

中性子照射Wの微細組織と熱機械的特性
**Microstructure and Thermo-mechanical Properties of
 Neutron Irradiated Tungsten**

長谷川晃¹⁾、福田誠¹⁾、黄泰現¹⁾、近藤創介²⁾、野上修平¹⁾、檜木達也²⁾、
 L. Garrison³⁾、X. Hu³⁾、T. Koyanagi³⁾、C.M. Parish³⁾、Y. Katoh³⁾、L.L. Snead⁴⁾

A. Hasegawa¹⁾、M. Fukuda¹⁾、T. Hwang¹⁾、S. Kondo²⁾、S. Nogami¹⁾、T. Hinoki²⁾

¹⁾東北大・工、²⁾京大・エネ研、³⁾オークリッジ国立研、⁴⁾マサチューセッツ工科大
¹⁾Tohoku U., ²⁾Kyoto U., ³⁾ORNL, ⁴⁾MIT

序論

PHENIX計画のタスク2の目的は、核融合炉のダイバータの高温条件を含む温度領域（500～1450℃）におけるタンステン（W）系材料の機械特性と熱伝導特性におよぼす中性子照射影響を明らかにし、ダイバータ設計に資するWのデータベースを構築することである。そのためにオークリッジ国立研究所の原子炉（HFIR）を使って、Wの中性子照射を行い、照射後試験によって照射影響を明らかにする。さらに、タスク3での中性子照射したWにおけるトリチウム（T）の滞留および透過挙動を評価するための照射試料や、タスク1の熱伝導特性を評価する照射試料も供給する。

Wの照射挙動とその機構を理解し、照射に対する抵抗性の高い材料を開発するために、Wの照射欠陥の基礎的な挙動研究のために単結晶（高純度材）と、多結晶化や合金化、そして製造工程による微細組織制御により照射による材質変化を少なくし、照射硬化や脆化の抑制が期待される各種のW材料を照射した。照射量は照射効果の機構がはっきり分かる低照射量から、照射硬化などが飽和し始めると言われる2dpa程度までを目標に原子炉での照射を行った。また材料試験炉で懸念されるWの熱中性子吸収による核変換で生成されるレニウム（Re）やオスミウム（Os）の影響を抑えるために、核変換元素の濃度が数%になる高照射量の試験において、核変換を抑制する熱中性子遮へいをしたキャプセルを作製し照射を行い、Wにおけるはじき出し損傷と核変換の影響を明らかにすることを目的とした。またWだけではなく、Wの被覆想定したW/SiCの接合材の照射も行い、その照射後特性の評価試験方法の開発も行った。

実験方法

低線量照射は、照射時間が原子炉の照射サイクル（約1ヶ月）よりもはるかに短いため、運転中でも炉から試料を出し入れができるラビットキャプセルを用いて行った。室温から800℃までの温度範囲で、0.02dpaから5dpaまで照射した。試験片は微小引張り試験片形状で、試料はWの単結晶を中心に行った。照射後の試験は陽電子消滅法（PAS）による格子欠陥の同定や、硬さ測定と引張り試験を行い、照射による微細組織の変化と、それによる照射硬化や引張り変形の挙動を調査した。日本で開発した多結晶材や合金などの組織制御材については、ラビットキャプセルを用いて500℃と800℃で照射は1サイクル、約0.2dpaの照射を行った。この照射試料は各種の微細組織制御材を熱伝導測定用円板の形状で照射した。照射は終了し、現在放射能の冷却中である。

単結晶や微細組織制御した各種W材料の照射は、熱中性子遮へいを施した大型の照射装置（RB*）で約2dpaを目指して現在照射中である。引張り試験や熱伝導測定用diskなど各種形状の試験片を500, 800, 1100℃の各温度で照射している。2017年前半で照射を完了し、その後放射能を冷却し、2018年からの照射後試験に向けて照射後試験装置の整備を進めている。

主な成果

照射欠陥の温度による挙動を明らかにするために、ラビットキャプセル中で室温において低線量（0.03dpa）照射を行ったW単結晶の照射硬化量の照射後熱処理による変化と、陽電子消滅法や透過型電子顕微鏡で観察した損傷の温度による変化の挙動を図1に示す(1)。

図の左端は照射前のビッカース硬さである。低線量のため照射硬化量は小さいが、照射後の昇温によって硬さが増加し、600～800℃で最高となって、その後は硬さが減少することが分かる。これは陽電子消滅法や組織観察の結果から、温度が上がったことによるボイドなどの空孔クラスターの核形成と成長と、格子間原子型の転位ループの形成と成長により、W中の転位のすべり運動の抵抗が発生し、その結果、変形能の低下、すなわち硬化を示すようになったと考えられる(2)。

