

学位論文題名

大型ヘリカル装置の高ベータプラズマにおける
高エネルギー粒子の軌道と速度分布関数に関する研究

学位論文内容の要旨

効率的な磁場閉じ込め核融合炉を実現するためには、高いベータ値(プラズマ圧力と磁気圧との比)を持つプラズマを安定に閉じ込める必要がある。近年、大型ヘリカル装置(LHD: Large Helical Device)では、中性粒子ビーム(NB: Neutral Beam)入射加熱を用いた実験において、体積平均で5%を超える高ベータプラズマが達成されている。より高ベータのプラズマを達成し、維持するために、NBにより生成される高エネルギー粒子の閉じ込めや、振る舞いを調べることは重要である。

LHDにおける高ベータプラズマ中の高エネルギー粒子軌道解析の大多数は、最も外側に存在する閉じた磁気面(最外殻磁気面)を粒子の損失境界としている。そのため、最外殻磁気面外側の周辺磁場領域に出ても、再び最外殻磁気面内側に戻ってくる粒子(Re-entering 粒子)は損失粒子として扱われてきた。しかし、真空磁場における最外殻磁気面を損失境界としない解析において、LHDではRe-entering 粒子が数多く存在しており、Re-entering 粒子の加熱効率や粒子の閉じ込めへの寄与が指摘されている。また、LHDの高ベータプラズマでは、周辺部の磁気面に乱れが生じるため、真空磁場に比べて最外殻磁気面が小さくなり、周辺磁場領域が厚くなる。このような場合、より多くの粒子が最外殻磁気面に到達し、Re-entering 粒子になると考えられる。そのため、Re-entering 粒子は、高ベータプラズマにおける粒子の閉じ込めや加熱効率に対してより重要な役割を果たすと考えられる。そこで本研究では、粒子の損失境界を真空容器壁として、高ベータプラズマ中の高エネルギー粒子の軌道を解析し、Re-entering 粒子の振る舞いや粒子の閉じ込めへの寄与を調べることを目的とした。また、NBなどにより生成された高エネルギー粒子は、プラズマの粒子と衝突し、緩和していくことで様々な速度成分を持っている。高エネルギー粒子がどのような速度分布関数になるかを調べることは、プラズマ加熱のみならずプラズマの平衡、安定性においても重要な課題である。本研究では、真空容器壁を粒子の損失境界とした軌道追跡コードを基にしたモンテカルロコードを開発し、高ベータプラズマにおける高エネルギー粒子の速度分布関数を明らかにすることも目的とした。

まず本研究では、真空磁場、高ベータプラズマにおいて、それぞれ強磁場、低磁場とした場合の粒子の軌道を追跡し、その軌道を通過粒子、バナナ粒子、カオス軌道粒子の3種類に分類して解析した。特に、Re-entering 粒子の閉じ込めへの寄与を定量的に調べた。その結果、磁場強度が同じ場合、真空磁場と高ベータプラズマとでは、粒子の初期条件による粒子の分類はほとんど変わらないことを明らかにした。真空磁場では、主に最外殻磁気面近傍を出発した粒子がRe-entering 粒子になるのに対して、高ベータプラズマでは、プラズマ中心部を出発した粒子もRe-entering 粒子になることがわかった。また、高ベータプラズマでは、Re-entering 粒子の数が真空磁場に比べて

多くなり、その大多数が長時間真空容器内に閉じ込められていることを示した。荷電交換反応の Re-entering 粒子への影響が、周辺部の中性粒子密度に依存していることを確認し、特に、中性粒子密度が 10^{17} m^{-3} 以下の場合において、Re-entering 粒子のプラズマへの寄与が重要となることがわかった。また真空磁場では、荷電交換反応が、粒子の閉じ込めにほとんど影響しないことがわかった。これに対して高ベータプラズマでは、荷電交換反応が、プラズマ中心部を出発した粒子にも影響し、粒子の閉じ込めへの影響が大きいことがわかった。

