



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: 2016年12月20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 (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いて行う。

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

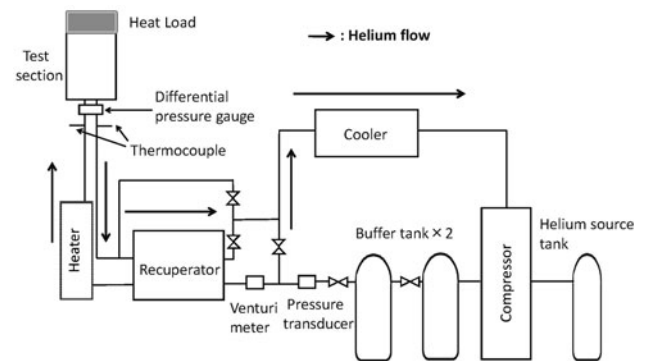


図1 GIT 高温高圧ヘリウムループ。

い。プロジェクト開始時のループの性能は、ガストーチに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、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温度を大幅に増加させる必要があった。

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) 施設を使用する (図2)。PAL 施設は定常高熱負荷試験装置で、表1の性能の2台のランプを有する。PAL 施設ではタスク2から提供される中性子照射 W 試料を用いた熱負荷実験を行い、微細組織の変化やき裂の伸展等を評価する。そのための試料ホルダー、計測



図2 ORNL のPAL 施設。

表1 PAL 施設の性能。

PAL System	最大入射熱流束 [MW/m ²]	最大吸収熱流束 (1100 K の W 材の場合) [MW/m ²]	最大熱流束面積
Vortex300 高出力	27	12.7	10 mm × 100 mm
Vortex500 低出力	4.2	2	180 mm × 180 mm

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必要があった。

2.3 これまでの成果

2.3.1 伝熱実験

先述のとおり、より原型炉条件に近い H⁴test を行うために、GIT ヘリウムガスループの改造を行った。当初ガストーチを用いて最大 2.8 MW/m² であった熱流束をアイダホ国立研究所の STAR 施設から 10 kW 高周波誘導加熱装置を借り入れ、現時点では、出力15%で 6.6 MW/m² まで向上させた。

一方、試験部の製作に関しては以下のように決めた。プロジェクトにおける本伝熱実験の計画では、前半3年間でより原型炉に近い条件下での衝突噴流群の基本的な伝熱特性を把握、その結果に基づき衝突噴流群冷却ダイバータの課題を抽出する。その後の3年間で、最適なダイバータ設計を数値シミュレーションによるダウンセレクションで提案し、その設計案に関連する伝熱実験を行う。

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3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) 1.04 mm、その周辺に六角形状に24個の直径 0.6 mm 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

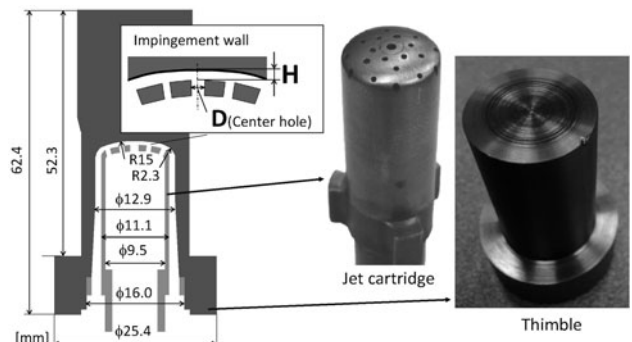


図3 HEMJ 試験部詳細。

400℃まで、噴流レイノルズ数は 1.3×10^4 から 5.4×10^4 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4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、

$$Nu = 0.085 Re^{0.590} \kappa^{0.190} \quad (1)$$

で整理することができる。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、更なる伝熱性能向上を狙って $H/D = 0.25$ での伝熱実験を行った。図5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変化を示している。 $H/D = 0.5$ の場合、温度の上昇また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を傾向が一致する。一方、 $H/D = 0.25$ の場合、ヘリウム温度100℃以下では、 $H/D = 0.5$ の平均ヌセルト数を上回り、従来の研究結果と一致するが、200℃以上の高温域で $H/D = 0.5$ 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。

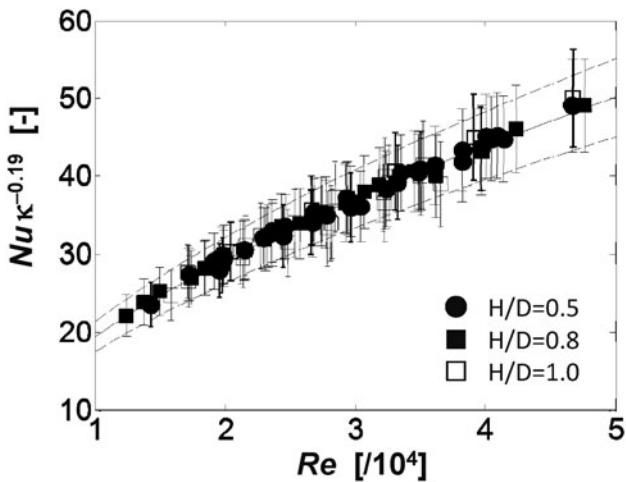


図4 ヘリウム温度300℃以下での平均ヌセルト数。

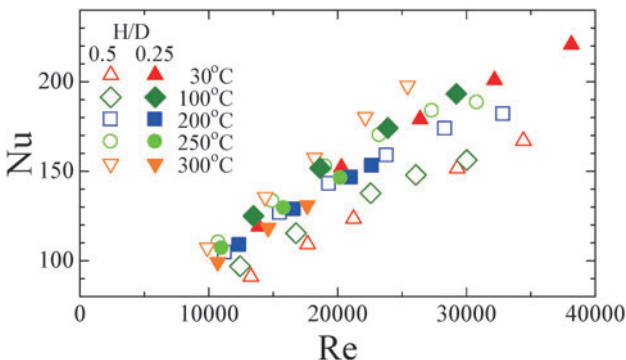


図5 $H/D = 0.25$ および 0.5 の場合の平均ヌセルト数。

図6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、 $H/D = 0.25$ の場合に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。

