

学 位 論 文 題 名

大型ヘリカル装置における
高エネルギー粒子の閉じ込めと挙動に関する研究

学位論文内容の要旨

磁場閉じ込めによる核融合炉を実現するためには、電磁流体的に平衡が存在し、安定であること、個々の荷電粒子を長時間保持できることが必要とされる。特に、プラズマ加熱や核融合反応で生成された高エネルギーの荷電粒子が長時間保持できるか、その荷電粒子が装置内でどのような挙動を示すかを検証することは、磁場閉じ込め核融合装置の性能を評価する上で、極めて重要である。そこで、本研究では、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD: Large Helical Device)を対象とし、高エネルギー粒子の軌道を LHD の真空容器壁を粒子損失境界として追跡し、その挙動や閉じ込め性能を調べることを第一の目的とした。LHD におけるこれまでの実験では、標準磁場配位と呼ばれる磁気軸位置 $R_{ax} = 3.75$ m の電磁流体的に安定な磁場配位に比べて、内寄せ磁場配位と呼ばれる磁気軸位置 $R_{ax} = 3.6$ m の電磁流体的に不安定な磁場配位の方が、閉じ込めが向上するという結果が得られている。本研究では粒子軌道解析の手法を用いて、内寄せ磁場配位におけるこのような高閉じ込めの原因を探ることを第二の目的とした。

磁場閉じ込め装置における高いプラズマ閉じ込めを実現するためには、周辺磁場領域におけるプラズマの果たす役割が重要となる。しかし、LHD をはじめとするヘリオトロン型装置の周辺磁場領域における詳細な粒子軌道解析は、未だ、なされていない。そこで、本研究では、カオス磁力線領域と呼ばれる LHD の周辺磁場領域を磁力線追跡によって同定し、同領域における粒子の軌道を解析した。その結果、カオス磁力線領域に保持される粒子は、20km にも達する長い連結長の磁力線に沿って運動する通過粒子と、カオス磁力線領域内に存在する磁気ミラーに捕捉される反射粒子の 2 つのグループからなることがわかった。このようなカオス磁力線領域に保持される粒子は、ダイバータプレートへの熱負荷を軽減し、プラズマ外の中性粒子によるコアプラズマの冷却を防ぐ役割を果たす可能性があることを示した。標準磁場配位と内寄せ磁場配位における、周辺磁場領域での粒子閉じ込め特性は、両者の磁場配位において大きな違いはないことがわかった。しかし、標準磁場配位では、ダイバータ磁力線に沿うことなく損失する、深く捕捉された非カオス軌道粒子や最外殻磁気面内外を出入りするカオス軌道粒子が存在するが、内寄せ磁場配位ではこのような粒子は存在しないというように、両者の磁場配位には、粒子軌道と磁気面との関係について違いがあることが明らかになった。また、磁場構造の解析によって、標準

磁場配位における例外的軌道を示す粒子は、磁場強度が一定の面と磁力線上の磁場強度変化が極小となる面との交線である粒子損失溝がカオス磁力線領域に存在することや最外殻磁気面上の磁場強度がトーラスの内外で異なることに起因することを明らかにした。さらに、このような例外的な挙動を示す粒子、特に最外殻磁気面内外を出入りする粒子が存在しないことによって、内寄せ磁場配位ではエネルギー閉じ込めの改善がなされている可能性があることを示した。

これまで行われた LHD におけるイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF: Ion Cyclotron Range of Frequency)加熱実験では、従来の理論的予想を上回る成果があげられている。このような高い加熱性能を矛盾なく説明するためには、ICRF 加熱粒子の有限ラーモア半径効果や非線形効果を考慮した解析が必要となる。本研究ではドリフト方程式ではなく、単一荷電粒子の運動方程式を数値的に解くことによってこのような効果を考慮し、ICRF 加熱時の粒子の軌道を解析した。ICRF 電場印加時の粒子軌道解析によって、最外殻磁気面内部の多くの領域を出発した粒子の最大到達エネルギーは 300 keV を超えること、このような粒子は、全てが 10^{-4} sec 以上真空中容器内に保持されることを示した。LHD における ICRF 加熱粒子は、全てがダイバータ磁力線に沿って損失するため、プラズマに近接している ICRF アンテナや真空中容器壁への ICRF 加熱粒子の衝突は問題とならないが、300 keV 程度のエネルギーでダイバータプレートへと損失するため、プレートへの熱負荷の増加が問題となる可能性があることを示した。周辺磁場領域を出発した ICRF 加熱粒子は電子温度による影響をほとんど受けないが、コアプラズマ領域を出発したものは電子温度が上昇することによって、その最大到達エネルギーが上昇することを示した。また、電子の温度を 30 keV 以上にすれば、電子による減速は ICRF 加熱粒子に対して大きな影響を与えないことがわかった。LHD における ICRF 加熱では、磁場に垂直方向の粒子速度、ICRF 波の位相速度、ICRF 共鳴層での粒子の滞在時間によって 2 つのタイプの加熱過程が存在する。この 2 つのタイプの加熱過程によって、粒子は高エネルギーカオス軌道粒子となり、ダイバータへと損失することがわかった。また、現在の LHD では ICRF 加熱粒子の最大到達エネルギーに上限があること、ICRF 電場による高エネルギーカオス軌道粒子への遷移が生じたときのエネルギーが、その上限エネルギーとなることが示された。高エネルギーカオス軌道粒子に対する閉じ込め性能は、内寄せ磁場配位の方が優れており、その軌道は、内寄せ磁場配位の方がコアプラズマ領域全体により広範囲に広がることがわかった。このような高エネルギーカオス軌道粒子の挙動や閉じ込め性能の相違が、内寄せ磁場配位における ICRF によるプラズマ加熱効率向上の一因であることを示した。

