

氏名（本籍地）	細井克洋（東京都）
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博甲第6801号
学位授与年月日	平成26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	

Study of particle control based on H α line measurement and Monte-Carlo simulation in the GAMMA 10 tandem mirror

（GAMMA 10 タンデムミラーにおける H α 線計測およびモンテカルロシミュレーションに基づく粒子制御に関する研究）

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	理学博士	吉川正志
副査	筑波大学准教授	理学博士	假家 強

論 文 の 要 旨

<研究の背景と目的>

磁場閉じ込め装置において、中性粒子の挙動を周辺部だけではなく、プラズマ内部においても理解することが、最適な粒子供給やプラズマの閉じ込め、高性能プラズマの生成を考える上で非常に重要である。また、粒子バランスの観点から、実験条件の最適化にはプラズマ粒子の閉じ込め、および粒子源となる中性粒子の制御が不可欠である。GAMMA 10 はタンデムミラー型直線型装置であり、単純な磁力線構造や観測ポートの多さから、物理現象を単純化した条件下で詳細に計測できるため、基礎的な物理の解明に適している。

本研究の目的は、観測性に優れた直線型装置において、異なる実験条件下及び、異なる粒子源から発生する中性粒子の挙動を、軸方向に沿って設置された H α 線検出器による計測と高速カメラを用いた2次元イメージを用いることによって、その空間的な測定を行い、完全3次元化された中性粒子輸送モンテカルロシミュレーションコード(DEGAS)を用いることにより実験を再現することで、装置や実験条件、粒子源に依らない中性粒子挙動を解明することである。

<GAMMA 10 における C-ECRH 実験>

GAMMA 10 では、主閉じ込め領域であるセントラル部において、電子サイクロトロン共鳴加熱装置(C-ECRH)を用いた加熱実験が行われている。しかしながら、この C-ECRH 印加時にプラズマの蓄積エネルギーの減少が確認されることがあり、プラズマの高性能化に向けて実験条件の最適化が必要とされている。これまでの実験結果から、C-ECRH 印加時に蓄積エネルギーが減少した場合には、電子線密度の減少が確認されると共に、軸方向と径方向の損失粒子の増加も観測されている。この結果から、C-ECRH 印加時のプラズマ性能劣化は粒子損失に依るものだと示唆されていた。そこで粒子バランスの観点から実験条件の最適化を目指した実験を行った。まずプラグバリア部における ECRH を用いることで電位を形成し、閉じ込め改善をした実験を行った。閉じ込め電位形成時では C-ECRH 印加時に蓄積

エネルギーは増加し、損失粒子の増加は観測されなかった。また、粒子生成量を増やすことで実験条件の最適化を目指した実験を行った。ガスパフの流量を増やすことにより、プラズマ性能劣化の改善が達成された。さらに、リミター径を制御することによりリサイクリング源による粒子生成量を増加させた実験においても同様の改善がなされた。一方、ICRH の印加パワーを上げることにより、イオン温度を増加させ、リサイクリング源を増やすことにおいてもプラズマ性能劣化を改善できることがわかった。

以上の粒子生成量を変えた実験における $H\alpha$ 線発光強度の計測結果に基づいて、セントラル部における系全体の粒子生成量を評価し、プラズマが消滅したショットと持続したショットでその生成量について比較を行った。セントラル部とその両端にあるアンカー部の一部を再現したメッシュモデルを新たに作成し、中性粒子輸送のシミュレーション解析を行った。シミュレーション結果における粒子生成量は、リミターからのリサイクリングとガスパフからの粒子源の合計で評価した。プラズマの持続したショットとプラズマが消滅したショットにおいてセントラル部において粒子生成量は、ガスパフの流量、リミター径、ICRF パワーの3つの異なる実験条件において、すべてプラズマが持続したショットの方が多かった。また、その生成量の差は約 10% であることがわかった。このことから、粒子の総生成量として 10% 程度の差でプラズマ性能に対して大きく影響を及ぼしていることが明らかになった。

< SMBI 実験における中性粒子挙動 >

核融合プラズマ閉じ込め装置の粒子供給法として、超音速分子ビーム入射法 (SMBI) がある。この手法は、比較的小さな装置に適した新たな粒子供給法として開発されており、ペレット入射に比べて簡便なものとして近年脚光を浴びている。SMBI は今までの実験結果において、中性粒子ビーム加熱 (NBI) などの加熱系と重畳することで、従来のガスパフに比べプラズマ性能を向上させることがわかっているが、従来のガスパフとの相違が解明されていないため、中性粒子挙動の観点から従来のガスパフとの差を調べる実験を行った。セントラル部中央に SMBI を設置することで、ほぼ単純円筒形のプラズマに対して入射を行い、その際のプラズマの発光から中性粒子挙動を調べた。高速カメラで観測した2次元イメージから求められた発光強度分布の半値幅を、中性粒子の指向性の指標として、プレナム圧に対する依存性を調べた結果、プレナム圧を高くすることで、より高い指向性を持った粒子供給が可能となることがわかった。

