

(続紙 1)

| | | | |
|---|--|----|-------------------|
| 京都大学 | 博士 (エネルギー科学) | 氏名 | 藏 臨閣 (ZANG Linge) |
| 論文題目 | <u>Study on Edge Fluctuation of Supersonic Molecular-Beam Fueled Plasmas Using Langmuir probes and Fast Cameras in Heliotron J</u> (ヘリオトロン J 装置において超音速分子ビーム入射法で給気されたプラズマにおける周辺プラズマ揺動に関する研究) | | |
| (論文内容の要旨) | | | |
| <p>高温プラズマの環状磁場閉じ込め実験では、高密度域におけるプラズマ閉じ込めが、低密度域で得られる閉じ込め経験則より劣化することがしばしば観測されている。この劣化現象を克服するため、ペレット入射やリサイクリング制御性の高いダイバータ研究が進み、H-mode をはじめ、幾つかの閉じ込め改善モードが見出されてきた。さらに、ヘリカル装置 LHD では、ペレット入射により、内部輸送障壁を伴う高密度プラズマ放電(SDC 放電)が見出されている。一方、本学エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J では、超音速分子ビーム入射(SMBI)法等による斬新なガス供給制御により、閉じ込め劣化を抑えた高密度プラズマの生成に成功している。これらの観測に対し、高密度域での改善閉じ込め発現のモデルや制御シナリオが種々議論されているところであるが、現状、未解明な部分が多く、更なる研究の進展が望まれている。</p> <p>本論文は、SMBI のプラズマ閉じ込めへの効果に関し、特に、閉じ込め領域周辺部におけるプラズマ揺動の観点から、ヘリオトロン J 装置における中性粒子ビーム入射加熱(NBI)プラズマに対し SMBI 給気を行い、その際の周辺領域プラズマ揺動特性の変化並びにそれに起因する粒子損失に与える影響を、高速ビデオカメラ並びに静電プローブ計測を軸とする実験的手法を用いて研究した成果をまとめたもので、7 章から構成されている。</p> <p>第 1 章は序論として、核融合炉を目指す環状磁場閉じ込めプラズマ研究の状況を概説、その後、閉じ込め領域周辺領域におけるプラズマの役割、特に周辺領域プラズマにおける乱流研究の重要性を指摘している。同時に新たな給気制御手法として注目され、本研究において閉じ込めへの影響に焦点を当てている SMBI 法について概説し、軸対称系であるトカマクと大きく異なる周辺磁場構造を持つ非軸対称系であるステラレータ／ヘリオトロン系磁場配位を対象とする研究の重要性を指摘している。これらを背景に、本研究の目的・意義の位置付けを行っている。</p> <p>第 2 章では、研究の基盤となる周辺プラズマ揺動の計測手法並びに解析手法を、歴史的経緯を交えながら概説した後、本研究で用いた計測手法として、静電プローブ法並びに高速カメラ法についてまとめている。データ解析法としては、本論文で重要となるいくつかの解析手法、すなわち、揺動起因径方向粒子束の評価法、揺動の周波数－波数空間でのスペクトル解析法や確率密度関数等の統計的扱い、異なる周波数揺動間のある関係を探るバイコヒーレンス解析法、さらに、背景光成分の多い高速カメラ画像から関心のある揺動情報を抽出するための画像処理手法をはじめとする二次元データ解析手法等を解説している。</p> <p>第 3 章は、本研究の実験で使用した、本学エネルギー理工学研究所のプラズマ閉じ込め装置 ヘリオトロン J 装置についての説明である。閉じ込め領域周辺部も含めたヘリオトロン J 磁場配位の特徴、装置の持つ構造上の特徴、および本研究で使用した各種加熱装置やプラズマ閉じ込め研究における標準的パラメータを得るための計測装置について概説している。</p> | | | |

第4章では、SMBI法を用いたNBIプラズマを対象に、ヘリオトロンJ閉じ込め磁気面の最外殻磁気面近傍におけるプラズマ揺動並びに揺動起因径方向粒子束の振る舞いを、SMBI入射口から離れた位置に設置した静電プローブを援用して調べている。SMBI直後にはプラズマ蓄積エネルギーの若干の低下が観測されるが、この時間帯では、20-50kHzの低周波数域で、間歇的高強度揺動を伴う密度揺動強度が増大、その確率密度関数も非Gaussian的様相を呈するようになることを明らかにした。このときポロイダル電場揺動と密度揺動から算出する揺動起因径方向粒子束はSMBI前の4倍程度まで急激に増大しており、プラズマ蓄積エネルギー低下の一因となっていることを指摘した。この時間帯を過ぎると、蓄積エネルギーは再び上昇するが、ここでは揺動起因径方向粒子束は、ほぼSMBI前のレベルまで低減し、この時間帯のプラズマ線平均密度がSMBI以前より2倍以上高くなっていることから、良好な粒子閉じ込め状態が実現していることを示唆している。また、径方向電場並びに揺動の位相速度の径方向依存性から、SMBI前後のシア流の比較を行い、揺動特性の変化との関連を議論している。ガス入射直後の揺動起因径方向粒子束の増大は、他の幾つかの装置で観測されていることも勘案し、SMBIでは、ガス入射による揺動起因径方向粒子束の増大が短時間・局所的に限られることが、閉じ込めの劣化を最小限に抑え、その後の高密度域での良好な閉じ込めにつながっているとのシナリオを提示した。

