

氏名	ISLAM MD SHAHINUL			
学位の種類	博士（理学）			
学位記番号	博甲第 8462 号			
学位授与年月日	平成 30年 3月 23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	Study of Plasma Behavior Based on Particle and Heat Flux Measurements and Numerical Simulation in the GAMMA 10/PDX End-cell (GAMMA 10/PDX エンドセルにおける粒子・熱流束計測および数値シミュレーションに基づくプラズマ挙動に関する研究)			
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(工学)	江角直道	
副査	慶應義塾大学教授	工学博士	畑山明聖	

論文の要旨

<研究の背景と目的>

ダイバータ模擬研究は、ITER や DEMO のような将来の核融合装置を定常・安定に運転する為に必要なプラズマの非接触化の物理機構を研究する上で重要な課題である。これまでダイバータ模擬研究は、数多くのトカマクや直線装置において行われてきた。これらの装置では、ダイバータ領域に中性ガスを導入して実験が行われてきたが、様々な不純物ガス導入のプラズマ非接触化への効果については、まだ十分に明らかになっていない。そこで、単純な構造を持つ直線型核融合実験装置である GAMMA 10/PDX タンデムミラー装置を用いて、様々な不純物ガス入射による放射冷却効果を比較することは、非常に重要な研究課題である。GAMMA 10/PDX におけるダイバータ模擬研究は、本体西側端部に設置したダイバータ模擬実験モジュール(D-module)において行われ、プラズマを非接触化させるための放射冷却を引き起こす為のガス(Xe, Ar, Kr)の入射をダイバータ部に入射することで、効率よくプラズマの非接触化を達成している。

本論文は、GAMMA 10/PDX のエンド部において、不純物ガス入射のプラズマに対する非接触プラズマ化へ向けた放射冷却などの効果について理解する事を目的として、実験及び数値シミュレーション解析の両面から検討を行ったものである。実験では、不純物ガスを入射した際の熱流束および粒子束の計測を中心に、各種不純物ガスの電子冷却と非接触プラズマ化への効果について詳細に比較・検討している。また、非接触プラズマに対して電子サイクロトロン共鳴加熱(ECH)波動を印加した際の挙動についても詳細に調べている。一方、数値シミュレーションでは、GAMMA 10/PDX の磁場構造を詳細に模擬し

た流体モデルに基づくダイバータ模擬コード“LINDA”を用いて、各種ガスに対する輻射冷却の効果を比較・検討している。また、ダイバータプラズマにおいて重要な影響を及ぼす中性粒子について、運動論的に粒子の輸送を模擬するコードを新たに開発し、初期的な解析を行った結果についても述べられている。

< D-module を用いたダイバータ模擬実験結果 >

D-module へのガス入射は、Xe、Kr、Ar ガスを用いて行われ、内部の電子温度、密度、イオン束などのプラズマパラメータは主として D-module 内に設置されている V 字型のタングステン板上、及びコーナー部に設けられているカロリメータとラングミュアプローブにより測定されている。ガス入射量の増加に伴う熱流及び粒子束の低下が観測され、その空間分布も詳細に計測されている。また、各種ガスの効果の比較において Xe ガスが、電子冷却、及び熱流、粒子束の低減効果において最も良い性能を持つことが確認されている。また、ガス入射の初期段階において、電子密度が増加し、その後の入射量の増加によって減少に転じていることも示されている。これらの結果は、非接触プラズマが形成されていることを示しており、Xe が最も効果的な放射冷却ガスであることが確認されている。

上述の非接触プラズマ状態への ECH の短パルス入射が行われ、それに伴う電子加熱のプラズマパラメータへの効果が調べられている。その結果、ECH によるエンド部のイオン束の急激な増加が認められ、不純物イオンからの放射がエンド部において急激に増加していることから、非接触プラズマから電離が支配的な接触プラズマへの遷移を示唆する現象が確認されている。この結果は、ECH 等のプラズマ追加熱機構が、非接触プラズマから接触状態へ遷移させるための良いツールとなる事を示している。

< 流体コードを用いたダイバータ模擬プラズマの数値シミュレーション解析 >

本研究で開発している多流体コード“LINDA”は、トカマク等で広く用いられている B2 コードと同様の物理モデルで構築された方程式を使用している。GAMMA 10/PDX では、端部ミラーから流出する端損失プラズマを利用してダイバータ模擬実験を行っているため、エンド部における磁力線構造を基に計算空間内のメッシュが作成されている。また、エンド部に流入するプラズマパラメータは常に一定であり、軸対称性を持つとされ、ターゲット板は計算空間終端に、タングステン製の円形ターゲット板を設置していると仮定されている。現状のコードでは、水素の原子過程(荷電交換、電離、再結合)が含まれており、それに加えて、放射冷却用ガスの過程(放射パワー損失、電離、再結合)が考慮されている。また、ターゲット板上での水素リサイクリングの効果も考慮されている。

