

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 12883 号
------	---------------

氏 名 皇甫 度均

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)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	大野 哲靖
委員	名古屋大学	教授	横水 康伸
委員	東京大学	教授	熊田 亜紀子
委員	名古屋大学	准教授	梶田 信
委員	名古屋大学	准教授	小島 寛樹

論文審査の結果の要旨

皇甫度均君提出の論文「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」は、将来のエネルギー源と期待されている磁場閉じ込め核融合発電炉におけるプラズマ壁相互作用による炉壁の表面構造変化とその上で点弧されるアーキングによる炉壁の損耗機構を明らかにしている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、核融合発電炉におけるプラズマ壁相互作用研究の重要性を、炉壁の表面構造変化と炉壁への熱負荷、それに伴う炉壁の損耗の観点から詳細に述べている。特に、核融合発電炉におけるプラズマ対向材料として使用されるタングステン等の高融点金属表面で生成される繊維状ナノ構造上でのアーキング現象に関する先行研究を紹介し、本研究の目的である繊維状ナノ構造上でのアーキングの点弧・維持に関する物理機構解明とアーキングによる材料損耗機構解明の重要性を述べている。

第2章では、本研究を遂行するにあたって使用した直線型プラズマ装置 NAGDIS-II、PISCES-Aおよびプラズマと材料表面の計測手法や計測装置の概要をまとめている。また、本研究の実験データの解析に用いられた基礎理論について述べている。

第3章では、国際熱核融合実験炉 (ITER) のダイバータ領域で想定される高密度プラズマ環境下において、炉壁の冷却用に導入される冷却用ガス (ネオン、アルゴン、窒素) の添加が炉材であるタングステン表面構造に及ぼす影響を調べている。ヘリウムプラズマ中への少量の冷却用ガスの添加により、既存の繊維状ナノ構造の数十倍の大きさを有する nano-tendril bundles (NTBs) 構造が形成されることを明らかにした。また、NTBsの生成に重要なパラメータ (冷却用ガス濃度・入射イオンエネルギー・試料の質量損失率) を明らかにし、NTBsの成長にスパッタリングによるタングステン粒子の飛び出しと表面への再堆積が重要な役割を果たすことを示した。

一方で、ダイバータ板上で形成可能な様々な表面構造上でのアーキングの点弧可能性を評価するために、電界電子放出特性を評価した。表面構造の微細度が電界電子放出を増大させることを明らかにし、ナノ構造表面上での電界集中効果を定量的に評価した。また、ダイバータ候補材 (タングステン、モリブデン、タンタル) 間で電界電子放出特性を比較し、モリブデンが電界電子放出の抑制やアーキング防止の面で最適であることを示した。

第4章では、ナノ構造上で点弧するアーキングの特性を理解するために、アーク点弧時における電圧-電流特性、点弧条件および持続特性、アークスポットおよびアークプラズマの特性を評価している。プラズマに面するナノ構造上で発生するアーキングの電圧-電流特性に線形性が存在することを発見し、線形性は磁力線方向のプラズマ抵抗による電圧降下に起因することを明らかにした。また、アーキングの点弧のために既存に知られるプラズマ-金属間電位差に加えて金属表面上の電界と周辺部のプラズマ密度の重要性を明らかにした。さらに、アーキングの点弧率、持続時間、アークスポットの数および速度のアーク電流、ナノ構造の厚み依存性を明らかにした。これらの結果により、ダイバータ板上で生成されるナノ構造上で点弧するアーキングの寿命および規模を評価することが可能である。

第5章では、ナノ構造上で発生するアーキングによるタングステンの損耗特性を質量変化測定結果により明らかにした。アーキングによる損耗特性はアーク電流およびナノ構造厚みに依存した。時間当たり損耗量はアーク電流に比例して増加したものの、電荷量当たり損耗量はアーク電流に依存しないことを示した。それに対し、電荷量当たり損耗量はナノ構造厚みに依存し大幅に変化することを示し、アークスポットの集団化がナノ構造の機械的な破壊を促進することを実験・理論両面から明らかにした。さらに、これまでの知見と第4章および第5章で得られた研究成果をまとめ、ITERダイバータ領域におけるアーキングによる材料損耗量を推定した。ITER運転条件において、アーキングによる炉壁の損耗量はアーク以外の原因による損耗量の同程度かそれ以上となる可能性があることを示し、炉壁の損耗および不純物の生成量を推定するにあたってアーク点弧を考慮すべきことを明示した。

第6章では、本研究の総括として研究のまとめと今後の課題を与えている。

以上のように、本論文では、プラズマ壁相互作用による炉壁表面の構造変化とその上に点弧するアーキング特性を実験的に詳細に調べ、アーキングによる磁場閉じ込め核融合発電炉壁の損耗機構を明らかにした。これらの成果により、アーキングによる磁場閉じ込め核融合発電炉の炉材損耗量を定量的に評価することが可能となり、核融合発電炉の設計に大きく貢献し、学術的および工学的に寄与するところが大きい。よって、本論文の提出者である皇甫度均君は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格があると判断した。