

学位論文題名

核融合プラズマ対向材料の水素および
ヘリウムリテンション特性の研究

学位論文内容の要旨

核融合炉の燃料である水素粒子は、プラズマ対向壁に入射して、対向壁中に保持(リテンション)される。保持された水素は熱あるいはイオン衝撃により脱離してプラズマに混入する。水素粒子の壁と境界プラズマとの行き来は水素リサイクリングと呼ばれ、炉心プラズマの閉じ込め特性の劣化の原因となる。一方、プラズマ対向壁には、核融合反応の灰であるヘリウム粒子も入射し、保持される。保持されたヘリウムが主放電中に熱あるいはイオン衝撃により脱離すると、炉心プラズマ中のヘリウム灰濃度が上昇する。このため、自己点火条件の維持が難しくなる場合もある。従って、プラズマ対向材料の水素およびヘリウムのリテンション特性について解明し、適切なコンディショニング法を考える必要がある。しかし、現在使用あるいは提案されているプラズマ対向材料の水素およびヘリウムリテンション特性について未だ系統的な評価は十分に行われていない状況にある。

本研究では、核融合炉のプラズマ対向材料として考えられている黒鉛、 B_4C 転化材、SiC 転化材およびタングステンに対して、水素イオンあるいはヘリウムイオンを照射し、このリテンション特性を調べるとともに、材料間の比較を行った。また、実機トカマク装置である DIII-D において重水素放電に曝されたプラズマ対向材料についても重水素リテンション特性を調べ、本研究で得られたシミュレーション実験結果と比較した。以下、本研究の結果を述べる。

ECR イオン照射装置を用いて、黒鉛、 B_4C 転化材、SiC 転化材およびタングステンに水素(H)イオンを照射して水素を保持させた。その後、昇温脱離分析法により、保持された水素の昇温脱離特性および水素リテンション量を求めた。黒鉛からの水素の脱離スペクトルは単一のピークを持っていたが、他の材料では2つのピークを持っていた。全水素リテンション量は、 B_4C 転化材で最も大きく(1.0×10^{18} H/cm²)、次いで黒鉛(6.7×10^{17} H/cm²)、SiC 転化材(5.8×10^{17} H/cm²)、タングステン($(0.7 \sim 1.7) \times 10^{17}$ H/cm²)の順となった。表面不純物濃度が異なるタングステンでは、水素リテンション量が2倍程度も異なることが分かった。水素リテンション量の加熱温度依存性を求め、核融合炉で行われるベーキングによる水素リテンション量の低減効果を評価した。通常実施されている 300~400 °C のベーキングにより効果的に水素リテンション量を低減できるのは、タングステンおよび B_4C 転化材であることが分かった。黒鉛および SiC 転化材のリテンション量を低減させるためには 600~800 °C のベーキングが必要であることも分かった。照射温度を上げて水素を照射した場合、黒鉛、 B_4C 転化材および SiC 転化材の水素リテンション量は、照射温度に対して単調減少した。何れの材料でも、温度が 300~600 °C の時、室温照射の値の半分となった。

水素リテンション量の低減のため用いられるヘリウム放電洗浄を模擬するため、すでに水素を保持している黒鉛、 B_4C 転化材、SiC 転化材およびタングステンにヘリウムイオンを照射し、保持された水素の叩き出し効果を評価した。ヘリウムイオン照射により水素およびメタンの低温側の脱離ピークが大きく減少した。残留水素リテンション量は、 1×10^{18} He/cm² のヘリウム

照射量まで急激に減少し、その後ほぼ一定となった。しかし、タングステンでは、 5×10^{17} He/cm²以上のヘリウム照射をすると逆に水素リテンション量は増加した。これらのプラズマ対向材料において、ヘリウムイオン照射により水素リテンション量は照射前の0.35~0.6となり、大きく減少した。特に効果的に除去されたのはタングステンおよびB₄C転化材であった。ヘリウムイオン照射による水素リテンションの低減効果をベーキングと比較した場合、ヘリウムイオン照射は低い温度下において効果的であることが分った。