シミュレーション解析の結果から、プラズマ中への水素の導入が荷電交換損失を増加させることで、ターゲット板上でのイオン温度が大きく低下することが明らかとなっている。しかし電子温度については、それ程大きくないことも判明している。それに対して、Ar ガスと水素との同時入射では、電子温度の大きな低下が観測され、Ar の強い電子冷却効果が認められている。また、いくつかの不純物ガスによるエネルギー損失量の比較では、Xe が Ar や Kr に対して最も強い冷却効果を示すことが、初めて明らかにされている。以上の結果は、イオン温度に対しては水素に起因する荷電交換反応が、電子温度に対しては Ar による放射冷却が大きな効果を示しており、GAMMA 10/PDX 装置における非接触プラズマの形成への Xe の有効性を示している。

< 中性粒子輸送コードの開発 >

ダイバータ領域において、上流へ向けた水素中性粒子の輸送の詳細な解明は、重要な研究課題であり、

そのために、本論文では運動論的中性粒子輸送コードの開発を開始している。まず、最初の段階として初期のテスト計算が、一定の背景プラズマにおいて、ターゲット板からガスパフを想定した水素分子の入射により行われている。現状の計算では、リサイクリング水素は原子のみとして取り扱われている。一方、ガスパフ粒子は、水素分子としてコサイン分布する速度成分を持つように考慮されている。その結果、中性粒子はターゲット板周辺で集中し、上流へ向けて減少する様子が初めて認められている。また、水素原子密度は、ガスパフ分子の増加と共に上昇し、水素分子と同様にターゲット周辺に局在化し、上流に向かって減少することも確認されている。この中性粒子輸送コードは、今後の非接触プラズマ形成に対する分子過程(特に、分子活性化再結合など)の効果などを検証する上で非常に有効な手段となることが述べられている。

< 結論 >

本研究では、D-module への放射冷却用のガスを導入することによる効果について、カロリメータとラングミュアプローブを用いて調べられており、Xe ガスが最も効果的であり、Kr が Ar との中間の性能を示すことが明らかにされている。また、非接触プラズマに対する上流部でのプラズマ追加熱が、非接触—接触プラズマの遷移に対し重要な役割を果たしていることを明らかにしている。一方、多流体コードを開発することによって、水素や不純物を用いたダイバータプラズマにおける非接触プラズマへ向けた冷却の効果について、イオンエネルギーが主として荷電交換損失によりエネルギーを消失し、電子のそれが不純物による放射損失によるものであること等、詳細に検証されている。特に多種類の不純物ガスによる冷却効果の比較では、Xe ガスが Kr, Ar に比べて強い効果を示すなど、新しい知見が示されている。また、非接触プラズマ形成に対する分子の効果を検証する為に必要な、中性粒子輸送コードの開発も行われている。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は、GAMMA 10/PDX のエンド部において、不純物ガス入射のプラズマに対する非接触プラズマ化へ向けた放射冷却などの効果について理解する事を目的として、実験及び数値シミュレーション解析の両面から検討を行ったものである。実験的研究では、GAMMA 10/PDX 西エンド部に設置されているダイバータ模擬実験モジュール D-module に、不純物ガスを入射した際における、内部に設置しているV字型ターゲットでの熱流束および粒子束の計測を中心に、各種不純物ガスの電子冷却と非接触プラズマ化への効果について詳細に検証し、Xe が最も効果が高いことを示している。また、非接触プラズマに対して電子サイクロロン共鳴加熱(ECH)波動を印加した際の非接触から接触プラズマへの遷移現象についても詳細に調べている。一方、数値シミュレーションでは、多流体モデルに基づくダイバータ模擬コード“LINDA”に対して、実験で用いたガスの原子過程や放射冷却過程を新たに導入にすることにより、輻射冷却の効果を比較・検討し、実験と同様に Xe が強い冷却効果を示すなど、新たな知見が述べられている。また、ダイバータプラズマにおいて重要な影響を及ぼす中性粒子について運動論的に粒子の輸送を模擬するコードを新たに開発し、初期的な解析を行った結果についても述べられている。これらの結果は、今後 GAMMA 10/PDX に限らず直線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30年 2月 14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。