

プロジェクトレビュー

日米科学技術協力事業 PHENIX 計画—前半の成果と後半の研究計画—

Japan - US Joint Research Project PHENIX - Accomplishments
in the First 3 Years and Research Plans in the Second Half -

1. PHENIX 計画の概要

1. Overview of PHENIX Project

上田良夫, 波多野雄治¹⁾, 横峯健彦²⁾, 檜木達也²⁾, 長谷川晃³⁾, 大矢恭久⁴⁾, 室賀健夫⁵⁾
UEDA Yoshio, HATANO Yuji¹⁾, YOKOMINE Takehiko²⁾, HINOKI Tatsuya²⁾, HASEGAWA Akira³⁾,
OYA Yasuhisa⁴⁾ and MUROGA Takeo⁵⁾

大阪大学, ¹⁾富山大学, ²⁾京都大学, ³⁾東北大学, ⁴⁾静岡大学, ⁵⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2016年12月20日)

Keywords:

divertor, DEMO reactors, plasma facing component, tungsten, neutron irradiation, tritium retention, helium coolant

1.1 はじめに

国際熱核融合実験炉 ITER では高熱・粒子負荷を受けるダイバータのプラズマ対向材料としてタンゲステン (W) を使用し, 除熱のための冷却材としては水が用いられる。また, その後の原型炉でも, 現在の設計では W プラズマ対向材料と水冷却が主案となっている。しかしながら, W は基本的には脆性材料であり, 特に核融合炉では中性子照射脆化の評価が不可欠であるが, そのための研究は十分ではない。また, 中性子照射により W 中に照射欠陥が形成されるが, これはトリチウム (T) の捕獲サイトとなるため, 核融合炉環境下では W は T 吸蔵量が大きくなるという懸念がある。したがって, 中性子照射された W 材料の熱機械特性や T 吸蔵量を正しく評価し, その結果に基づいてプラズマ対向材料として望ましい W 材料の開発や, ダイバータ機器設計を行うことが, 核融合炉の実現には不可欠である。

これまでに欧州では, 主に ITER を意識し, 機器の特性試験という観点から中性子照射研究が行われた。しかしながら, この研究では, 耐久性評価が主目的であり, 詳細な組織・物性の変化は明らかになっていない[1, 2]。一方, 日本では長谷川らのグループが中心となって, W 材料の照射による物性変化について, 国内外の原子炉を利用して研究を進めてきている[3, 4]。日米科学技術協力事業 PHENIX (PFC Evaluation by tritium Plasma, HEat, Neutron Irradiation eXperiments) 計画ではこれらの研究をベースとし, 原型炉ダイバータを視野に入れた研究として, 高温での照射影響評価 (~1200°C), 核融合炉に近い中性子スペクト

ルを得るための熱中性子を低減した原子炉照射, 及び様々な種類の W 材料の照射影響評価, を新たな研究課題と位置づける。

ダイバータ材料としての W は高熱負荷を受けることから, その温度条件が広い (1200°C~500°C (He 冷却の場合)) ため, この範囲での温度依存性を評価することが重要である。また, 水冷却原子炉の様な熱中性子が多い環境では, 中性子吸収に伴う元素変換 (W→Re→Os, 等) が早く進み, 熱中性子の少ない核融合炉環境での W 照射影響とは異なることが知られており[5], 照射時の熱中性子遮蔽が必要である。さらに, W ダイバータ機器の設計において, 様々な W 材料について照射を行い, 適切な材料選択を行うことも必要である。

また, 原型炉から商用炉を視野に入れた場合は, より安全性を高めるために, 核融合環境でも放射化せず, 化学的反応性もない He ガスを利用した冷却系の利用が望まれる。また He ガスを用いると冷却媒体温度を水より高く設定でき, 高い発電効率を実現できる可能性がある。しかしながら, He ガス冷却を用いた場合は水冷却に比べて冷却能が低く, 効率的な冷却方法の開発が望まれている。

PHENIX 計画は, これら W プラズマ対向機器開発における課題に対し新しい知見を得るため中性子照射試験や高温高圧 He ガスループを用いた伝熱実験を実施し, 原型炉を見据えたダイバータ開発に大きな貢献をすることを目的としている。特に中性子照射試験においては, W の照射影響に対する標準的なデータベースの作成を行うとともに,

corresponding author's address: Grad. Sch. of Eng. Osaka Univ., Suita, OSAKA 565-0871, Japan

corresponding author's e-mail: yueda@eei.eng.osaka-u.ac.jp

照射影響を総合的に理解することをめざす。PHENIX 計画は3つのタスクから構成され、それぞれのタスクが相互に協力して研究を進める。以下で各タスクの概要を説明する。

