

京都大学	博士（工学）	氏名	山 口 裕 之
論文題目	Simulation study of energetic particle physics in perturbed helical plasmas (摂動の存在するヘリカルプラズマにおける高エネルギー粒子に関連する物理現象の解明)		
(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時間的・空間的な摂動の存在する場合の高エネルギー粒子閉じ込めおよびそれに関連する物理について、モンテカルロ法を用いた数値シミュレーションにより解析を行った研究成果をまとめたものであって、6章から構成されている。 第1章は序論であり、核融合反応，トロイダル型磁場によるプラズマ閉じ込めおよび大型ヘリカル実験装置(LHD)実験において観測された摂動のあるプラズマについて概説し，本研究の目的と構成について述べている。 第2章では，高エネルギー粒子閉じ込め解析のために開発され，本研究に用いられているモンテカルロ解析コード GNET について，基礎方程式，数値解析手法であるグリーン関数法およびクーロン衝突モデルについて説明している．次に，本研究で行った GNET-TD コードへの拡張について述べている．具体的には，時間発展プラズマへの対応のためのグリーン関数法の拡張と多イオン種クーロン衝突モデルへの拡張である．さらに，中性粒子ビーム入射(NBI)加熱解析において，ビームイオン発生分布を計算する HFREYA コードと統合輸送解析コード TASK3D について説明している。 第3章では，LHD プラズマにおける多イオン種の場合の NBI 加熱シミュレーション結果について述べている．LHD 高イオン温度実験における典型的な磁場配位と定常プラズマを仮定し，水素イオン，ヘリウム(He²⁺) および炭素(C⁶⁺) 不純物イオンを含む多イオン種 LHD プラズマにおける NBI 加熱シミュレーションを行っている．結果として，炭素不純物イオン割合が増加することによって，高速イオンのピッチ角散乱が増加し，速度空間における分布がピッチ角方向に広がることが得られている．これによって拡散的輸送が増加し，高速イオンのエネルギー損失率が増加することが定量的に示された．最終的に，粒子当りの加熱は不純物割合とともに増加し，電荷と質量数の比に依存して，炭素不純物イオン1個あたりの加熱が水素イオン・ヘリウム不純物イオンに対する加熱の3倍程度となることが得られている．本研究により，低密度・高不純物割合のプラズマにおける接線入射のイオン加熱効率が，高密度・低不純物割合プラズマにおける垂直入射のそれと同程度に改善することが示されている。 第4章では，新たに開発した GNET-TD を用いた LHD 非定常プラズマのシミュレーション結果について述べている．LHD における非定常水素プラズマに対して GNET-TD および TASK3D による NBI 加熱・統合熱輸送シミュレーションを行い，実験結果との比較により，解析に用いた加熱・輸送統合モデルの妥当性を検証している．ここでは，ペレット入射等が存在せず，比較的緩やかに時間発展する LHD 放電#114053 で得られたプラズマ密度の時間発展データと NBI 入射時間発展パターンを用いている．まず，GNET-TD による非定常 NBI 加熱シミュレーションを行っている．その結果，電子・イオン加熱それぞれの立ち上がり，垂直入射ビームパワーのモジュレーションによるイオン加熱の周期的変動，および NBI 入射の停止による電子・イオン加熱の減少等の非定常な加熱現象が示されている．それらの結果を用いて TASK3D により統合熱輸送シミュレーションを行い，電子・イオン温度の時間発展の実験結果との良好な一致を得て			

