

主 論 文 の 要 旨

論文題目 ヘリウムプラズマ照射による繊維状ナノ構造金属上でのアーク点弧に関する研究
(Arcing on fiberform nanostructured metal surfaces formed by helium plasma exposure)

氏 名 皇甫 度均

論 文 内 容 の 要 旨

ITER や DEMO 炉ではダイバータ板に定常、間歇的に多大な熱負荷が流入する。ダイバータ板の損傷を防ぐため、冷却用ガスとしてネオン(Ne)、窒素(N₂)、アルゴン(Ar)等が導入され、ダイバータ領域には様々な粒子種のプラズマが振る舞うことが予想される。特に、ITER ダイバータでは核融合反応生成物であるヘリウム(He)イオンの流入によりダイバータ材であるタングステン(W)板の上に繊維状ナノ構造が形成されることが知られる。核融合炉の Edge localized modes (ELMs)のような間歇的熱負荷を流入に加え、ナノ構造の形成による熱伝導の低下や表面からの電界集中効果のため、ナノ構造表面ではアーキングの発生が容易になると予想される。本研究では、ダイバータ板でのプラズマ-壁相互作用で表面上に生成されるナノ構造に注目し、その上に発生するアーキングにおける系統的研究を目的とする。また、冷却用ガスの混合による表面構造変化を調べる。取り組んだ内容を4つの課題に分け以下にまとめる。

1. 不純物添加ヘリウムプラズマ照射による nano-tendril bundles (NTBs)の生成

ITER および核融合実験装置でダイバータ領域の熱負荷低減のために使用する N₂、Ar、Ne を添加した He プラズマの照射による W 表面構造変化を調べた。生成された nano-tendril bundles (NTBs)は既存の fuzz ナノ構造とは異なり数十 μm の大きさの構造が島状に分布した。NTB の生成条件が明らかになり、入射イオンエネルギーおよび添加される不純物ガス濃度に大いに依存することが分かった。特に、NTB 生成に用いた不純物濃度は(～0.04–15%)、ITER や原型炉(DEMO)における不純物ガスと He 間の濃度比と一致し、不純物

ガスがダイバータ板の予期せぬ表面構造変化を及ぼす可能性が示唆された。NTB が生成のためには、結果的に $\sim 10^{-3}$ – 10^{-2} の正味の損耗率が必要であり、その形状は損耗率に従って変化した。本研究での NTB の生成条件は、RF 放電で発生した純粋な He プラズマ照射により、入射イオンエネルギーは物理スパッタリング以下という先行研究の結果と大きく異なり、NTB の成長には複数の形成メカニズムが働く可能性を示唆する。

イオン照射量の変化に伴う NTB 成長の推移を 3 次元計測した結果、照射量が増加するほど NTB の数、高さ、面積が増加した。NTB 成長の傾向は用いた不純物ガス種により異なり、不純物イオンのスパッタリング率の影響を受けた。NTB の表面と断面観察により、line-of-sight 再堆積が成長に重要な役割を果たすことが示唆された。NTB の初期状態を模擬した計算において、 $2 \times 10^{25} \text{ m}^{-2}$ 程のイオン照射量において元の突起の質量に比べ数十–数百倍の質量増加が可能であることが示された。

2. ナノ構造および NTBs の電子放出特性

ナノ構造の細長い形状は局所的な電界集中効果を招き、電界電子放出を増大させると思われる。本研究では、高耐熱性能を有するダイバータ候補材である W、モリブデン(Mo)、タンタル(Ta)において、ダイバータ表面上での生成可能性があり、異なる形状を持つナノ構造(fuzz)、円形状突起構造(loop)、He バブル(bubble)構造を用いて電界電子放出特性の表面構造間、材料間比較を行った。ナノ構造上では loop 構造に比べ電界電子放出の開始電圧が低くなり、電界電子放出が増大することが示された。Fowler-Nordheim プロットより求めた電界集中係数はナノ構造の場合 ~ 1000 に達しており、著しい電界集中効果があることが示唆された。3つの材料の中では Mo が他の金属より電界電子放出の抑制に優れる特性を示した。バブル構造では breakdown が発生し、試料表面にクレータが生成された。Ta のバブル試料上ではブレークダウン後のクレータ表面にナノ構造の形成を確認し、バブル中に含まれた He ガスの放出、電離および高電場による高エネルギー He イオンの入射などにより短時間でナノ構造が生成可能であることが示唆された。

一方、NTB 構造においては、ナノ構造よりも一桁低い電場で電界電子放出が始まった。これは NTB が島状に分布し電界が集中しやすいこと、NTB の高さがナノ構造の数十倍であり、先端部のアスペクト比が大きいためであると思われる。電界集中係数は 3300–5300 に達し、NTB による電界電子放出の増加が今後のダイバータにおけるアーク点弧可能性を格段にあげる可能性がある。

3. ナノ構造上で発生するアークスポットの運動・分光特性

He プラズマに挿入したナノ構造 W に負電圧を印加し、パルスレーザーを照射することによりアークを点弧させた。アークの点弧により試料の電圧、電流ともに急激に変化した。アーク発生時の電圧電流特性は、真空アークには見られない線形性と有し、試料表面からプラズマ装置の陽極までの He プラズマの電圧降下がその原因であることが分かった。この結

果は、アークプラズマより外部の He プラズマがアークの電流電圧特性に影響を与えることを示唆し、ダイバータにおけるアークの電流ループの規模によっては大電流アークが防止される可能性を示唆する。

