

氏 名	ほん だ みつる 本 多 充
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2798 号
学位授与の日付	平 成 19 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	工 学 研 究 科 原 子 核 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Transport Simulation of Tokamak Plasmas Including Plasma Rotation and Radial Electric Field (プラズマ回転と径方向電界を取り入れたトカマクプラズマの輸送シミュレーション)
論文調査委員	(主 査) 教 授 福 山 淳 教 授 山 本 克 治 助 教 授 村 上 定 義

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、トカマクプラズマにおける輸送モデルの検証ならびに輸送障壁形成のモデリングを行うとともに、プラズマ回転および径方向電界を取り入れた輸送シミュレーションコードを新たに開発し、中性粒子ビーム入射時の密度分布変化を解析した研究成果をまとめたものであり、6章から構成されている。

第1章は序論であり、核融合エネルギーの実用化を目指した磁気閉じ込め核融合研究における閉じ込め・輸送研究の位置付けならびに閉じ込め改善運転モードの重要性について述べている。

第2章では、まず拡散型輸送シミュレーションコード TASK/TR によって記述される物理現象、プラズマ密度と温度の時間発展を記述する基礎方程式、そして粒子間のクーロン衝突に起因する新古典輸送モデルを説明している。そして新古典輸送において重要な役割を果たす捕捉粒子割合について、従来用いられている近似表式を正確な数値積分と比較した結果、輸送シミュレーションにおいては計算が容易で比較的精度が高い Kim のモデルが適切であることを示した。さらに自発電流密度と電気抵抗率に対する新古典輸送モデルについても定量的な比較検討を行い、計算時間は比較的長いが汎用的な NCLASS コードを用いるのが妥当であることを示した。

第3章では、TASK/TR による輸送シミュレーション結果を実際のトカマク実験データである ITPA 分布データベースと比較することにより、主要な乱流輸送モデルである CDBM, GLF23, Weiland の3つを評価している。54件の実験データに対して、蓄積エネルギーおよび温度分布の実験値からのずれを評価した結果、CDBM モデルと GLF23 モデルは基礎となる物理機構が異なるにもかかわらず、全体的に類似の振る舞いを示すことを明らかにした。CDBM モデルは L モードで、GLF23 モデルは H モードで、実験データにより近い結果を予測する。一方、Weiland モデルは蓄積エネルギーや温度を過大に予測する傾向にある。さらに、シミュレーション結果の装置依存性を考察した結果、CDBM モデルにプラズマ断面形状の楕円度を取り入れた CDBM05 モデルを新たに提案し、既存の3つのモデルのいずれよりも、実験データをよりよく再現することを確かめている。

第4章では、閉じ込め性能向上に重要な役割を果たしている輸送障壁を記述するため、CDBM 乱流輸送モデルの改善を図るとともに、ITER プラズマの予測シミュレーションを行っている。まず、輸送障壁において乱流輸送を抑制する機構の一つと考えられている E×B 回転速度シアの効果を摂動論的に CDBM 乱流輸送モデルに取り入れて輸送シミュレーションを行い、JET トカマクにおける内部輸送障壁形成の実験結果をかなりよく再現している。次に、固有値方程式の数値解析結果に基づいて、CDBM 乱流輸送モデルに E×B 回転速度シアの効果をより正確に取り入れた表式を新たに導き、これを用いて周辺部輸送障壁形成のシミュレーションを行っている。一方、CDBM および CDBM05 モデルを用いて、ITER における運転シナリオの予測シミュレーションを行い、大電流運転と準定常運転のいずれにおいても、CDBM05 モデルは ITER に期待されている核融合出力に近い値を予測することを示している。

