

氏名	Md. Maidul Islam
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博甲第 8463 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 Fueling by Supersonic Molecular Beam Injection in the GAMMA 10 Tandem Mirror (GAMMA 10 タンデムミラーにおける超音速分子性ビームによる燃料補給に関する研究)
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(理学) 吉川 正志
副査	筑波大学准教授 博士(理学) 南 龍太郎

論 文 の 要 旨

<研究の背景と目的>

磁場閉じ込めプラズマ核融合装置において、燃料補給は核融合反応を維持するだけでなく、高性能プラズマの生成やプラズマ閉じ込めの最適化にとっても重要な課題である。超音速分子性ビーム入射 (SMBI) は、従来から行われているガスパフによる粒子供給法と、固体ペレットによる粒子供給法の、両方の利点を持つ粒子供給法として開発されてきた。SMBI は比較的単純な構造で、高速の電磁弁により高圧の燃料ガスが、ラバールノズルを通して超音速ビームとなりプラズマに入射される。

本論文は、直線型プラズマ閉じ込め装置 GAMMA 10 タンデムミラーにおける粒子補給時の中性粒子輸送に着目し、SMBI 時における中性粒子の挙動について実験的に調べた結果、並びにモンテカルロ粒子輸送シミュレーション解析に基づいて検討を行ったものである。実験では、GAMMA 10 セントラル部と東側アンカー内側変換部において行った水素 SMBI 時の中性粒子挙動を、装置の各部に設置した H α 線検出器および高速カメラによるプラズマからの可視光の計測から、その空間構造を特定し、プラズマ密度の半径方向分布計測からプラズマ生成への効果について検証している。一方、数値計算による解析では、完全3次元モンテカルロ粒子輸送コード”DEGAS”を用いたシミュレーション解析で、高速カメラにより得られた 2 次元画像を再現し、中性粒子のプラズマ中での発散について定量的な検討を行っている。

<GAMMA 10 セントラル部における SMBI 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、イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF)

波動による生成・加熱プラズマへの水素 SMBI 実験が行われ、様々な入射条件において、水素のバルマー線 ($H\alpha$ 線)、プラズマ線密度などの計測結果が得られている。入射条件としては、バルブ開放パルス幅を 0.5 ms、上流のプレナム圧を 0.3 MPa から 2.0 MPa に変化させ、それに伴う電子の線密度や $H\alpha$ 線強度の計測を行い、プレナム圧の増加に従って両者の増加量も上昇することを確認している。また、粒子の補給効率も、この領域で比例して増加することが確認されている。また、高速カメラで測定した 2 次元のプラズマ発光の画像から、SMBI に起因する発光の広がりプレナム圧依存性が詳細に測定され、ラバーノズルを用いた入射粒子の収束性が、これまでに使われていたストレートノズルに比べて、改善されていることも確認されている。

SMBI 実験において、プラグバリア部の電子サイクロトロン共鳴加熱 (P/B-ECRH) を行い、その重畳効果について調べられた。その結果、P/B-ECRH の無い場合に比べて $H\alpha$ 線強度が増加し、電子線密度も上昇していることが確認され、P/B-ECRH 重畳による電子加熱の結果、電離が促進されていることを示唆する結果が得られている。一方、タンデムミラー端部に流出するイオン流は、端損失イオンのエネルギー分析器を用いて計測され、SMBI に起因する端損失プラズマ流の増加が、P/B-ECRH 印加時に抑制されている事も認められており、SMBI によって粒子供給されたセントラル部プラズマが、P/B-ECRH によって電位閉じ込めされた結果が示されている。

< GAMMA 10 東アンカー内側変換部における SMBI 実験 >

燃料補給特性を更に調べるために、小型のラバーノズルを設計・製作し、GAMMA 10 の東アンカー内側変換部に設置した。これは、ICRF 加熱により高温イオンの存在しているセントラル部中央に既設のもの (CC-SMBI) に比べて、離れた位置から粒子供給を行い、高温イオンの荷電交換損失によるエネルギー減少を抑制することを目的として行われている。本実験においても、入射条件として、バルブ開放パルス幅を 0.5 ms、上流のプレナム圧を 0.3 MPa から 2.0 MPa に変化させ、それに伴う電子の線密度や $H\alpha$ 線強度の計測を行っている。その結果、東アンカーの SMBI (EA-SMBI) は、CC-SMBI と同様に、プレナム圧の増加に伴って、 $H\alpha$ 線、電子線密度共に増加するが、その割合は CC-SMBI に比べて小さいものの、プラズマの持つ蓄積エネルギーの指標である反磁性量が、SMBI に伴う荷電交換損失によって低下することを抑制していることを見出している。