ECRイオン照射装置を用いて黒鉛、B₄C転化材、SiC転化材にヘリウムイオンを照射して、保持されたヘリウムの昇温脱離特性を調べるとともに、ヘリウムリテンション量の照射量依存性について評価した。ヘリウム脱離スペクトルは、黒鉛では単一のピーク、B₄C転化材およびSiC転化材では2つのピークを持っていた。これらのピーク温度は、黒鉛では約300℃、B₄C転化材およびSiC転化材では約300℃および約900℃であった。両転化材の低温側ピークは、材料中の炭素成分に起因するヘリウムの脱離分と考えられる。ヘリウムリテンション量の照射量依存性を調べた結果、何れの試料でも 2×10^{18} He/cm²のヘリウム照射量でほぼヘリウムリテンション量は飽和した。ヘリウムリテンション量は、SiC転化材で最も大きく(4.2×10^{17} He/cm²)、次いで黒鉛(3.4×10^{17} He/cm²)、B₄C転化材(2.7×10^{17} He/cm²)の順となった。水素濃度と比較した結果、ヘリウム濃度は水素濃度の(15~30)%となり、かなり高くなることが分った。従って、主放電中のヘリウム脱離を抑えるため、主放電前にベーキング等でヘリウムリテンション量を低減しておく必要があることが分った。ベーキングによるヘリウムリテンション量の低減効果を調べるため、ヘリウムリテンション量の加熱温度依存性を求めた。この結果、黒鉛中のヘリウムは通常のベーキングでかなり除去されることが分った。一方、B₄C転化材およびSiC転化材中のヘリウムは800℃までほとんど減少せず、ベーキングによる低減化は難しいことが分った。

実機プラズマ対向材料の水素リテンション特性を評価するため、大型トカマク装置のDIII-Dで重水素プラズマに曝された黒鉛およびB₄Cの重水素リテンション特性を評価した。黒鉛およびB₄Cに対して昇温脱離分析を行うと、保持されたDは主としてHD、D₂、CD₄の形で放出した。HD、D₂、CD₄として放出される割合は、黒鉛面では各々40%、27%、33%となり、B₄C面では各々40%、21%、39%となった。B₄C面からの重水素の総脱離量は黒鉛面より若干大きいか同程度であった。また、B₄C面からのメタンの脱離量は、放電中に起こる最表面の炭素の堆積により大きくなった。重水素リテンション量の2次元分布を求めた結果、試料の端の部分で大きくなることが分った。

以上、本研究では、核融合炉のプラズマ対向材料の候補となっている黒鉛、B₄C転化材、SiC転化材およびタングステンに対して、水素リテンション特性を調べるとともに、水素リテンション量を低減させるために必要なベーキング条件およびヘリウムイオン照射条件を評価した。また、ヘリウム灰濃度の増大の原因となるヘリウムリテンション特性についても評価し、かなりのヘリウムが壁に保持されることを示した。これらは、核融合炉壁のコンディショニングにおいて重要な結果を提供している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 日 野 友 明
副 査 教 授 山 科 俊 郎
副 査 教 授 粥 川 尚 之
副 査 教 授 大 貫 惣 明

学 位 論 文 題 名

核融合プラズマ対向材料の水素および

ヘリウムリテンション特性の研究

核融合炉の燃料である水素粒子は、プラズマ対向壁に入射して、対向壁中に保持(リテンション)される。保持された水素は熱あるいはイオン衝撃により脱離してプラズマに混入する。水素粒子の壁と境界プラズマとの行き来は水素リサイクリングと呼ばれ、炉心プラズマの閉じ込め特性の劣化の原因となる。一方、プラズマ対向壁には、核融合反応の灰であるヘリウム粒子も入射し、保持される。保持されたヘリウムが主放電中に熱あるいはイオン衝撃により脱離すると、炉心プラズマ中のヘリウム灰濃度が上昇する。このため、自己点火条件の維持が難しくなる場合もある。従って、プラズマ対向材料の水素およびヘリウムのリテンション特性について解明し、適切なコンディショニング法を考える必要がある。しかし、プラズマ対向材料の水素およびヘリウムリテンション特性について未だ系統的な評価は十分に行われていない状況にある。

