

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	向井 清史
論文題目	ヘリオトロン J プラズマにおけるマイクロ波 AM 反射計を用いた電子密度分布計測および粒子輸送特性に関する研究		
（論文内容の要旨） 本論文は、京都大学エネルギー理工学研究所の磁場プラズマ閉じ込め装置であるヘリオトロン J において生成されるプラズマの電子密度分布の高時間分解計測を可能とするマイクロ波 AM 反射計を開発し、これを用いた電子密度分布計測データを基に、超音速分子ビーム入射（SMBI）による粒子供給時の閉じ込めの改善過程における電子密度分布挙動、並びに ECH プラズマの粒子輸送特性を論じた結果をまとめたもので、7 章で構成されている。 第 1 章は序論で、核融合プラズマ研究やヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位の最適化研究における粒子輸送特性解明や粒子供給法最適化の重要性に加え、関連先行研究等について述べた上で、本研究の目的・意義を示している。 第 2 章では、本研究で対象としたプラズマ閉じ込め装置ヘリオトロン J について、その磁場配位の特徴、装置の持つハード面での構造の特徴、およびヘリオトロン J を構成する粒子供給・加熱・計測装置について概説している。 第 3 章では、粒子輸送特性や粒子供給法による電子密度分布挙動の変化の実験的解明に必要な、高時間分解能・広測定空間領域を有する電子密度分布計測装置として本研究で独自に開発したマイクロ波反射計について詳述している。反射計システムとして、電子密度分布計測時の電子密度揺動による擾乱を低減し、位相差計測時のフリンジジャンプの影響を除去可能なAM反射計を採用し、併せてXモード入射を選択することで、凹な密度分布においてもプラズマ中心部の計測を可能としている。これにより、搬送周波数（33–56 GHz）や変調周波数（200 MHz）の適切な設定により、線平均電子密度が $1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度以下のプラズマに対しては、プラズマ周辺部から中心部に渡る広い測定区間領域を実現している。また、プラズマ密度変化の特性時間より十分早い 1 ms の時間分解能を可能としている。この様なハード面の開発と同時に、反射計計測において得られる入射周波数一位相変化量特性から電子密度分布を再構築するプログラムを開発、分布再構築の精度評価も実施して、その有効性を確認している。 第 4 章では、開発したマイクロ波 AM 反射計をヘリオトロン J プラズマ計測へと適用し、マイクロ波干渉計による線平均密度および AXUVD による軟 X 線放射分布計測結果との比較を行うことで、AM 反射計による電子密度分布の時間発展計測の妥当性を検証している。これらにより、ECH プラズマでは密度増加に伴い密度分布が			

凹型形状から平坦な形状へと変化する傾向があること、NBI ではピークした凸型分布形状であることを明らかにしている。同時に、広い空間領域の密度分布が計測できること、凹型密度分布の計測が出来ること等、反射計設計時に要求した仕様が満たされていることも実証している。

第 5 章では、ヘリオトロン J プラズマに、新たな粒子供給法として超音速分子ビーム入射 (SMBI) を印加した際の電子密度分布の挙動を、AM 反射計を用いて実験的に明らかにしている。SMBI を印加した場合には、ガスパフによる粒子供給と比較してプラズマ中心部への粒子供給が増加していること、また、SMBI パルス後、プラズマ蓄積エネルギーが増加して行く過程で、SMBI 時に特徴的な密度分布変化が現れること等を初めて示すことに成功している。これらのデータを基に、SMBI により生ずるこのような特異な電子密度分布の変化が、粒子閉じ込めや粒子輸送、さらには蓄積エネルギーの増加に影響を与えている可能性を指摘している。

第 6 章では、中心加熱条件でのECHプラズマを対象に、ガスパフ制御による密度変調実験を行い、AM反射計を用いて計測した電子密度分布の時間応答から粒子輸送解析を行うことで、プラズマコア部での拡散係数 D_{core} および対流速度 V_{core} の評価を試みている。線平均電子密度の異なるプラズマ条件下で行った変調実験の解析から、①拡散係数に関しては、密度が増加すると拡散係数の値が減少する傾向があること、②対流速度に関しては、いずれの密度条件においても、 V_{core} は正の値（外向き）であり、低密度においてより大きい値となるとの結果を得ている。これらのことから、中心加熱のECHプラズマでは、外向きの対流項が粒子輸送を決定する上で重要な役割を果たしており、特に低密度領域でその影響が大きいことを定量的に議論している。また、正の V_{core} は、反射計計測で観測された凹型形状の密度分布と合致する結果であり、ヘリオトロンJにおいても、中心加熱のECHにおいて外向きの対流が生じていることを述べている。

第 7 章は本論文の総括として、本研究のまとめを行い、最後に、今後の課題・展望について記述している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ヘリオトロン J プラズマの電子密度分布の高時間分解計測を可能とするマイクロ波 AM 反射計の開発、これを用いた電子密度分布計測に基づく、超音速分子ビーム入射 (SMBI) による粒子供給時の閉じ込め改善過程における電子密度分布挙動、並びに ECH プラズマの粒子輸送特性を研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

- ① ヘリオトロン J 装置の磁場構造並びに装置の構造上の特徴を活かした高時間分解能・広測定空間領域を有する電子密度分布計測装置としてマイクロ波 AM 反射計を独自に開発し、1 ms の時間分解を持ち凹形状の密度分布にも対応する、ヘリオトロン J プラズマ電子密度分布計測システムの開発・構築に成功した。
- ② この反射計を用い、ECH プラズマでは密度増加に伴い密度分布が凹型形状から平坦な形状へと変化する傾向があること、NBI ではピークした凸型分布形状であることを見出した。
- ③ 新たな粒子供給法として超音速分子ビーム入射 (SMBI) を印加した際の電子密度分布が特徴的な時間変化を示すことを見出し、粒子閉じ込めや熱輸送、さらには蓄積エネルギーの増加に影響を与えている可能性を指摘した。
- ④ 中心加熱条件 ECH プラズマを対象にした密度変調実験において、反射計による電子密度分布の時間応答観測から、ヘリオトロン J では初めての試みとして、プラズマコア部での拡散係数 D_{core} および対流速度 V_{core} の定量評価を行った。
- ⑤ これにより、密度が増加すると拡散係数の値が減少する傾向があること、対流速度に関しては、いずれの密度条件においても V_{core} は正の値 (外向き) であり、低密度においてより大きい値となることを示し、中心加熱の ECH プラズマにおいては、外向きの対流項が粒子輸送を決定する上で重要な役割を果たしており、特に低密度領域でその影響が大きいことを明らかにした。

以上、本研究は、ヘリオトロン J における粒子輸送研究を大きく進展させ、ヘリカル軸ヘリオトロン磁場配位の最適化に資するのみではなく、広くトーラス磁場による核融合プラズマ閉じ込め研究の発展に寄与するものである。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23年12月26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。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、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