本研究では、様々な条件のもとに行った LHD における高エネルギー粒子の軌道解析に基づき、LHD の粒子閉じ込め性能を定性的かつ定量的に明らかにした。その結果、カオス軌道粒子の挙動と閉じ込めが LHD のプラズマ全体の性能を決定する可能性のあること、さらに、このようなカオス軌道粒子の挙動や閉じ込めが、実験で達成されている内寄せ磁場配位における閉じ込め改善の原因となりうることを示した。これらの知見は、LHD をはじめとするヘリオトロン型核融合装置の開発に対して重要な意義を持つ。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 板 垣 正 文
副 査 教 授 榎 戸 武 揚
副 査 教 授 日 野 友 明
副 査 教 授 渡 辺 二 太 (核融合科学研究所)
副 査 助 教 授 及 川 俊 一

学 位 論 文 題 名

大型ヘリカル装置における

高エネルギー粒子の閉じ込めと挙動に関する研究

磁場閉じ込めによる核融合炉を実現するためには、電磁流体的に平衡が存在し、安定であること、プラズマを長時間保持できることが必要である。特に、プラズマ加熱や核融合反応で生成された高エネルギーの荷電粒子が長時間保持できるか、その荷電粒子が装置内でどのような挙動を示すかを検証することは、極めて重要である。著者は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD: Large Helical Device)において、高エネルギー粒子の軌道を真空容器壁の実形状を粒子損失境界として追跡する計算プログラムを作成し、粒子を通過粒子と反射粒子、反射粒子をさらに非カオス軌道粒子、カオス軌道粒子とに分類して、その挙動や閉じ込め性能を調べた。LHD のこれまでの放電実験では、標準磁場配位と呼ばれる磁気軸位置 $R_{ax} = 3.75 \text{ m}$ の磁場配位に比べて、磁気軸位置 $R_{ax} = 3.6 \text{ m}$ の内寄せ磁場配位と呼ばれる磁場配位の方が、閉じ込めが改善されるという結果が得られている。また、LHD におけるイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF: Ion Cyclotron Range of Frequency)加熱実験では、内寄せ磁場配位の方が、プラズマ加熱効率が向上するという結果が得られている。本研究では、2つの磁場配位に対して粒子軌道解析を行い、粒子軌道がどのように異なるのかを示し、その相違から内寄せ磁場配位における閉じ込め改善、加熱効率向上の原因を検討した。

LHD では、プラズマの最外殻磁気面外にカオス磁力線領域と呼ぶ周辺磁場領域が存在し、高閉じ込め実現のために重要な役割を果たしている。このような周辺磁場領域における粒子軌道解析は、真空容器の実形状を粒子損失境界とすることにより可能となるものであり、本研究において、詳細な解析を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) カオス磁力線領域に保持される粒子は、極めて長い連結長を持つ磁力線に沿って運動する通過粒子と、カオス磁力線領域内に存在する磁気ミラーに捕捉される反射粒子の2つのグループからなり、このカオス磁力線領域はミラー型装置と同等のプラズマ閉じ込め能力を有することを明らかにした。
- (2) 周辺磁場領域での粒子閉じ込め特性は、標準磁場配位と内寄せ磁場配位とでは大きな違い

はないことを示した。

- (3) 標準磁場配位では、ダイバータ磁力線に沿うことなく損失する深く捕捉された非カオス軌道粒子および最外殻磁気面内外を出入りするカオス軌道粒子のような特異な軌道を描く粒子が存在するが、内寄せ磁場配位ではこのような粒子は存在しないことを明らかにした。
- (4) 上記の特異な粒子は、粒子損失領域がカオス磁力線領域に存在すること、および最外殻磁気面上の磁場強度がトーラスの内外で異なることに起因することを明らかにした。特に、内寄せ磁場配位でのエネルギー閉じ込めの改善は、最外殻磁気面内外を出入りする粒子が存在しないためであることを明らかにした。

ICRF 加熱粒子の有限ラーモア半径効果や非線形効果を考慮した解析において、単一荷電粒子の運動方程式を数値的に解いて、ICRF 加熱時の粒子の軌道を解析した。得られた結果を以下に示す。

- (1) LHD では ICRF 加熱により、極めて高いエネルギーを持つ粒子がコアプラズマ領域で生成され、かつ、それを長時間保持することが可能であることを示した。
- (2) ICRF 加熱により、粒子は磁場に垂直、平行の両方向に加速され、その結果、カオス軌道粒子となりダイバータへと損失することを示した。
- (3) 現在の LHD では ICRF 加熱粒子の最大到達エネルギーに上限が存在し、エネルギーが MeV オーダーのカオス軌道粒子の閉じ込め性能が、その上限を決定していることを示した。
- (4) 高エネルギーのカオス軌道粒子に対する閉じ込め性能は、内寄せ磁場配位の方が優れており、その軌道は、内寄せ磁場配位の方がコアプラズマ領域全体に、一様に広がることを明らかにした。このような高エネルギーカオス軌道粒子の挙動や閉じ込め性能の相違が、内寄せ磁場配位における ICRF によるプラズマ加熱効率向上の一因であることを示した。

これを要するに、著者は、高エネルギー粒子の軌道解析に基づき、大型ヘリカル装置における、いわゆるカオス軌道粒子の挙動と閉じ込めがプラズマ閉じ込め性能を決定し、さらに、実験で達成されている内寄せ磁場配位における閉じ込め改善や ICRF 加熱の高い加熱性能の一因であることを明らかにした。これは、LHD をはじめとするヘリカル型核融合装置のプラズマ性能の向上のために新たな知見を与えたものであり、核融合プラズマ工学の発展に寄与するところ大である。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。