

燃焼プラズマを見据えた大規模乱流輸送シミュレーション研究

仲田 資季

自然科学研究機構 核融合科学研究所, 総合研究大学院大学

Motoki NAKATA

National Institute for Fusion Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies)

核融合炉における炉心燃焼プラズマは燃料イオン(重水素:D及び三重水素:T)に加え、核融合反応や壁・ダイバータ板などに由来するヘリウム灰や金属不純物といった複数イオン種が常に混在した多種イオンプラズマとなる。各々の粒子種に関する乱流輸送フラックスは相互に関連し合った複雑な物理機構をとり、その輸送特性(特に粒子輸送特性)は未だ完全には解明されていない。燃焼出力の制御や不純物排気、効果的な燃料供給のためには、各粒子種の温度・密度分布および輸送フラックスを区別して正確に評価することが重要となるが、実験での同時計測は一般に困難であるため、第一原理モデルに基づいた大規模な乱流輸送シミュレーションによる解析・予測が不可欠となる。このような課題に対して、乱流の発達と輸送フラックスを自己無撞着に取り扱うジャイロ運動論的乱流シミュレーションコードGKV[1]の計算モデルの開発・拡張が進展している。実験計測分布から再構築されたMHD平衡の組み込み[2]や、保存特性を維持した多粒子種衝突項[3, 4]の実装により、ITERプラズマにおける多種イオンITG-TEM(イオン温度勾配-捕捉電子モード)駆動乱流輸送シミュレーションが実現された。これにより、熱および粒子輸送フラックスの燃料(D-T)比率およびヘリウム灰蓄積率依存性や、定常燃焼条件[5]を満たす分布領域が運動論シミュレーションの見地から明らかにされた(図1)。また、実際のJT-60Uトカマク装置および大型ヘリカル装置の実験データに対する予測性能の検証も進められており、実験と同程度のイオンおよび電子熱輸送フラックスを与える良好な予測性能も確認されている[6-8](図2)。さらに最近では、水素同位体種がITG/TEM駆動乱流輸送へ与える影響等の解析[9-11]も進展している。講演では、ペタフロップス級計算機を活用した多粒子種乱流輸送シミュレーション研究の進展と展望を紹介する。

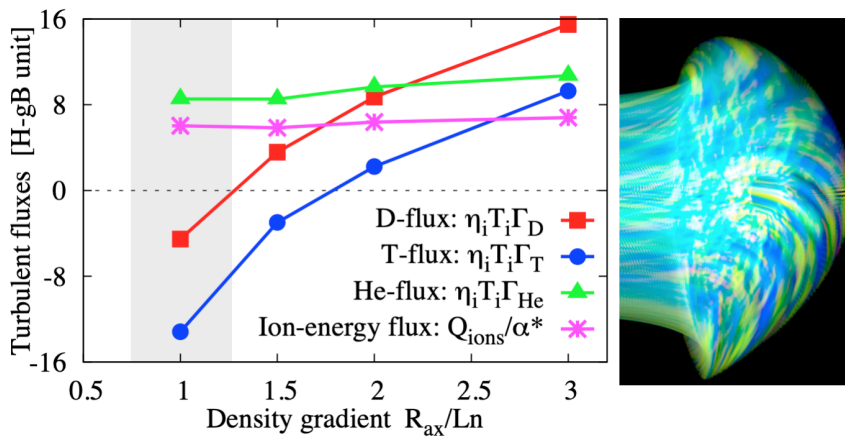


図1 ITER D-T-He乱流シミュレーションによる燃焼条件[5]を満たす分布領域(灰色)の同定。

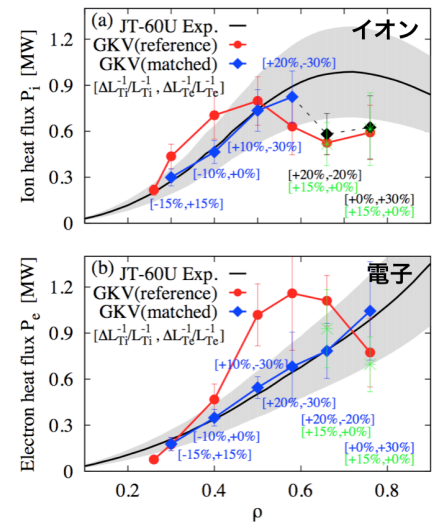


図2 JT-60U実験データとGKV計算結果の比較[6]：
(a)イオンおよび(b)電子熱輸送フラックス。

[1] T. -H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24 (2006)
 [2] M. Nakata, A. Matsuyama et al., Plasma Fusion Res. 9, 1403029 (2014)
 [3] M. Nakata, M. Nunami et al., Comput. Phys. Commun. 197, 61 (2015)
 [4] M. Nunami, M. Nakata et al., Plasma Fusion Res. 10, 1403058 (2015)
 [5] D. Reiter, G. H. Wolf et al., Nucl. Fusion 30, 2141 (1990)
 [6] M. Nakata, M. Honda et al., Nucl. Fusion 56, 086010 (2016)
 [7] M. Nunami, T. -H. Watanabe et al., Phys. Plasmas 20, 092307 (2013)
 [8] A. Ishizawa, T. -H. Watanabe et al., Nucl. Fusion 55, 043024 (2015)
 [9] M. Nakata, M. Nunami et al., Plasma Phys. Control. Fusion 58, 074008 (2016)

[10] M. Nakata, M. Nunami et al., Phys. Rev. Lett. 118, 065002 (2017)
 [11] M. Nakata, K. Nagaoka et al., Plasma Phys. Control. Fusion 61, 016014 (2019)