

京都大学	博士（工学）	氏名	政 岡 義 唯
論文題目	Study of alpha particle confinement and effects of nonlinear collisions in heliotron reactors (ヘリカル型核融合炉における高エネルギーアルファ粒子閉じ込めおよびその非線形衝突の影響)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、核融合エネルギーの利用を目指した磁気閉じ込め装置であるヘリカル型装置におけるアルファ粒子閉じ込めについて、モンテカルロ法を用いた数値シミュレーションにより有限軌道幅の効果および非線形衝突効果を含めて定量的評価を行った研究成果をまとめたものであって、5章から構成されている。 第1章は序論であり、核融合エネルギー利用の意義、磁気プラズマ閉じ込め装置トカマクおよびヘリカル装置の構成、アルファ粒子閉じ込めおよびその加熱について概説し、本研究の目的と構成について述べている。 第2章では、ヘリカル型装置におけるアルファ粒子閉じ込め解析のために開発されているモンテカルロ解析コード GNET について説明し、本研究において使用するアルファ粒子発生項およびクーロン衝突モデルの概要を述べている。特に、アルファ粒子発生項のモデル化においては、準モンテカルロ法を導入し、これまでの単純モンテカルロ法に比べ高精度にモデル化することが可能となった。次に、モンテカルロ法で重要なテスト粒子数に関する統計誤差の検証を行っている。これにより、テスト粒子数 50,000 を用いることにより、エネルギー損失率が十分な精度で得られることを示している。 第3章では、大型ヘリカル装置（LHD）の磁場配位を約 3.5 倍に拡張した磁場配位を仮定し、高エネルギーアルファ粒子閉じ込め解析を行った結果について述べている。LHD 磁場配位では、磁気軸をヘリカルコイルの中心よりも内側にシフトさせた内寄せ配位において、MHD 安定性を重視した標準的な外寄せ配位と比較して高エネルギー粒子の閉じ込め性能が向上することが知られている。LHD 型核融合炉において粒子閉じ込め解析を行い、磁気軸位置を内側にシフトすることにより、エネルギー損失率が 29% から 5 % に大幅に低減されることを定量的に示している。また、損失した高エネルギーアルファ粒子の軌道を詳細に解析することにより、高エネルギーアルファ粒子が特定のピッチ角において多く損失することを明らかにしている。これは、粒子発生時や衝突過程において、アルファ粒子が特定のピッチ角となった場合に軌道状態の遷移が起こりやすくなり、大きく軌道が変化するため、径方向拡散が増加し、損失が増大するからである。次に、得られる核融合出力を固定して、プラズマ密度と温度を変化させた場合の高エネルギーアルファ粒子閉じ込め性能の変化を解析している。結果として、どの磁場配位においても、プラズマ密度の上昇により高エネルギーアルファ粒子の閉じ込め性能が向上することを明らかにしている。特に磁気軸位置が内寄せの磁場配位ではプラズマ密度依存性が強く、プラズマ密度が上昇するとほとんど全ての高エネルギーアルファ粒子が閉じ込められることを示している。これらの結果は、プラズマの高密度化がエネルギー減衰中の高エネルギーアルファ粒子の損失に大きな影響を与えることを定量的に示し、磁気軸位置の内寄せとプラズマの高密度化が効率的なアルファ粒子加熱にとって非常に有用であることを示している。			