本研究では、高エネルギー粒子の速度分布関数を求めるために、真空容器壁を粒子の損失境界とした軌道追跡コードを基にしたモンテカルロコードを開発した。開発したコードでは、プラズマとのクーロン衝突に加え、中性粒子密度の高い周辺磁場領域を通る Re-entering 粒子と、中性粒子との荷電交換反応による損失が考慮されている。そのため、より正確な Re-entering 粒子の閉じ込めへの寄与を評価することができる。開発したコードを用いて、LHD に設置されている磁力線と順方向、ならびに、逆方向へ接線入射された NB と磁力線に対して垂直に入射された NB について、高エネルギー粒子の速度分布関数を解析した。その結果、接線入射 NB に対する解析では、Re-entering 粒子による速度分布関数への寄与は、最外殻磁気面近傍のみにあることがわかった。また、高ベータプラズマ中の垂直入射 NB に対する解析では、場所によらず Re-entering 粒子の速度分布関数への寄与が、無視できないことがわかった。これらの Re-entering 粒子の速度分布関数への寄与により、Re-entering 粒子がプラズマの加熱効率に大きく影響する可能性があることを示した。また、周辺部の中性粒子密度を実際の LHD での値程度とした場合、高ベータプラズマ中の逆方向接線入射 NB に対する解析では、荷電交換損失の Re-entering 粒子への影響が大きく、Re-entering 粒子の速度分布関数への寄与は極めて小さくなることがわかった。これとは対照的に、順方向接線入射 NB に対する解析では、荷電交換損失による影響が小さく、Re-entering 粒子の速度分布関数への寄与が十分にあることを明らかにした。一方、垂直入射 NB の速度分布関数には荷電交換損失による影響が大きく、また、荷電交換損失の速度分布関数への影響は、周辺部に比べてプラズマ中心部付近において小さくなることがわかった。加えて、粒子のエネルギーとプラズマの温度と密度から決まる緩和時間が長くなると、荷電交換損失の Re-entering 粒子への影響は大きくなることを示した。

本研究では、真空容器壁を粒子の損失境界として、LHD の高ベータプラズマ中の高エネルギー粒子に関する 2 種類の解析を行った。1 つは粒子軌道解析である。これに加えて、軌道追跡コードを基にしたモンテカルロコードを開発し、NB により生成される高エネルギー粒子の速度分布関数を解析した。その結果、高ベータプラズマにおいても、Re-entering 粒子が長時間真空容器内に閉じ込められていること、加えて、この Re-entering 粒子が LHD におけるプラズマの加熱に、大きく寄与する可能性があることを示した。これらの知見は今後の LHD の高ベータプラズマ実験のみならず、LHD をはじめとしたヘリオトロン型核融合装置の研究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 日 野 友 明

副 査 教 授 住 吉 孝

副 査 准教授 及 川 俊 一

副 査 准教授 渡 邊 清 政 (核融合科学研究所)

学 位 論 文 題 名

大型ヘリカル装置の高ベータプラズマにおける 高エネルギー粒子の軌道と速度分布関数に関する研究

効率的な磁場閉じ込め核融合炉を実現するためには、高いベータ値 (プラズマ圧力と磁気圧との比) を持つプラズマを安定に閉じ込める必要がある。近年、大型ヘリカル装置 (LHD: Large Helical Device) では、中性粒子ビーム (NB: Neutral Beam) 入射加熱を用いた実験において、体積平均で 5% を超える高ベータプラズマが達成されている。より高ベータのプラズマを達成し、維持するために、NB により生成される高エネルギー粒子の閉じ込めや振る舞いを調べることは重要である。

