

[22008]

中性子照射を模擬したタングステンにおけるプラズマ駆動透過に 及ぼす水素同位体効果

Hydrogen Isotope Effect on Plasma Driven Permeation in Tungsten Simulating Neutron Irradiation

大矢恭久 ^{#A)}, 平田詩織 ^{B)}, 小山 優輝 ^{B)}, 星野柚香 ^{A)}, 三福寺旭 ^{A)}, 齋藤 永 ^{A)}, 周 啓来 ^{A)}
Yasuhisa Oya ^{#A)}, Shiori Hirata ^{B)}, Yuki Koyama ^{B)}, Yuzuka Hoshino ^{A)}, Asahi Sanfukuji ^{A)},
Hisashi Saito ^{A)}, Zhou Qilai ^{A)}

^{A)} Faculty of science, Shizuoka University

^{B)} Graduate School of Science & Technology, Shizuoka University

Abstract

The hydrogen isotope permeation behavior for tungsten and tungsten-10%rhenium with various damage distributions by Fe^{2+} and He^+ - Fe^{3+} irradiation was evaluated by plasma driven permeation device. The D diffusion coefficient and permeation flux for irradiated W-10%Re were smaller than that for W, suggesting that the introduced irradiation damage would act as a barrier to permeation and diffusion.

Keyword: Hydrogen isotopes permeation, Tungsten, Rhenium

1. 目的

核融合炉環境下では DT 核融合反応による 14 MeV 中性子や高エネルギー水素同位体がプラズマ対向材であるタングステンに照射され、照射欠陥が形成される。一般的にタングステンの水素同位体滞留量は低いことで知られているが、タングステン中に欠陥が形成されると照射欠陥が水素同位体の安定な捕捉サイトとなり、水素同位体滞留量が増加することが報告されている[1]。過去の研究では、中性子照射による放射化によって試料の取扱が困難になるため、中性子照射タングステン中の水素同位体滞留挙動はタングステンイオンや鉄イオンなどの重イオン照射タングステンを使用した模擬実験により評価されることが多かった[1-3]。重イオン照射実験により、欠陥を導入したタングステンは損傷量が増加するにつれて、ポイドなどの安定な捕捉サイトを形成し、水素同位体滞留量が増加することが明らかにされた[3]。しかし、重イオンは荷電粒子であるため飛程が短く、照射欠陥は表面付近に集中して形成されるが、中性子は照射欠陥をバルク中に均一に形成するため、重イオン照射と中性子照射ではタングステン中の水素同位体滞留挙動が異なると予想される[4]。また実機環境下においても、14 MeV 中性子の他に燃料である重水素やトリチウムが高エネルギー粒子としてプラズマ対向機器に照射され、これらのイオンによって導入される欠陥は表面に集中して分布する。よって、プラズマ対向材料中の照射欠陥は分布を持っている。また、中性子照射により一部のタングステンがレニウムへと核変換する。レニウムの生成量は、2.5 年の運転後に最大 4%、10 年の運転後に最大 8%まで増加すると予測されている[5]。そこで本研究では、実機環境下において生じる照射欠陥の影響を系統的に理解するため、タングステン、タングステン-レニウム合金を用いて水素同位体透過挙動を評価した。鉄

イオン照射および、ヘリウムイオン、鉄イオン同時照射によって生成する欠陥分布を制御し、水素同位体透過挙動への照射欠陥影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

実験にはアライドマテリアル社製の直径 6 mm ϕ 、厚さ 0.5 mm^tのタングステン(W)とタングステン10%レニウム(W-10%Re)合金を使用した。この試料に対し、不純物除去のため高真空下($<10^{-6}$ Pa)で 1173 K にて 30 分間加熱処理を行った。その後、核融合炉内環境を模擬した損傷試料を作製するために、群馬県にある高崎量子応用研究所(TIARA)にて Fe^{2+} の照射を行った。損傷量が 1 dpa となるように W と W-10%

