

マテリアルプローブによる 大型ヘリカル装置の第一壁挙動解析

学位論文内容の要旨

核融合プラズマのエネルギー閉じ込め時間は、プラズマと第一壁との間で起こる水素リサイクリングに影響される。第一壁中の水素保持(リテンション)量が増えると、水素リサイクリングが顕著になり、閉じ込めが劣化する。DT核融合炉では、安全性の観点から炉内に蓄積するトリチウム量は制限される。このため、水素リテンションの評価が必要となる。また、エネルギー閉じ込め時間は、第一壁から放出される不純物により減少するので、壁表面の不純物堆積状態の把握とその制御が必要になる。工学的観点からは、壁の損耗厚がある値以上になると交換しなければならないので、損耗状態の把握も重要である。これらの観点から、第一壁の水素リテンション、不純物及び損耗状態を調べる必要がある。

本研究では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の第3サイクル実験以降、第一壁に多数のマテリアルプローブを設置して、その放電ガスリテンションと表面状態の変化を調べることにより、プラズマ壁相互作用について評価した。プローブ材料として、ステンレス鋼、黒鉛、シリコンを用い、一連の放電実験後に取り出して、状態変化を解析した。プローブの設置位置は、ポロイダル方向の6ヵ所とトロイダル方向の10ヵ所である。

LHDでは、主放電とグロー放電が実施され、放電ガスとして水素とヘリウムが用いられている。これらの放電でのプラズマ壁相互作用を調べるため、シャッター機構を使い、どちらか一方の放電のみに曝したプローブ試料を作製した。主放電のみに曝したプローブ表面ではカーボンの堆積が顕著であり、グロー放電のみに曝したプローブ表面では第一壁材料であるステンレス鋼の主成分である鉄の堆積が顕著であった。これらの結果から、主放電プラズマは主としてダイバータ壁と、グロープラズマでは主として第一壁と相互作用することが分かった。

主放電あるいはグロー放電のみに曝した場合、ヘリウムの保持・脱離挙動が大きく異なっていた。主放電のみに曝した場合は保持されたヘリウムの大部分は800K以上で脱離し、グロー放電では800K以下で脱離した。この脱離挙動の違いを調べるため、北海道大学のECRプラズマ装置を用いて、ヘリウムイオンのエネルギーを変えてプローブに照射して、照射後、昇温脱離分析でヘリウム脱離挙動を調べた。ヘリウムエネルギーが数100eV程度の場合、保持されたヘリウムは低温領域(800K以下)で脱離するが、3keVの場合では高温領域(800K以上)で脱離した。この実験結果は、主放電中ではkeVオーダーの荷電交換されたヘリウム粒

子が捕捉され、グロー放電中では数 100eV のヘリウムイオンが捕捉されることを示し、各々主放電下での境界プラズマ計測結果とグロー放電電圧に対応することが分かった。

プラズマ壁相互作用の内壁依存性を評価するため、ポロイダル方向とトロイダル方向に設置したプローブの状態変化を調べた。ポロイダル方向において、プラズマに近い壁では放電ガス保持量が多く、プラズマから遠い壁では不純物堆積量が多かった。トロイダル方向において、水素及びヘリウムガス保持量はアノード近傍で多く、これらのリテンションは主としてグロー放電時に起こることが分かった。この結果は、壁洗浄に用いられるグロー放電において、アルゴン等の捕捉されにくいガスを使用するなら、ガスリテンションを低減できることを示唆している。

LHD では第 5 サイクル実験以降、サイクル実験期間に 3 度のボロニゼーションが行われ、プラズマ中の酸素不純物量が桁違いに減少し、プラズマ蓄積エネルギーが更に向上した。ボロニゼーションの効果を明らかにするため、第 6 及び 7 サイクル実験においてボロン膜のトロイダル一様性と酸素捕捉状態を調べた。ボロン膜厚はアノードとジボラン導入用ノズルの近傍において厚く、これらから離れた部分ではボロン濃度は数%程度であった。壁全体の約 30%がボロン化していた。堆積したボロン中の酸素濃度は堆積厚とともに高くなり、酸素不純物を効果的に捕捉していることが分かった。また、ボロン化の割合が少なくても、プラズマ中の酸素不純物量を大きく減少させることが分かった。

以上の結果から、ダイバータ部に黒鉛タイルが設置されてプラズマ中の金属不純物が減少したのは壁全体がカーボン化されたこと、ボロニゼーション後のプラズマ中の酸素不純物の減少は壁のボロン化とその酸素捕捉によること、放電ガスである水素とヘリウムの捕捉は主としてグロー放電時に起こること、主放電及びグロー放電のプラズマ壁相互作用は各々ダイバータ及び第一壁で起こること等、エネルギー閉じ込めに影響を与える新たな知見を得た。各サイクル実験でのプラズマ壁相互作用の結果は次のサイクル実験に反映され、プラズマ閉じ込め性能の向上に貢献してきた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 日 野 友 明
副 査 教 授 榎 戸 武 揚
副 査 教 授 板 垣 正 文
副 査 助 教 授 廣 畑 優 子