京都大学	博士（工学）	氏名	政 岡 義 唯
さらに、FFHR-d1 核融合炉における高エネルギーアルファ粒子の閉じ込め性能の検証を行っている。FFHR-d1 は LHD 実験を基に設計が進められているヘリカル型 DEMO 炉であり、D-T 運転が行われる際の高エネルギーアルファ粒子閉じ込めが重要な課題の一つとなっている。まず、炉工学的な知見を用いて設計された FFHR-d1 の磁場配位について検証を行っている。その結果、エネルギー損失率が 40%を超え、核融合炉としては不十分な閉じ込め性能であることが示されている。このため、これまでに得られた知見に基づいて、磁気軸の内寄せとプラズマの高密度化による改善を提案し、より内寄せ配位の FFHR-d1 を考案している。この新たに設計された FFHR-d1 ではエネルギー損失率が 16%程度まで減少し、閉じ込め性能が大きく改善することを示している。 第 4 章では、高エネルギーイオン間の衝突を含む粒子間衝突効果、すなわち非線形衝突効果が高エネルギー粒子閉じ込めに与える影響について述べている。エネルギー減衰しつつある高エネルギーアルファ粒子を含む速度分布関数は非マクスウェル分布となるため、背景プラズマをマクスウェル分布と仮定している従来の線形衝突モデル（Boozer の衝突モデル）では、高エネルギーイオン間の衝突の影響を記述することはできない。そのため、まず非線形衝突モデルの構築を行っている。Fokker-Plank 形式の衝突演算子の定式化を行い、特異点の問題を解決するために Legendre 展開を用いた表現を導いている。次に、速度拡散テンソルおよび平均力ベクトルを求め、さらに、モンテカルロコードである GNET へ導入するため、Langevin 形式の衝突演算子の定式化を行なっている。構築された非線形衝突モデルは、マクスウェル分布プラズマを仮定した場合、ピッチ角散乱およびエネルギー散乱に関してこれまで用いられてきた Boozer 型線形衝突演算子と同等になることを確かめている。次に、GNET コードを用いて、マクスウェル分布プラズマを仮定して、Boozer 型線形衝突演算子の場合とのベンチマークテストを行い、両者のよい一致を得ている。 最後に、非線形衝突効果を検証するシミュレーションを行い、その結果を示している。非線形衝突演算子の計算には高エネルギー粒子自身の速度分布関数が必要となるため、高エネルギー粒子の速度分布関数と衝突演算子を反復的に解くモデルを新たに提案している。この反復モデルを用いて、まず DEMO 炉での中性粒子入射(NBI)加熱を解析し、非線形衝突効果の検証を行っている。NBI 加熱の出力を 30, 90, 150MW と増加させるにつれて、非線形衝突効果により高速ビームイオンの速度拡散が増大し、その分布関数が速度空間において広がることを確認している。この結果は、高速イオンの有限軌道幅効果を取り入れたモンテカルロ・シミュレーションにおいて非線形衝突効果を初めて示したものであり、今後のヘリカル型核融合炉開発において重要な知見となるものである。 第 5 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合エネルギーの利用を目指した磁気閉じ込め装置であるヘリカル型装置におけるアルファ粒子閉じ込めについて、モンテカルロ法を用いた数値シミュレーションにより有限軌道幅の効果および非線形衝突効果を含めて定量的評価を行った研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. ヘリカル型装置におけるアルファ粒子閉じ込めについて、アルファ粒子発生・テスト粒子軌道追跡・粒子間衝突・軌道損失の全てを考慮した高精度シミュレーションを行うため、準モンテカルロ法などの新しいアルゴリズムや多粒子種プラズマとの粒子間衝突効果を導入し、並列計算機に対応するシミュレーションコードを新たに開発した。
2. ヘリカル型核融合炉の典型的な磁場配位として、大型ヘリカル装置（LHD）磁場配位を拡張した磁場配位を仮定し、高エネルギーアルファ粒子閉じ込め解析を行った結果、磁気軸位置をヘリカルコイルの中心よりもトーラス内側にシフトすることによって、エネルギー損失率が 29% から 5% に大幅に低減されることを定量的に示した。また、プラズマ密度の上昇により、高エネルギーアルファ粒子の閉じ込め性能が向上することを示し、特に、磁気軸位置が内寄せの配位ほどプラズマ密度依存性が強く、磁気軸位置の内寄せとプラズマ密度増加がアルファ粒子閉じ込め改善に非常に有効であることを定量的に示した。
3. 高エネルギー粒子間衝突がアルファ粒子閉じ込めに与える影響を評価するため、Fokker-Planck 形式のクーロン衝突項から出発して、モンテカルロ・シミュレーションに適用できる Langevin 形式の非線形衝突モデルを新たに開発した。このモデルをモンテカルロシミュレーション・コードに導入し、NBI ビームイオンに対する計算を行った結果、非線形衝突効果により高速ビームイオンの速度拡散が増大し、その分布関数が速度空間においてより広がることを初めて示した。

以上のように、本論文は新たに開発した高精度なシミュレーションコードを用いて、ヘリカル型装置におけるアルファ粒子閉じ込めの定量的な解析を行っており、炉心プラズマにおける高エネルギーアルファ粒子閉じ込めの理解に大きく寄与するものである。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 25 年 2 月 28 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。