第5章では、プラズマ回転と径方向電界を含めてトカマクプラズマの時間発展を記述する流体型輸送シミュレーションコ

ード TASK/TX とそれによるシミュレーション結果を記述している。輸送障壁形成時のようなプラズマの速い応答を記述するために、従来の拡散型輸送シミュレーションのように運動方程式の定常解から密度や温度の勾配に比例する流束を求めるのではなく、運動方程式を直接解く定式化を新たに導入している。磁気面内の輸送現象は十分速いとして、磁気面平均された二流体方程式、マクスウェル方程式、中性粒子拡散方程式等からなる方程式系を考え、磁力線方向の損失を取り入れることによってセパトロクス外側の SOL プラズマを含めた 1 次元輸送シミュレーションを行う TASK/TX コードを開発している。周辺部輸送障壁が形成されるセパトロクス近傍の空間分解能をあげるために有限要素法を用い、時間発展は完全陰解法によって高い数値安定性を得ている。新古典輸送現象については、ポロイダル方向の運動方程式にトロイダル磁場の空間不均一に起因するポロイダル粘性を導入することにより、空間拡散、電気抵抗、自発電流、Ware ピンチを自己無撞着に記述している。乱流輸送現象については、電子とイオンの運動量交換の形で分極を生じない粒子輸送を導入し、運動量輸送と熱輸送は拡散現象として記述している。SOL プラズマでは、磁力線方向の粒子輸送とイオンの熱輸送を音速での対流損失として、電子の熱輸送をはるかに速い熱伝導現象として、それぞれ記述している。まず、新古典輸送現象が正しく記述されていることをシミュレーション結果と従来の解析との比較により確認し、次に乱流輸送モデルが粒子拡散現象を記述することを確かめている。そして、密度や温度の空間分布の粒子拡散係数やプラズマ電流等に対する依存性を調べ、プラズマ電流の増大に伴って Ware ピンチが増加し、密度分布がややピークすることが確かめている。最後に、中性粒子ビーム入射時のプラズマ回転、径方向電界、密度分布等の時間発展を解析し、プラズマ電流と逆方向の入射の場合には密度分布が中心にピークする傾向を示し、径方向電界の空間分布等とともに JFT-2M トカマクにおける実験結果をかなりよく再現できることを明らかにしている。

第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約するとともに、今後の課題を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、トカマク型磁気閉じ込め核融合装置におけるプラズマ閉じ込め特性と閉じ込め改善現象を解明するために、輸送モデルの検証ならびに輸送障壁形成のモデリングを行うとともに、プラズマ回転および径方向電界を取り入れた輸送シミュレーションコードを新たに開発し、中性粒子ビーム入射時の密度分布変化を解析し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. トカマクプラズマにおける磁力線方向の輸送を支配する新古典輸送について、捕捉粒子比率の精密な評価を行うとともに、従来の新古典輸送モデルの比較検討を行った。
2. トカマクプラズマの閉じ込め性能を支配する乱流輸送について、理論的に導出され広く用いられている 3 種類の乱流輸送モデルの定量的評価を行った。拡散型輸送方程式を解く TASK/TR コードを発展させ、実験分布データベースを利用して実験結果と輸送シミュレーション結果を統計的に比較し、乱流輸送モデルの装置依存性および運転モード依存性を明らかにした。
3. 実験分布データとの比較をもとに、電流拡散性バレーニングモード (CDBM) 乱流輸送モデルにプラズマの断面形状効果を取り入れた新しい輸送モデルを提案し、実験分布データを最もよく再現できることを示した。
4. CDBM 乱流輸送モデルの径方向電界シフト依存性を詳細に解析し、内部輸送障壁形成の輸送シミュレーションを行って、実験結果をかなりよく再現できることを示した。
5. 輸送障壁形成等の遷移現象を含めた輸送シミュレーションを行うため、プラズマ回転および径方向電界を取り入れた流体型輸送方程式系を新たに提案し、有限要素法を用いた輸送シミュレーションコード TASK/TX を開発した。このコードを用いて、中性粒子ビーム入射時に観測されている密度分布変化を再現できることを初めて示した。

以上のように、本論文はトカマクプラズマにおける乱流輸送モデルを実験分布データとの比較によって詳細に検証するとともに、動的輸送現象を自己無撞着に記述する新しい輸送シミュレーション手法を提案・実証しており、学術上、実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19年1月26日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。