
原子状水素ペアイオンの生成

第13回 若手研究者によるプラズマ研究会

2010.3.10 於 JAEA 那珂研



山口大学 大学院理工学研究科

大原 渡

【共同研究者】

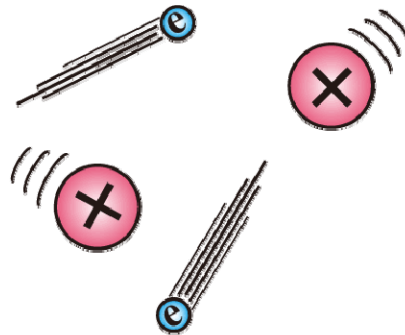
前田 健雄, 田島 慎也 (山口大学)

樋口 剛史, 太田 智喜 (山口大学)

福政 修 (宇部工業高等専門学校)

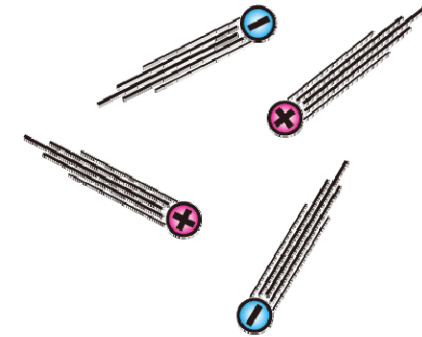
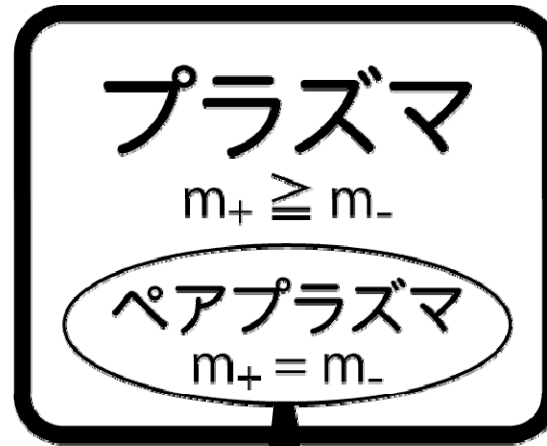
津守 克嘉, 竹入 康彦 (核融合科学研究所)

通常プラズマとペアプラズマ



通常プラズマ

電子と正イオンから成る
 $(m_+/m_e = 10^3 \sim 10^5)$

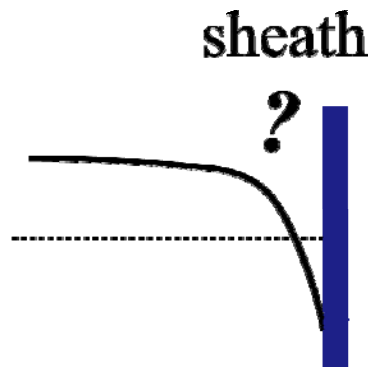


ペアプラズマ

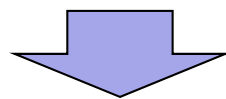
等質量の正負荷電粒子のみから成る
 $(m_+/m_- = 1)$

電子系ペアプラズマ
 (電子-陽電子)
 イオン系ペアプラズマ

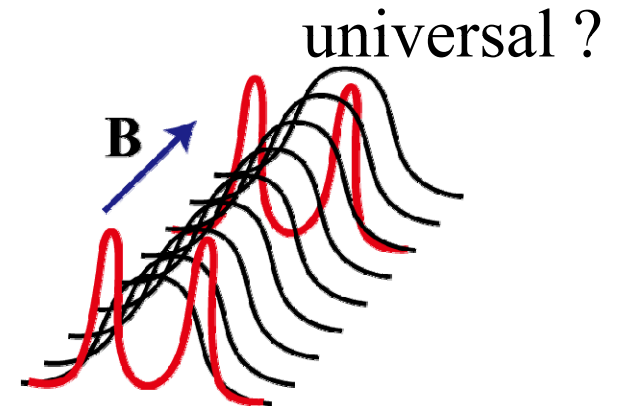
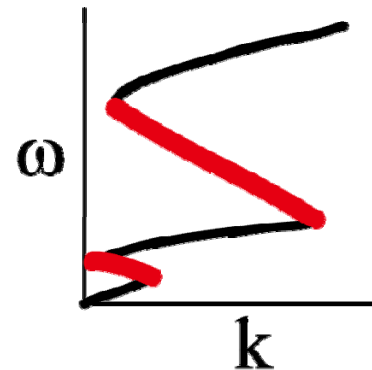
プラズマ物性においてペアプラズマ独特の時空間的対称性が発現する



