

非接触ダイバータプラズマにおける粒子束のロールオーバーと分岐特性 Characteristics of rollover and bifurcation of particle flux for the divertor plasma detachment

東郷 訓, 滝塚知典¹, 中村 誠², 星野一生², 伊庭野健造¹, 李 躍³, 小川雄一³, 坂本瑞樹
Satoshi TOGO, Tomonori TAKIZUKA¹, Makoto NAKAMURA², Kazuo HOSHINO²,
Kenzo IBANO¹, Yue LI³, Yuichi OGAWA³, Mizuki SAKAMOTO

筑波大, 大阪大¹, 量研機構², 東京大³

Univ. of Tsukuba, Osaka Univ.¹, QST², Univ. of Tokyo³

核融合原型炉において損耗が少ないダイバータの設計に向け、非接触ダイバータプラズマを再現可能なシミュレーションコードが必須である。しかし既存のスクレイプオフ層 (SOL)-ダイバータプラズマシミュレーションコードでは既存実験装置におけるダイバータ板への粒子束の挙動を必ずしも定性的・定量的に再現できていない [1]。そこで本研究では比較的物理モデルが簡素で計算時間が短い一次元シミュレーションコード [2] と簡易解析モデルを用いて、ダイバータ板への粒子束に対する種々の物理機構 (原子分子過程、非等方イオン温度、プラズマ径方向拡散、SOL の幅など) の効果を調査した。

中型トカマク ($L_{\parallel} = 44$ m) の SOL-ダイバータプラズマを想定し、炉心プラズマから SOL に流入する全粒子束 Γ_{sep} に対する両ダイバータ板への全粒子束 Γ_t の挙動を調べた。最初に炉心プラズマから SOL に流入する全熱流束 ($P_{\text{sep}} = 4$ MW) と SOL 幅 ($d = 1$ cm) を固定して調べた。シミュレーションでは原子分子過程としてイオン化反応、荷電交換反応、体積再結合反応、不純物放射を考慮した。簡易解析モデルでは一様な背景プラズマ (イオンと電子の温度は等しいと仮定) の下で定常状態での中性粒子の連続の式を解くことで、粒子バランスから Γ_t を算出した (ただし体積再結合反応は考慮していない)。図 1 に Γ_t 及びダイバータ板前面の密度 n_t と温度 T_t の Γ_{sep} 依存性を示す。数値解では低密度・高温プラズマを初期値とした場合 (図の黒丸) と高密度・低温プラズマを初期値とした場合 (図の白丸) で解に分岐が生じた。解析解でも数値解に対応する安定解 (図の実線) が定性的に再現され、且つ従来から報告されていた不安定解 (図の破線) も得られた [3]。低温安定解での Γ_t のロールオーバーは低温化によるイオン化反応の低減によるものであり、簡易解析モデルでもイオン化反応以外のエネルギー損失を考慮することで定性的に再現された。さらに解析解ではもう一つの解の折れ曲がりが生じ、第四の解 (図の鎖線) が得られた。これは定常解を持つための Γ_{sep} に上限が存在することも示唆する。第四の解は低密度・低温プラズマであるため、定常的な非接触ダイバータプラズマに対応していると考えられる。またシミュレーションで $\Gamma_{\text{sep}} > 3 \times 10^{22}$ /s では非定常的な非接触ダイバータプラズマが生じたが、これは解析解での Γ_{sep} の上限に対応していると考えられる。講演では第四の解の安定性と、種々の物理機構の効果について議論する。

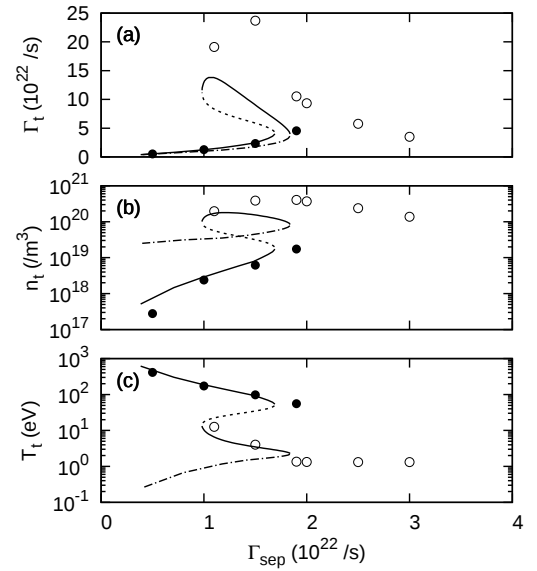


図 1: (a) Γ_t 、(b) n_t 及び (c) T_t の Γ_{sep} 依存性と分岐特性。曲線は解析解 (実線は安定解、破線は不安定解、鎖線は第四の解)、丸印は数値解 (黒丸は高温安定解、白丸は低温安定解に対応)。 T_t は電子温度を選ぶ。

[1] A.V. Chankin *et al.*, J. Nucl. Mater. **390-391** (2009) 319.

[2] S. Togo *et al.*, J. Comput. Phys. **310** (2016) 109. / Contrib. Plasma Phys. **56** (2016) 729.

[3] M. Sugihara *et al.*, J. Nucl. Mater. **128-129** (1984) 114.