

|           |                                           |
|-----------|-------------------------------------------|
| 氏 名       | かね こ まさ し<br>金 子 昌 司                      |
| 学位(専攻分野)  | 博 士 (エネルギー科学)                             |
| 学 位 記 番 号 | エ ネ 博 第 132 号                             |
| 学位授与の日付   | 平成 18 年 3 月 23 日                          |
| 学位授与の要件   | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当                   |
| 研究科・専攻    | エ ネ ル ギ ー 科 学 研 究 科 エ ネ ル ギ ー 基 礎 科 学 専 攻 |
| 学位論文題目    | ヘリオトロン J における高速イオンの挙動に関する研究               |

論文調査委員 (主 査)  
教授 近 藤 克 己      教授 佐 野 史 道      教授 水 内      亨

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、先進ヘリカル型閉じ込め装置であるヘリオトロン J における高速イオンの閉じ込めの磁場配位依存性について研究し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、磁場閉じ込め核融合において  $\alpha$  粒子の良好な閉じ込めが必要であり、 $\alpha$  粒子の挙動を予測する上で高速イオンの挙動を明らかにすることが重要であることを示し、先進ヘリカル型装置の一つであるヘリカル軸ヘリオトロン配位における高速イオン閉じ込め特性の改善について述べている。特にヘリオトロン J における高速イオンの閉じ込め特性の、磁場構造を表すフーリエ成分の一つであるバンピー成分導入による磁場配位依存性を明らかにすることの重要性を示し本論文の意義を述べている。

第 2 章では、先進ヘリカル型閉じ込め装置としてのヘリオトロン J の磁場配位の柔軟性を示しバンピー成分を始め、種々の磁場成分の違いによるヘリオトロン磁場の特徴を述べている。このヘリカル磁場に閉じ込められた高速イオンの挙動を明らかにする上で必要な異なったピッチ角を持った高速イオンの生成法と生成されたプラズマ諸パラメータの評価法について述べている。

第 3 章では、本研究でヘリオトロン J における高速イオンの挙動を研究するために用いた荷電交換中性粒子エネルギー分析器の測定システムと測定されたエネルギースペクトルおよびピッチ角分布の評価法について述べている。ここでは中性粒子密度分布を与える水素分子の解離、電離過程に基づいた新しい 1 次元スラブモデルによる解析結果を示し測定された荷電交換中性粒子のエネルギースペクトルの評価法を示している。

第 4 章では、ヘリオトロン J における標準磁場配位における高速イオンのエネルギースペクトルおよびピッチ角分布を測定するために、異なったピッチ角分布を持つ高速イオンを中性粒子ビーム、イオンサイクロトロン周波数帯加熱によって生成した結果について述べている。中性粒子ビームで入射したエネルギー  $E_{inj}$  (28~30keV),  $E_{inj}/2$ ,  $E_{inj}/3$  の中性粒子から生成されたピッチ角の小さい高速イオンが減速することによって作り出すエネルギースペクトルとその時間変化を測定した。高速イオンの減衰時間は、観測するエネルギーが入射エネルギーから離れるにしたがって長くなり、電子密度が低くなるほど長くなった。これらの測定結果を Fokker-Planck 方程式で解析し、減速過程がクーロン散乱による減速過程で説明できることを示した。またイオンサイクロトロン周波数帯加熱では 4~10keV の高速イオンのテール成分の生成が確かめられた。そのエネルギースペクトルと無衝突軌道計算結果から、共鳴層において生成される高速イオンのピッチ角が 100~110° に分布するものと結論づけた。これによりヘリオトロン J 装置で中性粒子ビームから生成されるものとは異なるピッチ角分布を持つ高速イオンの生成を確認し、閉じ込め挙動を解析することが可能であることを示した。

第 5 章では、異なったピッチ角分布をもつ高速イオンの閉じ込め特性のバンピー成分に対する依存性を調べるためバンピー成分のみを 0.01~0.15 の範囲で変化させた磁場配位でエネルギースペクトルとその時間変化およびピッチ角分布を測定した。中性粒子ビーム入射で生成された高速イオンのエネルギースペクトルの時間変化と、Fokker-Planck 方程式の数値解

