

氏名	野尻 訓平
学位の種類	博士 (理学)
学位記番号	博 甲 第 8942 号
学位授与年月日	平成 31年 3月 25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Neutral particle effect on plasma detachment and characterization of ion behavior in the end region of GAMMA 10/PDX

(GAMMA 10/PDX エンド部における非接触プラズマ形成への中性粒子効果およびイオン挙動の特性評価に関する研究)

主査	筑波大学 教授	工学博士	中嶋 洋輔
副査	筑波大学 教授	理学博士	坂本 瑞樹
副査	筑波大学 准教授	博士(理学)	南 龍太郎
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	江角 直道

論 文 の 要 旨

本論文は、非接触プラズマ形成の対するイオン温度や中性粒子状態の影響を明らかにすることを目指して、静電プローブを用いたイオン温度計測手法の開発と非接触プラズマ形成への中性粒子状態の影響に関する研究成果をまとめたものである。第1章では、本研究の背景と目的および研究手法が述べられている。第2章では、実験装置および計測原理が述べられている。第3章では、静電プローブを用いたイオン温度評価法の開発とガス供給と排気を用いた非接触プラズマ形成への中性粒子状態の影響に関する実験結果と考察が述べられている。第4章では、本論文が総括されている。

磁場閉じ込め核融合炉においてダイバータ板に集中する熱・粒子負荷を低減する方法として、ダイバータプラズマへの中性ガス供給による非接触ダイバータ化が有望視されており、非接触プラズマ形成のメカニズムを解明することが求められている。タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10/PDX では、開放端領域にダイバータ模擬実験モジュール(D-module)を設置してダイバータ模擬実験が行われている。また、GAMMA 10/PDX では閉じ込め領域(セントラル部)とイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱を用いて高イオン温度のプラズマを生成でき、加熱パワー、ガスパフ量等を調整することで、幅広いイオン温度領域での実験が可能となっている。また、D-module の入口付近からはガスを供給でき、D-module の後部に設置された排気扉を開くことによって粒子排気が可能となっている。

静電プローブで測定されるイオン飽和電流には、イオン温度に関する情報が含まれている点に着眼して、静電プローブを用いたイオン温度評価法の開発が行われている。ICRF 加熱パワーやガスパフ量を調整してイオン温度を変化させ、静電プローブで評価した γT_{\parallel} (γ : 比熱比、 T_{\parallel} : 磁力線に平行方向のイオン温度) の特性とエネルギー分析器を用いて計測した T_{\parallel} との比較が行われている。比熱比は ICRF 加熱によって低下し、ガスパフを行うと上昇する結果が示されている。 γ の変化の原因として、イオン同士の衝突度の変化やイオン・中性粒子間の衝突度の変化、イオン温度およびエネルギー分布関数形状の変化が考察されている。実験結果と考察から、衝突度が変化しなくてもイオンのエネルギー分布関数に高温成分が生じて T_{\parallel} が上昇することにより、 γ が低下するという可能性が実験的に示されている。また、静電プローブを用いたイオン温度評価法のために、粒子シミュレーションによる γ とプラズマパラメータとの関係のデータベースの必要性が示されている。

D-module の排気扉を閉じた状態でダイバータ模擬プラズマへ水素ガスを供給した場合と、排気扉を開けた状態で、より多くの水素ガスを供給した場合における非接触プラズマ形成の特徴の比較が行われた。D-module 内の V 字型ターゲット板より上流では、ガス排気扉の開閉に依らず同等のプラズマが生成されている。これに対しターゲット板付近では、いずれの場合も電子温度 (T_e) の低下に伴い電子密度 (n_e) とイオン飽和電流 (I_{is}) が増加した後減少に転じたものの、同じ T_e の範囲において排気扉を開けた場合の方がこれらの減少量が小さく、非接触化が起きにくいことが示されている。排気扉を開けてガスを多く供給することにより、 T_e が低下しても、非接触プラズマ形成に寄与する反応過程である分子活性化再結合 (MAR) の反応率が低くなることが明らかにされている。この原因として、MAR 反応率の観点から、水素分子の振動・回転状態、水素分子密度 (n_{H_2})、イオン温度 (T_i) の 3 つの違いについて考察がなされている。水素分子の振動・回転状態の影響に関しては、水素分子の Fulcher- α 帯スペクトルから水素分子の振動温度と回転温度を評価した結果、排気扉の開閉で T_e が同程度の時、振動回転温度に明確な違いは見られないことが示されている。 n_{H_2} の影響に関しては、Fulcher- α 帯発光強度を n_e で規格化することにより n_{H_2} の相対量を評価した結果、排気扉を開けた場合の方がターゲット板付近の n_{H_2} が低いことが明らかにされている。 T_i の影響については、MAR 中の T_i に依存する素過程の反応速度係数を用いて考察が行われている。排気扉を開けた場合はガスの置換が促進されて中性原子がより低温になっていると予想され、この低温原子との荷電交換反応等によって T_i がより低下した可能性が示されている。

審 査 の 要 旨

[批評]

非接触プラズマ形成に対するイオン温度、中性粒子状態の影響を明らかにすることは物理的に重要な課題である。この論文では、静電プローブで測定されるイオン飽和電流には、イオン温度に関する情報が含まれている点に着眼して、静電プローブを用いたイオン温度評価法の開発が行われている。GAMMA

10/PDX 実験において、ICRF 加熱パワーやガスパフ量を調整してイオン温度を変化させ、静電プローブで評価した γT_{\parallel} (γ : 比熱比、 T_{\parallel} : 磁力線に平行方向のイオン温度) の特性とエネルギー分析器を用いて計測した T_{\parallel} との比較から、比熱比は ICRF 加熱によって低下し、ガスパフを行うと上昇することを明らかにしている。また、イオン温度およびエネルギー分布関数形状の変化と比熱比の関係についても考察されている。イオン温度の絶対値の評価までには至らなかったが、イオン温度評価法開発を一步前進させる成果が得られている。非接触プラズマ形成への中性粒子状態の影響に関する課題においては、ダイバータ模擬実験モジュールの排気扉の開閉と水素ガス供給を合わせた実験を行い、非接触プラズマ形成に対する中性粒子状態の影響について、MAR の反応率の観点から、水素分子の振動・回転状態、水素分子密度(n_{H_2})、イオン温度 (T_i) の3つパラメータによる比較検討に基づいて詳細に考察している。以上の結果は、ダイバータプラズマの物理を解明するうえで、イオン温度、中性粒子挙動の重要性を明らかにするもので、ダイバータ開発に向けての有益な知見を与えるものであり、学位論文として価値のあるものであると評価できる。また、学位論文審査における質問に対して的確な回答が得られている。

〔最終試験結果〕

平成 31 年 2 月 19 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。