



3. タスク 2 (1) 中性子照射計画

3. Task 2 (1): Neutron Irradiation Plan

檜木達也, 長谷川晃¹⁾, 福田 誠¹⁾, 田中照也²⁾, 大矢恭久³⁾, 波多野雄治⁴⁾, 上田良夫⁵⁾
 HINOKI Tatsuya, HASEGAWA Akira¹⁾, FUKUDA Makoto¹⁾, TANAKA Teruya²⁾, OYA Yasuhisa³⁾,
 HATANO Yuji⁴⁾ and UEDA Yoshio⁵⁾

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

(原稿受付: 2016年12月20日)

米国のオークリッジ国立研究所にある研究用原子炉 HFIR を用いたタングステン材料の中性子照射試験を行った。熱中性子による核変換の影響を抑制するため、熱中性子遮蔽を検討しガドリニウムによる熱中性子遮蔽キャプセルを開発した。ガドリニウムによる熱中性子遮蔽効果や照射キャプセルの熱分布のモデリングを行い、これまでに知見が不足している高温領域で比較的高い線量での中性子照射試験を実施することができた。

Keywords:

neutron irradiation, tungsten, thermal neutron shielding, gadolinium, high temperature, high fluence

3.1 諸言

PHENIX 計画の大きな目的の一つに、タングステン材料の各種特性に及ぼす中性子照射効果を明らかにすることがある。PHENIX 計画では、米国のオークリッジ国立研究所にある High Flux Isotope Reactor (HFIR) を用いて中性子照射試験を行う。しかしながらタングステンの場合、熱中性子によるレニウムやオスニウム生成等の核変換の影響が大きく、今回目的とする比較的高い損傷量では核変換元素の濃度が数%になり材料特性の変化が生じるため、その影響が特に顕著となる。タングステンでは1~2 displacement per atom (dpa) 以上で照射硬化が飽和し始めるとされている[1]。核変換効果を考慮した1 dpaを超える比較的高い線量領域における、中性子スペクトルが核融合環境に近い条件でのタングステンの照射効果データはこれまで得られていない。また、これまでに得られているタングステン材料の中性子照射データは、800℃程度までが中心であるが、ダイバータでは最高1500℃程度までの温度が想定されている。純タングステンでは、1000℃以上で再結晶が生じるが、1000℃以上での中性子照射データは非常に限られている。

本タスクでは、タングステンの核変換効果を抑制するための熱中性子遮蔽を行い、1000℃を超える照射温度も含めて、1 dpaを超える比較的高い線量の中性子照射を、現状候補とされる各種タングステン材料に対して行う。これにより、核融合炉ダイバータ用タングステン材料の中性子照射効果の基本的な理解を得る。本章では、そのための照射技術開発と照射計画の概要を述べる。

3.2 熱中性子遮蔽キャプセルの設計・開発

HFIR における熱中性子領域でのフラックスは、核融合炉で想定されるフラックスに比べて、一桁以上高い[2]。熱中性子遮蔽材には、日米科学技術協力事業 JUPITER 計画で用いられた酸化ユーロピウム[3]、ガドリニウム、炭化ホウ素、ハフニウムで検討を行った。HFIR での6サイクルの中性子照射における遮蔽能力の観点では、酸化ユーロピウムとガドリニウムが候補となったが、取り扱い易さ、これまでの実績、コスト等を踏まえて、ガドリニウムを最終的に選択した。図1はガドリニウムによる熱中性子の遮蔽効果に関する計算結果である。キャプセルの外側(図の

