

報告番号	※ 甲 第 10740号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 希ガスプラズマ照射によるタングステン表面構造変化とガス吸蔵特性に関する研究

氏 名 矢嶋 美幸

論 文 内 容 の 要 旨

将来の核融合炉材料において、炉内のトリチウム(T)量の制約からT吸蔵量の低い高融点金属材料の使用が必要不可欠である。高融点金属材料、特に国際熱核融合実験炉(ITER)でダイバータに使用されるタングステン(W)のT保持特性の理解と制御は重要な課題となる。しかし、近年の研究により、核融合による反応生成物であるヘリウム(He)がWに照射されると、樹枝状構造を有する繊維状ナノ構造やHeバブル・ホールといった照射損傷が表面に形成されることが明らかになった。

Heバブルが形成されたWに対してはすでに水素同位体相互作用の研究が進められており、水素同位体である重水素の保持量およびプリスタリング形成がHe予照射によって抑制されることが報告されている。しかし、水素のエネルギーが高い場合にはHeバブルが拡散バリアとなり逆に水素吸蔵量およびプリスタリングが著しく増加することが報告されている。一方、ナノ構造を有するW試料に関しては水素同位体保持に関する報告例はない。

既にトカマク型環境下でナノ構造が形成されることがトカマク型プラズマ実験装置 Alcator C-Mod で報告されている。同現象がTを取り扱う予定のITERや次世代核融合実験炉で生じた場合、形成されたナノ構造により比表面積が増大し、ダイバータ表面で多量のTを吸着・吸蔵する危険性がある。従って、ナノ構造Wに対するT保持特性の調査は重要な課題となっている。

ITERではダイバータ板への熱負荷低減のために、放射冷却用のガスとしてアルゴン(Ar)やネオン(Ne)等の希ガスの導入が計画されているが、ArやNeもHe同様W中の熱空孔に捕捉され、ナノ構造等の照射損傷を形成する可能性がある。しかしそれらのWへの照射効果は十分に分かっていない。

さらに近年、ナノ構造が形成された試料に対して、Heプラズマ照射を止め加熱(アニーリング)を行うと表面回復現象が生じることが明らかとなっている。この回復現象をうまく利用することで、ダイバータメンテナンス時のTの効果的な除染に効果を発揮する可能性が考えられる。しかし、ナノ構造の表面回復現象が生じる温度および繊維状ナノ構造内部変化に関する詳細は未だ明らかになっていない。

上記の課題を明らかにするために、本研究では、ArおよびNeプラズマ照射によるW表面構造変化、ナノ構造Wの表面積変化に対するT保持特性、アニーリング時のナノ構造内部変化を明らかにすることを目的とし、研究を行った。本論文は全5章で構成されている。

第1章ではダイバータの役割とその使用環境に関して説明した後、その候補材料であるWのHeプラズマ照射損傷に関する現在の進展についてまとめた。ナノ構造形成による核融合炉内での課題について述べた後、本研究の意義と目的を述べた。

第2章ではArおよびNeプラズマ照射によるタングステン表面構造変化について明らかにした。直線型ダイバータ模擬試験装置 NAGDIS-II を用いて、熱空孔が十分に形成される温度で入射イオンエネルギーを変化させ、希ガスプラズマ照射を行った。そして照射面を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察すると共に、照射断面を透過型電子顕微鏡(TEM)により観察した。その結果、Heプラズマ照射ではナノ構造が形成される条件(入射イオンエネルギー >20 eV, 温度 $:1000\text{ K} < T_s < 2000\text{ K}$)であっても、ArおよびNeプラズマ照射ではバブル・ホールやナノ構造といった照射損傷が形成されないことを明らかにした。さらに、エネルギー分散型X線分光法(EDX)による分析の結果、ArやNeが表面近傍に保持されていないことを明らかにした。各粒子のWへの飛程のシミュレーション結果から、Ar及びNeの飛程がHeに比べ短いことが分かっており、この飛程の違いが、He照射との違いを生む原因の一つであることを示した。