析により高速イオンの実効的な損失時間の評価を行い、その結果バンピー成分の大きい高バンピー配位において損失時間が約30%長くなることを明らかにした。それに伴いバルクのイオン温度も約10%高くなった。またイオンサイクロトロン周波数帯加熱によって生成したピッチ角の大きい高速イオンについてバンピー成分の大きさに対する効果を調べた。ここでもテールイオン温度、バルクイオン温度の上昇量が高バンピー配位の方が有効であった。また生成された高速イオンからバルクイオンへのエネルギー輸送を解析したところ標準配位に比べ高バンピー磁場配位において約50%高い伝達効率を示すことが明らかになった。この結果バルクイオン温度の上昇率も約50%増加したことを確かめた。このように中性粒子ビーム入射、イオンサイクロトロン周波数帯加熱により生成された初期ピッチ角の大きく異なる高速イオンの閉じ込めがバンピー成分を大きくすることによって改善されることを検証した。これらの結果は、バンピー成分を大きくすると粒子損失が飽和するまでの時間が長くなるという理論解析と良い一致を示している。

第6章では、電子サイクロトロン加熱を行ったプラズマにおいて電子密度が $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上では、イオンのエネルギースペクトルは単一のイオン温度をもつマクスウェル分布であるが、電子密度の減少に伴いバルクイオン温度の数倍のエネルギーをもつ高速イオンのテール成分が生成されることを見出した。電子密度が $0.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ では生成されたテール成分の割合が約5%になることを示した。高温テール成分生成の電子密度、電子サイクロトロン加熱パワー、磁場勾配の依存性から高速電子によるイオン加熱の可能性について考察している。

第7章では、以上の総括と今後の展望について述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、先進ヘリカル型磁場閉じ込め装置であるヘリオトロンJにおける高速イオンの磁場配位依存性について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. ヘリカル軸ヘリオトロン磁場における磁場構造を表すフーリエ成分の一つであるバンピー成分による高速イオン閉じ込め改善を実験的に検証するため、異なったピッチ角分布をもつ高速イオンの生成とエネルギースペクトルおよびピッチ角分布測定システムの構築を行った。
2. 中性粒子ビーム入射によってエネルギー  $E_{inj}$  (28~30keV),  $E_{inj}/2$ ,  $E_{inj}/3$  の高速中性粒子から高速イオンを生成し、定常状態のエネルギースペクトルおよびピッチ角分布と中性粒子ビーム入射停止以後の時間変化から得られる減衰時間をFokker-Planck方程式による解析結果と比較することにより実効的な高速イオン損失時間を評価した。その結果損失時間は高バンピー磁場配位において約30%長くなり高速イオンの閉じ込め改善が確かめられた。
3. イオンサイクロトロン周波数帯加熱によって生成される4~10keVの高速イオンのエネルギースペクトルと高速イオンの軌道計算結果から共鳴層で生成される高速イオンのピッチ角が $100 \sim 110^\circ$ に分布することを明らかにした。また高エネルギーイオンからバルクイオンへのエネルギー伝達効率を評価したところ低バンピー配位に比べ高バンピー磁場配位において約50%の増加が見られバルクイオン温度の上昇が確認された。これらの結果は、バンピー成分を大きくすると粒子損失が飽和するまでの時間が長くなるという理論解析と良い一致を示している。
4. 電子サイクロトロン加熱を行ったプラズマにおいて電子密度が $1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上では、イオンのエネルギースペクトルは単一のイオン温度をもつマクスウェル分布になるが、電子密度の減少に伴いバルクイオン温度の数倍のエネルギーをもつ高速イオンのテール成分が生成されることを見出した。電子密度 $0.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ でテール成分の割合が5%に達することを確認した。テール成分生成の電子密度、電子サイクロトロン加熱パワー、磁場勾配の依存性から高速電子によるイオン加熱の可能性が大きいことを示した。

以上、本論文は先進ヘリカル型閉じ込め装置において閉じ込め磁場成分のバンピー成分が高速イオンの閉じ込め特性に大きく影響することを明らかにし、バンピー成分を大きくすることが有効であることを示した。得られた成果は今後のヘリカル型閉じ込め装置における閉じ込め改善の研究に極めて有用な知見を与えたもので学術上、實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18年2月20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。