

氏名	おか だ ひろ ゆき 岡 田 浩 之
学位(専攻分野)	博士 (エネルギー科学)
学位記番号	論エネ博第9号
学位授与の日付	平成11年11月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	Study of Fast Ion Production and Confinement in Ion Cyclotron Range of Frequency Heating of Heliotron E (ヘリオトロン E 装置のイオンサイクロトロン加熱による高速イオンの生成と閉じ込めに関する研究)

論文調査委員 (主査) 教授 佐野史道 教授 若谷誠宏 教授 近藤克己

論文内容の要旨

本論文は、ヘリカル系磁場配位のイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF) 加熱における高速イオンの生成及び閉じ込めの物理を、実験と理論の両面から論じた結果をまとめたもので、7章からなっている。

第1章は序論で、核融合を目的とするトーラス型磁場配位のプラズマ加熱に関する研究の背景と歴史を述べ、加熱効率を改善する観点から、本研究の目的を説明している。

第2章では、ヘリカル系磁場配位としてヘリオトロン E 型磁場配位に注目したとき、速波による ICRF 加熱のためのアンテナ設計について述べ、製作したアンテナによる 1 MW 級の大電力入射に成功した実験結果を説明している。ICRF 加熱ではアンテナの最適化が重要な課題であり、軸対称磁場配位で開発されたアンテナ設計の手法を進展させ、プラズマ形状に合わせた、捻れた形状のアンテナを開発し、発信器 1 基当たり 1 MW の入射を目標にモデル計算が行われ、その有効性が実験で確認されている。実測されたアンテナ・インピーダンスから、伝送経路での電圧分布が求められ、工学的な課題である真空バリコンの耐圧制限が満たされていることを明らかにしている。プラズマからの中性粒子や、ダイバータに沿って流出する荷電粒子からアンテナ中心導体を保護するため、2重のフェラデー・シールド及びアンテナ両端にグラファイト保護板を装着する等の工学的改良を加え、2 MW レベルの ICRF 加熱実験を安定に、かつ効果的に行うに十分なプラズマ負荷抵抗を得ることに成功している。

第3章では、少数イオンを用いた速波による ICRF 加熱実験の結果を述べ、高速イオンの生成と閉じ込めの機構について説明している。電子密度 $1.5 - 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ において、バルクイオン温度として 0.6 keV (水素マイノリティ) 及び 1.0 keV (^3He マイノリティ) が得られることを見出し、イオン加熱効率としては、中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱の効率とほぼ同等であることを実証した。高速イオン生成実験では ICRF パルス中に、高い強度の高エネルギー粒子束が観測され、100 keV までの粒子束に対する詳しい挙動が解析されている。とくに ICRF パルス遮断後の高速イオン粒子束の減衰特性から、減衰時間スケールについて当初予測されていたようにクーロン衝突や荷電交換反応だけでは説明できず、この原因を粒子軌道損失過程に求める必要があることを示している。

第4章では、上記の推論を実証するため、高速イオンの挙動を模擬するためのモンテカルロ・シミュレーション・コードを新たに開発して得た成果を述べている。シミュレーション・コードは、ICRF 電場によるイオンの加速機構、クーロン衝突によるピッチ角散乱機構・エネルギー散乱機構、更に粒子軌道追跡による高速イオンのロスコーン損失の評価などを統一的に組み込んだモデルによって構成されている。モンテカルロ計算の中で、衝突オペレータがクーロン衝突を高精度に模擬していることをピッチ角散乱、エネルギー散乱に対する解析解と照合することによって確認している。エネルギー保存については 10^{-7} 程度の相対誤差で計算が行われており、ヘリオトロン E 装置の実験結果を模擬するための時間ステップとして、 10^{-7} 秒程度が適切であることを見出している。

第5章では、高速イオンのエネルギー分布に関する時間発展の測定結果をシミュレーション・コードの結果と照合し、高速イオンの生成と閉じ込めの物理を考察している。まず、定常状態でのエネルギー分布はシミュレーション・コードによって良く再現できること、シミュレーション・コードによる高エネルギー・テイルの生成時間は、本論文の実験条件のもとでは20 keV以下で1 ms以下であることを示し、これが中性粒子エネルギー分析器(NPA)による観測値と矛盾しないことを見出している。一方、ロスコーンの存在下で高エネルギー・テイルが高い強度で生成されるのは、当該時間スケールにおいてロスコーンへのピッチ角散乱が無視できるオーダーであることによることが定量的に明らかにされている。ICRFパルス遮断後の高速イオン粒子束の減衰特性については、高速イオンの生成過程とは異なり、高エネルギー領域のロスコーン損失の寄与が支配的要因となることを定量的に示している。またバルク粒子へのエネルギー分配率は、高速イオン生成の実験モードでは小さく(0.2-0.4程度)、イオン加熱実験モードでは増加する(0.55-0.7程度)ことを明らかにし、効率的な加熱を実現するためには最適な密度条件があることを示唆している。