2.3.2 熱負荷実験

先述のとおり、照射材の高熱負荷実験 (HHFT:High Heat Flux Testing) を行うために表2のような改造をPAL施設に施した。図7にPAL施設の概要を示す。図7(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することができ、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[6,7]。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バーによる二重閉じ込めによって達成される(図7(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7(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中である。

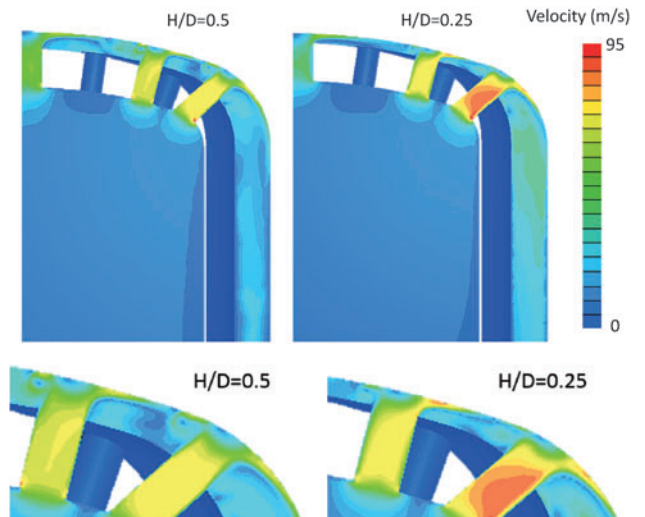


図6 HEMJ 試験部の衝突面近傍流れ場。

表 2 中性子照射材高熱負荷実験のための PAL 改造点.

Design considerations	Adopted solutions
IR heating	Large quartz window
Quartz window seal	High temperature o-ring
Enclosure overheating	<ul style="list-style-type: none"> Enclosure size larger than area of peak power Water cooled enclosure
W testing: No O ₂ at high temperature	Evacuate enclosure air and backfill with Ar
Quartz window integrity during air evacuation	Secondary chamber on top of quartz window for equalizing pressure on both sides of quartz window
Liftoff of quartz window	Vent and automatic pressure valve and controller
Avoid overheating and cracking of quartz during HHFT	Air knife to cool the quartz window
HHFT	Impingement water cooling
Temperature measurements	K, S, R thermocouples; pyrometer
Containment of volatilized radioactive compounds	HEPA filter vent for Ar bleeding during experiment <ul style="list-style-type: none"> HEPA filter canister for evacuation of Ar after experiment Testing section enclosed in quartz cylinder Vacuum tight thermocouple feedthroughs No water connections within the enclosure

2.4 今後の計画

伝熱実験に関しては、前半3年間における H⁴test はほぼ計画通りに進んでいる。今後ヘリウム温度500~700℃の高温実験のデータを補完する。また、層流化の乱流モデリングのための基礎実験を計画しており、現在は国内研究として実施している。今半3年間では、冷却構造の最適化のための数値シミュレーションによるダウンセクションを行い、新しい概念設計およびそれに関連する伝熱実験を行う予定である。

熱負荷実験に関しては、計画前半で行った高出力 PAL 用試験ホルダー設計に基づき照射材 HHFT 装置を完成させ、現在、タスク2との共同で行っているタンゲステン材

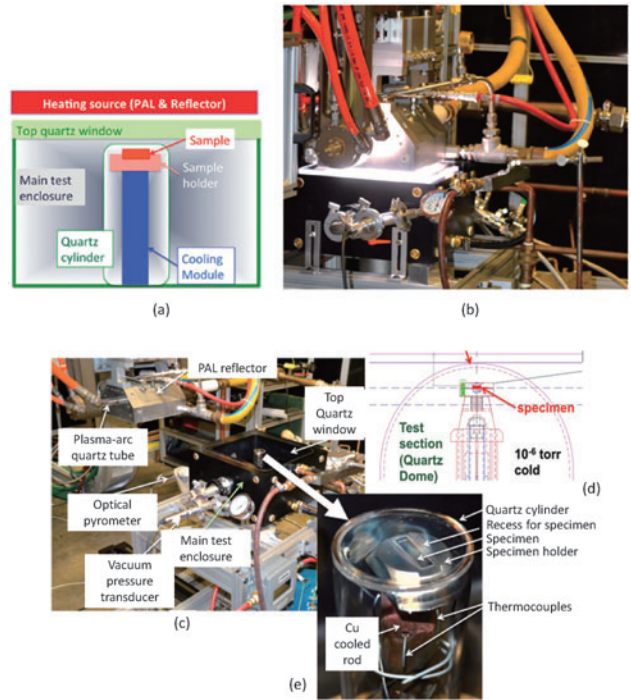


図 7 PAL 施設詳細.

の照射終了後、HHFT を実施する。実験結果に基づき、材料特性（熱拡散率、微細構造、硬度）を評価し、モデリングを行う。

伝熱実験および熱負荷実験により提案する概念設計にタスク2から得られる中性子照射効果、およびタスク3からのトリチウム挙動予測を加え、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）を明確にする。

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] A.S. Sabau *et al.*, Phys. Scr. T159, 14007 (2014).
- [7] A.S. Sabau *et al.*, Fusion Sci. Technol. 66, 394 (2014).