PASJ2017 TUP124

核融合プラズマ対向材の損傷評価に向けたタンデム加速器による タングステンへの 4MeV ヘリウムビーム照射と内部拡散の検討

IRRADIATION OF 4MEV HELIUM BEAM AND INTERNAL SCATTERING IN TUNGSTEN USING TANDEM ACCELERATOR TO EVALUATE EROSION FOR PLASMA FACING MATERIAL IN NUCLEAR FUSION

内田雄大^{#, A)}, 斎藤誠紀^{B)}, 齊藤信雄^{A)}, 鈴木常生^{A)}, 高橋一匡^{A)}, 佐々木徹^{A)}, 菊池崇志^{A)} Yuki Uchida^{#, A)}, Seiki Saito^{B)}, Nobuo Saito^{A)},

Tsuneo Suzuki^{A)}, Kazumasa Takahashi^{A)}, Toru Sasaki^{A)}, Takashi Kikuchi^{A)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

^{B)} National Institute of Technology, Kushiro College

Abstract

Erosion for tungsten was evaluated experimentally by irradiating 4MeV helium beam at fluence of 10²² ions/m². The diffraction images were acquired for helium irradiation and non-irradiation area by using the transmission electron microscope (TEM). As a result, Debye-Scherrer rings were observed for the diffraction patterns in the helium non-irradiation area. In the helium irradiation area, sparse diffraction patterns were observed. These results show recrystallization may occur by localized heating. Moreover, internal scattering of helium in tungsten was calculated with TRIM code. Broadening of helium for depth direction irradiated in 4 MeV was larger than in 250 eV.

1. はじめに

磁場閉じ込め核融合装置のプラズマ対向材にタング ステンが検討されている。しかし、タングステンへの低エ ネルギー(<keV)のヘリウム照射により、表面付近でのヘ リウムバブルの生成[1]や熱負荷による再結晶脆化[2]な どの損傷が確認されている。また、リップルロスなどにより、 高エネルギー(~MeV)のヘリウムイオンが第一壁へ入射 するため[3]、深部で欠陥層が生成されることが予測され ている。本研究では、核融合反応で発生するヘリウムの エネルギーを模擬した 4 MeV のヘリウム照射により、タ ングステンの深さ方向におけるバブルの生成と再結晶化 の可能性について検討した。また、ヘリウムの内部散乱 による広がりがタングステンの損傷生成に与える影響を 評価するために、TRIM コード[4]による計算を行った。

2. 実験手法

高エネルギーヘリウム照射によりタングステン試料へ 損傷を与えるために、タンデム型静電加速器を用いた。 ヘリウム照射後のタングステン試料について、 FIB(Focused Ion Beam)装置を用いて薄片加工し、 TEM(Transmission Electron Microscope)を用いて深部 の損傷を観察した。

イオンビーム照射には、長岡技術科学大学に設置されているタンデム型静電加速器(Tandetron Broch (4117-MC*-358); High voltage engineering)を用いた。イオンには4 MeV の He²⁺を使用した。イオンビームは、タングステン試料の中心に2×2 mm²でコリメートして照射した。フラックスとフルエンスは、それぞれ 10¹⁸ ions/m²/s、10²² ions/m²とした。このフルエンスは、250 eV のヘリウムイオ

ン照射によってヘリウムバブルの生成が確認される量[5] に相当する。

ヘリウム照射後のタングステン試料に対して、FIB 装置(FB2200; Hitachi high-technologies)を用いて TEM 観察用の薄片試料を作製した。深さ方向に 10 μm 程度、 厚さ 100 nm 程度まで薄片加工した。加工は加速電圧 40 kV で行った後に、ガリウムイオンによるダメージ層を 除去するために加速電圧 10 kV で加工した。

ヘリウム照射箇所と未照射箇所の薄片試料の断面を TEM (HT7700; Hitachi high-technologies)を用いて観察 した。加速電圧は 100 kV である。

試料は、タングステン板(The Nilaco Corporation)を用 いた。サイズは 0.20×10×10 mm³、純度は 99.95%である。

3. 結果および考察

ヘリウム照射後のタングステン試料について、暗視野 像と電子回折像を取得した。Figure 1 にヘリウム照射箇 所と未照射箇所の明視野像を示す。また、Figure 2 に照 射箇所と未照射箇所の電子回折像を示す。電子回折像 を比較すると、ヘリウム未照射箇所では、多結晶に見ら れるデバイリングが確認でき、ヘリウム照射箇所ではまば らな回折点が確認できた。この結果から、ヘリウム照射箇 所の結晶粒径は未照射箇所よりも大きいと考えられる。

