

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 10^{22} 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 10^{18} ions/m²/s、 10^{22} 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を確認できた。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、 10^6 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

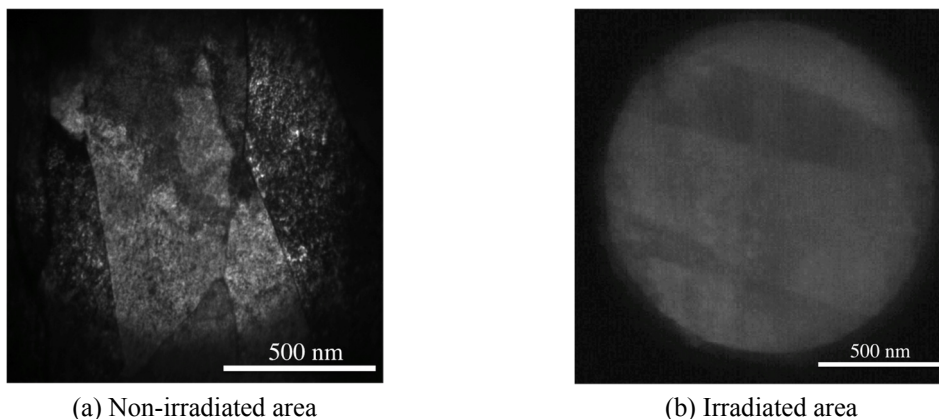


Figure 1: Bright field images of tungsten observed by TEM. (a) non-irradiated area, and (b) irradiated area of helium.

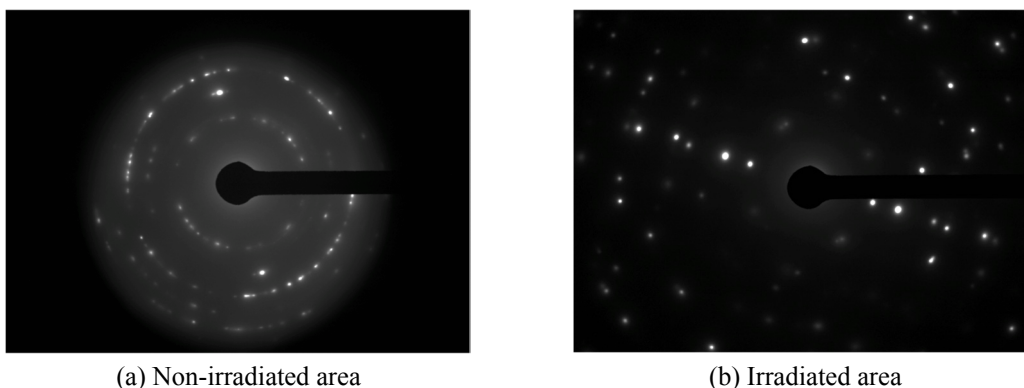


Figure 2: Electron diffraction images of tungsten observed by using TEM. (a) non-irradiated area, and (b) irradiated area of helium.

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 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 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。