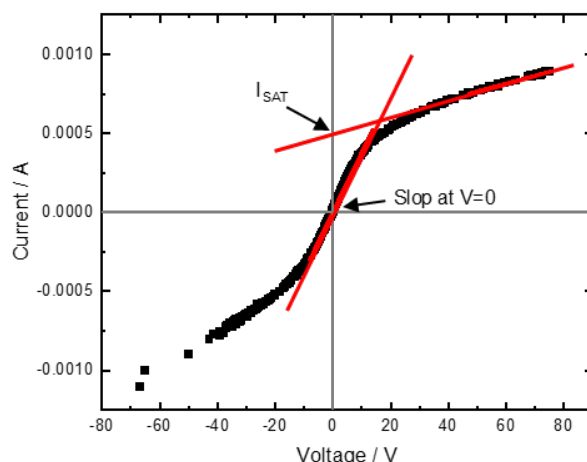


Figure 1. I-V characteristics for the evaluation of plasma parameters.

[22008]

Re 試料に対し、室温で照射を行った。また一部の試料に対して、京都大学にある複合ビーム材料照射施設(DuET)にて He^+ と Fe^{3+} の同時照射を行った。1173 K の温度で損傷量が 1 dpa、ヘリウム濃度が 600 appm/dpa となるように照射を行った。その後、静岡大学に設置した線形 RF プラズマ駆動装置(PDP)を用いて重水素プラズマ駆動透過実験、HD 混合プラズマ駆動透過実験を 673 K~813 K の温度で行った。印加電力 550 W にてプラズマを生成し、D、HD プラズマフラックスは $1.0 \times 10^{21} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ とした。イオンフラックスは Fig. 1 に示すダブルラングミュアプローブを用いて計測した I-V 特性から算出した。試料を透過した H, D, HD は重水素で校正を行った質量分析器にて測定した。プラズマ中の原子比は Fig. 2 に示す、プラズマ計測システムを用いて測定したプラズマ分光スペクトルの面積とイオン化効率の割合から算出した。

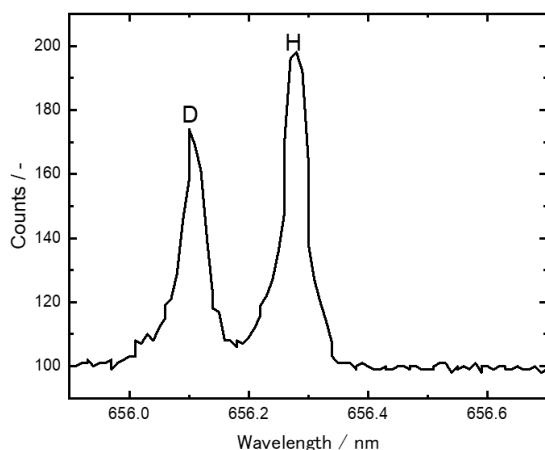


Figure 2. H and D spectra by high-resolution optical emission spectroscopy.

3. 結果・考察

Fig. 3 に D プラズマ照射時の W と W-10%Re の定常透過フラックス、Fig. 4 に D プラズマ照射時の W と W-10%Re の拡散係数を示す。非照射 W-10%Re は非照射 W に比べて定常透過フラックスが高く、拡散

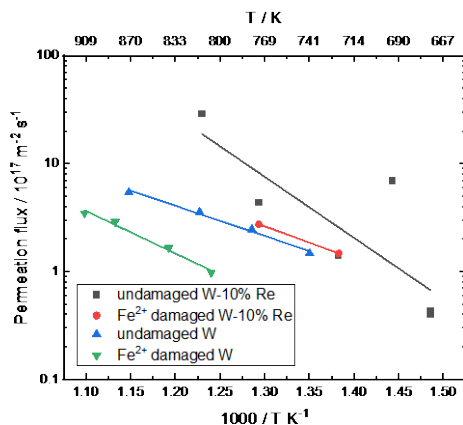


Figure 3. D permeation flux as a function of temperature.

