

非接触ダイバータプラズマにおける分子活性化再結合の解析 Analysis of Molecular Activated Recombination in Detached Divertor Plasmas

坪谷友香¹, 巽瞭子¹, 星野一生¹, 畑山明聖¹, Md.Shahinul.Islam², 中嶋洋輔²
Yuka Tsubotani¹, Ryoko Tatsumi¹, Kazuo Hoshino¹, Akiyoshi Hatayama¹
Md.Shahinul.Islam², Yousuke Nakashima²

¹慶大理工, ²筑波大プラズマ研

¹Keio University, ²Plasma Research Center, University of Tsukuba

核融合炉の実現に向けて, Edge Localized Mode (ELM)による熱パルス等の条件下における非接触プラズマの動的特性の理解が重要である. しかしELMが非接触状態に与える影響は完全には理解されていない. 本研究では, ELMが非接触状態に与える影響を解析するために以下の二点に注目した. (1)ELMによってプラズマのエネルギー分布は熱平衡から逸脱すること. (2)GAMMA10/PDXにおいて, 基本的な原子分子プロセスに加えて分子活性化再結合(MAR)が非接触状態で観測されていること[1].

本研究では, GAMMA10/PDXのD-moduleを対象とした0次元モデルを構築した. 本モデルでは, 式(1)のレート方程式を用いてプラズマ及び中性粒子密度の時間発展を計算した.

$$\frac{dn_s}{dt} = \sum_{j,k} R_{gain} n_j n_k - \sum_{l,m} R_{loss} n_l n_m - \frac{n_s}{\tau} + S_{gain} \quad (1)$$

ここで, s は粒子種(e, H⁺, H, H²⁺, H, H₂(v)), R_{gain} , R_{loss} は生成, 消滅の反応速度係数, τ は閉じ込め時間, S_{gain} はH₂ガスパフや上流からのプラズマ流入量である. 原子は主量子数を1から35まで, 振動励起分子は励起準位を0から14まで考慮し, MARを含む非接触状態において重要な原子分子プロセスを考慮した.

さらに以下のように簡易的にELMパルスを模擬し, 式(1)を用いて非接触プラズマの動的特性を解析した. ELMパルスの際に, 電子密度は背景の低エネルギー成分($n_{e,low}$)とELMによる高エネルギー成分($n_{e,high}$)にわけて計算した. 1 eVの非接触状態へのELMによる熱パルス(0.2 ms)の流入を仮定し, ELM中のみ背景電子に加えて100 eVの電子を流入させた. 低エネルギー成分の電子温度($T_{e,low}$)は1 eVで一定とした. 高エネルギー成分の電子温度($T_{e,high}$)は式(2)のエネルギー方程式を用いて式(1)と同時に計算した.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{3}{2} n_{e,high} T_{e,high} \right) = -E_{ion} \times n_{e,high} n_H R_{ioz} + \frac{3}{2} \times E_{ELM} \times S_{e,high} - \frac{3}{2} \frac{n_{e,high} T_{e,high}}{\tau} \quad (2)$$

$E_{ion}=13.6$ eV, $E_{ELM}=100$ eVであり, $S_{e,high}$ は100 eV電子の流入量である. 右辺第1項はイオン化によるエネルギー損失, 第2項は100 eV電子流入によるエネルギー生成, 第3項は輸送によるエネルギー損失である.

図1にMAR, 電子とイオンの直接の再結合(EIR)及びイオン化(IOZ)の反応レートを示した. ELM開始直後, 高エネルギー電子流入によってイオン化レートが急激に増加する. このイオン化によって $T_{e,high}$ は4 eV程度まで低下する. 背景電子に比べ高い $T_{e,high}$ により高励起準位分子密度が増加する一方, MARの反応速度係数にはあまり影響しない. この結果MARレートが増加し, ELM中のイオン化による非接触プラズマの崩壊を抑制している.

ELMによる動的応答を解析する0次元モデルを構築し, 現在の計算条件の元ではELM中にMARレートが増加することを示した. 今後はPIC(Particle in Cell)モデル[2]と中性粒子輸送モデルを統合し, より正確にELMを模擬して非接触状態の解析を進めていく.

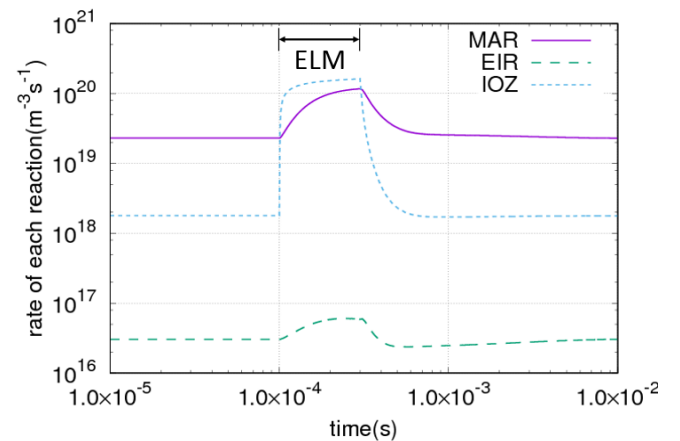


図1 MAR, IER, イオン化の反応レート

[1] M. Sakamoto, *et al.*, Nuclear Materials and Energy, **12**, 1004(2017).

[2] Hockney R.W, and Eastwood J.W. *Computer Simulation Using Particles*. CRC Press. (1988).