本研究では、核融合炉のプラズマ対向材料として考えられている黒鉛、 B_4C 転化材、 SiC 転化材およびタングステンに対して、水素イオンあるいはヘリウムイオンを照射し、このリテンション特性を調べるとともに、材料間の比較を行った。また、実機トカマク装置である DIII-D において重水素放電に曝されたプラズマ対向材料についても重水素リテンション特性を調べた。以下、結果の要点を述べる。

黒鉛、 B_4C 転化材、 SiC 転化材およびタングステンに水素(H)イオンを照射して水素を保持させた。その後、昇温脱離分析法により、保持された水素の昇温脱離特性および水素リテンション量を求めた。黒鉛からの水素の脱離スペクトルは単一のピークを持っていたが、他の材料では2つのピークを持っていた。全水素リテンション量は、 B_4C 転化材で最も大きく、次いで黒鉛、 SiC 転化材、タングステンの順となった。水素リテンション量の加熱温度依存性を求め、核融合炉で行われるベーキングによる水素リテンション量の低減効果を評価した。通常実施されている 300~400 °C のベーキングにより効果的に水素リテンション量を低減できるのは、タングステンおよび B_4C 転化材であることが分った。黒

鉛および SiC 転化材のリテンション量を低減させるためには 600~800 °C のベーキングが必要であることも分った。

水素リテンション量の低減のため用いられるヘリウム放電洗浄を模擬するため、すでに水素を保持している黒鉛、B₄C 転化材、SiC 転化材およびタングステンにヘリウムイオンを照射し、保持された水素に対する叩き出し効果を評価した。ヘリウムイオン照射により水素の低温側の脱離ピークが大きく減少した。ヘリウムイオン照射により水素リテンション量は照射前の 0.35~0.6 となり、大きく減少した。特に効果的に除去されたのはタングステンおよび B₄C 転化材であった。

黒鉛、B₄C 転化材、SiC 転化材にヘリウムイオンを照射して、保持されたヘリウムの脱離特性を調べるとともに、ヘリウムリテンション量の照射量依存性について評価した。ヘリウム脱離スペクトルは、黒鉛では単一のピーク、B₄C 転化材および SiC 転化材では 2 つのピークを持っていた。これらのピーク温度は、黒鉛では約 300 °C、B₄C 転化材および SiC 転化材では約 300 °C および約 900 °C であった。ヘリウムリテンション量は、SiC 転化材で最も大きく、次いで黒鉛、B₄C 転化材の順となった。水素濃度と比較した結果、ヘリウム濃度は水素濃度の (15~30) % となり、かなり高いことが分った。従って、主放電中のヘリウム脱離を抑えるため、主放電前にベーキング等でヘリウムリテンション量を低減しておく必要があることが分った。

実機プラズマ対向材料の水素リテンション特性を評価するため、大型トカマク装置の DIII-D で重水素プラズマに曝された黒鉛および B₄C の重水素リテンション特性を評価した。黒鉛および B₄C で保持された D は、主として HD、D₂、CD₄ の形で放出した。HD、D₂、CD₄ として放出される割合は、黒鉛面では各々 40 %、27 %、33 % となり、B₄C 面では各々 40 %、21 %、39 % となった。B₄C 面からの重水素の総脱離量は黒鉛面と比べ若干大きいと同程度となった。また、B₄C 面からのメタンの脱離量は、放電中に起こる最表面の炭素の堆積により大きくなった。

これを要するに、著者は、核融合プラズマ対向材料の水素およびヘリウムリテンション特性について多くの新知見を得たものであり、核融合プラズマの閉じ込め性能の向上に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。