

# PIC-MCC 法による直線型慣性静電閉じ込めプラズマの放電解析

## Discharge Analysis of linear Inertial Electrostatic Confinement Plasma with PIC-MCC

松田和太, 長谷川純  
Kazuhiro Matsuda, Jun Hasegawa

東京工業大学  
Tokyo Institute of Technology

慣性静電閉じ込め (Inertial Electrostatic Confinement : IEC) 核融合中性子源は, 重水素を充填した真空容器内でグロー放電を発生させ, 加速された重水素イオンと背景ガス分子 ( $D_2$ ) の衝突により核融合反応を起こして中性子を発生させる装置である. IEC 装置は小型かつ安価で放射線管理が容易であるといったメリットがある一方, 従来の同心球型や同軸円筒型の装置では, 内部置かれた陰極への熱負荷が性能を制限していた. その問題を解決するため, 我々は円筒型の陽極と陰極を同軸上に並べた直線型 IEC 核融合中性子源を開発した. この装置では電極が外部に露出しているため冷却が比較的容易であるが, 実用化のために中性子発生率を  $10^9$  n/s 程度まで向上させるには, 電極表面への熱負荷をさらに軽減する必要があることが分かった. そのためには装置内部のイオンや電子等の高エネルギー粒子の挙動を把握することが非常に重要である. これまで我々の研究グループでは IEC プラズマの電離度が低いことから真空電位を仮定した Monte Carlo 解析を行ってきた. しかし, 中性子発生率の改善のため投入電力を上昇させると, 局所的に電離度が上昇し, 空間電荷効果による電位の変調が無視できなくなることが分かってきた. 本研究では, 空間電荷効果を考慮した解析を行うため, 1次元 Particle In Cell - Monte Carlo Collision (PIC-MCC) 法を用いた解析コードを開発し解析を行った.

解析では, 1次元平行平板電極間に半径  $r$  の放電柱が形成されると仮定した上で, その半径から求まる電流密度を基に定電流制御を行い, 定常状態における電位分布や衝突過程の頻度や分布を観測した. 考慮した粒子間の衝突過程は, Table. 1 に示す通りである. また陽極に衝突した電子の後方散乱や陰極へのイオンや中性粒子の衝突による2次電子放出も考慮した.

開発した PIC-MCC コードの信頼性を評価するため, 実験にて測定した  $H\alpha$  線スペクトルと PIC-MCC 解析で得られたものを比較した. 背景ガス圧を

0.6 Pa, 電流値を 10 mA に制御した時の結果が Fig. 1 である. 実験に比べ PIC-MCC 解析の方が全体的にドップラーシフト量が少ないものの, 中央に鋭いピークを持ち左右に高速水素原子からの発光によるサテライトピークがあるという結果は, 定性的に一致している. また, 653 nm や 659 nm 付近の波長において変曲点があることも再現できている. 同様の計算について, 核融合反応や各種衝突過程の発生頻度やその分布, 放電維持電圧と圧力・電極間距離の積の関係, 粒子のエネルギー分布から電極への熱負荷について検討した結果を報告する.

Table. 1 PIC-MCC コードに組み込んだ衝突過程.

$e + H_2 \longrightarrow (\text{elastic})$	$H + H_2 \longrightarrow H_2^+$
$e + H_2 \longrightarrow 2e + H_2^+$	$H + H_2 \longrightarrow \text{fast } H^+$
$H^+ + H_2 \longrightarrow \text{fast } H$	$H + H_2 \longrightarrow H\alpha$
$H^+ + H_2 \longrightarrow e (\text{total})$	$(D + D_2 \longrightarrow \text{D-D fusion})$
$H^+ + H_2 \longrightarrow H\alpha$	$H_2 + H_2 \longrightarrow \text{fast } H^+$
$(D^+ + D_2 \longrightarrow \text{D-D fusion})$	$H_2 + H_2 \longrightarrow \text{fast } H_2^+$
$H_2^+ + H_2 \longrightarrow \text{slow } H_2^+$	$(D_2 + D_2 \longrightarrow \text{D-D fusion})$
$H_2^+ + H_2 \longrightarrow e (\text{total})$	$H_3^+ + H_2 \longrightarrow \text{fast } H^+$
$H_2^+ + H_2 \longrightarrow \text{fast } H^+$	$H_3^+ + H_2 \longrightarrow \text{fast } H_2^+$
$H_2^+ + H_2 \longrightarrow H_3^+ + H$	$H_3^+ + H_2 \longrightarrow H\alpha$
$H_2^+ + H_2 \longrightarrow H\alpha$	$(D_3^+ + D_2 \longrightarrow \text{D-D fusion})$
$(D_2^+ + D_2 \longrightarrow \text{D-D fusion})$	

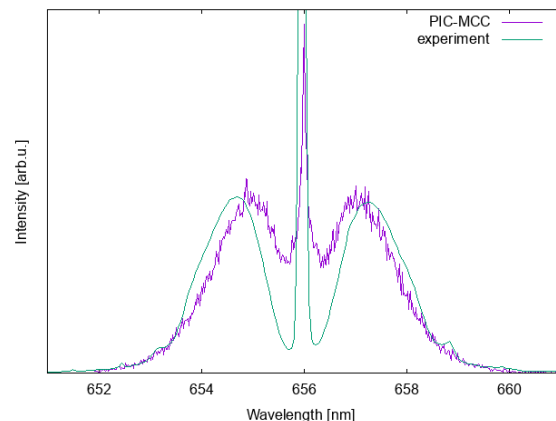


Fig. 1:  $H\alpha$  線のスペクトルの比較.