

## 自己評価報告書

平成 23 年 5 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20226017

研究課題名（和文） トロイダルプラズマの運動論的統合シミュレーションコードの開発

研究課題名（英文） Development of Kinetic Integrated Simulation Code for Toroidal Plasmas

研究代表者

福山 淳 (FUKUYAMA ATSUSHI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60116499

研究分野：核融合理論

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合，トロイダルプラズマ，粒子運動論，統合シミュレーション

## 1. 研究計画の概要

核融合炉において実現される核燃焼プラズマの挙動を正確に予測し、信頼できる制御手法を開発するため、運動論的効果を取り入れた炉心プラズマ統合シミュレーションコードを開発し、速度分布関数の時間発展に基づいた輸送シミュレーションおよび非軸対称効果を含めたトロイダルプラズマ統合解析を実現する。

## 2. 研究の進捗状況

(1) トロイダル炉心プラズマ統合モデリングコード TASK および関連コード GNET 等の開発が進展している。中核となる運動論的輸送解析モジュール (TASK/FP) では、速度分布関数の時間発展をフォッカープランク方程式によって記述する。従来の速度分布解析では 1 成分あるいは電子とイオンの 2 成分での解析であったが、DT 核燃焼プラズマを記述するために、任意の数の粒子種について解析できるように拡張した。クーロン衝突項において、粒子数や運動量だけでなくエネルギーも保存するように非線形衝突項を拡張し、相対論的効果も取り入れた。さらに空間輸送項を導入して高速イオンの径方向輸送が加熱分布に与える影響を解析し、径方向拡散係数のエネルギー依存性が加熱分布に大きな影響を与えることを初めて定量的に示した。そして ITER プラズマにおける電子、重水素イオン、三重水素イオン、 $\alpha$  粒子の 4 粒子種に対して、電子サイクロトロン波、中性粒子ビーム、イオンサイクロトロン波、核融合反応等による複合加熱の速度分布解析を世界に先駆けて行った。また、分布関数の変形を考慮に入れて核融合反応率を計算し、より正確に評価できるようになった。

(2) ヘリカル系プラズマにおいては磁場のヘリカルリップルとトロイダルリップルによって、高速イオンの軌道が複雑になるため、粒子軌道を追跡して速度分布を求めることが必要となる。5 次元ドリフト運動論方程式を解く GNET コードを 3 次元波動伝播解析コード TASK/WM と組み合わせることにより、LHD プラズマにおけるイオンサイクロトロン波加熱の加熱効率を評価し、磁場配位およびサイクロトロン共鳴位置を変化させてその最適化を行った。

(3) ヘリカル系磁場配位における新古典輸送係数を正確に計算し、その結果をニューラルネットワークによりデータベース化した DGN/LHD モジュールと、径方向電流から径電場を計算する ER モジュールを拡散型流体輸送モジュール TASK/TR と組み合わせ、LHD プラズマの輸送シミュレーションを行った。複数の異常輸送モデルについて実験における温度分布の再現性を比較するとともに、径電場評価モデルの比較も行った。系統的な輸送モデルの比較によって、より優れた乱流輸送モデルを提案する手掛かりが得られた。

(4) 運動方程式を含めて磁気面平均された二流体方程式およびマクスウェル方程式を解く動的流体輸送モジュール TASK/TX は、プラズマの回転や径電場の時間発展を正確に取り扱うことができる。この方程式系に、ヘリカル磁場の効果による新古典粘性と周辺部の磁気面破壊に伴う径方向拡散の効果を取り入れ、LHD プラズマの輸送シミュレーションを行った。その結果、中性粒子ビーム加熱パワーの増大に伴う輸送過程および空間分布の遷移が初めて示された。

(5) その他、トカマク配位における粒子輸送解析、任意の速度分布関数をもつプラズマに

おける波動伝播解析, 有限要素法による波動伝播解析, プラズマ回転と有限ラーモア効果を取り入れた平衡解析等も進展し, 新しい成果が得られた.

### 3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している.

(理由)

最重要課題である運動論的輸送モジュール TASK/FP の開発が順調に進展している. 軌道追跡型速度分布関数解析コード GNET は並列化が完了し, 具体的な研究課題に適用されつつある. 流体的輸送モジュールによる解析, 波動伝播解析モジュールの機能拡張も予定通り進行している.