実験では観測することの困難なプラズマの内部における中性粒子挙動の詳細を調べるために、シミュレーション解析を行った。SMBI 用にセントラル部中央のメッシュを細かくすることで、SMBI からの中性粒子挙動の詳細な解析が行うことのできるメッシュモデルを新たに作成した。DEGAS コードでは粒子の初期条件として発散角がコサイン分布によって与えられるが、実験結果から得られた発光強度分布の半値幅とは大きく異なることが明らかになった。実験結果を再現できるように、発散角をより指向性の高くなるように小さくした条件で、シミュレーションを行ったところ、従来のコサイン分布に対して半分の発散角を用いることで、実験結果を再現できることがわかった。実験結果を再現したシミュレーション結果から算出されたプラズマ断面における $H\alpha$ 線放射輝度分布を調べたところ、入射粒子の指向性によりその分布に大きな差があることがわかった。指向性の高い粒子供給を行うことで、周辺部の中性粒子密度を下げられることがシミュレーションにより明らかになった。これにより、3次元の中性粒子輸送シミュレーションコードを SMBI からの中性粒子に適用することで、計測からでは明らかに出来なかった断面構造を初めて明らかにすることができた。また、プラズマ内部の中性粒子密度分布の解析結果を用いることで、SMBI 入射側

からプラズマ中心までの放射輝度の径方向分布から中性粒子の侵入長の評価が初めて可能となった。この結果より、指向性は侵入長に対して影響を与えないことが明らかになった。

SMBI の粒子供給以外の効果として、周辺部のプラズマ冷却効果があることが報告されている。これは従来のガスパフに比べ、高い指向性の粒子供給による高い中性粒子密度が周辺部に出来ることで、プラズマの冷却に影響があるのではないかと推測される。この周辺部のプラズマ冷却効果に着目し、異なる電子温度分布を初期条件としたシミュレーションに対して侵入長を評価した。その結果、周辺部の電子温度が低いほど、侵入長が長くなることがシミュレーションによって明らかになった。これは、指向性の高い粒子供給において、周辺部の電子温度を下げることで後続の中性粒子の平均自由行程が伸長させ、結果として深い侵入長を得るというモデルが考えられる。以上のシミュレーション解析により、従来のガスパフと SMBI について異なる点が明らかにされた。

< 結論 >

以上の実験結果及び、それに基づいたシミュレーション結果から、異なる粒子源(ガスパフ源、リサイクリング源)によるシミュレーション系内における粒子生成量の導出、及びそれがプラズマ性能に及ぼす効果についての定量的な評価が可能となった。さらに、従来のガスパフに限らず、SMBI による中性粒子を、シミュレーションにおいて適切な初期条件を用いることで実験結果を再現できるようになった。これにより、装置形状やプラズマ形状に依らずシミュレーションにより詳細な中性粒子挙動解析が可能となり、トーラス型装置などの観測が難しい装置やヘリカル型装置のような複雑な磁力線構造のものにおける中性粒子輸送の研究に多大な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、プラズマからの $H\alpha$ 線放射の計測及び3次元モンテカルロシミュレーション解析に基づいて、ガスパフ源、リサイクリング源、及び新しい超音速分子ビーム(SMBI)などの異なる種類の粒子源による中性粒子輸送について詳細に調べ、粒子生成量の評価や入射中性粒子の特性について議論したものである。本研究では、GAMMA10 セントラル部における粒子バランスに基づく実験条件の最適化に向けた有益な知見や、粒子生成量がプラズマの生成・消滅についての、定量的な考察を行った。また SMBI 実験では、入射中性粒子の指向性についての初めての知見が得られ、シミュレーション解析において、初期条件である粒子の指向性を制御することによって、SMBI に伴う中性粒子挙動を初めてシミュレーションにより再現することに成功した。更に、従来のガスパフに比べ高い指向性を持つ SMBI を用いることによる周辺部の中性粒子密度を低減した局所的な粒子供給の可能性を示した。以上の成果は、 $H\alpha$ 線計測とモンテカルロシミュレーションを用いることにより、観測が難しい複雑な形状の装置や観測しにくい場所において、適切な初期条件を設定することで、様々な粒子源における中性粒子挙動を定量的に評価できる手法を確立し、装置形状や磁場配位に依らない様々な体系のプラズマへの適用性を示したもので、極めて重要な知見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 26 年 2 月 18 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。