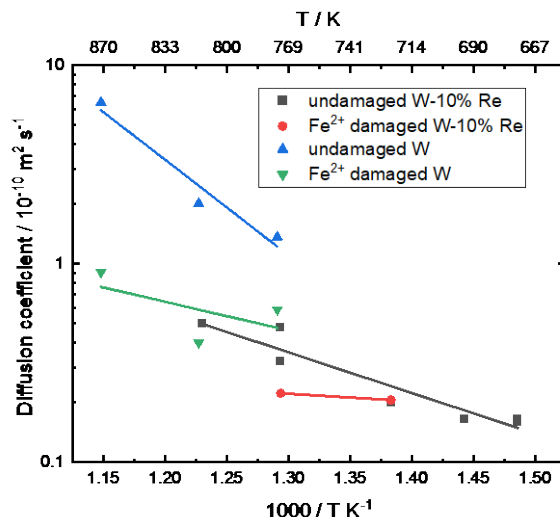


Figure 4. D diffusion coefficient with D plasma.

係数が減少していた。また Fe^{2+} 照射を行った W-10% Re は非照射 W-10%Re に比べて定常透過フラックス、拡散係数がともに減少していた。 Fe^{2+} 照射により生成された照射欠陥が D を捕捉し、D 透過、拡散の障壁として働いたことが考えられる。

Fig. 5, 6 に HD の比率を変化させながら HD 混合プ

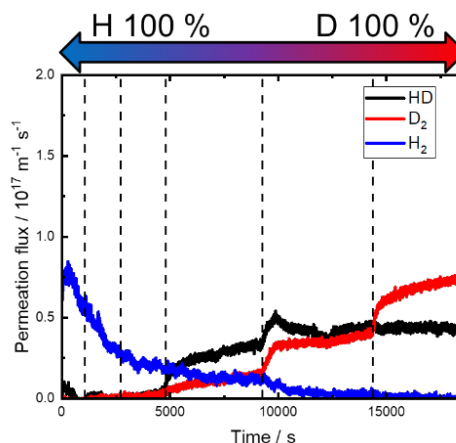


Figure 5. D permeation flux for W-10%Re under plasma exposure with various HD ratio.

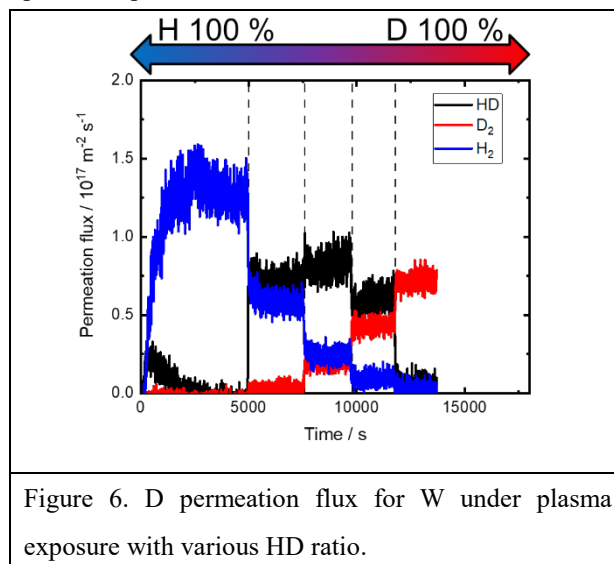


Figure 6. D permeation flux for W under plasma exposure with various HD ratio.

[22008]

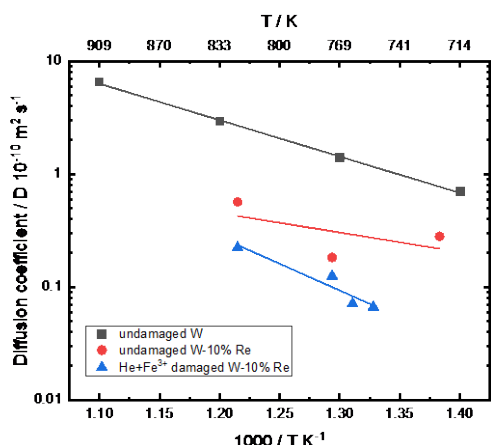


Figure 8. Comparison of D diffusion coefficient for undamaged W, W-10%Re and He⁺-Fe³⁺ damaged W-10%Re.

