

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

著者（英）	Kunpei Nojiri
内容記述	この博士論文は内容の要約のみの公開（または一部非公開）になっています
year	2019
その他のタイトル	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
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2018
報告番号	12102甲第8942号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00156559

数理物質科学研究科 博士論文の要約

専攻名 物理学専攻
学籍番号 201630075
学生氏名 野尻訓平
学位名 博士(理学)
指導教員 坂本瑞樹

博士論文題目

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)

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。非接触プラズマ形成においてイオン温度や中性粒子状態は重要なパラメータとなる。トカマク型装置のダイバータ領域では、非接触プラズマ形成過程におけるイオン温度は計測されておらず、イオン温度の空間分布や時間変化の計測を行うために簡便なイオン温度計測手法の開発が必要となる。また、分子活性化再結合等の中性分子が関わる相互作用がトカマク型装置での非接触プラズマ形成にどの程度寄与するかに関する統一見解が得られていない等の事もあり、非接触プラズマ形成への中性原子分子の温度、密度、量子状態などの中性粒子状態の影響を明らかにすることが必要となる。このような背景から、本研究は①簡便なイオン温度計測手法の開発と②非接触プラズマ形成への中性粒子状態の影響を明らかにすることを目的としている。①イオン温度計測手法の開発に関しては、静電プローブで計測されるイオン飽和電流に、磁力線平行方向イオン温度(T_{\parallel})とイオン比熱比(γ)の積である γT_{\parallel} が寄与することに着目し、新たなイオン温度計測手法として簡便な計測器である静電プローブを用いた T_{\parallel} 評価法を開発を行った。②非接触プラズマ形成への中性粒子状態の影響に関しては、中性粒子状態がガスの供給量と排気量にも影響を受けることに着目し、ガスの給排気特性を変化させることにより非接触プラズマ形成への中性粒子状態の影響を調査した。

本研究はタンデムミラー型装置 GAMMA 10/PDX を用いて実験を行った。この装置では閉じ込め領域(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プラズマを生成でき、尚且つ幅広いイオン温度領域での実験が可能である。また、開放端部の開いた磁場配位を利用してダイバータ模擬実験も行うことができる。ダイバータ模擬実験モジュール(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大容量排気装置への粒子排気が可能である。本研究では GAMMA 10/PDX の以上の利点を活

用して実験を行い、以下の結果を得た。

① 静電プローブを用いた $T_{i||}$ 評価法の開発

ICRF 加熱やガスパフを用いて $T_{i||}$ を変化させ、静電プローブで評価した $\gamma T_{i||}$ ($\gamma T_{i||,LP}$) の特性をエネルギー分析器(IEA)で計測した $T_{i||}$ ($T_{i||,IEA}$) と比較することにより調査した。セントラル部プラズマの ICRF 加熱を行うと、開放端部の $T_{i||,IEA}$ は上昇し、 $\gamma T_{i||,LP}$ は低下した。この ICRF 加熱に加えてセントラル部にて追加ガスパフを行うと、 $T_{i||,IEA}$ と $\gamma T_{i||,LP}$ 共に低下した。以上のような $\gamma T_{i||,LP}$ の変化の原因を γ の値という観点から考察するために、 $\gamma T_{i||,LP}$ と $T_{i||,IEA}$ の比から γ を見積もった。その結果、 γ は ICRF 加熱によって低下し、ガスパフを行うと上昇した。 γ の変化に関して予想される要因としては、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に加えて、近年の粒子シミュレーション研究で予測されているイオン温度およびエネルギー分布関数形状の変化がある。今回、計測データを基に開放端部における衝突度とエネルギー分布関数に関する考察を行うことにより、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 $T_{i||}$ が上昇することにより、イオン音速等のイオン挙動に重要な役割を担う γ の値が低下するという可能性を実験的に示した。また、静電プローブを用いた $T_{i||}$ 評価法の定量性の向上に向けては今後、実験や粒子シミュレーション計算等を行うことにより γ の値および特性のデータベースをさらに拡充することが有効であるという展望を得た。

② 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調査

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の、二つの給排気特性下における非接触プラズマ形成の特徴を比較した。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た。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の低下に伴い電子密度とイオン飽和電流が増加した後減少に転じたものの、同じ電子温度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かった。排気扉を開けてガスを多く供給することにより、電子温度が低下しても、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となった。この要因としては、MAR 反応率の観点から、i)水素分子の振動・回転状態、ii)水素分子密度、iii)イオン温度の三つの違いが考えられる。i)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、排気扉の開閉で電子温度同程度の時、振動回転温度に明確な違いは判断できないことがわかった。(ii)水素分子密度の影響に関しては、Fulcher- α 帯発光強度を電子密度で規格化することにより水素分子密度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水素分子密度が低いことが明らかとなった。またこの結果から、より低い水素分子密度で電子温度が低下することも明らかとなった。iii)イオン温度の影響については、分子活性化再結合中のイオン温度に依存する素過程の反応速度係数を用いて考察を行った。今回の実験で予想されるイオン温度範囲では、イオン温度が低いほど反応速度係数が低くなる傾向にあった。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イオン温度がより低下したと考えられる。以上の結果から、排気扉を開けてガスを多く供給することにより、電子温度が低下しても水素分子密度とイオン温度が低いことにより分子活性化再結合の反応率が低くなる可能性を示した。