焼鈍の温度が上がることで、これらの欠陥クラスターが粗大化したり、また欠陥を放出することで縮小し消滅することから、高温部では硬さの回復が見られるようになったと考えられる。Wの中性子照射材の系統的な基本データはこれまであまり取られておらず、照射後の欠陥の基本的な挙動を理解する上で貴重なデータが得られた。

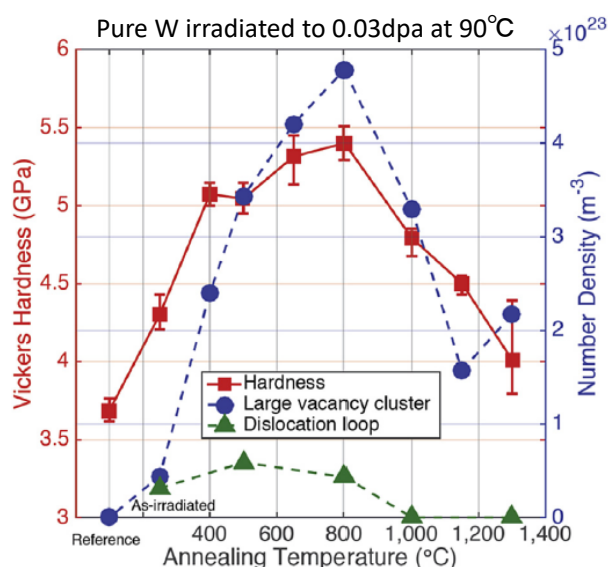


図1 中性子照射したW単結晶の照射後焼鈍による硬さと損傷組織の変化(1)

図2はこれまでに得られた純Wの照射硬化量の損傷量(dpa)依存性を示したものである(3)。①～④が今回のラビット照射で得られたデータである。1dpa以下では熱中中性子の多寡にかかわらず、照射硬化の損傷量依存性はほぼ同じ傾向にあるが、1dpa以上では、HFIRのように熱中中性子の多い原子炉での照射と、熱中中性子の少ない高速炉照射をくらべるとHFIRの方が照射硬化量がずっと大きくなる傾向が見られた。これはHFIRでの1dpa以上の照射では核変換によりReが数～十％程度に達し、WReやWRe₃といった析出物が多量に形成されることが原因と考

えられている。微細組織観察の定量的な評価からもそれが裏付けられた(1～3)。これらの結果から、HFIRでの重照射においては熱中中性子遮へいによる核変換の抑制の重要性が認識され、現在熱中中性子遮へいを施した大型のキャプセルでの照射が進められている。2014～5年に照射用の材料の製作と試験片の加工、キャプセルへの装荷が行われ、2016年の6月から500、800、1100℃の3つの温度で2dpaを目標として照射が始まり、継続して照射中である。

現在、照射後試験のための実験装置の整備とこれらの試料の非照射でのデータ取得が日米で進められている。

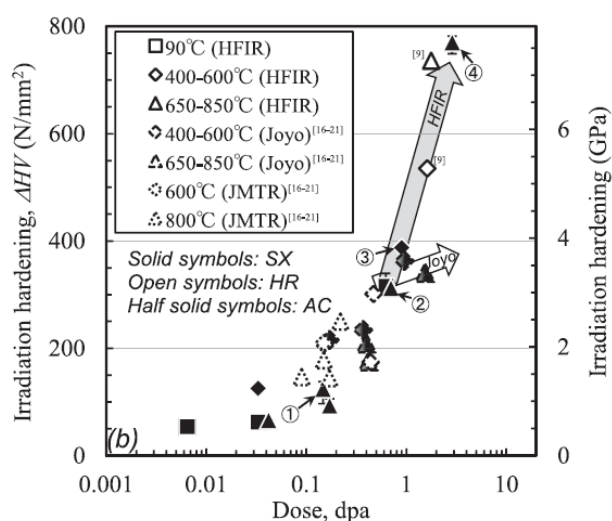


図2 純Wの照射硬化量のはじき出し損傷量依存性(3)

今後の課題

照射の終わった試験片は放射能化しているため1年程度の冷却が必要であり、その後キャプセルを解体し、日本への試験片の輸送が計画されている。放射能化している試験片の実験には放射線管理区域内での実験が不可欠であり、そのための装置の整備や、効率的な試験片の利用などの照射後実験計画を調整していくことが必要である。

参考文献 (PHENIX 計画による論文)

- (1)X. Hu et al., J. Nucl. Mater. 480 (2016) 235-243
- (2)X. Hu et al., J. Nucl. Mater. 470 (2016) 278-289
- (3)M. Fukuda et al, J. Nucl. Mater., 479 (2016) 249-254