京都大学	博士（工学）	氏名	山 口 裕 之
いる。 第5章では、LHD 高イオン温度実験について NBI 加熱・統合熱輸送シミュレーションを行った結果について述べている。ここでは、実験値からフィッティングした水素、ヘリウム不純物イオン、炭素不純物イオンの密度発展を用いている。これにより、ペレット入射時には高速イオンの急激な減速に加えて、炭素不純物イオンによるピッチ角散乱によりプラズマ周辺部の高速イオン速度分布関数が急激に変化することが示されている。その結果、プラズマ中心部における炭素不純物イオンへの加熱はペレット入射後に急激に増加し、その後緩やかに減少することを示している。従来のシミュレーション手法ではペレット入射直後のプラズマ中心部における加熱吸収が過小評価されており、これはペレット入射以前にプラズマ中心部で発生した高速イオンによる加熱効果が考慮されていないためであることを明らかにしている。さらに、TASK3D を用いた統合熱輸送シミュレーションでは、異なるイオン乱流熱輸送モデル間の比較を行っている。水素プラズマにおいて検証されてきた従来の乱流モデルに加えて、不純物効果を含んだ IFS-PPPL 型乱流モデルと新たに開発したプラズマ実効電荷依存モデルを用いている。電子温度の振る舞いは、イオンの乱流熱輸送モデルによらずペレット入射前後ではほぼ一定となり、gyro-Bohm 型モデルによって実験と同様の振る舞いが再現されることが示されている。従来の乱流輸送モデルでは実験のようなイオン温度の上昇は見られず、IFS-PPPL 型モデルおよび実効電荷依存モデルを用いた場合、ペレット入射後のイオン温度上昇とその後のイオン温度の低下という、実験と同様の振る舞いが得られている。この結果は、高イオン温度実験プラズマにおいては、不純物イオンによってイオンの乱流熱輸送が5倍以上低減していることを示唆している。 第6章では、ヘリカルプラズマにおける磁気島存在下での NBI 加熱シミュレーションについて述べている。共鳴有理面に磁気島を生じさせる摂動磁場の効果を含んだ案内中心運動方程式を GNET-TD に取り入れ、ヘリカルプラズマにおける磁氣的摂動存在下の高エネルギー粒子の振る舞いが、LHD 配位において初めて解析されている。LHD において非接触プラズマの確立に用いられているモード数 $(m, n) = (1, 1)$ の磁気島を仮定した場合、接線入射 NBI による高速イオンは、磁気島内部で発生した場合には磁気島構造周辺に局在し、磁気島の外で発生した場合にはその中へほとんど侵入しないことが示されている。このような発生位置の違いは、入射方向と磁気島の位相によって決定され、高速イオンの即時損失を増加させ得ることが示されている。一方、垂直入射ビームの空間分布および損失率への影響はごくわずかであることも示されている。 第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。			

(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時間的・空間的な摂動の存在する場合の高エネルギー粒子閉じ込めおよびそれに関連する物理について、モンテカルロ法を用いた数値シミュレーションにより解析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. 三次元トロイダル磁場配位における高エネルギー粒子に対する運動論シミュレーションコード GNET を拡張し、非定常プラズマに対する解析が可能な GNET-TD コードの開発を行った。これにより、プラズマ加熱や密度が時間的に発展する軽水素プラズマの中性粒子ビーム入射 (NBI) 加熱解析を行い、さらに統合輸送シミュレーションコード TASK3D との連結により、実験結果で得られたプラズマ温度の時間発展を再現することに成功した。
2. NBI 加熱における不純物イオンの影響を正確に評価するため、HFREYA および GNET-TD コードに不純物イオン効果を正確に取り込み、不純物イオンによるピッチ角散乱の増加など LHD プラズマの NBI 加熱における不純物イオンの影響を初めて定量的に明らかにした。
3. 炭素ペレット入射によるプラズマの急激な時間変化を含む LHD 高イオンモードプラズマに GNET-TD および TASK3D を適用して解析を行い、高イオンモードにおいては一時的に乱流輸送が 1/5 程度に低減していることを初めて示した。また、不純物による乱流輸送低減を含む輸送モデルを考案し、イオン温度の時間発展を再現することに初めて成功した。
4. 共鳴有理面に磁気島を生じさせる摂動磁場の効果を含んだドリフト運動方程式を GNET-TD に取り入れ、LHD における磁氣的摂動存在下の高エネルギー粒子の振る舞いについて解析を行った。非接触プラズマ確立に用いられているモード数 $(m, n) = (1, 1)$ の磁気島を仮定した場合について、接線入射 NBI 加熱による高エネルギービーム粒子の分布は、磁気島の位相により変化することが初めて示された。

以上のように、本論文は新たに開発したシミュレーションコード等を用いて、ヘリカル型装置における高エネルギー粒子閉じ込めと炉心プラズマの輸送特性を解明しており、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（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 2 月 22 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。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める