

第20回若手科学者による
プラズマ研究会

直線型装置を用いたダイバータ模擬実験と 非接触プラズマの反応素過程に関する研究

筑波大 プラズマ研究センター
飯島 貴朗

1. 核融合炉でのダイバータの役割と課題

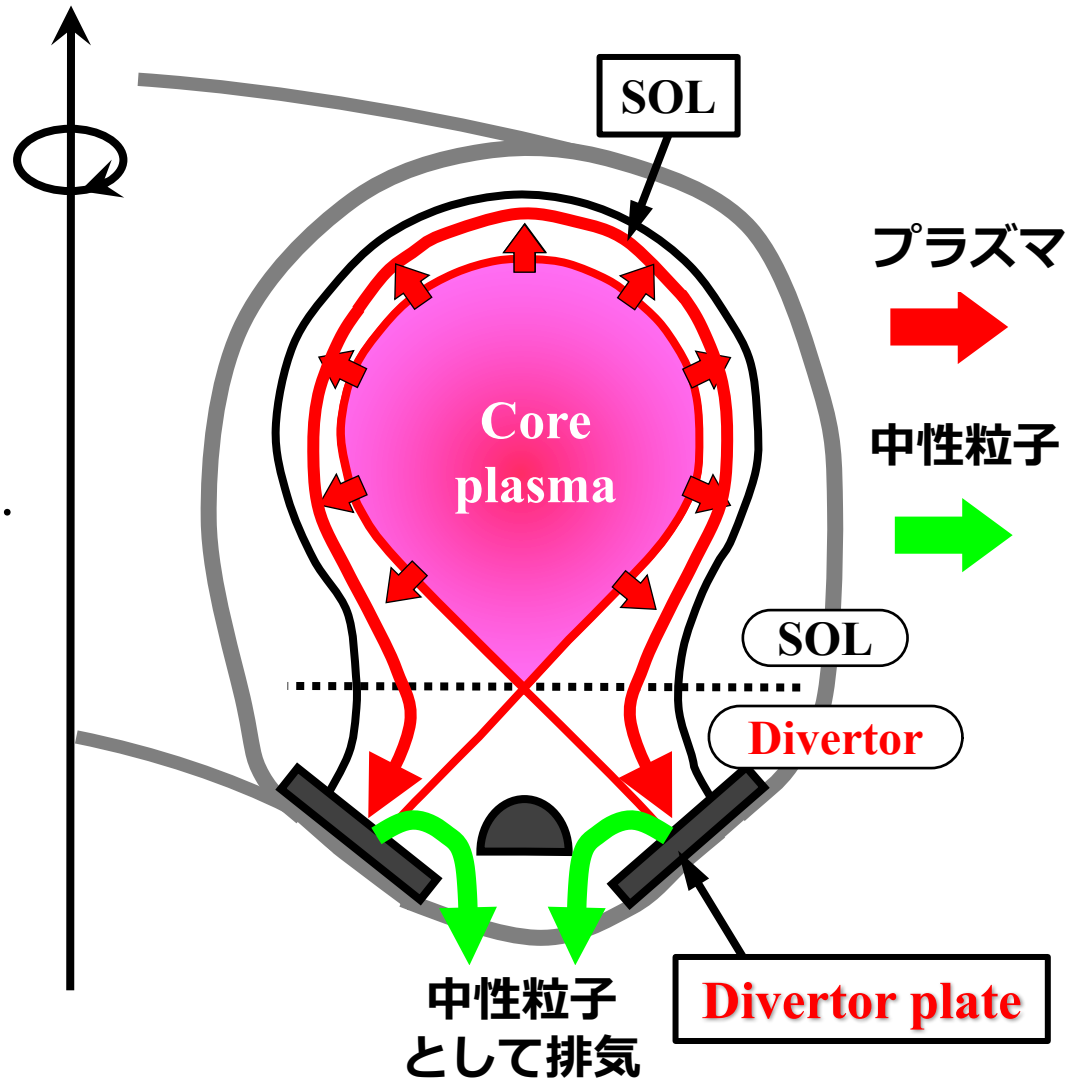
炉心プラズマの性能を維持するには、ダイバータによる熱・粒子除去が重要となる。

→ 炉心プラズマからの流出エネルギーは、ITERで100 MW，原型炉で500 MWを超えると予測される。



ITERのストライク点近傍では、定常時で10 MWm⁻²，非定常時で20 MW/m²。

許容熱負荷は10 MW/m²。



体積再結合による非接触プラズマの生成が必要不可欠。

2. 非接触プラズマの生成

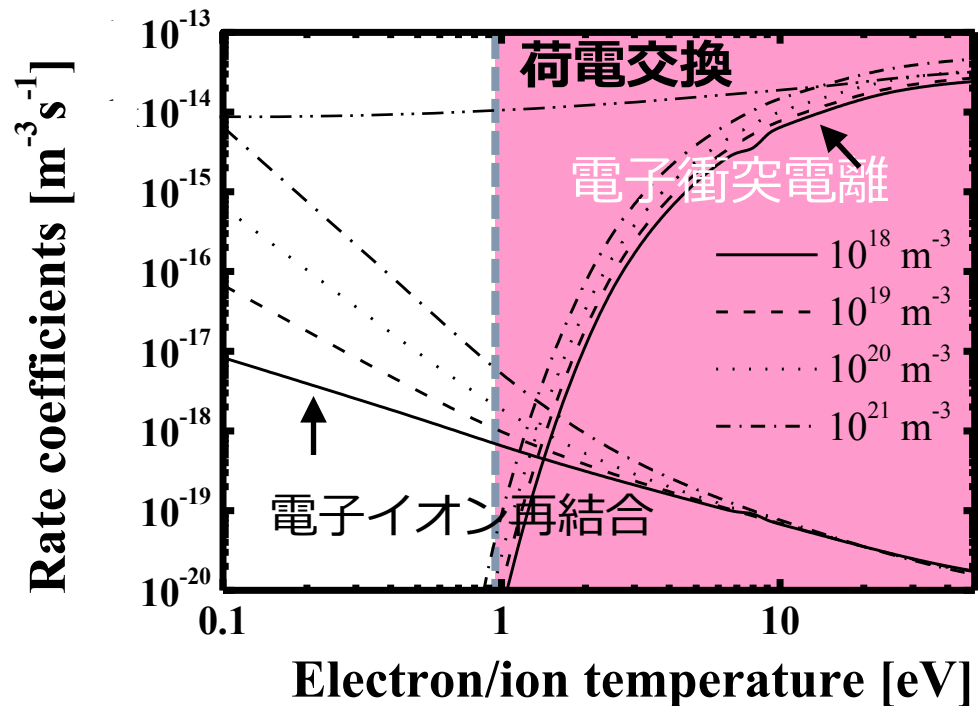
ダイバータプラズマに中性粒子を導入

荷電交換 : $A^+ + B \rightarrow A + B^+$

電子衝突電離 : $A + e \rightarrow A^+ + 2e$

→ 電離過程により 電子温度の低下
電子密度の増加

水素原子の実効的電離・再結合レート



2. 非接触プラズマの生成

ダイバータプラズマに中性粒子を導入

荷電交換 : $A^+ + B \rightarrow A + B^+$

電子衝突電離 : $A + e \rightarrow A^+ + 2e$

→ 電離過程により 電子温度の低下
電子密度の増加

電子温度が十分に減少 ($< 1\text{eV}$)