shielding



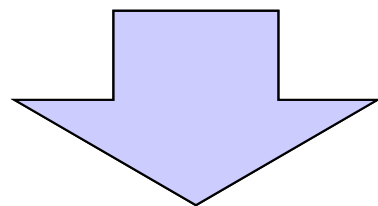
E field



ペアプラズマ研究の流れ

電子-陽電子ペアプラズマ (e^+ , e^-) の問題点

- ペア再結合によりプラズマの寿命が短い.
- 反物質を用いているので直接計測が難しい.



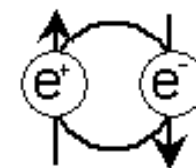
ポジトロニウム (Ps)

ortho-Ps



寿命: 140 ns

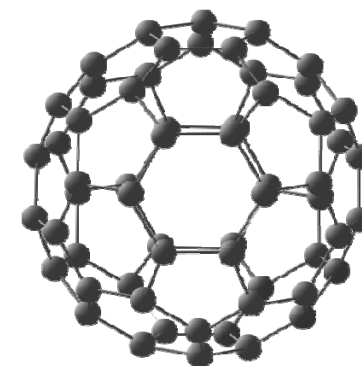
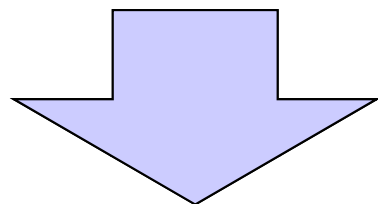
para-Ps



寿命: 0.13 ns

C_{60} ペアイオンプラズマ (C_{60}^+ , C_{60}^-) 実現とプラズマ物性解明

- イオンの応答速度が遅く, 集団現象が低周波の静電波に限定される
- 理論研究では非線形波や電磁波に興味がある



C_{60} : 720 amu



Hydrogen Atom : 1 amu

最も軽いイオン (H^+ , H^-) を用いた

水素ペアイオンプラズマの生成を目指した

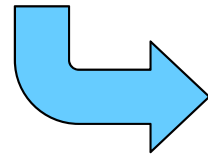
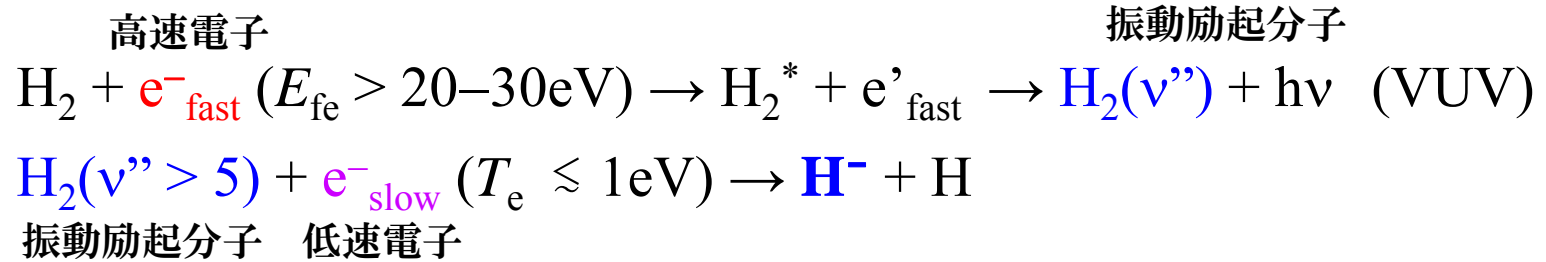
水素ペアイオンプラズマ生成における課題

