, Fusion Eng. Des. **85**, 2251 (2010).