

氏名(本籍地)	市村和也			
学位の種類	博士(理学)			
学位記番号	博甲第 7218 号			
学位授与年月日	平成 27 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	数理解物質科学研究科			
学位論文題目	Study of End-loss Ion Flux in the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror for Divertor Simulation (ダイバータ模擬の為の GAMMA 10/PDX タンデムミラーにおける端損失イオン束に関する研究)			
主査	筑波大学教授	工学博士	中嶋洋輔	
副査	筑波大学教授	工学博士	市村 真	
副査	筑波大学教授	工学博士	今井 剛	
副査	筑波大学教授	理学博士	坂本瑞樹	

論 文 の 要 旨

<研究の背景と目的>

核融合炉では高温・高密度のプラズマ生成に伴い、発生する 100 MW 以上の高熱流が炉壁を損傷する危険があるため、熱流を緩和するためのダイバータ部開発が課題となっている。ダイバータ部開発においては熱負荷低減と不純物ガス入射のバランスや、非接触プラズマの物理機構解明など多くの課題が存在するため、直線型のプラズマ実験装置を用いたダイバータ模擬実験が広く行われている。直線型装置を利用したダイバータ模擬実験により、ダイバータ壁材料の損耗や、非接触プラズマ生成などの知見が得られているが、現時点では未解明な部分が残されている。一方、ダイバータ模擬実験では直線型装置におけるプラズマパラメータと実際の核融合ダイバータ部領域におけるプラズマパラメータの違いがしばしば指摘されている。従って、核融合炉実現に向けては高温度のプラズマを用いたダイバータ模擬実験を行い、物理機構を研究することが必要とされている。

以上のような背景から、本研究では大型直線装置である GAMMA 10/PDX タンデムミラー装置における高温プラズマ流の生成と、得られたプラズマ流の特性について調べることで、実際のダイバータ部プラズマに近いプラズマ流生成に向け、プラズマ流のパラメータを向上することを目的としている。そのため、GAMMA 10/PDX の端部に設置されている End Loss Ion Energy Analyzer (ELIEA)とよばれる計測器を用いてミラー端部から損失してくる端損失イオン束の分析を行い、イオン粒子束強度や温度といった基本的な性能と、プラズマ加熱に対する応答などを評価した。さらにプラズマ加熱の重畳によって得られた粒子束増加に対して、数値解析を用いて考察を行った。

< GAMMA 10/PDX 端損失イオン束の計測 >

GAMMA 10/PDX は、全長が東西に約 27 m の大型タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置である。中央のセントラル部と、その東西に位置するアンカー部では、2 系統のイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱によるプラズマの加熱が行われており、数 keV のイオン温度を達成している。このときミラー磁場による閉じ込めから逃れたイオンは、装置端部に設置されたエンド部へ到達する。本研究ではまず、エンド部に設置された ELIEA を用いて端損失イオン束の分析を行った。

ICRFによる加熱パワーが高い場合のプラズマと低い場合のプラズマ放電について、ELIEAによる端損失イオン束の分析を行った。その結果、磁力線に沿ったイオン温度($T_{i//}$)にして 100~400 eV となるイオンエネルギー分布が得られていることが分かった。とくに、セントラル部で高温のプラズマが生成されている場合は、イオンのエネルギー分布に高温成分のテールが発生していることが見出され、2 成分の Maxwell 分布を用いた温度評価法を適用することによって、実効イオン温度 $T_{i//}^{\text{eff}}$ を得ることができた。

磁力線と垂直方向(径方向)のイオン温度の空間分布を測定すると、イオン温度が平坦な径方向分布をとっており、エンド部ミラーズロート付近($z = 1030$ cm)において径方向約 5 cm にわたって軸上付近の値と近いイオン温度を示すことが分かった。一方、イオン粒子束の径方向分布は、セントラル部プラズマ密度の径方向分布と近い半値幅を持つ山なり分布となっており、これらから端損失イオン束の持つ熱流束の分布は、粒子束の分布によって決定されることが予想された。エンド部ミラーズロート近傍で行われた静電プローブとカロリメータによる計測結果から、熱流速の分布と粒子束の分布が類似した半値幅を持つことが示され、ELIEA による分布評価と一致する結果が得られた。これらから、GAMMA 10/PDX においては直径 10 cm 程度の端損失プラズマ流が生成されていることが明らかとなった。

ICRF の加熱パワーおよびガスパフによる粒子供給量を変化させ、ELIEA 計測を行った。その結果から、端損失イオン束の温度はセントラル部プラズマの蓄積エネルギー(反磁性量)に強い相関をもつこと、イオン粒子束がセントラル部プラズマの電子線密度に強い依存性を持つことが明らかとなった。特に端損失イオン束のエネルギーに対しては ICRF 加熱パワーが、その高い制御性を示していることが判明し、 $T_{i//}=100\sim 400$ eV の範囲でイオン温度を制御可能であることを確認した。

