

氏 名	ジャン ソウオン		
学 位 の 種 類	博 士 (理学)		
学 位 記 番 号	博 甲 第 9365 号		
学位授与年月日	令和2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	Enhancement of End-loss Ion Flux Using Ion Cyclotron Range of Frequency Waves on GAMMA 10/PDX (GAMMA 10/PDX におけるイオンサイクロトロン高周波を用いた端損失イオン束の増大)		
主 査	筑波大学准教授	博士(理学)	吉川 正志
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(工学)	江角 直道
副 査	筑波大学准教授	博士(理学)	南 龍太郎

論 文 の 要 旨

直線型プラズマ実験装置では開放端から磁力線に沿って流れてくるプラズマ（端損失プラズマ）を用いた様々な研究が行われており、代表的な研究としては、プラズマからの熱・粒子流を処理するダイバータ部を模擬した物理に関する研究やプラズマを用いた推進機等がある。このような研究においては、端損失イオン束の増大が求められている。本論文は、タンデムミラー型プラズマ閉じ込め装置GAMMA 10/PDX においてイオンと強く相互作用を起こすイオンサイクロトロン周波数帯（ICRF）波動を用いて端損失イオン束の増大を目的とした実験を行い、端損失イオン束の増大に成功し、その物理機構を初めて明らかにしたものである。

まず、端損失イオン束を増大させるためにどのようなパラメータを制御する必要があるかを定量的に見積もるべく、Least Absolute Shrinkage and Selection Operator（LASSO）を用いた変数選択を行ない、端損失イオン束に関する線形モデルを作成し、プラズマ生成が行われるセントラル部とアンカー部の密度と電位の上昇、中性粒子の減少が端損失イオン束の増大に効果的であることを明らかにしている。一方、プラズマの密度に関してはプラズマ生成量の増大が、電位に関してはイオンの損失領域の拡張と電位による加速が、中性粒子に関してはイオンの荷電交換反応による径方向損失が関係することが示唆されている。

次に、ICRF 波動をアンカー部のアンテナを用いて励起し、アンカー部におけるプラズマ加熱とガスパフを用いた追加ガス供給を行っている。その結果、中性粒子は増えるものの、プラズマの密度と電位がそれ以上に上昇し、端損失イオン束が3倍以上上昇することが確認でき、端損失イオン束は上昇したが、密度上昇やガス供給によるプラズマの冷却によりプラズマの反磁性量が大きく減少し、高エネルギーイオンの粒子束が減少することでイオン温度が減少することを確認している。そこで、高エネルギーイオン束を増大させるべく、ICRF波動と高エネルギーイオンの相

相互作用について解析を行っている。まず、セントラル部において遅波を励起させず、イオン加熱を行わない放電においては高エネルギーイオン ($> 500 \text{ eV}$) の損失機構は粒子間の衝突によるピッチ角拡散であり、遅波を用いたイオン加熱を行うと、波動とイオンの共鳴によるピッチ角散乱が起こり、一部のイオンが磁力線垂直方向に減速され損失領域に落ちることを実験的に明らかにしている。また、イオンの温度非等方性を駆動力に Alfvén Ion Cyclotron (AIC) 波動が励起し、イオンの温度非等方性が緩和され、高エネルギーイオンが損失領域に落ちることを確認している。さらに、比較的低いエネルギー領域 ($500 \sim 1000 \text{ eV}$) では ICRF 波動によるイオン束の増大が、より高エネルギーイオン ($> 1000 \text{ eV}$) においては AIC 波動によるイオン束の増大が効果的であることを明らかにしている。

以上の様に、本論文は ICRF 波動と粒子の相互作用を用いて端損失イオン束の増大を達成し、その物理機構を明らかにした研究をまとめたものである。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本論文は、筑波大学プラズマ研究センターの GAMMA 10/PDX においてイオンと強く相互作用を起こすイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 波動を用いて端損失イオン束の増大を目的とした実験を行い、ICRF 波動をアンカー部に励起して端損失粒子束を従来の 3 倍以上に増加させることに成功し、この端損失の物理機構を初めて明らかにしたことをまとめたものである。また、端損失イオン束を増大させるために効果のあるプラズマパラメータを評価するため、Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO) を用いた変数選択を行ない、端損失イオン束に関する線形モデルを作成し、プラズマ生成が行われるセントラル部とアンカー部の密度と電位の上昇、中性粒子の減少が端損失イオン束の増大に効果的であることを明らかにしている。そして、ICRF 波動をアンカー部のアンテナを用いて励起し、アンカー部におけるプラズマ加熱とガスパフを用いた追加ガス供給実験を行い、中性粒子は増えるものの、プラズマの密度と電位がそれ以上に上昇し、端損失イオン束が 3 倍以上上昇することを確認しており、さらに、ICRF 波動と高エネルギーイオンの相互作用について解析を行い、セントラル部において遅波を励起させず、イオン加熱を行わない放電においては高エネルギーイオン ($> 500 \text{ eV}$) の損失機構が粒子間衝突によるピッチ角拡散であり、遅波を用いたイオン加熱では波動とイオンの共鳴によるピッチ角散乱が起こり、一部のイオンが磁力線垂直方向に減速され損失領域に落ちることを実験的に明らかにした。

以上のように本論文は核融合プラズマ研究に対して重要な知見を与えるものであり、学位論文として十分価値のあるものであると評価された。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た。

〔最終試験結果〕

令和 2 年 2 月 14 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。