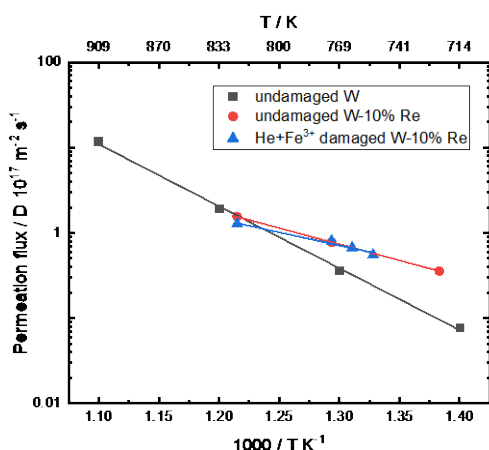


Figure 7. Comparison of D permeation flux for undamaged W, W-10%Re and He⁺-Fe³⁺ damaged W-10%Re.

ラズマ照射を行った W-10%Re と W の定常透過フラックスを示す。W-10%Re は W に比べて透過が定常になるまでの時間が長かった。W に比べて W-10%Re では水素同位体の溶解度が高く拡散に時間がかかったことが示唆される。また、W-10%Re では HD 比が 20:80 の際に HD の透過フラックスが最大であったのに対し、W では HD 比が 50:50 の際、HD 透過フラックスが最大であった。W-10%Re と W では同位体効果が異なっており、W-10%Re では W に比べて D/H 比の高いプラズマ照射で高い HD 放出が見られたと考えられる。Fig. 7 に H と D の原子比を 50:50 とした際に HD 混合プラズマ照射を行った D の定常透過フラックスを、Fig. 8 に同様の HD 混合プラズマ照射を行った際の D の拡散係数を示す。W-10%Re は W に比べて定常透過フラックスが高く、拡散係数が減少していた。また、He⁺ と Fe³⁺ の同時照射を行った W-10%Re は非照射 W-10%Re に比べて定常透過フラックス、拡散係数がともに減少していた。Fe²⁺ 照射を行った W-10%Re と同様に He⁺ と Fe³⁺ の同時照射により生成された照射欠陥が D を捕捉するとともに

に He バブル形成することにより、D 透過、拡散の障壁となったことが考えられる。

4. まとめ

本研究では実機環境下において生じる照射欠陥の影響を系統的に理解するため、タングステン、タングステン-レニウム合金を用いて水素同位体透過挙動の評価を行った。照射欠陥影響を模擬するために TIARA、DuET にて照射欠陥を導入し、試料への D プラズマ、HD 混合プラズマ照射実験を行うことで水素同位体透過挙動を行った。D プラズマ、HD 混合プラズマ照射実験より、W-10%Re は W に比べて定常透過フラックスが増加し、拡散係数が減少した。W-10%Re は W に比べて水素同位体の溶解度が高く、拡散しにくくなったと示唆された。Fe²⁺ 照射、He⁺ と Fe³⁺ の同時照射を行った W-10%Re は非照射 W-10%Re に比べて定常透過フラックス、拡散係数が減少したことから導入した照射欠陥が水素同位体を捕捉し、透過や拡散の障壁となったことが示唆された。また、HD 比を変化させながら HD 混合プラズマ照射を行った定常透過フラックスの結果から W-10%Re と W の同位体効果が異なり、W-10%Re では W に比べて高い D/H 比のプラズマで高い HD 放出が起きたことが示唆された。

参考文献

- [1] B. Tyburska et al., J. Nucl. Mater., 395 (2009) 150-155.
- [2] V. Kh. Alimov et al., J. Nucl. Mater., 441 (2013) 280-285.
- [3] Y. Oya et al., J. Nucl. Mater., 461 (2015) 336-340.
- [4] M. Shimada et al., Fusion Eng. Des. 87 (2012) 1166-1170.
- [5] A.V. Golubeva, et al., Deuterium retention in rhenium-doped tungsten. J. Nucl. Mater. 363-365 (2007) 893-897.