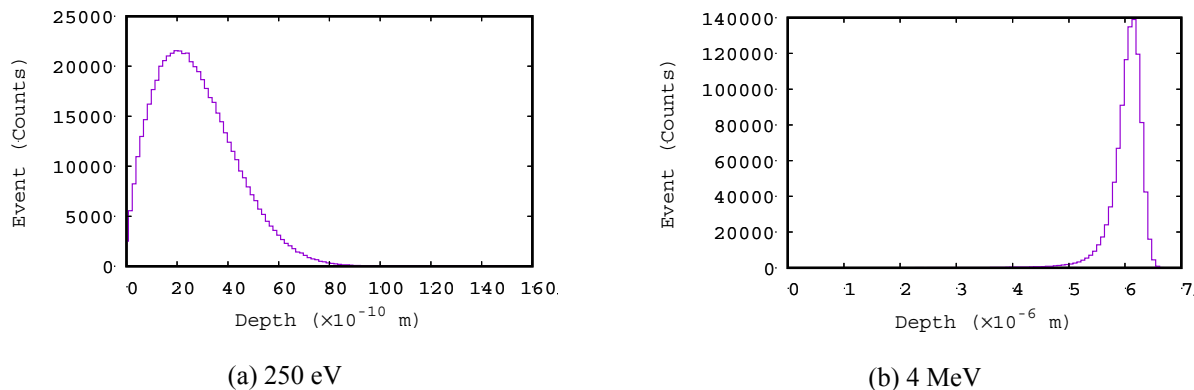


Figure 3: Depth distribution for helium ions into tungsten calculated by TRIM code. (a) Incident energy of helium ions is 250 eV, and FWHM is 3.9 nm. (b) Incident energy of helium ions is 4 MeV, and FWHM is 0.4 μm .

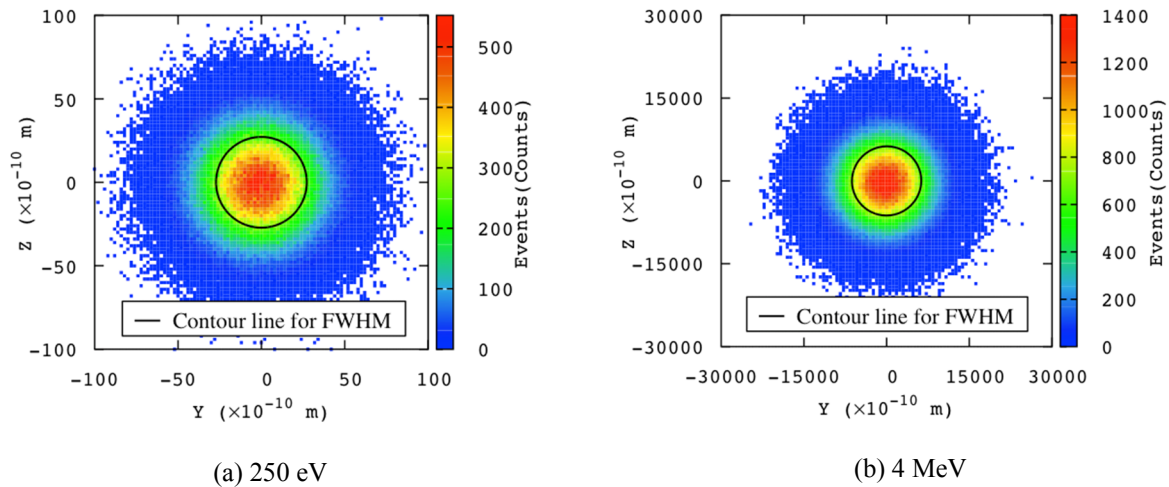


Figure 4: Distribution of radial direction for helium ions into tungsten calculated by TRIM code. (a) Incident energy of helium ions is 250 eV, and FWHM is 5.4 nm. (b) Incident energy of helium ions is 4 MeV, and FWHM is 1.2 μm .

また、電子回折像より、ヘリウム照射箇所と未照射箇所では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 He^{2+} をタングステンに 10^{22} ions/ m^2 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はデバイリングを確認した。また、ヘリウム照射箇所ではまばらな回折点を確認した。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.

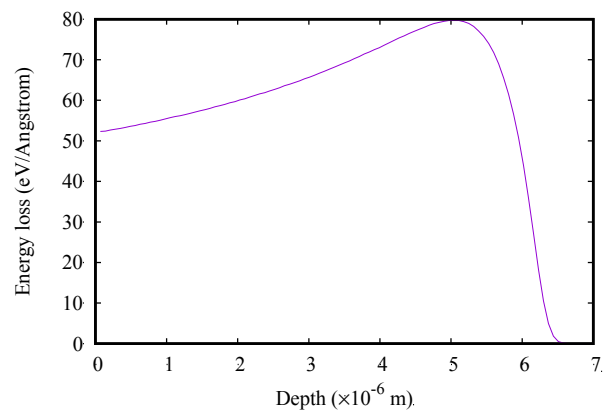


Figure 5: Electronic energy loss for 4 MeV helium ion into tungsten calculated by TRIM code.