電子イオン再結合 :

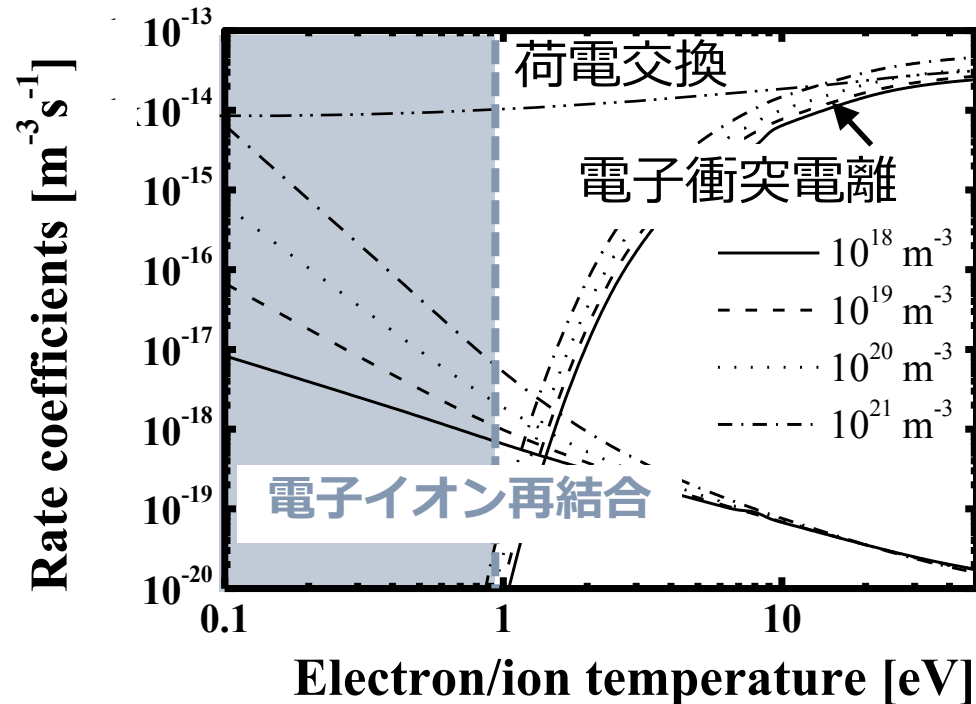
$A^+ + e \rightarrow A + h\nu$ (放射再結合)

$A^+ + e + e \rightarrow A + e$ (三体再結合)

→ プラズマの冷却 (非接触プラズマの生成)

再結合反応によりプラズマがガス化し、プラズマがダイバータ板から離れる非接触プラズマが生成される。

水素原子の実効的電離・再結合レート



3. 核融合装置でのダイバータ研究

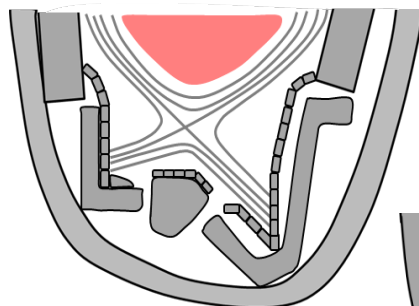
原型炉では、ITERより5-6倍ほど大きいエネルギーが炉心プラズマから放出され、ダイバータへと流入することとなる。



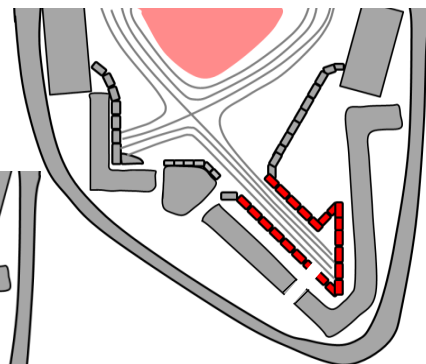
デタッチプラズマがより生成しやすいダイバータ形状が求められている。

先進的ダイバータ

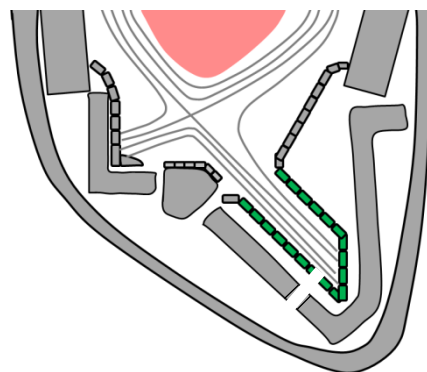
V字ダイバータ
(ITER, 従来型)