【課題】

- (1) 効率良く H^- を生成すること
- (2) 同時・等量に H^+ と H^- を生成する必要性

中性粒子入射加熱技術開発（負イオンNBI)において詳細研究

【体積生成】

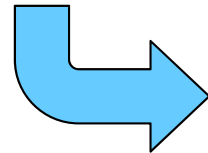


負イオン生成効率あまり高くない

【表面生成】

接触電離

金属表面電子を水素原子へ遷移させて H^- を生成。
仕事関数を低減させて遷移確率を高めるためにCsを使用する。

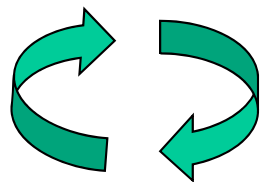
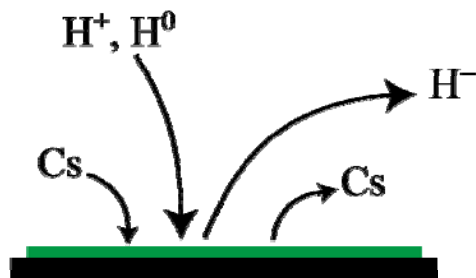


容易に気化して Cs^+ となりペアイオンプラズマにとって不純物になるセシウムは使用できない

接触電離から触媒イオン化へ

イオン化機構：接触電離

負イオン生成効率を高めるためには **仕事関数が低い**ほど良い



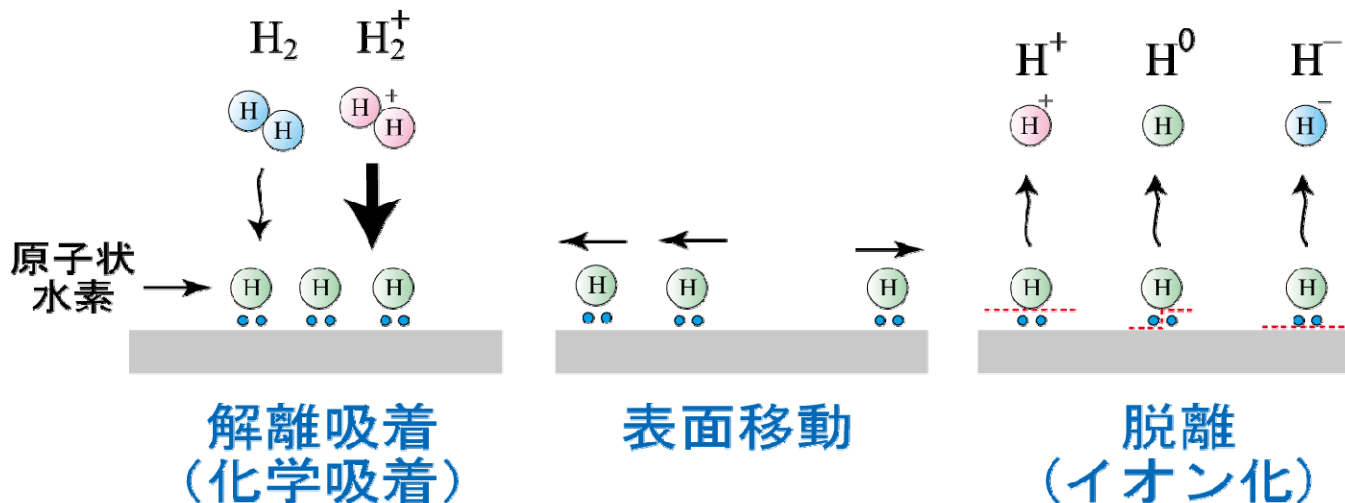
発想の転換

仕事関数が大きくてもよいが、**水素に対して活性**であること

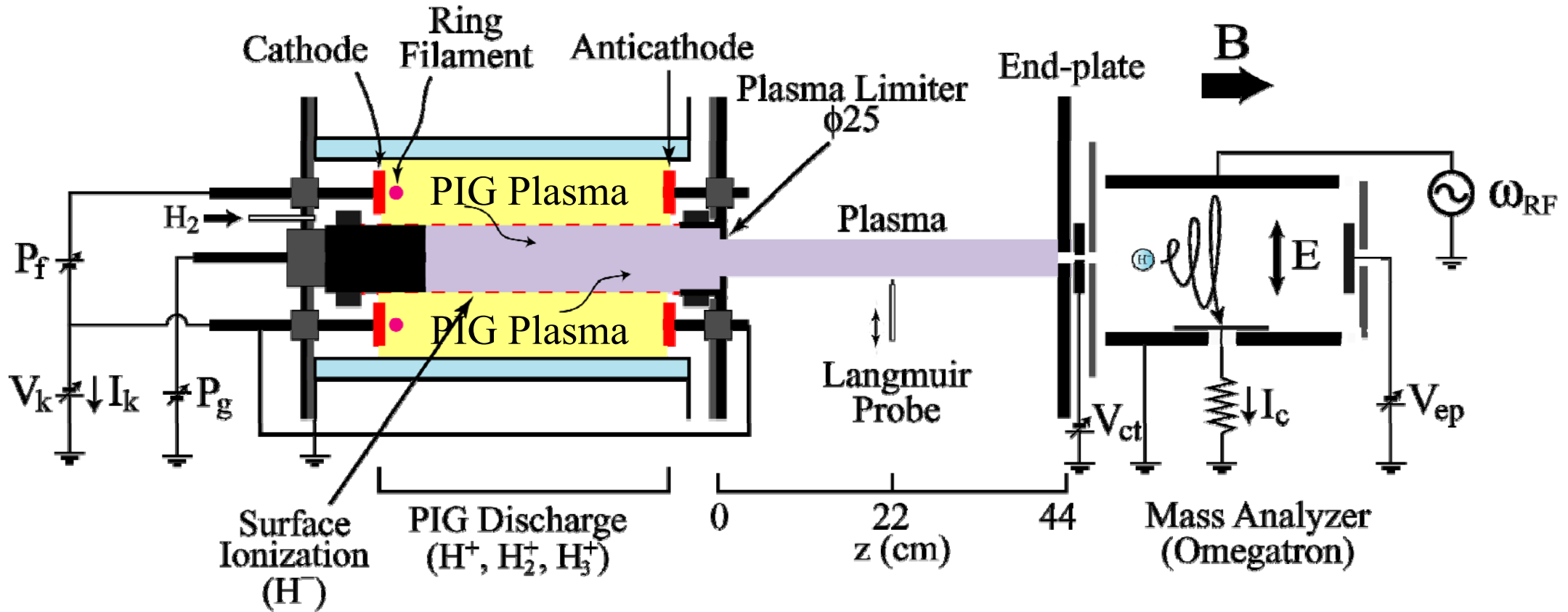
**水素に対して
触媒作用を有する金属**

水素と解離・吸着する
(触媒作用のある)遷移金属群

H 2.20 2.1																	He — —
Li 0.97 1.0	Be 1.47 1.5											B 2.01 2.0	C 2.50 2.5	N 3.07 3.0	O 3.50 3.5	F 4.10 4.0	Ne — —