第6章では、シミュレーション・コードを用いた解析をもとに、少数イオン加熱におけるイオン種依存性を論じている。ヘリオトロンE装置では、 ^3He を少数イオンとしたときに、最も高いイオン温度(1.0 keV)を得ている。少数イオンとして水素を選択したときは、0.5 MW以上の入射パワー領域では加熱効率が低下することを実験的に見出しているが、少数イオンとして ^3He を選択したときには、このような低下は見られない。この原因として、シミュレーション・コードによる解析から、研究対象のプラズマ・パラメータにおいては、同一入射パワーに対して水素よりも ^3He の場合の方が、高エネルギー・テイルが高い強度で生成され、軌道損失についても、水素の場合が約0.5、 ^3He の場合が約0.3の割合で存在し、結果として ^3He の場合の方が加熱について約40%程度、効率が良いことを見出した。このように、開発されたモデルは、高速イオンの生成と閉じ込めについてイオン種依存性を含めて、精度の高い実験予測を与え得るものであることを明らかにした。

第7章は結論である。本研究の成果を要約し、その応用について、現在実験が開始されている大型ヘリカル実験装置(LHD)や今後のヘリカル系プラズマ実験装置でのICRF加熱実験の展開に、広く適用できるものであると展望している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ヘリカル系磁場配位のイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱における加熱効率の改善を目的とした高速イオンの生成及び閉じ込めの物理を、実験及び理論の両面から探究した研究成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) 核融合を目指したヘリカル系プラズマにおいて、速波によるICRF加熱の成否の鍵を握るのはアンテナ設計である。本研究では、プラズマ形状が複雑なヘリオトロンE型磁場配位に適合する、捻れた構造のアンテナを独自に開発し、プラズマ・アンテナ間距離の最適化によって、十分な負荷抵抗を実現すると同時に、2重フェラデー・シールド及びグラファイト保護板の装着によって、不純物混入を効果的に抑制できるループ・アンテナの設計・製作法を確立し、2 MWレベルの大電力入射に成功した。

2) ヘリオトロンE装置における、上記のアンテナを用いた水素(またはヘリウム(^3He))の少数イオン速波加熱実験では、バルク(重水素)イオン加熱効率として、中性粒子ビーム入射(NBI)加熱効率とほぼ同等の 2×10^{19} (keV/m³MW)が得られることを実証した。

3) イオン加熱効率の少数イオン種依存性として、水素とヘリウムを比較したとき、ICRF電力として0.5 MW以上の大電力領域では、ヘリウムの方が加熱特性が良好であることを実験的に見出し、このときの中心イオン温度として1 keVを得た。

4) 高速イオンの生成と閉じ込めの挙動が、最終的にはイオン加熱効率を支配するとの視点から、中性粒子分析器(NPA)を用いて高速イオンのエネルギー分布に関する時間発展の測定を行い、ヘリオトロンE型磁場配位において、100 keVのオーダーの高速イオンの生成及び閉じ込めが有効に行われることを、初めて明らかにした。

5) イオン加熱効率の少数イオン種依存性及び高速イオンの生成と閉じ込めについての測定結果を系統的に理解するため、新たに粒子シミュレーション・コードを開発した。高速イオンのエネルギー減衰時間の測定結果は、クーロン衝突及び荷電交換反応だけでは説明できず、ICRF電場によるイオン加速機構、クーロン衝突によるピッチ角散乱機構及びエネルギー散乱機構、更に粒子軌道追跡を用いたロスコーン損失の評価などを統一的に組み込んだシミュレーションを行って初め

て、測定結果の解釈が定量的に行えることを明らかにした。特に、高速イオンの生成過程とは異なり、高速イオンの閉じ込めにおける高エネルギー領域のロスコーン損失の寄与の重要性を明らかにした。これによって、高エネルギー・テイルが本質的な少数イオン速波加熱における高速イオンの生成と閉じ込めの定量的な実験予測が、イオン種依存性を含めて可能になった。

以上要するに本論文は、ヘリカル系プラズマのICRF加熱に対して、効率的なアンテナ設計法を示すとともに、加熱に必要な高速イオンの生成・閉じ込めについての定量的な知見及び解析手法を提供するもので、学術上、実際上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11年8月19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。