第3章ではナノ構造Wの表面積測定およびT保持特性について明らかにした。NAGDIS-IIを用いて作成したナノ構造Wの表面積を、液体窒素温度におけるKrガスの吸着量から、BET法を用いて表面積を計測した。表面積は、ナノ構造の厚みに伴い増加し、ナノ構造が形成されると少なくとも10倍から30倍になることを明らかにした。さらにナノ構造及び表面を研磨したW試料(以下、未照射Wとする)をT濃度0.5%のDT混合ガス(全圧、1.2 kPa)に温度573 Kで5 h曝露した後、表面近傍のT濃度をイメージング・プレート法(IP)およびβ線誘起X線計測法(BIXS)により測定した。

表面近傍のT保持量を、Tのβ線強度からIPを用いて測定した結果、ナノ構造の形成により表面近傍T濃度が未照射Wに比べて著しく増加することが分かった。しかし、表面照射量が 5.0×10^{25} m²以上のナノWのT濃度はどの試料も未照射Wの約20倍程度で、飽和する傾向を示した。これはβ線の脱出深さ(ナノW中のβ線の最大飛程、約2.1 μm)による制約により、ナノ構造Wおよび未照射W、どちらの試料においても深さ方向にわたり全量を評価することはできなかつたためと推察される。

一方、BIXS計測により得られたT濃度由来のW(Lα)-X線強度はナノ構造の厚みの増加に伴い増加する傾向を示した。しかし、ナノ構造の厚みが3 μmと最も厚い試料の表面T濃度は未照射Wに対して8倍程度であり、これは表面積増大率27倍よりも小さい値となった。W(Lα)-X線はナノ構造中を3 μm進んでも8割強の強度を保っていることから、BIXS法は十分妥当性のある測定方法と考えられる。そのため、表面積測定結果とT吸着量の違いは、KrガスとTガスのナノ構造Wに対する吸着・吸蔵特性の違いによるものであると考察される。各ガスの使用温度(Kr:液体窒素温度, T:573 K)の違いだけでなく、一般的にTはWの格子に対して極めて小さいため、Krと異なり格子構造を変えずに格子間に侵入することが可能となる。従ってTはナノ構造の深い領域まで侵入し吸着するよりも、浅い領域で吸着し、拡散する方がエネルギー的に安定となったと推察される。

第4章では熱アニーリングによるナノ構造内部構造変化について明らかにした。NAGDIS-IIを用いて表面にナノ構造を形成したW試料を作成後、ヒーター付試料台を用いて電子顕微鏡内にて加熱を行い、熱アニーリング時のナノ構造内部変化を観察した。その結果、高温になるに従いナノ構造の収縮が確認された。およそ1173 Kでナノ構造内部のバブルの大部分が消失し、構造が大きく変化することが明らかになった。加えて昇温脱離法(TDS)を用いてHe脱離の温度依存性を調査した結果、1173 Kでナノ構造WからのHeの脱離量が最大となった。TEMおよびTDSの2つの結果から、温度の上昇に伴ってWの表面拡散が活発になった結果、ナノ構造が崩壊し、その結果Heが放出されたと推察される。

さらに、TDSにおいて昇温レートを変化させ加熱を行ったところ、400 K以下の低温領域にピークが確認されると共に、1000 K近傍にもブロードなHeの脱離が確認された。低温領域(400 K以下)におけるHe脱離スペクトルから、空孔周りの歪み場に弱く捕獲されたHeに由来すると推測される脱離エネルギーを導出した。一方、高温領域(1000 K付近)では、先述したWの表面拡散によるナノ構造の変形に由来するHeの脱離、空孔からのHe脱離に伴う空孔に対するHe結合エネルギーの変化、そして、400 K以下で観察された歪み場等に弱く捕獲されたHeの脱離が1000 K付近でも生じたため、連続的なHeの脱離がブロードなスペクトルとして現れたと推察される。最後にナノWのTDS結果と、高エネルギーでHeイオンビームを照射することによって形成された平坦なHeバブルW試料のTDS結果を比較することで、それらの試料のHe放出の違いを議論した。

第5章では総括として、まとめと今後の課題を述べた。

以上のように、本論文では、これまで実験的検証が行われていなかった希ガスプラズマ照射によるタングステン照射効果、ナノ構造形成による表面積およびトリチウム保持特性への影響、熱アニーリングに伴うナノ構造内部変化を実験的に明らかにした。本論文により得られた知見は、核融合炉で形成されるナノ構造形成の予測・緩和、そしてトリチウム保持特性の理解に大きく貢献できる内容であると考えている。