

# トカマクプラズマでのダイバータおよび第一壁への 定常・非定常熱負荷と低減手法

朝倉伸幸

日本原子力研究機構、青森研究開発センター

ITER の運転や核融合炉の設計において、熱と粒子制御を行うダイバータは最重要課題である。本講演では、(1) ダイバータにおける定常的な熱負荷の低減研究の進展、および (2) H モードプラズマにおいて周辺部のエネルギーが周期的に排出される ELM(Edge Localized Mode)によるダイバータおよび第一壁への熱負荷特性と低減手法、さらに (3) 核融合炉を考えた場合のこれらの課題について、概要を紹介する。

ITER のダイバータ運転では、熱負荷が大きくなるストライク点の上流で放射損失による熱流の低減を行いプラズマ温度を低温化し、さらに原子・分子の再結合過程を利用する非接触プラズマを生成する「非接触ダイバータ」を、熱・粒子の制御運転の基本としている。特にストライク点付近への大きな熱流束を低減・制御するため、多くの実験装置で、1990 年から 2000 年にかけて、「部分非接触ダイバータ」を生成するダイバータ形状の研究が行われてきた。また、異なる軽不純物ガスの入射などを行い、非接触ダイバータをより得やすくする実験が行われ、現在でも熱負荷の低減に使用されている。こうした実験経験について概要を報告する。

ITER のダイバータや第一壁などに対しては、特に、ELM による非定常な熱負荷を低減することが不可欠である。一方、周辺輸送障壁の崩壊と回復を周期的に繰り返す ELM は、ヘリウム灰や不純物を排出する効果も期待され、定常状態で高閉じ込めプラズマを維持するためには適切なレベルまで低減・制御することが重要である。本講演では、主に標準的なタイプ-I ELM について、ダイバータや第一壁への過渡的に熱負荷とその分布の特徴について説明を行う。ELM 発生により排出される周辺 (ペDESTAL) プラズマのエネルギーは、衝突頻度 ( $\nu^* = R_p q_{95} A^{1.5} / \lambda_e$ ) の減少と共に増加する傾向がある。高温 (3.5 keV 程度) が予想される ITER の周辺プラズマでは、22 MJ ものプラズマ蓄積エネルギーが、1 回の ELM で放出される可能性が示唆されている。一方、ELM を模擬したプラズマのパルス照射実験から、ダイバータ対向材 (炭素およびタングステン) への非定常熱負荷の限界 ( $q_{div}^{max} = 0.5 \text{ MJ/m}^2$ ) が指摘されているため、放出されるエネルギー ( $W_{ELM}$ ) を約 1/20 まで緩和する必要がある。従って、ELM 発生による大きな熱負荷の低減は、ITER において最も大きな物理検討課題であり、現在提案されている低減方法あるいは異なる ELM タイプ運転の可能性などに概要を説明する。さらに、ELM が発生した際、主プラズマ周辺部のプラズマは磁力線に沿った構造をもち、「プラズマ・フィラメント」と呼ばれる。プラズマ・フィラメントが境界層 (SOL) へ排出される際、磁力線に沿って古典的に輸送されるのみではなく、一部は低磁場方向 (トーラス外側) に高速で運動するため、第一壁への熱負荷の増加にも関与する。こうした高温のプラズマ輸送機構とともにダイバータおよび第一壁への熱負荷分布の特性について概要を述べる。

核融合出力が数倍大きな原型炉では、さらに大きな放射損失量が必要となり、広い領域で「非接触プラズマ」を安定に維持することが要請される。ITER のダイバータの発展する設計では課題やあるいは高閉じ込めプラズマの実験条件に大きな制限となる可能性も考えられる。原型炉での大きな熱・粒子束の制御の課題について SlimCS を例として解説する。