Na 1.01 0.9	Mg 1.23 1.2											Al 1.47 1.5	Si 1.74 1.8	P 2.06 2.1	S 2.44 2.5	Cl 2.83 3.1	Ar — —
		A			A			B ₁									
K 0.91 0.8	Ca 1.04 1.0	Sc 1.20 1.3	Ti 1.32 1.5	V 1.45 1.6	Cr 1.56 1.6	Mn 1.60 1.5	Fe 1.64 1.8	Co 1.70 1.8	Ni 1.75 1.8	Cu 1.75 1.9	Zn 1.66 1.6	Ga 1.82 1.6	Ge 2.02 1.8	As 2.20 2.0	Se 2.48 2.4	Br 2.74 2.8	Kr — —
Rb 0.89 0.8	Sr 0.99 1.0	Y 1.11 1.2	Zr 1.22 1.4	Nb 1.23 1.6	Mo 1.30 1.8	Tc 1.36 1.9	Ru 1.42 2.2	Rh 1.45 2.2	Pd 1.35 2.2	Ag 1.42 1.9	Cd 1.46 1.7	In 1.49 1.7	Sn 1.72 1.8	Sb 1.82 1.9	Te 2.01 2.1	I 2.21 2.5	Xe — —
Cs 0.86 0.7	Ba 0.97 0.9		Hf 1.23 1.3	Ta 1.33 1.5	W 1.40 1.7	Re 1.46 1.9	Os 1.52 2.2	Ir 1.55 2.2	Pt 1.44 2.2	Au 1.42 2.4	Hg 1.44 1.9	Tl 1.44 1.8	Pb 1.55 1.8	Bi 1.67 1.9	Po 1.76 2.0	As 1.96 2.2	Rn — —
Fr 0.86 0.7	Ra 0.97 0.9																
								B ₂									



