

ヘリウム-タングステン共堆積層による構造・物性変化と核融合炉への影響  
**Morphological and physical property changes due to helium tungsten  
 co-deposition layer and its impact on fusion reactors**

梶田 信  
 Shin Kajita

名古屋大学 未来材料・システム研究所  
 IMaSS, Nagoya University

タングステンにヘリウム(He)プラズマを照射すると、表面にHeバブルやファズと呼ばれる繊維状のナノ構造が形成されることが知られている。ファズの成長条件や成長速度については、これまでよく研究されてきたものの、Heイオンとともにタングステンを堆積させると、ヘリウム照射効果が大きく変化することが明らかになってきた[1]。本発表では、ヘリウム照射に対する堆積効果について現在の理解と、核融合装置への影響について、主にアーキングの観点から紹介する。

図1(a)は、直線型装置NAGDIS-IIのヘリウムプラズマに少量のネオンを添加した際に形成された、孤立したひげ状のナノ構造体の電子顕微鏡写真である[2]。この構造は、nano tendril bundles (NTBs)と呼ばれ、スパッタリングされた粒子の再堆積が形成機構として重要であると考えられている。ただし、RFバイアス等異なる機構も提案されており、議論は現在も続いている。

NAGDIS-IIにおいては、W試料の近くに負に深く数百VバイアスをかけたW線（スパッタリングワイヤ）を設置し、Wを試料に堆積させた条件でHe照射実験が行われた[3,4]。図1(b)は、W堆積環境でHeプラズマを1時間照射したW試料の一部の電子顕微鏡写真である。数mmにも及ぶ束状になった毛皮のような構造（LFN：large-scale fiberform nanostructure）が形成されているのがわかる。この構造はファズと同様の繊維状ナノ構造に加えて膜構造を含んでいる。

スパッタリングワイヤと基板の配置を変化させながら、LFNの成長方向を調べた結果、基板の端からスパッタリングワイヤに箇所から成長が始まり、成長方向はプラズマの流れと一致していることがわかっている[4]。

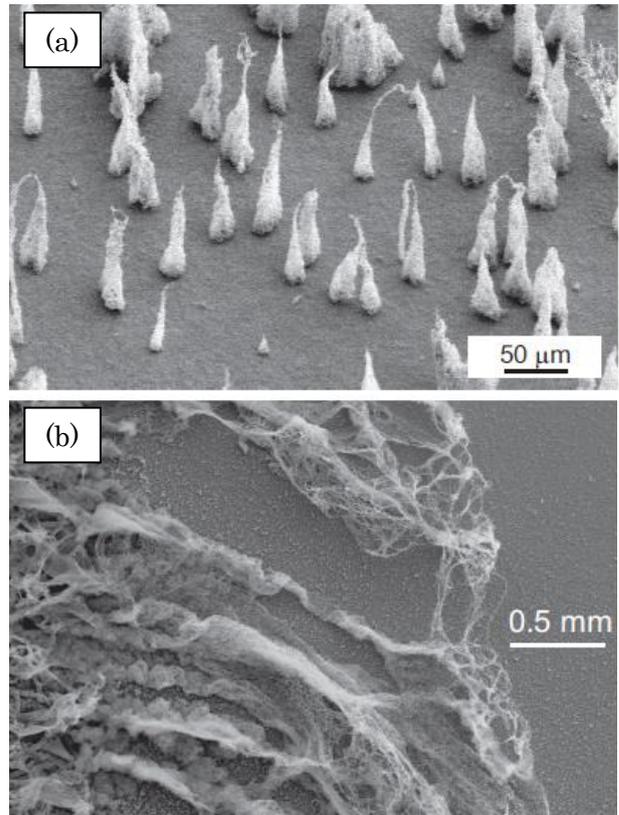


図1 NAGDIS-IIのヘリウムプラズマで、(a)少量のネオンを添加した際に形成された、nano tendril bundles (NTBs)と、(b)Wを堆積させた際に形成された巨大なナノ構造[1]。

図2は、ナノ構造層の厚さのHeフルエンス依存性を示している。純Heプラズマ照射の場合に加えて、NAGDIS-IIとDIONISOSにおけるNTBの平均高さ、マグネトロンスパッタリング装置におけるW堆積させた場合のナノ構造層の厚み、LFNの初期成長段階と後期成長段階のLFNの高さと厚さをプロットしている。Heフルエンスの範囲は $10^{24}$ から $6 \times 10^{25} \text{ m}^2$ である。純Heプラズマ照射時は、ナノ構造層の厚さはHeフルエンス（照射時間）の平方根に比例することが知ら

