

Fuzz 形成閾温度以下におけるタングステンのヘリウムプラズマ照射影響

Effects of Helium Plasma Exposure on Tungsten in Temperature Range below Fuzz Formation

坂本隆一, Elodie BERNARD¹, Arkadi KRETER², 吉田直亮³

Ryuichi SAKAMOTO, Elodie BERNARD¹, Arkadi KRETER², Naoaki YOSHIDA³

核融合研, ¹CEA/IRFM, ²FZ Jülich, ³九大・応力研

NIFS, ¹CEA/IRFM, ²FZ Jülich, ³Kyushu Univ./RIAM

タングステンにおけるヘリウムプラズマ照射影響の温度依存性を調べ、Fuzz ナノ構造が形成される閾温度よりも低い 1073 K 以下の温度領域では、結晶粒によって形状が異なる波状ナノ構造が形成されることを明らかにし、その結晶方位依存性を調べた。

ヘリウムは水素に比べて金属材料の表面損傷に及ぼす影響が大きいことが知られているが、核融合炉のプラズマ対向材料は、燃料である水素同位体のみならず、核融合生成物であるヘリウムの照射環境下に置かれる。特に第一壁は、ブランケットに入射する中性子の減衰を避けるために、厚さに制限があり、ブランケットの表面にコーティングされた薄いタングステン層になると想定されていることから、その寿命を評価する上でヘリウム照射影響が重要になる可能性がある。ブランケット構造材料として低放射化フェライト鋼を使用する場合、許容される最大運転温度は～800 K 以下となることから、第一壁温度は Fuzz ナノ構造が形成される閾温度（～1000 K）よりも低くなる。これまで、ヘリウム照射影響として Fuzz ナノ構造形成に着目した研究は数多くあるが、閾温度以下の温度領域における照射影響はあまり着目されていなかった。本研究では、核融合炉第一壁のプラズマ照射環境を想定し、Fuzz ナノ構造が形成される閾温度以下におけるタングステンのヘリウム照射影響を調べるために、直線プラズマ装置 PSI-2 を用いてヘリウムプラズマ照射実験を行い、電子顕微鏡（SEM, TEM）や電子線後方散乱回折法（EBSD）を用いて照射面の表面構造解析を行った。

$1 \times 10^{23} / \text{m}^2$ 以下の低照射量において、773 K 以下の温度領域では明らかな表面損傷構造は発達しないが、1073 K になると表面に直径 3 – 15 nm 程度の微小ホールが形成される。TEM による断面観察により、全温度領域において、表面から 20 nm 程度の深さまで、直径数 nm のヘリウムバブルが形成され、1073 K ではバブルが結合して大きく成長したものが表面に貫通し、微小ホールを形成する。

照射量が $5 \times 10^{24} / \text{m}^2$ を超えると、773 K 以下の温度領域で波状ナノ構造が形成され、1073 K では波状ナノ構造と微小ホールの両者が形成される。波状ナノ構造は結晶粒によってその間隔が異なり、図 1 に示すような典型的な 4 つの構造に分類できる。EBSD で求めた結晶方位と比較することにより、波状ナノ構造の結晶方位依存性を明らかにした。波状ナノ構造は $\langle 100 \rangle$ 方位に配列し、その間隔は表面の結晶方位が $\{110\}$ 面のとき最も狭く～25 nm であった。結晶方位が $\{110\}$ 面から傾くにつれて間隔が広くなり、 $\{100\}$ 面近傍では波状ナノ構造は発達しない。表面凹凸（波高）は、波状ナノ構造の間隔に依らずヘリウムの飛程（～10 nm）程度になる。さらに、照射量が $3 \times 10^{26} / \text{m}^2$ を超えると、結晶粒によって表面高さに明確な差異が生じるようになる。このことは、ヘリウムの入射エネルギー（～75 eV）がスパッタリングの閾値以下であるにもかかわらず表面損耗が生じ、損耗速度には結晶方位依存性があることを示唆している。

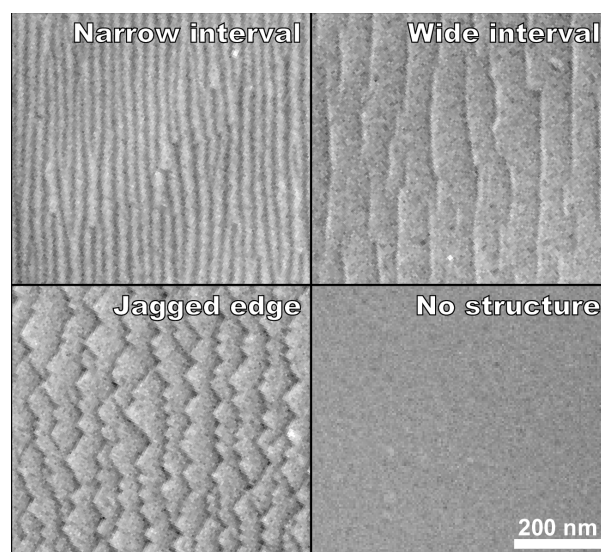


図 1: Typical four types of morphology on the helium plasma exposed tungsten surface at 473 K.