拡散型イオン源の概要



PIG-Discharge Region
 $n \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $K_e > 100 \text{ eV}$

Catalyst Grid ($\phi 40$)

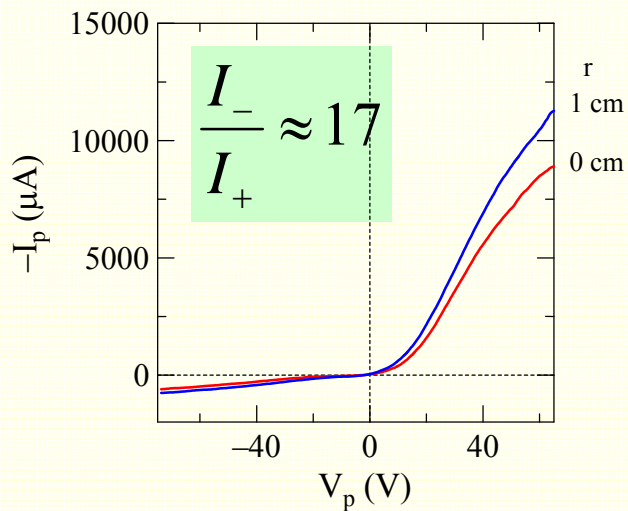
- **Ni** (200 mesh, 0.05ϕ , open area 37%)
 触媒金属

$B = 65 \text{ mT}$, $P = 1.2 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ (H_2 : 20 SCCM)

$I_k \times V_k = 2 \text{ A} \times -140 \text{ V}$

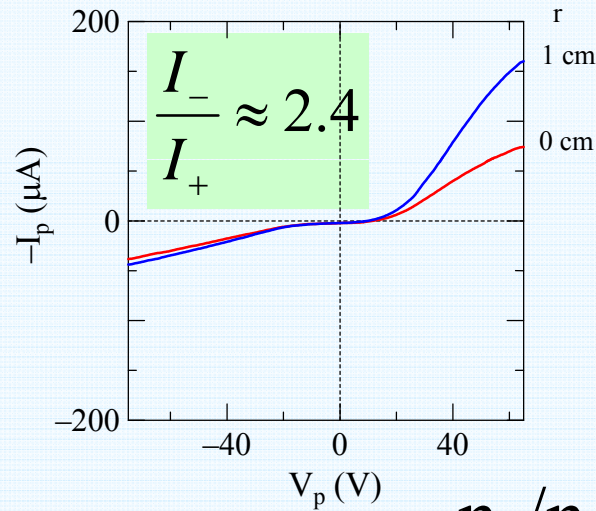
触媒表面における正負イオン生成

$$n_+ \sim 3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$



プローブ特性

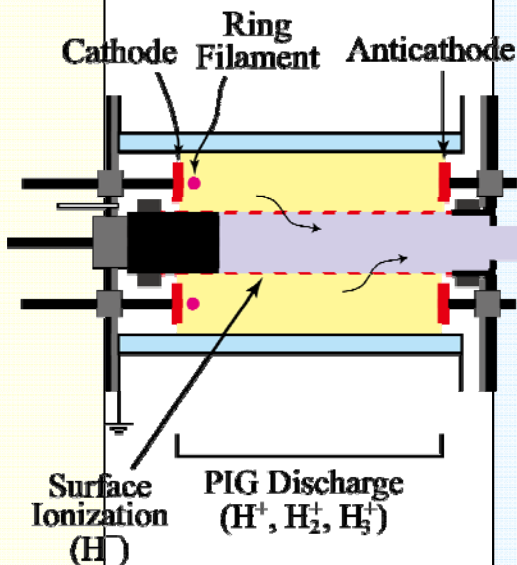
$$n_+ \sim 2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$$



