

熱・粒子制御に関連した周辺プラズマ物理現象

名古屋大学大学院工学研究科
大野哲靖

磁場閉じ込め方式の核融合エネルギーの実現のためには、核融合反応を起こす高温高密度の炉心プラズマを長時間維持しつつ、それを取り囲む真空容器壁は熱的に十分耐えられ、損耗が少なく、燃料などの粒子制御が確保されなければならない。炉心プラズマと真空容器壁の間に介在するプラズマを周辺プラズマという。炉心プラズマから境界領域に流出するプラズマ熱流は数十 MW/m² という太陽表面に匹敵する膨大なものであり、この熱負荷によるプラズマ対向壁損傷の低減が核融合発電炉の成否を決める重要な課題となっている。

本講演では、ダイバータ板、第一壁への熱・粒子制御を考える上で重要な周辺プラズマ現象であるプラズマデタッチメント現象（非接触プラズマ）と非拡散的輸送(Plasma Blob 輸送)に関して、その基礎物理と直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置及び大型装置（トカマク、ヘリカル）での実験結果について紹介する。

プラズマデタッチメント現象は、プラズマ-ガス相互作用により放射および荷電効果過程でプラズマを冷却し、プラズマを低温高密度状態し、最終的には電子イオン再結合過程(放射+3体再結合過程)によりプラズマを気相中で消失させるというものであり、周辺プラズマ領域での粒子・熱流 制御法の切り札と考えられている。この時、生成されるプラズマを非接触プラズマという。本手法の原理実証は直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置、トカマク、ヘリカル装置などで行われた。特に原子分子過程の観点から非接触プラズマ形成の理解に直線型ダイバータプラズマ模擬試験装置が果たした役割は大きい。国際熱核融合実験炉 ITER では、最も熱・粒子負荷が大きいストライク点付近を非接触化させる部分非接触プラズマの採用が予定されている。しかし、非接触プラズマの安定性や Edge Localized Mode に伴う熱パルスに対する動的応答など未解決の課題も多く存在し、非接触プラズマによる熱流制御は完全に信頼に足りうる制御法としては確立されていない。一方で装置の大型化、炉心プラズマ性能の向上にともないダイバータ板への粒子・熱負荷の大きさは対向材としての許容限界に達しており、閉じ込め方式を問わず磁場閉じ込め定常核融合炉の実現のためには非接触プラズマを用いた粒子・熱流制御の確立は不可欠な課題となっている。

最近の周辺プラズマ計測の進展により、最外殻磁気面近傍からプラズマの小さな塊 (Plasma Blob) が磁力線を横切って間欠的に第一壁方向へ飛行する現象が、トカマク型装置の周辺プラズマにおいて視覚的に捉えられている。この非拡散的輸送は Plasma Blob 輸送と呼ばれる。この Plasma Blob 輸送が第一壁付近の平坦な密度分布や周辺プラズマ流の原因ではないかと考えられている。さらにトカマク型装置以外のヘリカル型装置や直線型装置でも Plasma Blob 輸送を示唆する現象が観測されており、Plasma Blob 輸送現象は方式に依存しない磁場閉じ込めプラズマに普遍的な現象ではないかと考えられているようになってきている。講演では、Plasma Blob 輸送に関する理論、シミュレーション、実験に関する研究成果について概説するとともに、非接触プラズマが Plasma Blob 輸送に与える影響に関する最新の研究成果についても述べる。