He プラズマのパラメータおよび試料へのバイアス電圧を調整することにより、アークの点弧条件が明らかになった。既存に知られていたポテンシャルの閾値に加え、アークの点弧には He プラズマの電子密度やプラズマ材料間シース電場にも閾値が存在し、シース電場が少なくとも 2 MV/m 以上必要であることが分かった。また、パルス熱負荷に対するアークの発生確率はアーク電流、ナノ構造厚みに依存し、アーク電流が大きいほど、ナノ構造厚みが薄いほど点弧率が上昇した。アーク 1 回当たり持続時間はアーク電流に比例することが示された。試料表面が外部磁場に対して平行であるとき、retrograde 運動をするアークスポットの自走速度は外部磁場およびアーク電流より表面のアーク痕の幅により依存する傾向が見えた。さらに、アークスポットの運動はナノ構造厚みに著しく依存し、アークスポットの自走速度とアーク痕の幅はお互い逆比例関係であった。ナノ構造が厚くなると、自走速度の減少とともにアーク痕幅が増加し、その原因はアークスポットの集団化現象であることが明らかになった。一方、試料表面が磁力線と垂直である場合、アークスポットは微視的にはランダム運動しながらレーザースポットから遠ざかる方向に自走した。~100 A の大電流アークにおいて、数十個以上のアークスポットが同時に存在し、アークスポットの発光面積の時間変化がアーク電流の時間変化と非常に類似することより、アークスポット数とアーク電流間の相関関係が示された。高速カメラ観察により、すでに破壊されたナノ構造領域に再びアークスポットが進入する場合、アークスポットの激しい損耗が起きることが明らかになった。

アークスポットの分光計測より、W の中性粒子、 W^{1+} 、 W^{2+} イオンを同定した。また、ナノ構造厚みの増加につれてアークスポットの発光強度も増加することが示された。発光量の急激な変化はナノ構造厚み~1 μm 付近で発生し、それより薄いナノ構造で発光強度およびアークスポット数は共に減少した。ナノ構造厚み~1 μm 以上では、発光強度は変化するものの、アークスポット数には大きな変化はなかった。一方、ナノ構造が厚くなるほど W 一価イオンと W 中性粒子の発光強度比 W_{II}/W_I は減少した。同区間で発光強度の絶対値が増加するため、この結果はナノ構造厚みが増加するにつれてプラズマを成す構成成分の内 W 中性粒子や低価数イオンの割合が増加することを意味する。また、それと同時にアーク電流は減少し、アークスポットから放出される電子の一部が厚いナノ構造に吸収される可能性が示唆された。W プラズマの高励起準位スペクトルを用いるボルツマンプロットにより電子温度を評価した結果、NAGDIS-II のアークプラズマにおいて電子温度は W 中性粒子と W 一価イオンの両方で一致し、~0.8 eV 程度であった。PISCES-A では異なる厚みのナノ構造上でのアークプラズマ電子温度を評価し、発光強度が十分でなかったナノ構造厚み~0.9 μm 以下の除き、アークプラズマの電子温度はナノ構造厚みによらず 0.5–1.0 eV の範囲に分布することを示した。

4. ナノ構造上のアーキングによる損耗特性

ナノ構造上で発生するアーキによるタングステンの損耗特性を、質量測定を用いて調査した。ナノ構造厚みが一定の場合、アーキ電流に比例して時間当たりの損耗量(損耗率)は増加したが、電荷量当たり損耗量に電流依存性は観測されなかった。アーキ痕表面の観察により、試料全体に対する損耗面積はアーキ電流の増加とともに増大していることを確認した。しかし、単一のアーキ痕の幅には変化が見えなかった。これにより、損耗率の電流依存性は同時に発生するアーキスポット数、アーキスポットの運動速度の変化等によるものであることが示唆された。それに対し、一定のアーキ電流でナノ構造厚みを変化させたとき、電荷量当たり損耗量はナノ構造厚みの変化に応じて変化した。損耗量の急激な増大はナノ構造厚みが 2-2.3 μm の間で発生し、この間でアーキ痕の運動も同じく単一運動から集団化運動に変化した。よって、アーキスポットの集団化により微視的な損耗メカニズムが変化することが示唆された。Ecton モデルを用いてこれらの損耗特性を説明した。アーキスポットが爆発するとき、蒸気のプラズマ状態での損耗量は全体の損耗量の一部になることが分かった。ナノ構造厚みがアーキスポットの形成できるクレータの大きさよりも厚い時アーキスポットは同じ位置で再点弧するなど、ナノ構造厚みが点弧メカニズムに影響を及ぼすことが分かった。アーキプラズマが持つ運動量により周辺のナノ構造が機械的に破壊され、損耗量の増大に寄与したことが示され、ナノ構造の厚みが増えるほど機械的破壊による損耗量が支配的となることが分かった。

最後に、本研究で得られた損耗量の計測値およびアーキの発生率、持続時間など知見を用いて、ITER のダイバータ領域におけるアーキングによる損耗量を評価した。制御された ELMs (controlled ELMs) のエネルギー密度 ($E_{\text{ELM}} \sim 0.3 \text{ MJ/m}^2$)、発生頻度 ($f_{\text{ELM}} \sim 30 \text{ Hz}$) を考慮した時、ナノ構造がダイバータ板の 1.6-3.6 m^2 の領域において成長が飽和した時の厚み 0.3 μm まで生成されると仮定すると、アーキによる時間当たり損耗量は定常時のスパッタリングによる損耗の 1/10 程度であり、炉壁の損耗源としては制限的な要因となることが分かった。それに対し、ELM パルス当たりの損耗量はアーキングを考慮しない場合の 10 倍以上に達し、短時間における W 不純物の生成源としては予想以上の影響を及ぼすことが示唆された。