

福山 淳

京大工

FUKUYAMA Atsushi

Dept. Nucl. Eng., Kyoto Univ.

核融合反応が持続的に進行している核燃焼プラズマでは、反応により生成された高速アルファ粒子による加熱や高い圧力勾配により駆動される自発電流による閉じ込めが本質的となり、自律的な発展がより支配的となる。したがって ITER プラズマにおいては、立ち上げ時を除いては、外部からの加熱や電流駆動によって温度分布や電流分布を制御することは容易ではなく、プラズマ密度や回転速度等を通して制御することが重要となる。高い閉じ込め性能を維持するためのプラズマ制御の観点から、輸送と閉じ込めの課題を考えてみる。

プラズマ密度制御：炉心プラズマにおいて、燃料イオン密度は加熱分布に大きな影響を与える。その分布はペレット等の粒子源と反応生成ヘリウムや不純物を含めた粒子輸送によって決定される。粒子ピンチの存在や小さい粒子拡散係数のため、熱輸送に比べると粒子輸送の実験的検証は容易ではないが、その物理機構の解明は重要課題である。

プラズマ回転制御：プラズマの回転速度およびその径方向シアは、乱流輸送に大きな影響を与えることが、理論的に、また実験的にも示されている。トカマクにおけるプラズマの回転は、トロイダル方向とポロイダル方向に分けて考えることができる。トロイダル回転自体には新古典粘性力はほとんど働かないが、ポロイダル回転との結合を通してその影響を受ける。中性粒子ビーム入射等による運動量源や乱流による運動量輸送と合わせて、回転速度の空間分布が決まるが、その定量的解析はまだ十分ではない。一方、ポロイダル回転は、新古典粘性力の影響を強く受けるとともに、イオン圧力勾配や径方向電界に依存する。イオンの軌道損失や有限軌道幅の効果を含めて、定量的解析はこれからの課題である。

高速イオン分布制御：核融合反応によって生成された高速イオンの空間分布と速度分布は、電子やイオンのバルク成分の加熱分布に影響を与える。外部から励起された低域混成波やイオンサイクロトロン波との結合やプラズマ中に励起されたアルヴェン固有モードとの結合が高速イオンの分布に与える影響が解析されている。さらに、電流ホールのように磁気軸付近のポロイダル磁界が弱い場合には、トロイダル電流密度のわずかな変化が高速イオンのバナナ軌道幅を通して加熱分布に影響を与える可能性があり、詳しい解析が必要である。

周辺プラズマ制御：周辺プラズマは、コアプラズマの空間分布に対してその境界条件として大きな影響を与える。セパトトリクスの内側と外側に分けて、周辺プラズマの影響を考える。セパトトリクス内側のコアプラズマ周辺部は、比較的温度が低いいため、外部から圧力分布や電流分布を変化させることが容易である。しかしながら、有効な制御法を開発するためには、L/H 遷移に伴う輸送障壁形成のトリガーや Greenwald 密度限界の物理機構を早急に解明する必要がある。セパトトリクス外側の SOL プラズマは、コアプラズマからの高熱流束の受け皿として重要であり、その解析が急速に進みつつある。しかしながら、原子過程や乱流輸送が密接に絡み合っており、定量的な解析は容易ではない。

これらの課題の多くは、現在のトロイダルプラズマ実験装置においても実験ないしは模擬実験が可能である。しかしながら、複数の物理機構が結合あるいは競合している場合が大半であり、自己無撞着で定量的な解析は容易ではない。さまざまな物理現象を取り入れることのできるモデリングツールを早急に開発することが必要である。さらに ITER プラズマに外挿可能なモデリングを実現するためには、実験データとの定量的な比較や第一原理シミュレーションによる裏付けが不可欠である。

これまでの日本におけるプラズマ実験研究は、内部輸送障壁形成や長時間電流駆動等、インパクトのある実験結果を示しながら、定量的な物理機構の解明を欠いている場合が少なくなかった。これからの ITER に向けての研究においては、実験と理論・シミュレーションに加えて、実験データを十分に把握し、定量的な解析を実現して、物理機構を解明するモデリングを重視することが必要と考える。