### 4. 今後の研究の推進方策

(1) 輸送シミュレーションに運動論的効果を取り入れた波動伝播・巨視的安定性解析, 微視的安定性解析に基づく乱流輸送モデル, プラズマ計測・制御モジュール等を組み合わせて, ITER プラズマにおける運動論的統合シミュレーションを実現する.

(2) 粒子軌道追跡コードによる ITER プラズマの加熱解析および電子サイクロトロン波による電流駆動における電流駆動効率の定量的評価を行う.

(3) 新たに開発した 3 次元平衡コードによって求められた磁気島のある平衡配位における輸送シミュレーションを行う.

### 5. 代表的な研究成果

(研究代表者及び研究分担者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)

1. H. Nuga, A. Fukuyama, Kinetic integrated modeling of plasma heating in tokamaks, Progress in Nuclear Science and Technology, in press (2011) : 査読あり
2. M. Miki, A. Fukuyama, Transport Simulation of Helical Plasmas Using the TASK/TX Code, Plasma and Fusion Research, Vol. 5, S2040 (4p) (2010) : 査読あり
3. D. Raburn, A. Fukuyama, Numerical calculation of equilibria with poloidal-sonic flow and finite Larmor radius effects in large aspect-ratio tokamaks, Phys Plasmas, Vol. 17, No. 12, 122504 (10p) (2010) : 査読あり
4. M. Honda, A. Fukuyama, T. Takizuka and K. Shimizu, Modelling of anomalous particle transport for dynamic transport simulations, Nucl. Fusion, Vol. 50, No. 9, 095012 (14p) (2010) : 査読あり
5. S. Murakami, T. Yamamoto, A. Fukuyama, J. N. Talmadge, K. M. Likin, and J. W.

Radder, Optimization Study of ICRF Heating in the LHD and HSX, Configurations, Contributions to Plasma Physics, Vol. 50, No. 6-7, pp. 546-551 (2010) : 査読あり

[学会発表] (計 110 件)

1. D. Raburn, A. Fukuyama : Numerical Calculation of MHD Equilibria with Poloidal-Sonic Flow and FLR Effects, 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Chicago, IL, USA, 2010-11-08) BP9.00112
2. S. Murakami, K. Itoh, L. J. Zheng, J. W. Van Dam, A. Fukuyama : Simulation study of toroidal flow generation by ICRF heating using GNET code, 52nd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (Chicago, IL, USA, 2010-11-09) J04.00006
3. A. Fukuyama, H. Nuga, S. Murakami : Kinetic Integrated Modeling of Heating and Current Drive in Tokamak Plasmas, IAEA Fusion Energy Conference (Daejeon, Korea, 2010-10-12) THW/P2-01
4. S. Murakami, K. Itoh, L. J. Zheng, J. W. Van Dam, A. Fukuyama : Simulation Study of Toroidal Flow Generation by the ICRF Minority Heating, IAEA Fusion Energy Conference (Daejeon, Korea, 2010-10-13) THW/P4-03
5. A. Wakasa, A. Fukuyama, S. Murakami, et al. : Integrated Transport Simulation of LHD Plasmas Using TASK3D, IAEA Fusion Energy Conference (Daejeon, Korea, 2010-10-13) THC/P4-29

[図書] (計 2 件)

1. S. Murakami, K. Itoh, T. Yamamoto, A. Fukuyama, Simulation Study of Toroidal Shear Flow Generation by a Local ICRF Heating, Proc. 18th Topical Conf "Radio Frequency Power in Plasmas", AIP Conference Proceedings 1187, pp. 621-624 (2009) : 査読なし
2. A. Fukuyama, Integrated Transport Simulation of Burning Plasmas, 2nd ITER International Summer School (ed. by S.-I. Itoh, M. Shindo, S. Inagaki, and M. Yagi, AIP Conference Proceedings 1095), pp. 199-214 (2009) : 査読なし

[その他]

研究成果ホームページ :

<http://bps.nucleng.kyoto-u.ac.jp/kisc/>

開発コードホームページ :

<http://bps.nucleng.kyoto-u.ac.jp/task/>