バッフル付きロングレッグ
ダイバータ



ロングレッグ
ダイバータ



- 十分なレッグ長をとり、冷却領域を確保
- 中性ガスや不純物の逆流を抑制

4. 先進的ダイバータ構造とその特徴

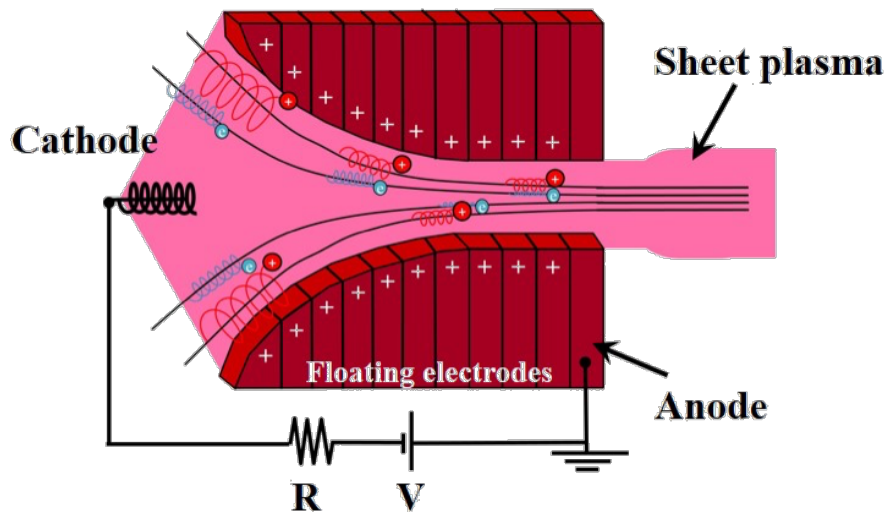
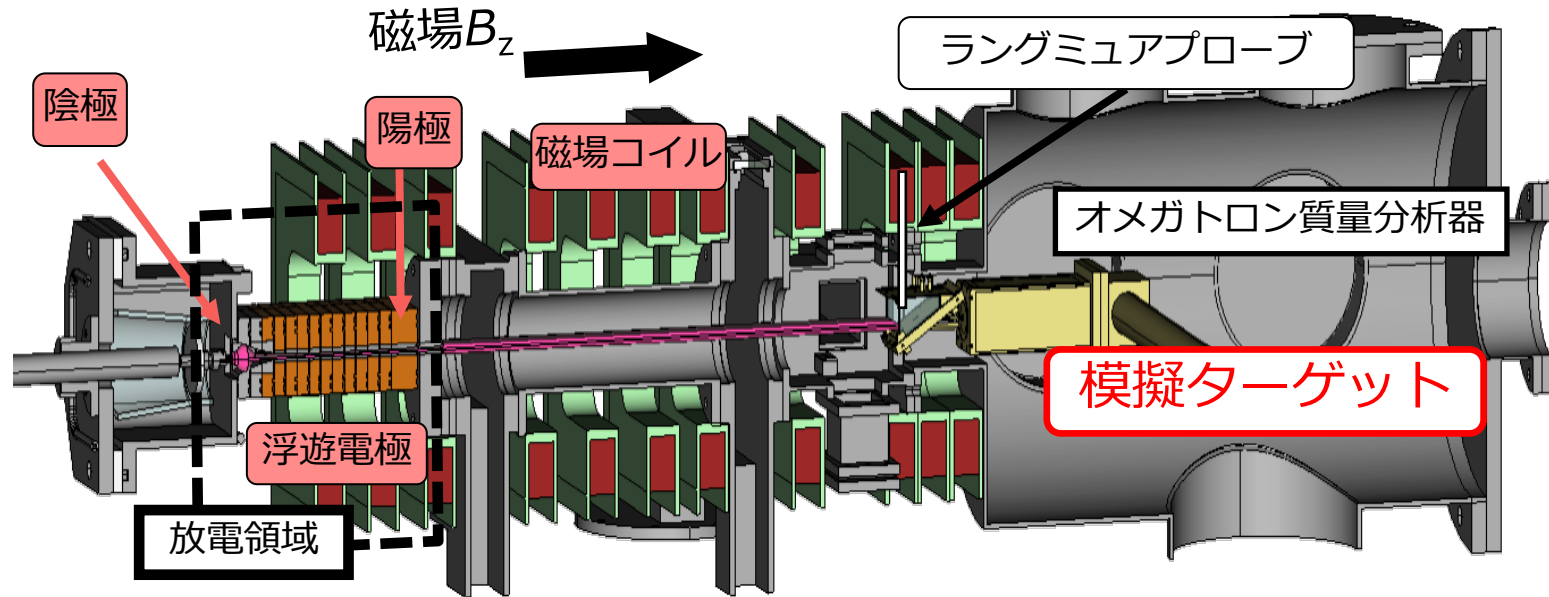
先進的ダイバータ構造の種類と効果

ダイバータ構造	構造の簡易さ	非接触プラズマ生成	逆流防止	熱負荷低減
V字ダイバータ (ITERで採用, 従来型)	◎	△	△	△
ロングレッグ ダイバータ (先進的)	○	-	-	-
バッフル付きロングレッグ ダイバータ (先進的)	△	-	-	-

先進的ダイバータは、構造が複雑で装置改造が困難であるため、シミュレーション研究が主であり、実験的研究が少ない。

本研究では、直線型ダイバータ模擬装置により、各種ダイバータ構造を模擬したターゲットを用いてデタッチプラズマの反応過程を調べ、先進的ダイバータの有効性を明らかにする

5. ダイバータ模擬実験装置 TPD-Sheet IV



実験条件

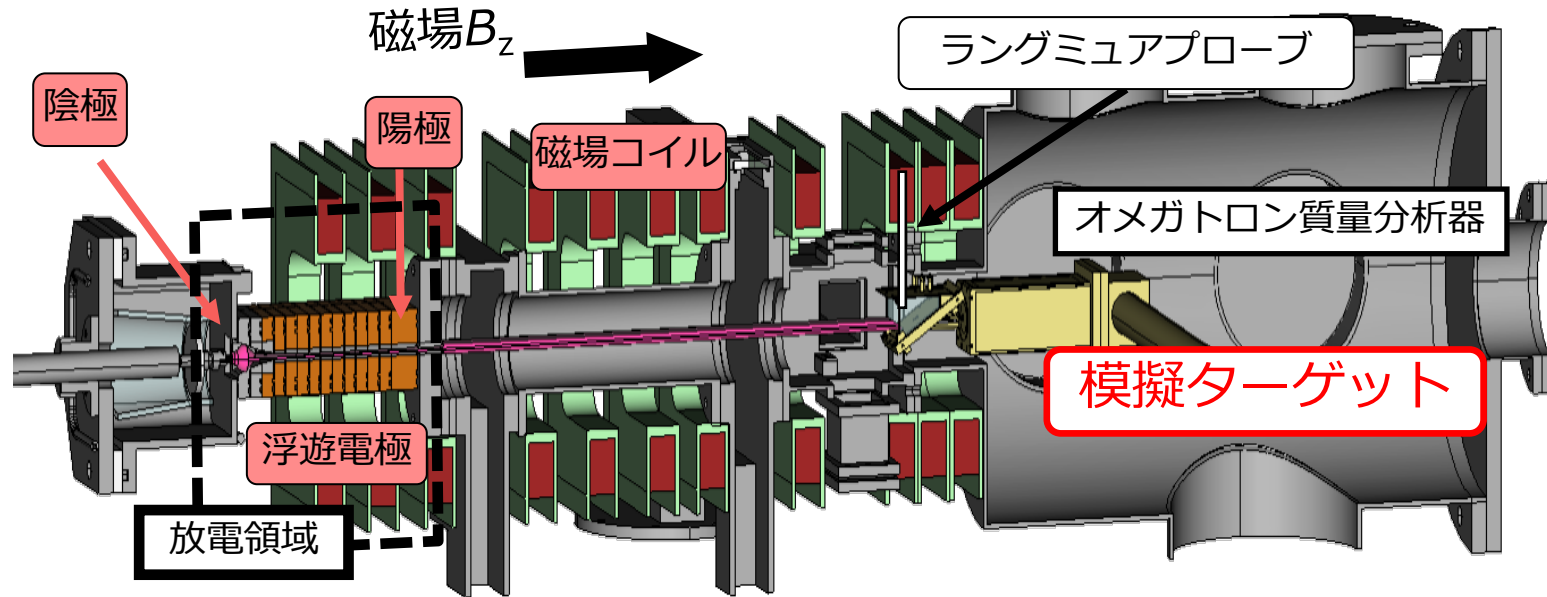
放電電流 : 50 A

放電ガス : 水素

冷却ガス : 水素

最大磁場強度 : 0.1 T

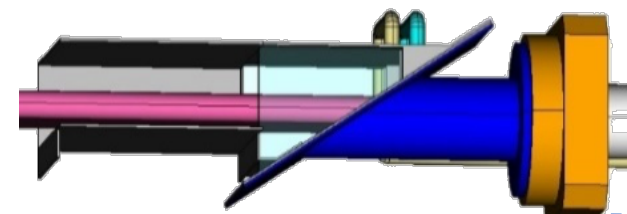
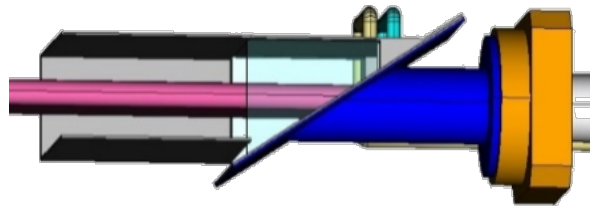
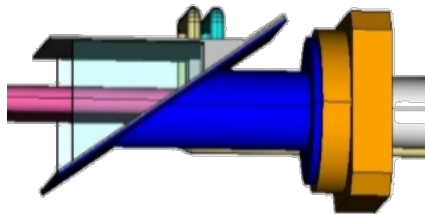
5. ダイバータ模擬実験装置 TPD-Sheet IV