学 位 論 文 題 名

マテリアルプローブによる 大型ヘリカル装置の第一壁挙動解析

核融合プラズマのエネルギー閉じ込め時間は、プラズマと第一壁との間で起こる水素リサイクリングに影響される。第一壁中の水素保持（リテンション）量が増えると、水素リサイクリングが顕著になり、閉じ込めが劣化する。DT核融合炉では、安全性の観点から炉内に蓄積するトリチウム量は制限される。このため、水素リテンションの評価が必要となる。また、エネルギー閉じ込め時間は、第一壁から放出される不純物により減少するので、壁表面の不純物堆積状態の把握とその制御が必要になる。工学的観点からは、壁の損耗厚がある値以上になると交換しなければならないので、損耗状態の把握も重要である。これらの観点から、第一壁の水素リテンション、不純物及び損耗状態を調べる必要がある。

本研究では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)の第3サイクル実験以降、第一壁に多数のマテリアルプローブを設置して、その放電ガスリテンションと表面状態の変化を調べることにより、プラズマ壁相互作用について評価した。プローブ材料として、ステンレス鋼、黒鉛、シリコンを用い、一連の放電実験後に取り出して、状態変化を解析した。プローブの設置位置は、ポロイダル方向の6ヵ所とトロイダル方向の10ヵ所である。

LHDでは、主放電とグロー放電が実施され、放電ガスとして水素とヘリウムが用いられている。これらの放電でのプラズマ壁相互作用を調べるため、シャッター機構を使い、どちらか一方の放電のみに曝したプローブ試料を作製した。主放電のみに曝したプローブ表面ではカーボンの堆積が顕著であり、グロー放電のみに曝したプローブ表面では第一壁材料であるステンレス鋼の主成分である鉄の堆積が顕著であった。これらの結果から、主放電プラズマは主としてダイバータ壁と、グロープラズマでは主として第一壁と相互作用することが分かった。

主放電あるいはグロー放電のみに曝した場合、ヘリウムの保持・脱離挙動が大きく異なっていた。主放電のみに曝した場合は保持されたヘリウムの大部分は800K以上で脱離し、グロー放電では800K以下で脱離した。この脱離挙動の違いを調べるため、北海道大学のE CRプラズマ装置を用いて、ヘリウムイオンのエネルギーを変えてプローブに照射して、照射後、昇温脱離分析でヘリウム脱離挙動を調べた。ヘリウムエネルギーが数100eV程度の場合、保持されたヘリウムは低温領域(800K以下)で脱離するが、3keVの場合では高温領域(800K以上)で脱離した。この実験結果は、主放電中ではkeVオーダーの荷電交換されたヘリウム粒子が捕捉され、グロー放電中では数100eVのヘリウムイオンが捕捉されるこ

とを示し、各々主放電下での境界プラズマ計測結果とグロー放電電圧に対応することが分かった。

プラズマ壁相互作用の内壁依存性を評価するため、ポロイダル方向とトロイダル方向に設置したプローブの状態変化を調べた。ポロイダル方向において、プラズマに近い壁では放電ガス保持量が多く、プラズマから遠い壁では不純物堆積量が多かった。トロイダル方向において、水素及びヘリウムガス保持量はアノード近傍で多く、これらのリテンションは主としてグロー放電時に起こることが分かった。この結果は、壁洗浄に用いられるグロー放電において、アルゴン等の捕捉されにくいガスを使用するなら、ガスリテンションを低減できることを示唆している。

LHDでは第5サイクル実験以降、サイクル実験期間に3度のボロニゼーションが行われ、プラズマ中の酸素不純物量が桁違いに減少し、プラズマ蓄積エネルギーが更に向上した。ボロニゼーションの効果を明らかにするため、第6及び7サイクル実験においてボロン膜のトロイダル様性と酸素捕捉状態を調べた。ボロン膜厚はアノードとジボラン導入用ノズルの近傍において厚く、これらから離れた部分ではボロン濃度は数%程度であった。壁全体の約30%がボロン化していた。堆積したボロン中の酸素濃度は堆積厚とともに高くなり、酸素不純物を効果的に捕捉していることが分かった。また、ボロン化の割合が少なくても、プラズマ中の酸素不純物量を大きく減少させることが分かった。

以上の結果から、ダイバータ部に黒鉛タイルが設置されてプラズマ中の金属不純物が減少したのは壁全体がカーボン化されたこと、ボロニゼーション後のプラズマ中の酸素不純物の減少は壁のボロン化とその酸素捕捉によること、放電ガスである水素とヘリウムの捕捉は主としてグロー放電時に起こること、主放電及びグロー放電のプラズマ壁相互作用は各々ダイバータ及び第一壁で起こること等、エネルギー閉じ込めに影響を与える新たな知見を得た。各サイクル実験でのプラズマ壁相互作用の結果は次のサイクル実験に反映され、プラズマ閉じ込め性能の向上に貢献してきた。

これを要するに、著者は核融合プラズマと第一壁との相互作用に関して新しい重要な結果を得ており、核融合プラズマ実験に反映させてエネルギー閉じ込め性能の向上に大きく寄与し、核融合プラズマ工学の発展に貢献した。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。