

# ヘリウムプラズマ再結合フロント構造への不純物ガス入射の影響 Effects of impurity gas seeding on recombination front structure in helium plasma

服部聖悟<sup>1)</sup>, 田中宏彦<sup>1)</sup>, 梶田信<sup>2)</sup>, 大野哲靖<sup>1)</sup>  
Hattori Shogo<sup>1)</sup>, Tanaka Hirohiko<sup>1)</sup>, Kajita Shin<sup>2)</sup>, Ohno Noriyasu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>名大院工, <sup>2)</sup>名大未来研

<sup>1)</sup>Grad. Sch. Eng., Nagoya Univ., <sup>2)</sup>IMaSS, Nagoya Univ.

核融合炉実現のための重要課題であるダイバータ板への熱負荷低減には、非接触プラズマ生成が有効な手法として提案されている [1]。非接触プラズマでは、上流から流入する高温プラズマと中性ガスとの相互作用により、放射損失を促しプラズマが冷却されることで体積再結合が発生する。その際、体積再結合が最も頻繁に発生する領域は再結合フロントと呼ばれ、ヘリウムプラズマの場合、電子-イオン再結合 (EIR) が1 eV以下の低温の条件で活発となる。一方、水素プラズマでは、EIRに加えて電子温度が2 eV程度と比較的高い電子温度で分子活性化再結合 (MAR) の反応断面積が最大となるが [2]、MARが発生しうる環境下での再結合フロント構造や、軽水素H<sub>2</sub>・重水素D<sub>2</sub>の同位体効果についての詳細計測は不十分である。

近年、水素プラズマに対し窒素ガスを導入することで非接触化が促進される現象が報告されている [3]。このような不純物ガスが入射された非接触プラズマ中では、異なるガス種同士の相互作用があるため原子分子過程は複雑である。各不純物ガスの非接触化効果をより単純化して理解するためには、原子分子過程が単純なヘリウム (He) プラズマに対し、H<sub>2</sub>・D<sub>2</sub>などの不純物ガスを導入し、各ガス種が再結合フロント構造に与える影響を評価することが有効と考えられる。

本研究では、直線型装置NAGDIS-IIで生成したHeプラズマに対して、装置下流から導入したHe・H<sub>2</sub>・D<sub>2</sub>ガスの非接触化効果と再結合フロント構造について調査を行った。下流ガスの流量を変化させた際の電子温度 ( $T_e$ )・電子密度 ( $n_e$ ) の軸方向分布を、計測精度の保証されたダブルプローブによって計測した [4]。図1に各ガス入射時の中流 ( $z = 1.36$  m) と下流 ( $z = 1.88$  m) における  $n_e$ ,  $T_e$  の中性ガス圧依存性を示す。ここで、 $z$  は陽極からの距離、 $\Delta P_n$  は下流からガスを導入した際の中性ガス圧の増加分である。図1からHe入射時と比較して、H<sub>2</sub>ガス入射時は中流位置で電子密度が減少した一方、電子温度の下限値は高くなった。過去に分光計測でも同様の結果が得られている [5]。対してD<sub>2</sub>ガス入射時の影響はHeガス導入時と類似しており、電子密度を維持したまま電子温度が減少する傾向が得られており、明らかな同位体効果が表れていた。これはD<sub>2</sub>分子とHe原子の質量が同じであるため、H<sub>2</sub>分子と比べて弾性衝突によるエネルギーロスが大きく電子温度冷却により効果的であることが一つの原因と考えられる。ただし電子密度の導出にはHeのイオン質量を計算に使用しているため、H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>ガス入射時は、0.5~1倍程度過大評価される点には注意が必要である。

なお  $n_e = n_i$ ,  $T_e = T_i$  と仮定すると、 $n_e$  と  $T_e$  の積である電子圧力 ( $P_e$ ) をおよそのプラズマ圧力とみなすことができ、それとHeの実効的な三体再結合レート  $S_{rec}$  の軸方向分布から非接触プラズマのスケール長の指標である、プラズマ圧力の減衰長  $L_{pe}$  の評価が可能となる (図2) [6]。He, H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> の  $L_{pe}$  はそれぞれ21 cm, 26 cm, 16 cm となり、D<sub>2</sub> が最も減衰長が短く、H<sub>2</sub> は最も減衰長の長い非接触プラズマとなることが分かった。H<sub>2</sub> ガス入射による減衰長の広がり Ref. [5] と同様にMARによるものだと考えられるが、D<sub>2</sub> が減衰長を短くする原因については現状分かっておらず、今後さらに調査する必要がある。

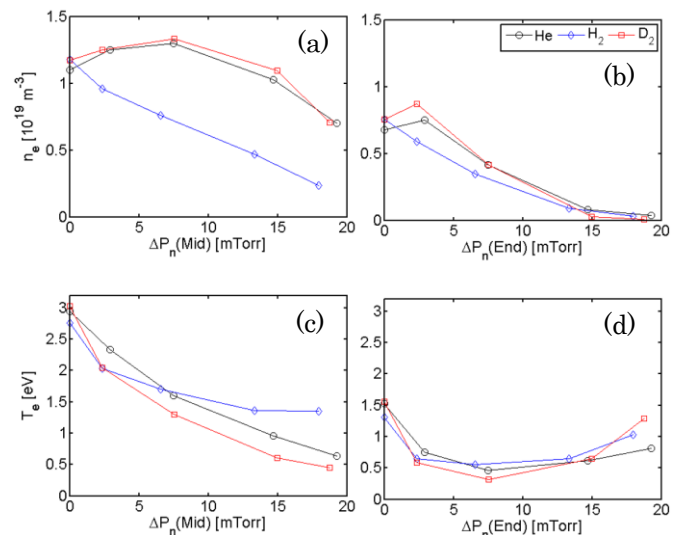


図1 (a)  $n_e$  ( $z = 1.36$  m), (b)  $n_e$  ( $z = 1.88$  m), (c)  $T_e$  ( $z = 1.36$  m), (d)  $T_e$  ( $z = 1.88$  m) の中性ガス圧依存性のガス種比較

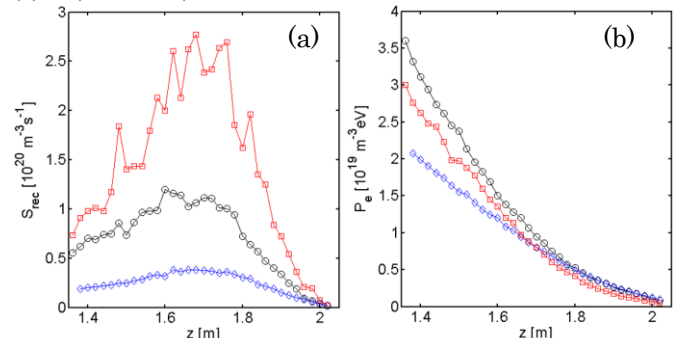


図2 (a)  $S_{rec}$ , (b)  $P_e$  の各ガス種における軸方向分布

- [1] N. Ohno *et al.*, Nucl. Fusion **41** (2001) 1055.  
[2] S. I. Krasheninnikov *et al.*, Phys. Lett. A **214** (1996) 285-291.  
[3] R. Perillo *et al.*, Nucl. Mater. Energy **19** (2017) 87-93.  
[4] Y. Hayashi *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **59** (2019) e201800088.  
[5] D. Nishijima *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **44** (2002) 597.  
[6] H. Tanaka *et al.*, Nucl. Mater. Energy **25** (2020) 100812.