V字ターゲット(従来型)

ロングレグターゲット

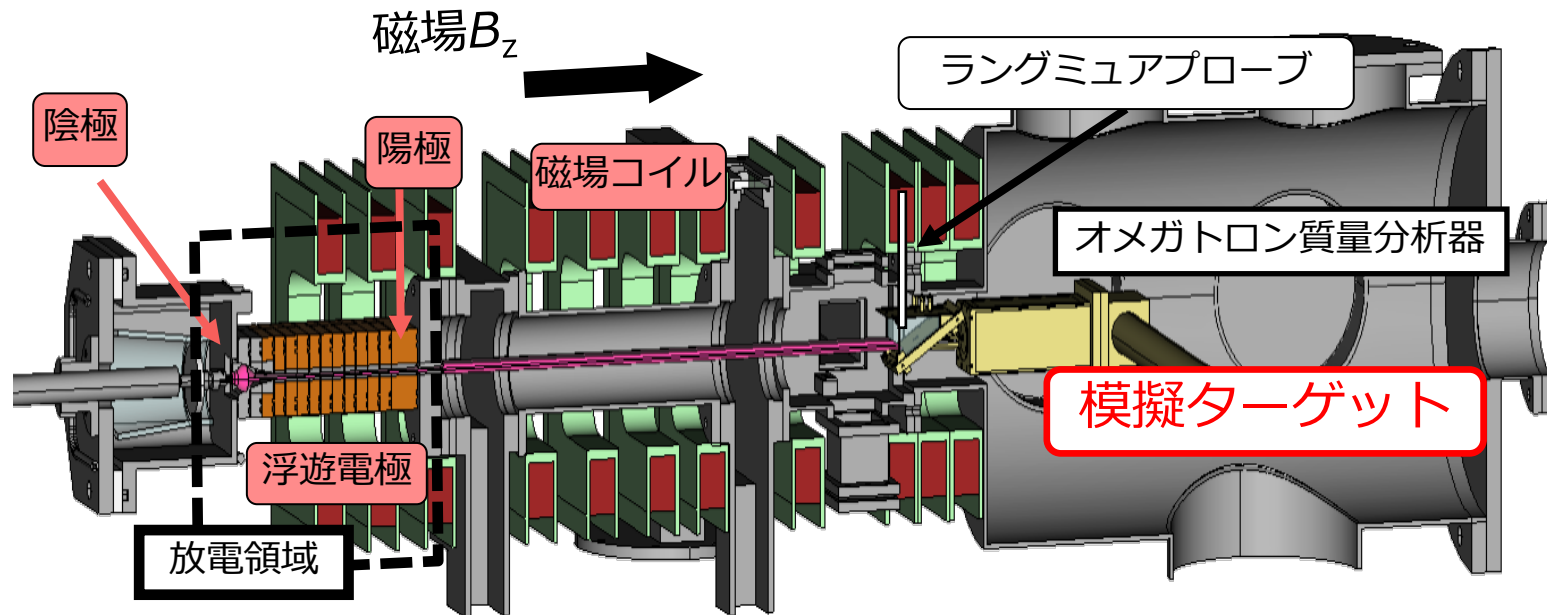
バッフル付き
ロングレグターゲット



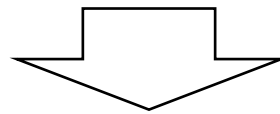
先進的ダイバータを模擬

各ターゲットでの非接触プラズマの反応過程を解明

5. ダイバータ模擬実験装置 TPD-Sheet IV



- 高速スキヤニングプローブ ⇒ ターゲット内部の電子温度・密度
- バラトロン真空計 ⇒ ターゲット内部・外部のガス圧
- オメガトロン型質量分析装置 ⇒ 各種イオン密度
- 真空紫外分光器 ⇒ 水素分子の振動温度 (従来研究)



振動励起分子を含む0Dモデルを構築し、
電離量・再結合量、各種イオン密度を求めた。

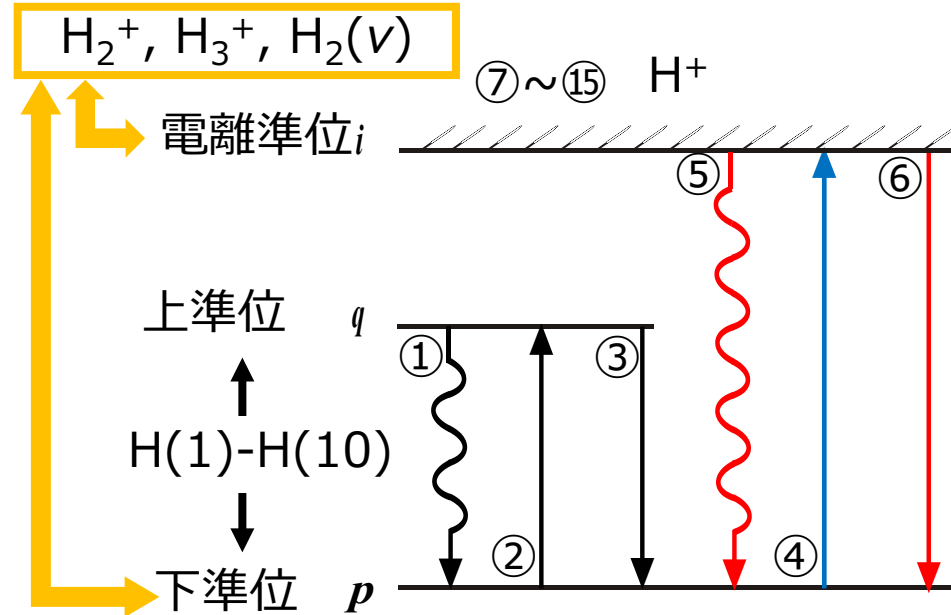
7. 振動励起分子を考慮した0Dモデル

原子過程 電子-イオン再結合 (EIR)

- ① $\text{H}(p) \rightarrow \text{H}(q) + h\nu : (\text{St})$
- ②・③ $\text{H}(p) + e \rightarrow \text{H}(q) + e : (\text{Ex})$
- ④ $\text{H} + e \rightarrow \text{H}^+ + 2e : (\text{eI})$
- ⑤ $\text{H}^+ + e \rightarrow \text{H} + h\nu : (\text{RR})$
- ⑥ $\text{H}^+ + e + e \rightarrow \text{H} + e : (\text{TBR})$

分子過程 分子性再結合 (MAR)