明視野像からヘリウムバブルに相当する欠陥は確認 できなかった。高エネルギーヘリウムは低エネルギーより も侵入長が深いため、タングステン内部での散乱による 広がりが大きいと考えられる。そこで TRIM コードを用い て、タングステン内に侵入したヘリウムの空間分布を計 算した。ここで、テスト粒子の数は、10⁶ 個とした。また、入 射エネルギーを 250 eV と4 MeV の場合で比較した。

[#] uchida@stn.nagaokaut.ac.jp

PASJ2017 TUP124



(a) Non-irradiated area

(b) Irradiated area

Figure 1: Bright field images of tungsten observed by TEM. (a) non-irradiated area, and (b) irradiated area of helium.



(a) Non-irradiated area



(b) Irradiated area



Figure 3 にタングステン内に入射したヘリウムの深さ分 布を示す。また、Figure 4 に入射したヘリウムの半径方 向の分布を示す。散乱による広がりを評価するために、 FWHM (Full Width at Half Maximum)を計算した。半径 方向の FWHM はそれぞれ、250 eV で 5.4 nm、4 MeV で 1.2 µm となった。これは、実験時のヘリウム照射範囲 である 2×2 mm²と比較して小さかった。つまり、250 eV と 4 MeV で半径方向に分布しているヘリウムの数は変わら ず、ヘリウムのバブルの成長へ与える影響は少ないと考 えられる。一方で、深さ方向の FWHM はそれぞれ、250 eV で 3.9 nm、4 MeV で 0.4 μm となった。250 eV よりも 4 MeV の方が深さ方向の広がりが約 100 倍大きいことが 分かる。つまり、4 MeV のヘリウム照射では、タングステンへの侵入深さ周辺に分布しているヘリウムの数が少な くなる。これにより、原子空孔にヘリウム原子が集まる量 が少なくなることで、ヘリウムバブルが観測できるほど成 長しなかったと考えられる。



Figure 3: Depth distribution for helium ions into tungsten calculated by TRIM code. (a) Incident energy of helium ions is 250 eV, and FWHM is 3.9 nm. (b) Incident energy of helium ions is 4 MeV, and FWHM is 0.4 μ m.

Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 1-3, 2017, Sapporo, Japan

PASJ2017 TUP124



Figure 4: Distribution of radial direction for helium ions into tungsten calculated by TRIM code. (a) Incident energy of helium ions is 250 eV, and FWHM is 5.4 nm. (b) Incident energy of helium ions is 4 MeV, and FWHM is 1.2 µm.

また、電子回折像より、ヘリウム照射箇所と未照射箇 所で回折パターンの変化を確認している。そこで、ヘリウ ム照射によるタングステン内のエネルギー付与を TRIM コード[4]で計算した。Figure 5 にタングステン中のヘリウ ムイオンの電子的阻止能を示す。図より、深さ5 µm でブ ラッグピークが確認できる。これにより、ブラッグピーク周 辺で局所的にタングステンの温度が上昇し、再結晶化し た可能性がある。

4. まとめ

タンデム型静電加速器を用いて、4 MeV の He²⁺をタ ングステンに 10²² ions/m² のフルエンスで照射した。照射 後のタングステンについて TEM を用いて、明視野像と 電子回折像を取得した。明視野像より、ヘリウムビーム照 射によるヘリウムバブルの生成は確認できなかった。 TRIM コードにより、タングステン内に入射したヘリウムの 広がりを計算した。その結果、250 eV の照射よりも 4 MeV の照射の方が、深さ方向の広がりが約 100 倍大き かった。電子回折像より、ヘリウム未照射箇所でデバイリ ングを確認した。また、ヘリウム照射箇所でずバイリ ングを確認した。これは、ヘリウムビーム照射による結晶粒 の増加の可能性を示唆する。4 MeV ヘリウムの阻止能 から、タングステン内部に局所的にエネルギーが付与さ れていることが分かった。

参考文献

- [1] M. Tokitani *et al.*, J. Nucl. Mater 337–339, 2005, pp. 937–941.
- [2] A. Suslova et al., Scientific Reports, 4, 2014, pp. 6845.
- [3] K. Tobita et al., Fusion Eng. Des. 65, 2003, pp. 561–568.
- [4] James F. Ziegler *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 248, 2010, pp. 1818–1823.
- [5] H. Iwakiri *et al.*, J. Nucl. Mater. 283–287, 2000, pp.1134–1138.



Figure 5: Electronic energy loss for 4 MeV helium ion into tungsten calculated by TRIM code.