れているが、堆積を加えた場合や、NTBの場合にはナノ構造の厚みや高さは、拡散律速過程ではなく、異なるプロセスが支配していることがわかる。

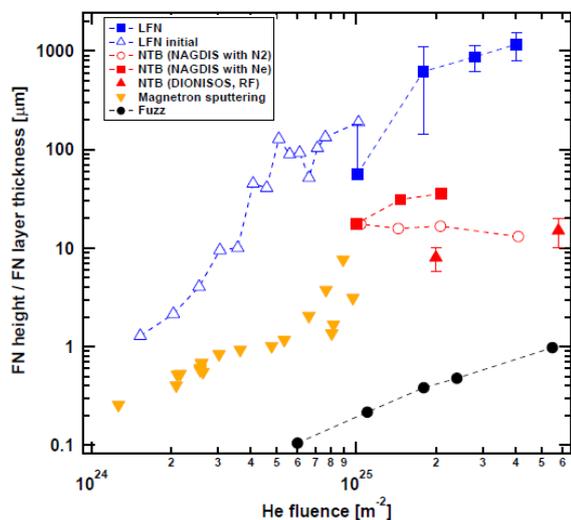


図2 ナノ構造層の厚さのHeフルエンス依存性。純Heプラズマ照射の場合、NAGDIS-IIとDIONISOSにおけるNTBの平均高さ、マグネトロンスパッタリング装置におけるW堆積させた場合、LFNの初期成長段階と後期成長段階のLFNの高さと厚さを示している[1]。

ファズは熱伝導率が著しく低く(1%以下)[5]、電界電子放出特性が高い[6]。特に、ファズは電界増強係数が1000、NTBを用いた面では5000程度になることが分かっている。以上のような物性の変化があるため、He照射面ではアーキングが点弧しやすい。特に、ファズが形成されると、パルス状の熱負荷がアーキングの点弧につながる可能性がある。実験的に、アークが点弧するための重要な要因の1つは試料の電位であることが明らかになっている。

ファズ層の厚さが2 μmの場合、1 CあたりのW放出量は0.6-1.1 mg/Cの範囲であり、ファズ層が厚くなるにつれてその値が増加することから、ダストの放出が原因であると考えられている。LFNを用いてアーク点弧実験を行った場合、アークスポットが移動している間に多くのダストや液滴が放出されることが確認される。また、ダストの衝突によりアークが点弧することも確認されている。

ヘリウムプラズマ照射によるファズの成長については、10年以上前から研究が進められ、多くの知見が蓄積されてきた。しかし、実際の核融合装置で発生する可能性がある堆積はHe効果を大きく変化させる。堆積効果やスパッタ

リングの原因となる不純物を考慮してHe効果を再検討することが重要である。

本研究は、大野哲靖教授(名古屋大学)、吉田直亮名誉教授(九州大学)、皇甫度均助教(筑波大学)を始め、多くの共同研究者や学生と共に実施してきた内容であり、心より感謝申し上げます。本研究は、JSPS科研費19H01874、15H04229等の助成を受けた。

#### 参考文献

- [1] S. Kajita, N. Yoshida, N. Ohno, Nucl. Mat. Energy 25 (2020) 100828.
- [2] D. Hwangbo, S. Kajita, N. Ohno, P. McCarthy, J. W. Bradley, H. Tanaka, Nuclear Fusion 58 (2018) 096022.
- [3] S. Kajita, S. Kawaguchi, N. Ohno, N. Yoshida, Sci. Rep. 8 (2018) 56.
- [4] S. Kajita, S. Kawaguchi, N. Yoshida, N. Ohno, H. Tanaka, Nucl. Fusion 58 (2018) 106002.
- [5] S. Kajita, T. Yagi, K. Kobayashi, M. Tokitani, N. Ohno, Results Phys. 6 (2016) 877-878.
- [6] D. Sinelnikov, D. Bulgadaryan, D. Hwangbo, S. Kajita, V. Kurnaev, N. Ohno, IEEE Trans. Plasma Sci. 47 (2019) 5186-5190.