- ⑦ $\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}^+ + e : (\text{eD2})$
- ⑧ $\text{H}_3^+ + e \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{H} + e : (\text{eD3})$
- ⑨ $\text{H}_2 + e \rightarrow \text{H}_2^+ + 2e : (\text{eI2})$
- ⑩ $\text{H}_2(v) + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + 2e : (\text{eDI})$
- ⑪ $\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{H}^+ + 2e : (\text{eDI2})$
- ⑫ $\text{H}_2(v) + \text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{H} : (\text{CNV})$
- ⑬ $\text{H}_2^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^+ + \text{H} : (\text{CNV2})$
- ⑭ $\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H}(p) + \text{H} : (\text{DR2})$
- ⑮ $\text{H}_3^+ + e \rightarrow 3\text{H} \text{ or } \text{H}_2 + \text{H} : (\text{DR3})$



従来のモデルに H_2^+ , H_3^+ , $\text{H}_2(v)$ の振動励起分子の介在する反応過程を新たに追加

7. 振動励起分子を考慮した0Dモデル

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(p)}{\partial t} = & \sum_{q < p}^{20} C(q, p) n_e n(q) \\ & - \left[\left\{ \sum_{q < p}^{20} F(q, p) + \sum_{q > p}^{20} C(p, q) + S(p) \right\} n_e + \sum_{q < p}^{20} A(p, q) \right] n(q) \\ & + \sum_{q > p}^{20} \{ F(q, q) n_e + A(q, p) \} + \{ \alpha(p) n_e + \beta(p) \} n_e n(p) \\ & + S_{DA} n_{H^+} n_{H^-} + S_{DR2} n_{H_2^+} n_e + S_{DR3} n_{H_3^+} n_e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{H^+}}{\partial t} = & S_{eDI} n_e n_{H_2(v)} + S_{eD2} n_e n_{H_2^+} + 2S_{eDI2} n_e n_{H_2^+} + \sum_{p=1}^{20} S(p) n_e n(p) \\ & - \left\{ \sum_p^{20} \alpha(p) n_e + \sum_p^{20} \beta(p) \right\} n_e n_{H^+} + S_{CNV} n_{H_2(v)} n_{H^+} \end{aligned}$$

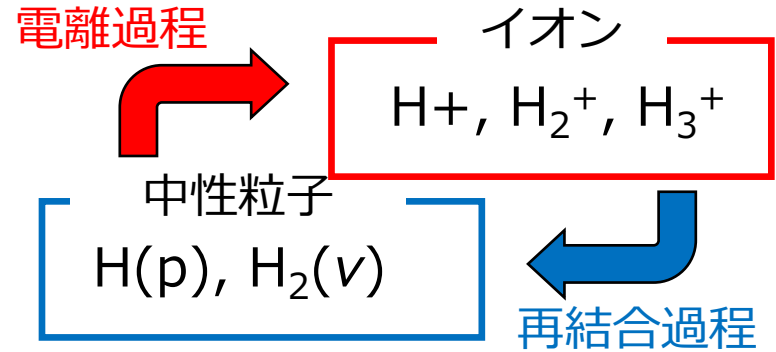
$$\begin{aligned} \frac{\partial n_{H_2^+}}{\partial t} = & S_{eI} n_e n_{H_2(v)} + S_{CNV} n_{H^+} n_{H_2(v)} - S_{eD} n_e n_{H_2^+} - S_{eDI2} n_e n_{H_2^+} \\ & - S_{DR2} n_e n_{H_2^+} - S_{CNV2} n_{H_2(v)} n_{H_2^+} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial n_{H_3^+}}{\partial t} = S_{CNV} n_{H_2(v)} n_{H_2^+} - S_{DR3} n_e n_{H_3^+}$$

H(p), H⁺, H₂⁺, H₃⁺のレート方程式を解き, 各粒子密度を求める.

8. 電離量と再結合量の計算

計算では、励起原子及び分子イオンによる再結合の影響を考慮した。



電離量 P_{Ion}	再結合量 P_{Rec}
$P_{Ion} = \frac{R_{Ion}}{R_{Rec} + R_{Ion}}$	$P_{Rec} = \frac{R_{Rec}}{R_{Rec} + R_{Ion}}$

R_{Ion} : 電離過程のレート
 R_{Rec} : 再結合過程のレート
 $R_{Rec+Ion}$: 電離過程と再結合過程のレート

電離過程のレート

$$\begin{aligned}
 R_{Ion} = & n_{H^+} n_e S_{RR} + n_{H^+} n_e n_e S_{THB} + n_{H_2^+} n_e S_{DR2} + n_{H_2(v)} n_{H^+} S_{CNV} \\
 & + n_{H_2^+} n_{H_2} S_{CNV2} + n_{H_3^+} n_e S_{DR3}
 \end{aligned}$$

