

## 燃焼プラズマに向けたモデリング・統合シミュレーション研究

原子力機構

林 伸彦、燃焼プラズマ研究班

燃焼プラズマは、様々な時空間スケールの物理現象が複雑に絡み合っており、燃焼プラズマの予測及び制御のためには、この複雑物理現象を含んだシミュレーションコードの開発が必要である。第一原理に基づいたシミュレーションは、燃焼プラズマを調べる有効な手段であるが、広範囲の時空間スケールを扱える段階には未だ至っていない。一方、各物理現象をモデル化し、それらのモデルを統合化したシミュレーションコードも有効な手段であり、世界各国で統合コードの開発が進められている。我々は、トカマクプラズマ時間発展シミュレーションコード TOPICS を燃焼プラズマ統合コードの中核として、開発を進めてきた。TOPICS は、主に1次元の輸送方程式と2次元のグラッドシャフラノフ方程式を解き、中性粒子輸送、加熱・電流駆動、等のコードを結合して計算する。発表では、モデリングと統合シミュレーションにより得た、以下の成果を紹介する。

### (1) 新古典テアリングモード (NTM)

磁気流体不安定性の一種であるNTMは、正磁気シア配位で高温プラズマの閉じ込めを劣化させるので、燃焼プラズマの高ベータ・定常化に向けた重要課題である。電子サイクロトロン波電流駆動 (ECCD) は、NTMを安定化させる有効な手段の一つである。修正ラザフォード方程式に基づいたNTMモデルをTOPICSに結合し、統合シミュレーションを行った。モデルの未定パラメータをJT-60U実験との比較により求め、モデルが実験を再現できることを確かめた。ITERにおいてNTM安定化に必要なECCDパワーを、JT-60U実験で妥当性を確認したモデルを用いたシミュレーションにより評価した。また、ECCD位置及び実時間制御の必要性を示した。

### (2) 強い負磁気シアプラズマ

負磁気シア配位は、内部輸送障壁 (ITB) 形成によりプラズマの高い閉じ込め性能が得られ、プラズマが自発的に流すブートストラップ電流との整合性が良いことから、核融合炉での運転シナリオの有望な候補の一つである。シミュレーションにより、異常輸送が負磁気シア領域内で新古典レベル以下に急に減衰する輸送モデルが、JT-60Uで観測された分布の時間発展を再現できることがわかった。つまり、負磁気シア領域内では輸送は新古典レベルになり、その結果、大きなブートストラップ電流を介して内部輸送障壁と強い負磁気シア配位が自律的に形成される。ITB位置が広いプラズマは、ブートストラップ電流による完全電流駆動により維持される。一方、ITB位置が狭くブートストラップ電流割合が小さいプラズマは、誘導電流の染込みにより収縮してしまう。適切な外部電流駆動により、この収縮を妨げ、さらにITB位置を制御することができる。強負磁気シアプラズマが、外部電流駆動に対して自律的に応答することを明らかにした。

### (3) ITER 定常運転シナリオ

負磁気シアプラズマは、ITER の定常運転シナリオの一つである。JT-60U 実験で妥当性を確認した輸送モデルを用いて、ITER 定常運転のシミュレーションを行った。 $\alpha$  粒子加熱のある強い負磁気シアプラズマでは、ITB における新古典レベルの輸送により、 $T_i \sim 40\text{keV}$  の高温まで熱的不安定であることがわかった。 $T_i \sim 30\text{keV}$  位ならば NB 加熱のフィードバック制御により熱的不安定性を抑制でき、外部電流駆動により完全電流駆動できれば、強い負磁気シア燃焼プラズマを維持できることを明らかにした。