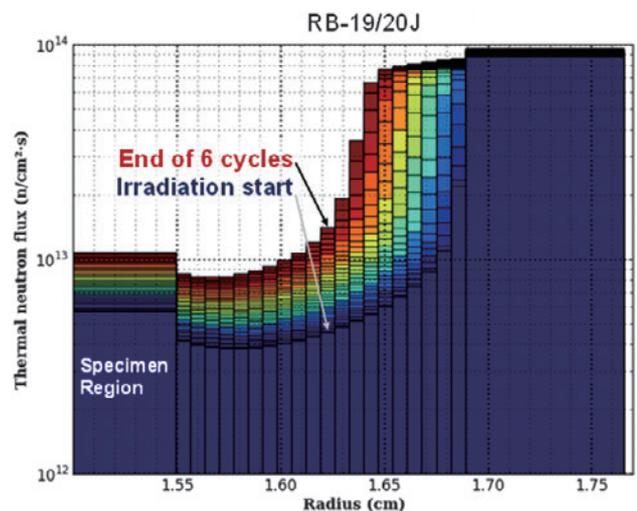


図1 ガドリニウムによる熱中性子の遮蔽効果。

右側)から内側(図の左側)にかけて熱中性子フラックスが減少することが示されている。青から赤への色分けに関しては、照射サイクルごとの遮蔽効果の低下を表している。試料はタングステンとして計算されており、中性子減速の影響も考慮されている。ガドリニウム熱中性子遮蔽により、キャプセル内の熱中性子束は約一桁低下し、核融合炉のスペクトルに近い条件での照射が期待できることが明らかになった。図2は、本研究で開発したガドリニウム遮蔽材の写真である。外側の筒がステンレス鋼で内側がアルミニウムであり、両者の熱膨張係数差により、サンドイッチ構造が圧縮されるようになっている。

3.3 中性子照射試験

HFIRにおける材料照射では、主にRB*と呼ばれる比較的照射スペースの大きい(400×38 mm 径程度)キャプセルとラビットと呼ばれる比較的小さい(50×6 mm 角程度)キャプセルが用いられる。照射温度に関しては、どちらも1000℃を超える高温での実績がある。本研究では、比較的高線量での熱中性子遮蔽を検討したが、簡易的な計算においても、1 mm 程度の遮蔽が必要ということが明らかになった。ラビットキャプセルの場合、遮蔽を考慮すると照射スペースが非常に限られてしまうため、本研究ではRB*を用いた照射試験(RB19J)を中心に検討することとなった。

RB19J キャプセルは、照射スペースが比較的大きいため、熱中性子遮蔽を考慮しても試験片の自由度は高い。照射温度に関しては、キャプセルを4つのサブキャプセルに分割して制御することにより、条件を振ることが可能であり、PHENIX 計画では、約500℃、約800℃、約1100℃の中性子照射を行った(図3の右下写真で黒色のグラファイトの3つのサブキャプセルがPHENIX 計画の分)。また、コスト削減のため、日本原子力研究開発機構(現:量子科学