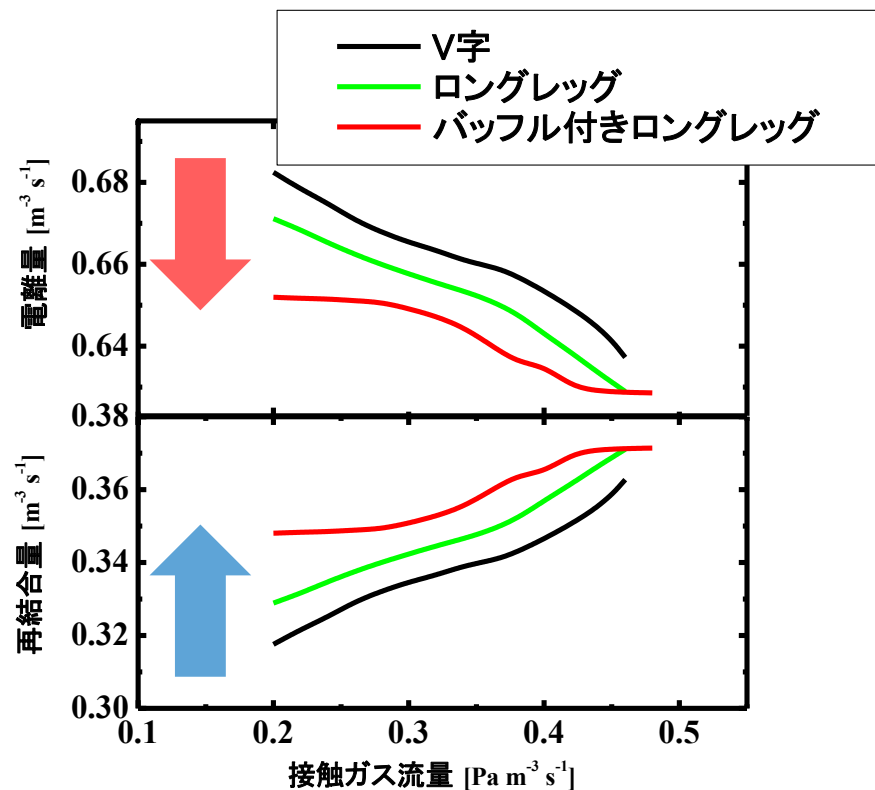
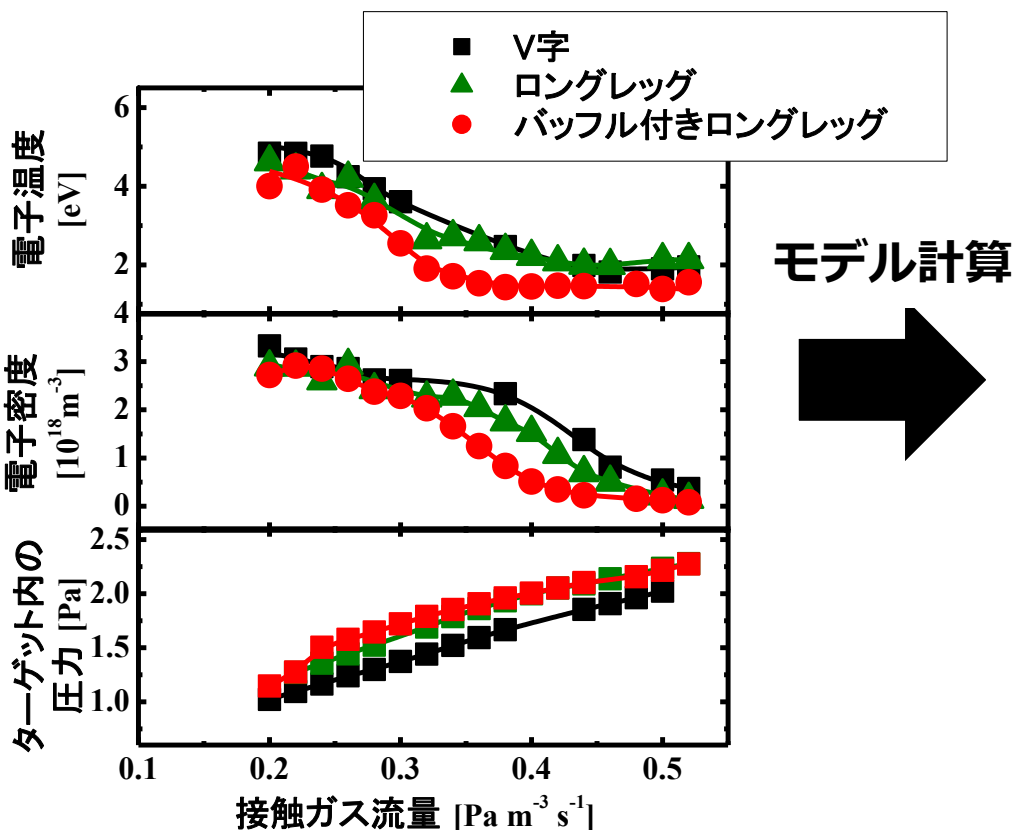
再結合過程のレート

$$\begin{aligned}
 R_{Rec} = & n_{H_2(v)} n_{H^+} S_{CNV} + n_{H_2^+} n_e S_{eD2} + n_{H_2^+} n_e S_{eDI2} + \sum_{p=1} S_{el} n_e n_{H(p)} \\
 & + S_{eDI} n_e n_{H_2} + S_{eI2} n_e n_{H_2} + n_{H_3^+} n_e S_{eD3}
 \end{aligned}$$

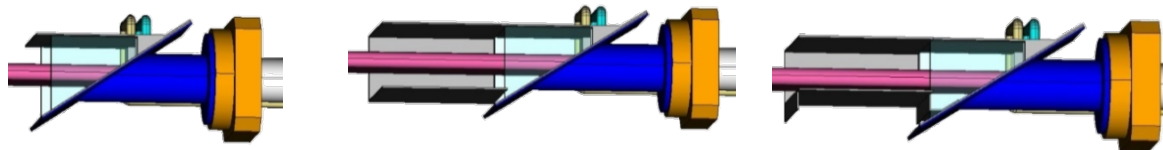
9. 実験結果とモデル計算結果 (ターゲット構造変化に対する電離量・再結合量)