< モンテカルロコードを用いた SMBI 時の中性粒子輸送シミュレーション解析 >

SMBI 時の入射粒子の特性、並びにプラズマ中に入射された中性粒子の挙動を調べるために、3 次元モンテカルロコード "DEGAS" を用いて中性粒子輸送シミュレーションを行っている。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プラズマからの発光強度分布は大きく異なっており、実験結果を再現するためには、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う必要がある。そこで、発散角を制御するパラメータ σ_{div} を導入し、併せてエネルギー保存を考慮するようにコードの改造を施している。ここで $\sigma_{div}=1$ は、コサイン分布による粒子の発散を与えている。シミュレーションで得られた結果からは、 σ_{div} の減少に伴い入射された粒子の拡散は抑制され、入射点周辺に局在化することが分かり、実験時に高速カメラで測定された結果と比較することにより、ラバーノズルを用いた実験結果では、 $\sigma_{div}=0.33$ でのシミュレーション結果と良い一致を示すことを見出されている。

また、SMBI に起因する粒子の侵入長についても調べられており、プラズマ断面内での $H\alpha$ 線輻射率

のシミュレーション結果から、侵入長は入射粒子の発散度に対して依存性の無いことが確認されている。また、背景プラズマのパラメータに対する侵入長についてもシミュレーション解析から調べられており、電子温度の減少に対応して、粒子はプラズマ中へ深く侵入することが示されている。

< 結論 >

実験及び、モンテカルロコードを用いた中性粒子輸送シミュレーション解析に基づいて、SMBI 時における中性粒子の挙動が調べられた。高速カメラを用いたプラズマ発光の画像解析から、ラバールノズルを用いた SMBI による粒子供給がストレートノズルを用いた場合より、良好な結果を示すことが明らかとなった。また、SMBI によって生成されたプラズマに帯する P/B-ECRH の効果についても調べられ、プラグバリア部における電位形成による閉じ込め効果を示唆する結果が得られ、 $H\alpha$ 線強度の計測からも ECH に起因する電離の促進も確認された。シミュレーション解析からは、ラバールノズルを用いた SMBI で粒子の発散がコサイン分布から3分の1に抑制されていることを示す結果が得られた。以上の結果は、SMBI 時の燃料補給についての有効性を示し、中性粒子輸送解析を行うことによって、その詳細な特性を評価することが出来ることを見出した。このことは、今後の ITER や DEMO のようなプラズマ閉じ込め装置における燃料補給の最適化にとって有益な知見を与えるものといえる。

審 査 の 要 旨

[批評]

本論文は、プラズマへの新しい燃料供給法として検討されている超音速分子性ビーム入射を GAMMA 10 タンデムミラー装置に適用し、その効果について生成されたプラズマの密度計測や $H\alpha$ 線計測に基づいて、実験的に検証すると共に、中性粒子輸送モンテカルロコード DEGAS を用いたシミュレーション解析から、ラバールノズルを用いた入射粒子の指向特性について議論したものである。本研究では、GAMMA 10 のセントラル部に設置した SMBI を用いて、粒子供給を行った際の高速カメラを駆使して得られたプラズマ発光画像から、SMBI に起因する入射粒子の挙動を評価し、その発散度合いをプラズマ断面、磁力線方向に沿った発散、プラズマへの侵入長といった物理量から定量的な解析を行っている。また、シミュレーション解析では、独自にエネルギー保存を考慮して初期粒子の発散角を補正した新たなパラメータを導入し、プラズマ中への侵入過程について詳細に評価している。更に、GAMMA 10 東アンカー内側変換部にも新たに小型ラバールノズルを持つ SMBI システムを構築し、セントラル部との比較検討を行っている。これにより、従来のガスパフに比べて高い指向性を持った SMBI が局所的な粒子供給を行い、プラズマの性能向上に寄与する可能性を示した。以上の成果は、SMBI がタンデムミラー装置における燃料供給法としての有効性を実証すると共に、モンテカルロシミュレーションによる中性粒子輸送解析の重要性を示しており、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。