

7P52 タングステン堆積層形成過程における水素透過挙動とそのモデル化 The modeling of hydrogen permeation behavior while forming tungsten deposition layer

増田 健太郎, 大宅 諒, 吉田 直亮, 片山 一成

MASUTA Kentaro, OYA Makoto, YOSHIDA Naoaki, KATAYAMA Kazunari

九州大学

Kyushu Univ.

1. 緒言

重水素 (D) とトリチウム (T) を燃料とする DT 核融合炉の実証に向けて、プラズマ対向壁における水素同位体の溶解、拡散、再放出といった挙動の理解は燃料密度制御、トリチウム安全管理の観点から重要な課題である。プラズマ対向材料の候補として、熱特性に優れたタングステン (W) が挙げられており、プラズマとの相互作用に関する研究が進められている。高エネルギー粒子が壁材料に入射するとスパッタリングと呼ばれる構成原子のはじき出しが生じる。W は高原子番号の元素であり、スパッタリング率は比較的低いが、核融合炉の長期的な運転を考慮するとスパッタリングによる影響は無視できない。はじき出された W 原子がプラズマ対向壁上に堆積し、再堆積層が形成される。そのため、再堆積層における水素同位体挙動の理解が必要である。再堆積層はバルク W とは構造が大きく異なり、水素同位体照射下で形成されることで高濃度に水素同位体を吸蔵することが報告されている⁽¹⁾。しかしながら、形成された堆積層に継続的に水素同位体が照射された際の、プラズマ側への再放出速度や壁側への透過速度については定量的理解が十分でない。

本研究では、高周波 (RF) プラズマスパッタ装置により、水素プラズマによって形成される W 堆積層の形成過程における水素透過現象を観測し、透過フラックスの経時変化を定量評価した。さらに、実験後の W 堆積層断面を透過電子顕微鏡 (TEM) により観察し、微細構造を調べた。

2. 実験

RF プラズマスパッタ装置は電極面積の異なる容量結合型の水素プラズマにより W ターゲットをスパッタする。W 堆積層を形成させる Ni 基板 (厚さ 20 μm) を容器中央の透過ポート (グラウンド電極側) に設置した。Ni 基板は銅ガasket とともに穴あきフランジにより固定することで、Ni 基板を介してプラズマを発生させる側 (プラズマ側) と Ni 基板及び W 堆積層を透過した気体が通過する側 (透過側) の 2 つの空間に分けている。プラズマ側を 10^{-4} Pa、透過側を 10^{-5} Pa 程度に真空引きした後、プラズマ側に水素ガスを供給し、マスフローコントローラを用いてガス圧を調節した。その後、RF 電極に 13.56 MHz の RF 電力 200 W を印加しプラズマを発生させた。W 堆積層

及び Ni 基板を透過した水素を四重極質量分析計 (QMS) を用いて測定した。また、透過ポート下部より熱電対を用いて基板温度を測定した。実験条件を表 1 に示したが、exp.1 では温度制御を行わず、exp.2、3 はシーズヒーターによる加熱を行い、基板温度を上昇させた。

exp.1 で形成した堆積層を集束イオンビーム加工装置 (FIB) により厚さ約 100 nm の試料を作成し、TEM による断面観察と、エネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) による元素分析を行った。

	温度制御	水素ガス圧	RF電力	Ni-RF電極距離	実験時間
exp.1	なし	60 Pa	200W	40 mm	24 h
exp.2	~ 360 °C				12 h
exp.3	~ 280 °C				

表 1 実験条件

3. 結果、考察

温度制御の有無に関わらず、水素の透過フラックスは実験初期でピークを示し、それ以降は時間とともに減少し続けた。これは、Ni 基板中の水素濃度が急激に上昇し、その後堆積層の厚み増加に従って、透過側への拡散が抑制されたことが原因であると考えられる。また、プラズマ点火後から 40000 秒までは、基板温度の高い条件の方が透過フラックスも大きいことが確認されたが、40000 秒付近ではいずれの条件でも透過フラックスは同程度であった。

exp.1 の W 堆積層断面の TEM 観察から、Ni 基板上に厚さ 260 nm 程度の堆積層の形成を確認した。表面付近を中心にキャビティが多く観察されており、水素が捕捉されている可能性があるため、今後定量的に評価する必要がある。先行研究により、W 堆積層中の水素拡散速度は W バルクよりも遅く、水素溶解度は大きいと報告されているが^(2,3)、本実験で確認された欠陥が水素の透過や滞留に影響を与えていると考えられる。

参考文献

- (1) K. Katayama et al, Fusion Sci. Technol., 54 (2008) 549-552.
- (2) K. Uehara et al., Fusion Eng. Des., 98-99 (2015) 1341-1344.
- (3) Y. Hara, et al., Fusion Eng. Des., 172 (2021) 112851.