プローブによる電子温度・密度
真空計によるターゲット内圧力

0Dモデルを用いた
電離量・再結合量

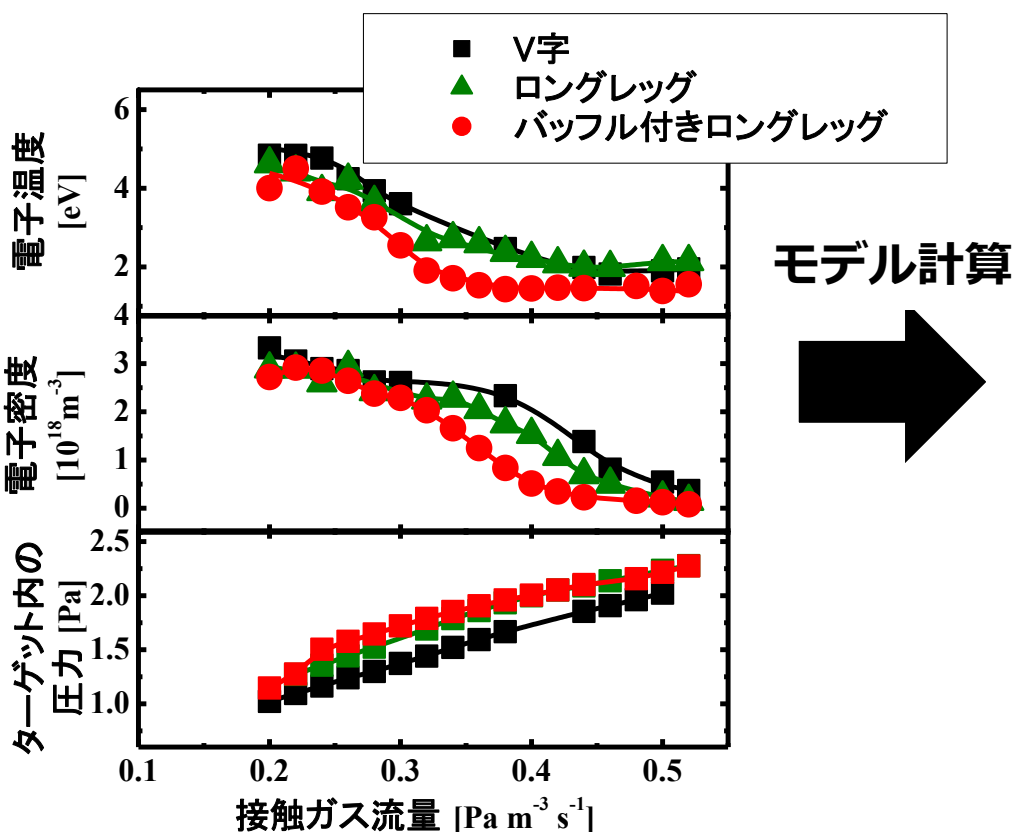


V字ターゲット(従来型) ロングレッグターゲット **バッフル付き
ロングレッグターゲット**

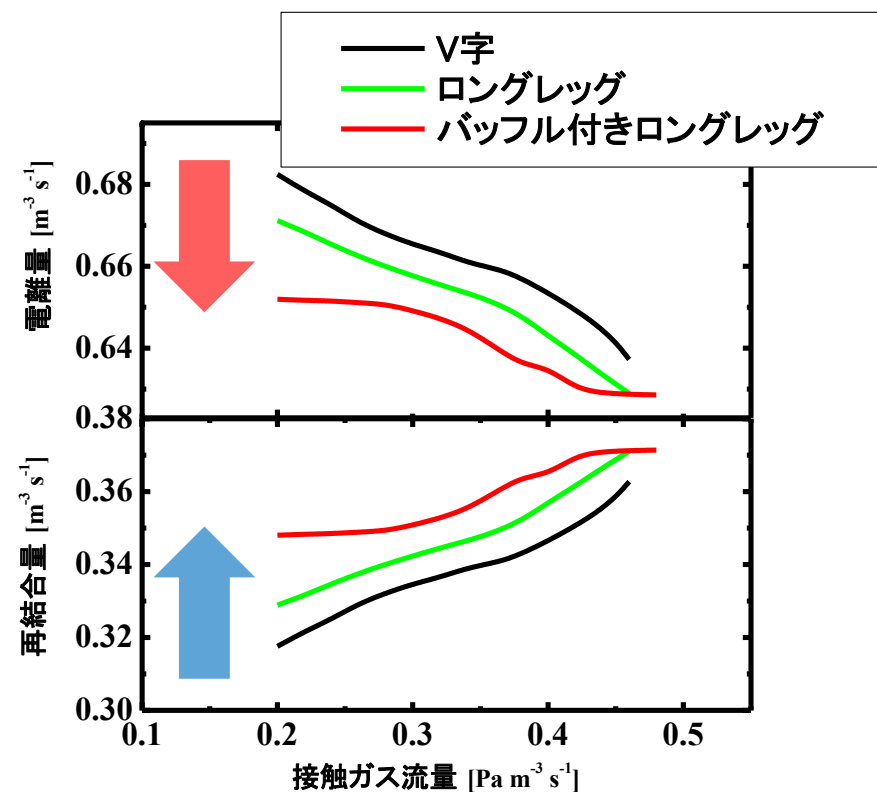


10. 実験結果とモデル計算結果 (ターゲット構造変化に対する電離量・再結合量)

プローブによる電子温度・密度
真空計によるターゲット内圧力



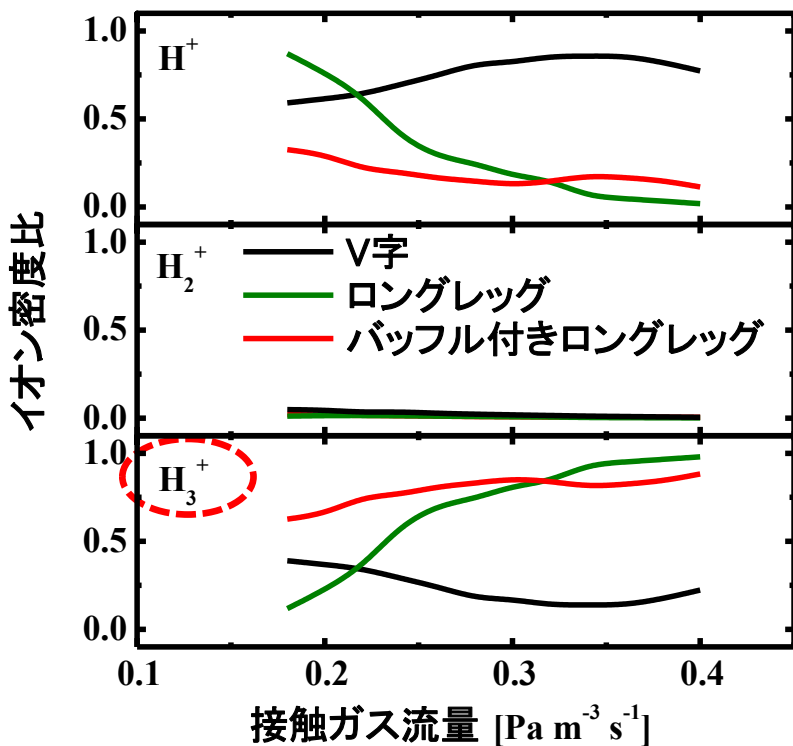
0Dモデルを用いた
電離量・再結合量



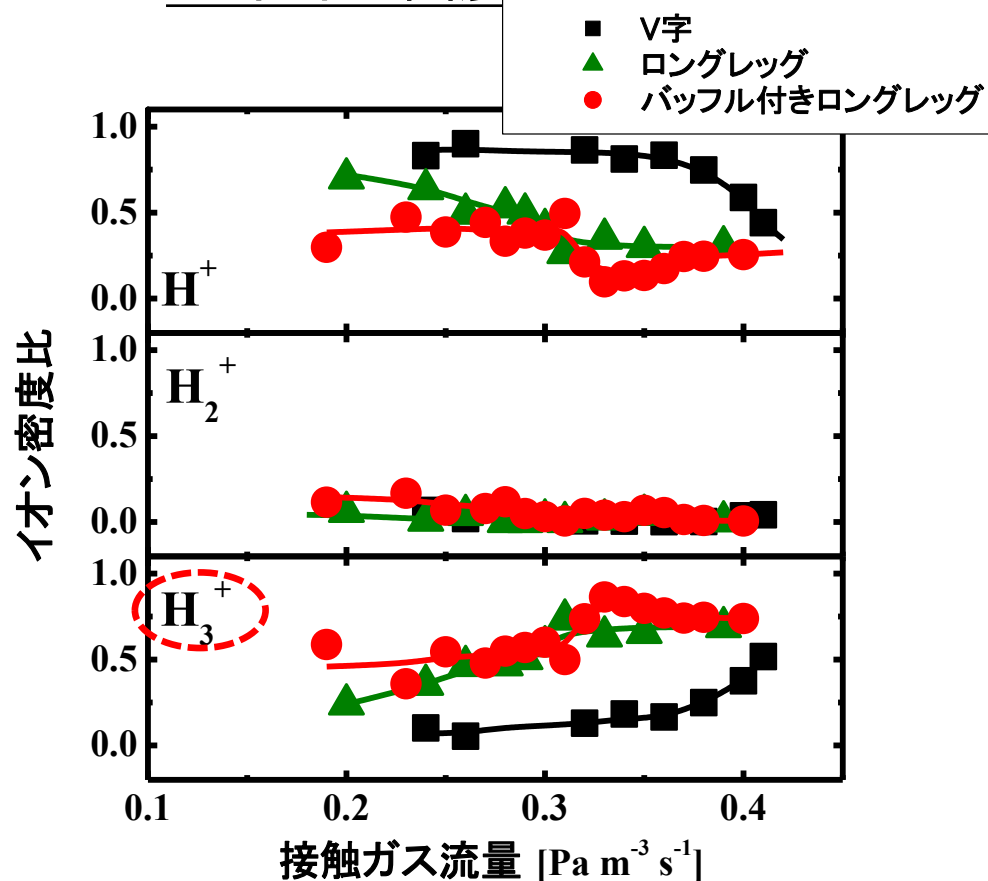
先進的ダイバータでは、**少ない接触ガス流量で再結合量が促進**することをモデル計算で初めて明らかにした

11. モデル計算と実験結果 (各種イオン密度比)