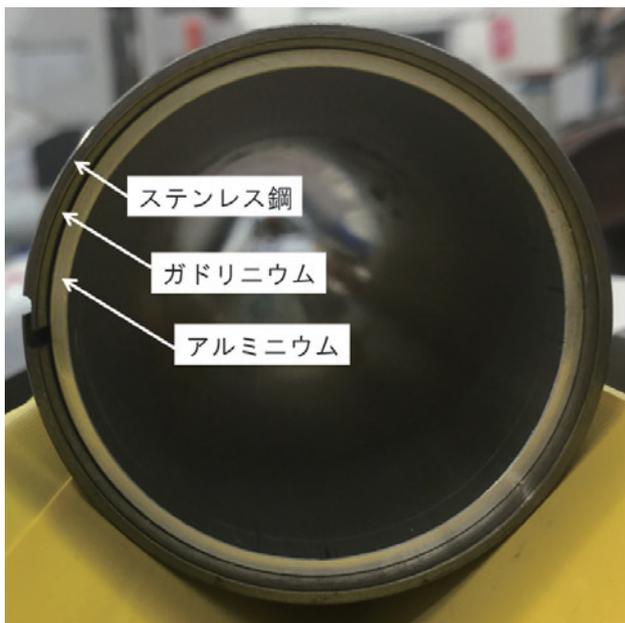


図2 RB19J キャプセルのガドリニウム遮蔽材。

技術研究開発機構)とキャプセルを共同で製作した(図3の右下写真で一番左のサブキャプセルが量子科学研究開発機構の分)。PHENIX 計画では、現在候補となっている各種タングステン材料に対して、強度や熱伝導度等の基本特性評価試験片、熱負荷試験片、トリチウム滞留・透過試験片等多様な試験片を系統的に評価できるようなテストマトリックスを日米共同で作成した。500℃の温度領域で406個、800℃の温度領域で389個、1100℃の温度領域で359個の試料を日米で準備した。タングステンの中性子照射による発熱の影響が懸念されたが、図4に示すように熱計算の結果、おおよそ目標とする温度域に収まることが明らかになった。

図3は、中中性子照射のための試料とグラファイトホルダーの写真を示している。円柱状のグラファイトに試料の形状に合わせたスロットを加工し、各スロットに試料を詰めていった。これらを、図2のステンレス鋼/ガドリニウム/アルミニウムの筒の中に入れた。

RB19J キャプセルは、比較的高コストで照射する単位が大きいので、照射条件を振った試験には不向きである。RB*に関しては、1回だけの照射試験であり、1~1.5 dpaの損傷量をめざして照射を行っているが、基本的には照射量を振ることができない。比較的核変換の影響が小さい低線量の約0.2 dpaでラビット照射を熱中性子遮蔽無しで、800℃、1100℃において実施した。試験片は全て6 mm 径で熱伝導度、強度、微細組織、トリチウム滞留・透過の評価が行われる。また、米国が保有していた、これまでの



図3 RB19J キャプセルの試料とグラファイトホルダー。

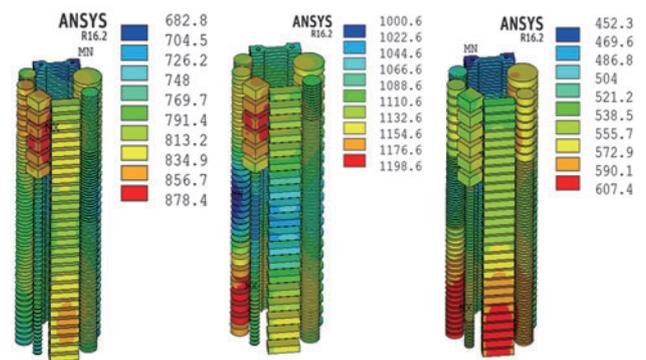


図4 RB19J での中性子照射時の熱計算結果。

プロジェクトで中性子照射された試料（熱中性子遮蔽無し）を活用した評価も進めている。

3.4 まとめ

PHENIX 計画では、熱中性子遮蔽を行いながらも比較的大きな容積を確保できるRB19Jキャプセルを用いることにより、タンゲステンで1~1.5 dpa程度の比較的高い損傷量での中性子照射を実施している。従来にない、1000℃を超える高温領域を含む系統的な中性子照射となっている。

プラズマ対向材料候補となり得る様々なタンゲステン材料に関し、比較的低線量では、中性子照射済みの試料、ラ

ビット照射試料により評価を行う。高線量では、熱中性子遮蔽を行ったRB19Jキャプセル照射試料により評価を行う。広範囲な温度、損傷領域での、中性子照射効果を明らかにし、ダイバータ用タンゲステンの適用性、開発指針を得る。

参考文献

- [1] A. Hasegawa *et al.*, J. Nucl. Mater. **471**, 175 (2016).
- [2] M.R. Gilbert *et al.*, J. Nucl. Mater. **467**, 121 (2015).
- [3] M.L. Grossbeck *et al.*, Fusion Mater. Semi-Annual Progress Reports, DOE/ER-0313/24, 254 (1998).