第5章では、高速カメラ計測に基づく、ヘリオトロンJにおける周辺プラズマ揺動構造の可視化に関する研究成果がまとめられている。プラズマ柱に垂直な視線方向を持つ高速カメラ観測を行うに際し、SMBIによりH α 光発光強度が増大することを利用することで、168kfpsの高時間分解で、十分は視野を持つ鮮明な画像データを得ることに成功している。さらに、新たな画像データ処理方法の開発を行い、周辺プラズマ揺動の中に突発的大振幅揺動の存在を明らかにし、その揺動が磁力線方向に延びたフィラメント状構造を持つことを見出した。さらにその構造の動きを動画として視覚化することに成功し、ポロイダル方向の位相速度の算出を試みている。これにより、周辺プラズマ揺動の見かけのポロイダル位相速度が、SMBIパルス後に劇的に変化することを見出した。この現象に関し、周辺プラズマに径方向位置で流れの向きが変化するポロイダル方向のシア流がある場合、SMBI時の急激なプラズマ変化により高速カメラによる観測位置が視線に沿った方向にシフトすることにより、見かけの位相速度が大きく変化して見える可能性を指摘している。

第6章では、高速カメラ観測とその視野にある静電プローブの併用計測を提案している。静電プローブとプラズマとの相互作用による発光がカメラ画像に影響することを利用し、カメラ単独では得られない視線方向の構造や、逆に、そのようにして空間構造を特定することにより、局所的な静電プローブ計測では困難な大スケールの揺動構造の挙動が理解できるようになることを、実例を持って示し、この複合計測法が、強力な新研究手段となり得ることを示した。

第7章において、論文全体をまとめ、総括を行っている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、エネルギー理工学研究所のヘリオトロン J において超音速分子ビーム入射 (SMBI) 法によるガス供給により閉じ込め劣化を抑えた高密度プラズマの生成に成功していることを背景に、SMBI の効果に関し、閉じ込め領域周辺部におけるプラズマ揺動の観点から、SMBI が周辺プラズマ揺動並びにそれに起因する粒子損失に与える影響を解明することを主目的として実験的研究を行い、多くの有益な知見を得た結果をまとめたものである。主な成果は以下のとおりである。

- (1) ヘリオトロン J において、高速カメラ観測により捉えられた可視域プラズマ発光画像から周辺プラズマ乱流構造を抽出する手法を開発、同手法を SMBI 実験に適用することにより、SMBI 直後において、磁力線方向に伸びたフィラメント状構造を持つ突発的大振幅揺動が存在することを明らかにし、その動的挙動 (ポロイダル方向回転) の可視化に成功した。
- (2) 同時に、SMBI により同揺動構造のポロイダル回転が大きく変化することを見出し、これが SMBI 近傍における発光強度径方向分布の変化で説明可能であることを示した。
- (3) SMBI 入射口から離れた場所に設置した静電プローブにより周辺プラズマ揺動の局所観測を行い、その解析から SMBI 前後における周辺プラズマ揺動の局所的特性並びに揺動駆動の粒子損失を評価した。それにより、① SMBI 入射直後の短期間のみ、揺動の低周波数成分ならびに揺動強度確率密度関数 (PDF) の歪み (突発的大振幅揺動の発生) が増加し、揺動駆動粒子損失が増加する、② その後、この揺動の低周波数成分が減衰し、PDF の歪みも収まり、揺動駆動粒子損失が減少していることを明らかにした。
- (4) さらに、SMBI 前後における最外殻磁気面近傍でのポロイダル回転速度の径方向シアが変化していることを見出し、この変化が上述の低周波数域の揺動特性の変化やそれに伴う揺動駆動粒子束の変化に関係している可能性を示した。
- (5) これらの周辺揺動特性並びに揺動駆動損失の変化が、プラズマ閉じ込め劣化、あるいは閉じ込め改善の一因となっているとして、SMBI では、この閉じ込め劣化期間を短時間で終わらせることができ、その後の閉じ込め改善につながっているとのモデルを提示した。
- (6) 高速ビデオカメラと静電プローブの組み合わせ計測により、周辺プラズマ揺動が生じている径方向位置を推定する手法を考案し、揺動領域の特定を試みた。これにより、両計測装置の併用により相補的なデータの取得を可能とし、周辺プラズマ揺動研究において有力なツールとなることを示した。

これら、本研究を通じて得られた知見は、SMBI により閉じ込め劣化を伴わずに高密度プラズマが生成可能となる機構の解明ばかりでなく、環状磁場閉じ込めにおける周辺プラズマ揺動並びにその閉じ込め性能に与える給気制御の影響に関する研究を深化させるために有意義かつ重要なものであり、核融合エネルギー制御に関わる学術領域に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (エネルギー科学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 26 年 2 月 21 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降