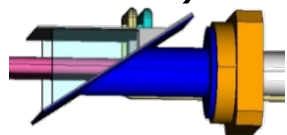
0Dモデルから
算出したイオン密度比



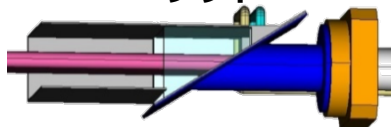
質量分析器から実測し
たイオン密度比



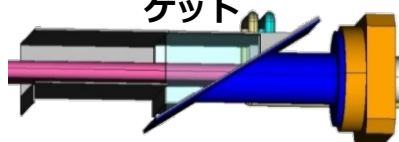
V字ターゲット(従来型)



ロングレッグターゲット

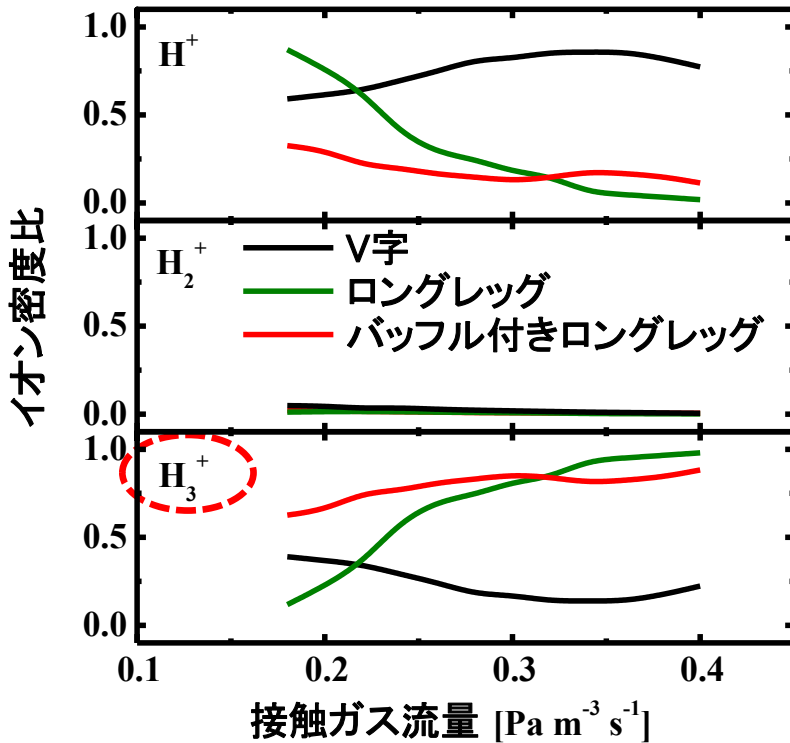


バッフル付き
ロングレッグターゲット

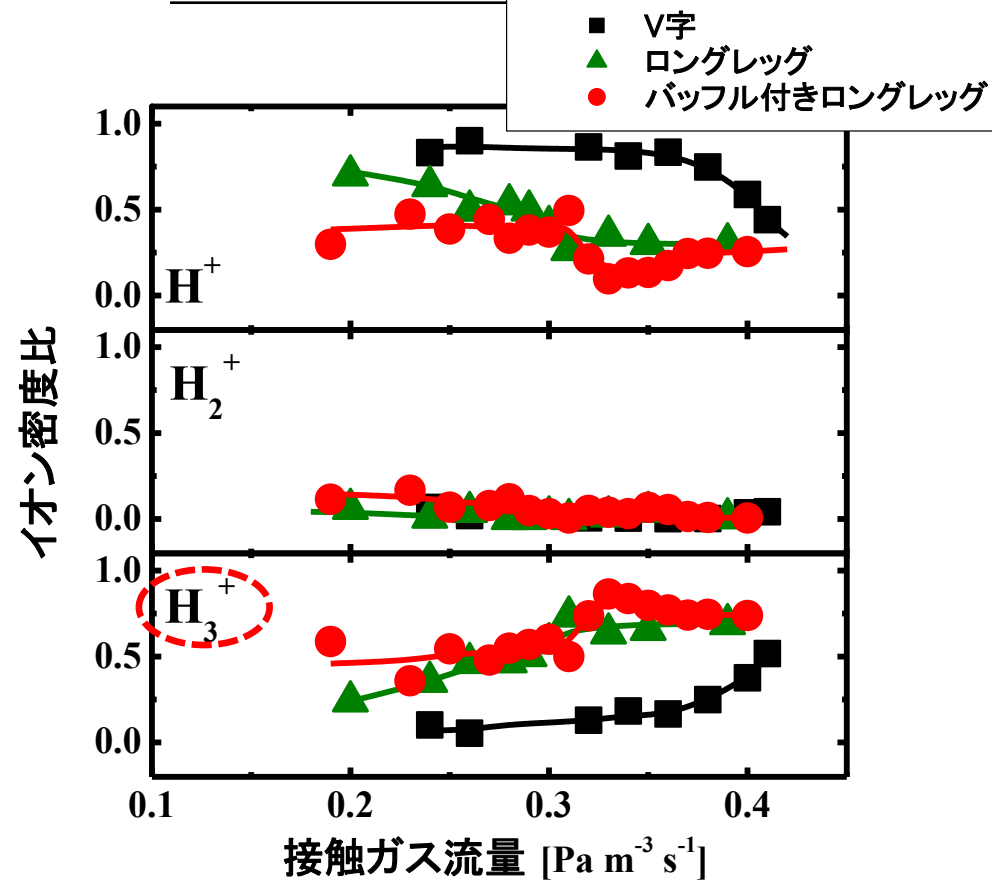


12. モデル計算と実験結果 (各種イオン密度比)

0Dモデルから
算出したイオン密度比



質量分析器から実測し
たイオン密度比

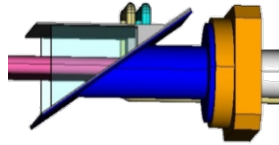


先進的ダイバータでは、分子イオン (H_3^+) を含む再結合 (分子性再結合) の影響が大きいことをモデル計算と実験で初めて明らかにした。

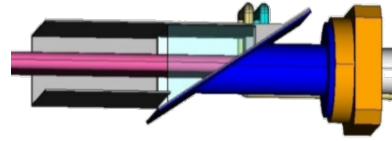
13. まとめ

先進的ダイバータ構造を模擬したターゲットでのデタッチプラズマの反応過程

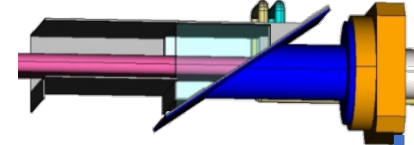
V字ターゲット(従来型)



ロングレグターゲット



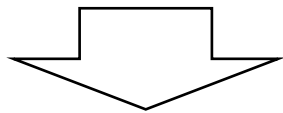
バッフル付き
ロングレグターゲット



先進的ダイバータを模擬

バッフル付きロングレグターゲット

⇒少ない接触ガス流量で再結合量が増加, 分子イオン (H_3^+) を含む再結合 (分子性再結合) が促進



先進的ダイバータの有効性を模擬実験により初めて明らかにした。