LHD における高ベータプラズマ中の高エネルギー粒子軌道解析の大多数は、最も外側に存在する閉じた磁気面 (最外殻磁気面) を粒子の損失境界としている。そのため、最外殻磁気面外側の周辺磁場領域に出ても、再び最外殻磁気面内側に戻ってくる粒子 (Re-entering 粒子) は損失粒子として扱われてきた。しかし、真空磁場における最外殻磁気面を損失境界としない解析において、LHD では Re-entering 粒子が数多く存在しており、Re-entering 粒子の加熱効率や粒子の閉じ込めへの寄与が指摘されている。また、LHD の高ベータプラズマでは、周辺部の磁気面に乱れが生じるため、真空磁場に比べて最外殻磁気面が小さくなり、周辺磁場領域が厚くなる。このような場合、より多くの粒子が最外殻磁気面に到達し、Re-entering 粒子になると考えられる。そのため、Re-entering 粒子は、高ベータプラズマにおける粒子の閉じ込めや加熱効率に対してより重要な役割を果たすと考えられる。そこで著者は、粒子の損失境界を真空容器壁として、高ベータプラズマ中の高エネルギー粒子の軌道を世界に先駆けて解析し、Re-entering 粒子の振る舞いや粒子の閉じ込めへの寄与を調べている。また、NB などにより生成された高エネルギー粒子は、プラズマの粒子と衝突し、緩和していくことで様々な速度成分を持つ。高エネルギー粒子がどのような速度分布関数になるかを調べることは、プラズマ加熱のみならずプラズマの平衡、安定性においても重要な課題である。著者は、真空容器壁を粒子の損失境界とした軌道追跡コードを基に、新たにモンテカルロコードを開発し、高ベータプラズマにおける高エネルギー粒子の速度分布関数への Re-entering 粒子の寄与も調べている。

まず本研究では、真空磁場、高ベータプラズマにおいて、それぞれ強磁場、低磁場とした場合の

粒子の軌道を追跡し、その軌道を通過粒子、バナナ粒子、カオス軌道粒子の3種類に分類して解析している。特に、Re-entering 粒子の粒子閉じ込めへの寄与を調べている。その結果、真空磁場では、主に最外殻磁気面近傍を出発した粒子が Re-entering 粒子になるのに対して、高ベータプラズマでは、プラズマ中心部を出発した粒子も Re-entering 粒子になることを示した。また、高ベータプラズマでは、Re-entering 粒子の数が真空磁場に比べて増加することを世界で初めて定量的に示し、その大多数が長時間真空容器内に閉じ込められていることを明らかにした。また真空磁場では、荷電交換反応が粒子の閉じ込めにほとんど影響しないことを示した。これに対して高ベータプラズマでは、荷電交換反応がプラズマ中心部を出発した粒子にも影響し、粒子の閉じ込めへの影響が大きいことを定量的に示した。

また本研究では、高エネルギー粒子の速度分布関数を求めるために、真空容器壁を粒子の損失境界とした軌道追跡コードを基に、新たにモンテカルロコードを開発している。開発したコードでは、背景プラズマとのクーロン衝突に加え、中性粒子密度の高い周辺磁場領域を通る Re-entering 粒子と中性粒子との荷電交換反応による損失が考慮されている。そのため、より正確な Re-entering 粒子の閉じ込めへの寄与を評価することができる。本研究では開発したコードを用いて、LHD に設置されている磁力線と順方向ならびに逆方向へ接線入射された NB と、磁力線に対して垂直に入射された NB について、高エネルギー粒子の速度分布関数を解析している。その結果、LHD で想定される程度の中性粒子密度では、高ベータプラズマ中の逆方向接線入射 NB に対しては、荷電交換損失の Re-entering 粒子への影響が大きく、Re-entering 粒子の速度分布関数への寄与は極めて小さくなることを明らかにした。これとは対照的に、順方向接線入射 NB に対しては荷電交換損失による影響が小さく、Re-entering 粒子の速度分布関数への寄与が十分にあることを示した。一方、垂直入射 NB の速度分布関数には荷電交換損失による影響が大きいことを明らかにした。これに加え、高ベータプラズマ中の速度分布関数から高エネルギー粒子の蓄積エネルギーを評価し、接線入射 NB では蓄積エネルギーの約 8% が、垂直入射の場合はその約 50% が Re-entering 粒子に起因することを世界で初めて明らかにした。

これを要するに、著者は LHD をはじめとしたヘリオトロン型核融合装置において、いわゆる Re-entering 粒子がプラズマの閉じ込め、平衡、ならびに加熱に大きく寄与することを定量的に示したものであり、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。