1.2 各タスクの概要

PHENIX 計画は3つのタスクからなり、その組織は表1のようになっている。米国側からはエネルギー省(DOE)の取りまとめのもと、オークリッジ国立研究所(ORNL)(タスク1および2)、ジョージア工科大学(GIT)(タスク1)、アイダホ国立研究所(INL)(タスク3)、サンディア国立研究所(SNL)(タスク3)が参加している。

タスク1では、He冷却における伝熱現象について、特にダイバータ環境を想定した高温条件での基礎的な理解を深め、その結果をもとに新しいHe冷却ダイバータの設計を行うことを目的としている。具体的には、GITの高温Heガスループを用いて、400℃程度以上でのHe衝突噴流による伝熱特性の研究とモデリングを行う。さらに、PAL(プラズマアークランプ)を用いて、中性子照射タンクステン材の高熱負荷試験を行う。最後に、すべてのタスクから得られた知見を生かして、ダイバータ機器の総括熱流解析と、安全性に対する検討を行う。

タスク2では、様々なW材料をダイバータの温度条件を考慮して500℃~1100℃で中性子照射し、その熱特性や機械的特性の変化を詳細に調べる。中性子照射は、ORNLの研究用原子炉(HFIR)で行うが、照射の際にガドリニウム(Gd)を利用して低速中性子を低減し、元素変換と照射損傷の比率が核融合炉に近い条件で照射を行う。照射試料は、熱機械特性を評価すると共に、タスク1の熱負荷試験、及びタスク3の水素滞留・透過試験に供する。

タスク3では、中性子照射W材料に対して、プラズマ照射、イオンビーム照射、およびガス曝露などの方法を用いて、水素同位体の滞留・透過挙動について詳細に調べる。さらに、高エネルギーイオン照射試料についても実験を行い、その中性子照射損傷との対応性などについても評価を行う。

高線量の中性子照射は長時間を要するうえ、試料の放射化を伴うため照射後に冷却期間を置く必要があり、照射完了後も直ちに試験を始めることはできない。そこでPHENIX計画では、米側研究機関が既に保有していた低線量中性子照射W試料の中からプロジェクトの目的に合うものを選別し、その照射後試験も行う。

表1 PHENIX計画の代表者、プログラムコーディネーターおよび正副タスクコーディネーター。

	日本	米国
代表	上田良夫 (大阪大学)	D. Clark (US DOE)
コーディネーター	波多野雄治 (富山大学)	D. Clark (US DOE)
タスク1	横峯健彦 (京都大学) 上田良夫 (大阪大学)	A. S. Sabau (ORNL) M. Yoda (GIT)
タスク2	檜木達也 (京都大学) 長谷川晃 (東北大学)	Y. Katoh (ORNL) L. M. Garrison (ORNL)
タスク3	大矢恭久 (静岡大学) 波多野雄治 (富山大学)	M. Shimada (INL) D. Buchenauer (SNL)

1.3 本プロジェクトレビューの構成

本プロジェクトレビューでは、現在4年目の活動が行われているPHENIX計画(6年計画)について、各タスクの研究成果や今後の研究計画について説明を行い、PHENIX計画の全体を理解していただくことを目的とする。次章「2.プラズマ対向機器における総括熱流応答の解明」では、タスク1で実施しているHeループを用いた伝熱実験と熱負荷実験の概要を述べる。「3.タスク2(1)中性子照射計画」と「4.タスク2(2)Wの中性子照射効果」ではPHENIX計画で実施する中性子照射の概要、および米側が保有していた低線量中性子照射W試料を用いて実施した機械特性試験の結果を報告する。「5.タスク3 トリチウム挙動および中性子照射効果」では、トリチウムおよび重水素のW中の透過挙動ならびに高温で中性子あるいは重イオンを照射し損傷を導入したW中の重水素滞留挙動を調べた結果が記載されている。最後に6章において、まとめと今後の研究計画を述べる。

参考文献

- [1] M. Roedig *et al.*, J. Nucl. Mater. **329-333**, 766 (2004).
- [2] M. Merola *et al.*, Fusion Eng. Des. **75-79**, 325 (2005).
- [3] A. Hasegawa *et al.*, Mater. Trans. **54**, 466 (2013).
- [4] A. Hasegawa *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 1568 (2014).
- [5] A. Hasegawa *et al.*, J. Nucl. Mater. **471**, 175 (2016).