

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	大谷 芳明
論文題目	ヘリカル型閉じ込め装置におけるイオン種の違いが粒子輸送に与える影響に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、環状磁場、とくにヘリカル系磁場装置に閉じ込められたプラズマにおける粒子輸送現象に関し、プラズマイオン種の違いが粒子輸送に与える影響を実験研究により論じたものである。本学エネルギー理工学研究所で稼働中の核融合プラズマ実験装置ヘリオトロンJにおいて自らが開発した遠赤外レーザー干渉計と既存マイクロ波干渉計を主要計測ツールとした密度変調実験を立案・実行して得た軽水素 (H) あるいは重水素 (D) プラズマの粒子輸送解析、並びに、自然科学研究機構 核融合科学研究所で稼働している LHD 装置における H あるいはヘリウム (He) プラズマにおける同様な手法による粒子輸送解析結果を基に、ヘリカル型閉じ込め装置におけるイオン種の違いが粒子輸送に与える影響を調査・検討した成果がまとめられている。本論文は七つの章と Appendix で構成されている。</p> <p>第 1 章は序論として、核融合研究の必要性ならびに環状磁場閉じ込めプラズマの輸送現象における、いわゆる同位体効果に関する先行研究の推移を俯瞰し、同研究の必要性・重要性を指摘した後、本研究の目的を述べている。</p> <p>第 2 章では、粒子輸送研究のために自らが開発・設置した遠赤外レーザー干渉計に関し、その設計・製作の詳細が述べられている。屈折の影響が小さい波長 $337\mu\text{m}$ の HCN レーザーを用いることにより、既存マイクロ波干渉計では計測が困難な高電子密度 ($\sim 1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) プラズマの計測に成功している。</p> <p>第 3 章では、粒子輸送評価を行うための手法、特に、密度変調法の提案、並びに干渉計データで得られる線積分値から密度の径方向分布を再構成する方法及び粒子輸送解析手法を、それぞれまとめている。その後、本研究で用いた二つの実験装置への本手法を適用する具体的な手法についても論じている。その際、上記干渉計システムの観測視線を磁気軸から外れた位置に設定することにより、磁気軸を通る視線を持つマイクロ波干渉計と組み合わせた観測から粒子輸送解析が可能となることも論じている。</p> <p>第 4 章は、ヘリオトロン J において異なるイオン種プラズマでの粒子輸送比較を行った結果をまとめている。電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) プラズマを対象に、D 及び H プラズマに対する密度変調実験から粒子拡散係数と対流速度を評価、粒子拡散係数は D プラズマの方が H プラズマよりも小さく、磁気軸中心へ向かう対流速度 (内向き対流速度) は D プラズマの方が H プラズマよりも小さく評価され、ヘリオトロン J において、粒子輸送に水素同位体効果があることを見出した。</p> <p>第 5 章では、LHD における H ならびに He プラズマに対する密度変調実験を実施、両者の粒子輸送係数を比較した結果をまとめている。LHD においては粒子輸送係数の空間位置依存性にも着目し、空間位置によってイオン種効果が異なることを見出している。すなわち、中心領域では He プラズマにおける粒子拡散係数は H プラズマに比して小さく、周辺領域では悪い。一方、中心領域の対流速度は、H プラズマは外向きであるが、He プラズマでは内向きであること、周辺領域での対流速度は、H と He プラズマで同程度の内向きであることなどを見出している。さらに、粒子輸送係数に対するイオン種効果の衝突周波数依存性を評価し、中心領域では粒子輸送係数に対するイオン種効果に明確な規格化衝突周波数依存性は見られないが、周辺領域では明確な規格化衝突周波数依存性が見られるとしている。</p> <p>第 6 章ではヘリオトロン J、LHD に加え、先行研究による CHS で得られたデータをも交</p>			

え、第 5 章で見出したイオン種効果の規格化衝突周波数依存性の観点からの比較を行っている。H プラズマに限れば、装置に依らず、粒子拡散係数自体には同様の規格化衝突周波数依存性が見出されるものの、イオン種効果に関しては、規格化衝突周波数依存性は装置間で必ずしも同一ではない（LHD では規格化衝突周波数の増加によりイオン種効果が大きくなるのに対し、CHS では規格化衝突周波数の減少によりイオン種効果が大きくなる）ことを指摘し、同時に、ヘリオトロン J と CHS の両方の装置で得られているデータからは、低規格化衝突周波数の場合に水素同位体効果がより大きく現れるという傾向を導いた。これらの結果より、異なるイオン種プラズマにおける粒子輸送に対し、そのイオン種効果は規格化衝突周波数と強く関係していることを指摘すると同時に、規格化衝突周波数以外のパラメータの重要性をも示唆している。

第 7 章では、本研究の総括として、本研究が、核融合炉におけるプラズマ中の粒子輸送に対するイオン種効果の物理機構解明に向けた基礎実験としての観点のみではなく、ここで得られた成果は、将来のヘリカル型核融合炉設計において、重水素・三重水素混合の炉心プラズマの閉じ込め性能を予測する上でも重要な知見となるものであるとまとめている。最後に、今後の展望についても記述している。

なお、Appendix には、第 2 章の遠赤外レーザー干渉計システム設計に関連する事柄並びに同システムによる高密度プラズマ観測例に関して記述されている。

(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カル型閉じ込め実験装置「ヘリオトロン J」装置、並びに核融合科学研究所「LHD」装置において、軽水素 (H)、重水素 (D) あるいはヘリウム (He) プラズマにおける密度変調実験を実施し、それぞれの粒子輸送解析結果をもとに、ヘリカル型閉じ込め装置におけるプラズマイオン種の違いが粒子輸送に与える影響を調査・検討した成果をまとめたものである。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 装置を用いて広い電子密度領域で粒子輸送研究を可能にするため、HCN レーザーを光源とする遠赤外レーザー干渉計システムを新たに設計・開発した。これにより、既存マイクロ波干渉計で計測困難な高プラズマ電子密度 ($\sim 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) 計測に成功した。
- (2) 同時に、同干渉計システムの観測視線を磁気軸から離れた位置に設定することにより、磁気軸を通る視線を持つマイクロ波干渉計と組み合わせた観測から粒子輸送解析が可能となることに着目し、その具体的解析手法を検討・開発し、ヘリオトロン J において給気制御による密度変調実験に基づく粒子輸送解析を可能とした。
- (3) ヘリオトロン J における電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) プラズマを対象とした密度変調実験から粒子拡散係数と対流速度を評価し、ヘリオトロン J における ECH プラズマの粒子輸送に水素同位体効果があることを初めて実験的に示した。
- (4) LHD における H と He プラズマに対し、同様の密度変調実験を行い、粒子輸送係数比較から、粒子輸送に対するイオン種の効果が規格化衝突周波数に依存していることを見出した。
- (5) ヘリオトロン J、LHD における実験データに加え、CHS 装置 (核融合科学研究所) での先行研究データを援用したプラズマ粒子輸送に対するイオン種効果を調べ、そのイオン種効果は規格化衝突周波数と強く関係していることを指摘すると同時に、規格化衝突周波数以外のパラメータの重要性をも示唆し、今後の粒子輸送に対するプラズマイオン種効果研究における新たな指針を与えている。

以上、本論文は、核融合炉におけるプラズマ中の粒子輸送に対するイオン種効果の物理機構解明に向けた新たな知見を与えるばかりではなく、将来のヘリカル型核融合炉設計において、重水素・三重水素混合の炉心プラズマの閉じ込め性能を予測する上でも重要な知見を与えている。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 29 年 2 月 22 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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

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： 2018 年 4 月 1 日以降