

論文内容の要旨

Abstract of Dissertation

氏名 Name 内田雄大

エネルギーの長期安定供給を実現する次世代のエネルギー源として、核融合が注目されている。国際的な協力によって進められる核融合エネルギーによる原型炉DEMO以降の磁場閉じ込め型核融合システムにおいて、プラズマ対向壁の候補材料であるタングステンの表面は種々の粒子の入射により損傷する。特に、燃料である高温のプラズマから不純物を排気するダイバータへのヘリウムイオン照射の影響については、keV以下の低エネルギー領域で盛んに研究されており、試料表面(~100 nm)にヘリウムバブルや繊維状ナノ構造が生成されることが明らかにされてきた。しかし、燃料プラズマを閉じ込める磁場配位により高エネルギー粒子が燃料プラズマから損失するトロイダルリップロスのため、MeV級の高エネルギーヘリウムイオンが第一壁に入射し、材料深部(~ μm)で欠陥層が生成されることが予測されている。高エネルギーのヘリウムイオンを材料に照射するとブリストアと呼ばれる水ぶくれ状の表面剥離が生成される。このような損傷はプラズマ対向壁の減肉、機械的性質の劣化、放射損失による燃料プラズマの冷却を引き起こす可能性がある。金属へのヘリウムイオン照射によるブリストア生成に関しては50年以上前から広く研究がなされているが、プラズマ対向材にタングステンの使用が検討され始めたのが30年前であり、特に第一壁への使用が注目されたのは最近であるといった歴史的背景から、室温でのタングステンへのMeV級のヘリウムイオン照射による研究は少ない。そのため、将来の核融合システム設計のためには、プラズマ対向材としてタングステンのブリストア生成機構を明らかにする必要がある。本研究では、MeV級のヘリウムイオン照射がタングステン内部に及ぼす影響を調査し、ブリストア生成特性を明らかにすることを目的とする。

本論文は全6章で構成される。

第1章では、本研究の背景と目的について述べる。磁場閉じ込め型核融合装置の概要について説明し、プラズマ対向材であるダイバータと第一壁に入射するヘリウムイオンの粒子フラックス、フルエンス、運動エネルギー分布などについて述べる。また、ヘリウムイオン照射により発生するヘリウムバブル、再結晶脆化、ブリストアについて説明する。

第2章では、本研究で構築したヘリウムイオン照射と内部損傷を観察するための実験系・観測系について述べる。静電加速器によりMeV級のヘリウムイオンビームをタングステン板材に照射する実験系を構築した。測定したイオン電流から、粒子フラックス、フルエンスなどを計算した。また、照射中の試料表面の温度の時間発展を熱電対により測定した。照射後のタングステン試料を集束イオンビーム装置(FIB)により加工し、走査電子顕微鏡(SEM)、透過電子顕微鏡(TEM)により内部の損傷を観察する実験の流れを構築した。

第3章ではブリストア発生の臨界フラックスと拡散との関係について調査する。ブリストア発生の臨界フラックスが粒子フラックスによるヘリウムの流入とタングステン中のヘリウムの拡散による流出との兼ね合いであることを理論的に見積もり、ヘリウムイオン照射実験の結果と比較したところ、見積もられた臨界フラックスが実験結果とおおよそ一致することを確認した。これは、同じフルエンスでも運動エネルギー、および粒子フラックス

の違いにより、現象が大きく異なり、核融合システム設計で見積もられている不純物の燃料プラズマへの混入や第一壁の損傷が予想よりも深刻な影響を及ぼす可能性を示唆する。臨界フラックスを導いたことにより、将来の核融合システム設計において、ブリストア発生の有無を予測できる可能性がある。

第4章ではヘリウムイオン照射によるタングステン内部の構造変化について述べた。ヘリウム照射後のタングステン試料内部の同一箇所をTEMとSEMで観察できるFIB加工を行い、TEMによりヘリウム照射後のタングステン試料内部を観察し、電子回折像から結晶粒径が増加していることを確認した。SEMによりヘリウム照射後のタングステン試料内部を観察し、電子線後方散乱(EBSD)から結晶粒径が増加していることを確認した。これは、ヘリウムイオン照射によって、タングステンの温度が局所的に上昇し再結晶化した可能性を示唆している。

第5章ではブリストアの生成機構・ブリストア膜厚とヘリウムイオンビームの飛程との関係について述べた。ブリストア生成機構の一つである内圧モデルについて説明し、ブリストアの観測された実験条件が内圧モデルと矛盾しないことを示した。また、ブリストア膜厚が飛程よりも大きいことを明らかにした。これは、将来の核融合システム設計において、第一壁の肉厚を考える際に、従来のスパッタリングによる減肉や飛程の計算結果に基づく設計では、過小評価である可能性を示唆する。

第6章では、前章までに得られた知見をまとめ、本論文の総括とした。