< 端損失イオン束の粒子束増大実験 >

GAMMA 10/PDX では高いイオン温度の端損失イオン束を得られていることが分かったが、粒子束の制御範囲は、 $2\sim 6\times 10^{22}$ particles/m²s であり、トカマク型の核融合炉ダイバータ部で想定されている粒子束($10^{23}\sim 24$ particles/m²s)よりも 1~2 オーダー低くなっていた。そこで標準的なプラズマショットに対して、更なるプラズマ加熱の重畳や、粒子供給を行い、粒子束の増大を試みた。実験から、アンカー部への ICRF 加熱追加が粒子束の増大に効果を持つことが分かり、東アンカー部への ICRF 加熱ではおよそ 8×10^{22} particles/m²s、西側では 9.9×10^{22} particles/m²s 程度の高いイオン粒子束を達成した。さらに、東西のアンカー部 ICRF 追加熱を同時に行うことで粒子束が増大し、 1.6×10^{23} particles/m²s を得ることができた。このときイオン温度は 100eV 前後の値となっており、ダイバータ部プラズマで想定されるようなプラズマパ

ラメータに近い粒子束の性能に達していることが確認できた。

<数値計算を用いた考察>

更なる粒子束増大に向けて粒子束増加のメカニズムや効率を調べるため、数値計算による考察を行った。GAMMA 10/PDX ではセントラル部、東西アンカー部はそれぞれミラー磁場となっており、プラズマ閉じ込めを行っている。そこで、各ミラーセルのプラズマがそれぞれミラー閉じ込め時間に基づいた粒子の輸送を行っているとは仮定したモデルを用いて、アンカー部加熱実験での粒子束増加効果を分析した。計算結果と実験結果の差異から、アンカー部 ICRF 実験におけるプラズマ粒子の輸送がミラー磁場のみでなく、プラズマ電位や高周波による粒子捕獲などの影響を受けていることが予想された。また、東西アンカー部への同時加熱を用いた高フラックス生成実験では、イオン衝突頻度の上昇によりフラックスの生成効率が低下している可能性が示唆され、より高いイオンフラックスを得るためには、プラズマ電位を上昇させ、イオン粒子の損失を促進することが重要となることが分かった。

<結論>

実験では、GAMMA 10/PDX における端損失イオン束が 100eV を超える高いイオン温度を達成しており、さらに ICRF 加熱により温度を 100~400 eV の範囲で制御できることが明らかとなった。ダイバータ模擬実験に使用される、 $z = 1030$ cm において直径 10 cm 程度の大口径のプラズマ流が生成できていることが分かった。アンカー部への ICRF 加熱を行うことで、端損失イオン束のイオン温度 100 eV 以上に維持したまま、粒子束を 10^{23} particles/m²s を超える値まで増大することが可能であることが分かった。

実験結果の分析を行うため、ミラー磁場同士の粒子の輸送を考慮した計算モデルを構築し、アンカー部加熱実験を模擬した条件での計算を行った。計算結果と実験結果の差異から、加熱実験時における粒子輸送に関する知見が得られた。また、現在の高フラックス生成実験におけるプラズマパラメータでは粒子衝突の頻度が高く、フラックス生成の効率が低下していることが示唆され、より高いフラックスを得るためには、プラズマ電位を上昇させ、イオンの損失を促進することが重要であることが分かった。

以上のように、GAMMA 10/PDX における端損失イオン束の性能や拡張性について新たな知見を得ることができた。特にイオン温度や粒子束の増大に関してその制御性が実験的に明らかとなり、追加熱による粒子束増大について数値的な考察から、粒子輸送や、高フラックス生成におけるイオン衝突やプラズマ電位の寄与などについて調べることができた。これらの知見は今後のタンデムミラー装置を用いたダイバータ模擬実験に貢献することができると考える。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は、GAMMA 10/PDX の端部に設置されている End Loss Ion Energy Analyzer (ELIEA) と呼ばれる粒子計測器を用いて、ミラー端部から損失してくる端損失イオン束のエネルギー分析と空間分布の測定を行い、イオン粒子束強度や温度といった基本的な性能と、プラズマ加熱に対する応答などを評価し、更に、プラズマ加熱の重畳によって得られた粒子束増加に対して、数値解析を用いて考察を行った

結果について述べたものである。本研究では、ICRF によって生成加熱されたプラズマの端損失イオン束のエネルギー分析から 100~400 eV の範囲で制御性の高いイオン温度を持ち、端部ミラー出口において、直径 10 cm 程度の大口徑プラズマの生成を確認した。また、アンカー部への ICRF 追加熱により、粒子束を 10^{23} particles/m²s を超える値まで増大することを確認している。一方、実験結果の分析を目的として、ミラー磁場管の粒子輸送を考慮した計算モデルを構築し、高フラックス生成の為の重要な知見を示した。これらの結果は、今後のタンデムミラー装置を用いてダイバータ模擬を進めてゆく上での重要な指針を与える研究であり、博士論文として十分価値のあるものである。

〔最終試験結果〕

平成27年 2月20日、数理物質科学研究科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。