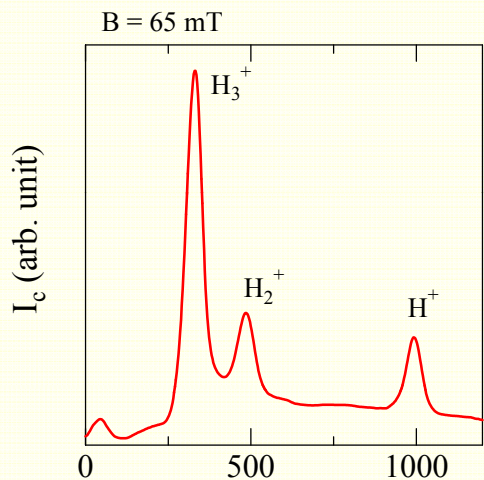
$$n_- / n_+ \sim 60\%$$

触媒グリッド無し

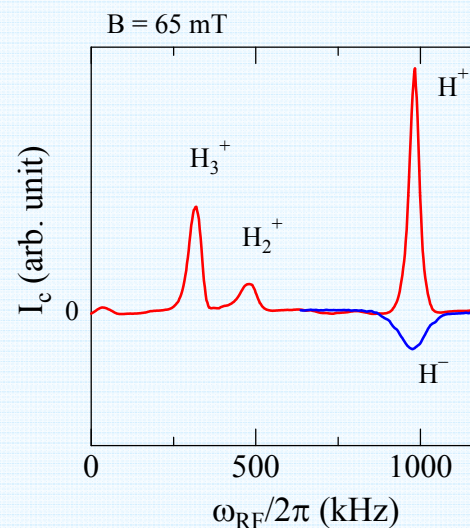
触媒グリッド有り
(Ni 200 mesh)



オメガトロン
質量スペクトル



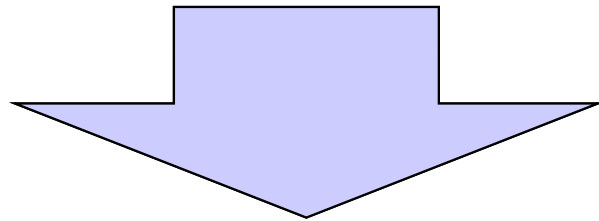
H は観測されない



拡散型イオン源の問題点と改善策

【問題点】

原子状水素正負イオンは生成されたが、
負イオン生成量が不十分なので、
 電子が両極性拡散により透過して、
 下流域に存在する ($n_e : n_- = 4 : 6$)



放電プラズマを
多孔体触媒で一度全て終端する
 (電子, 正イオンは透過させない)

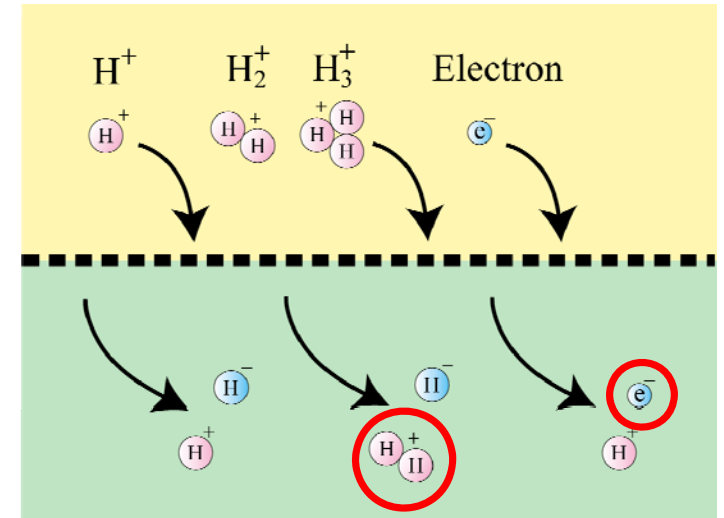
正イオン照射量, 照射エネルギーと
 水素ペアイオン生成量の関係

uniform B



Ni grid

uniform B

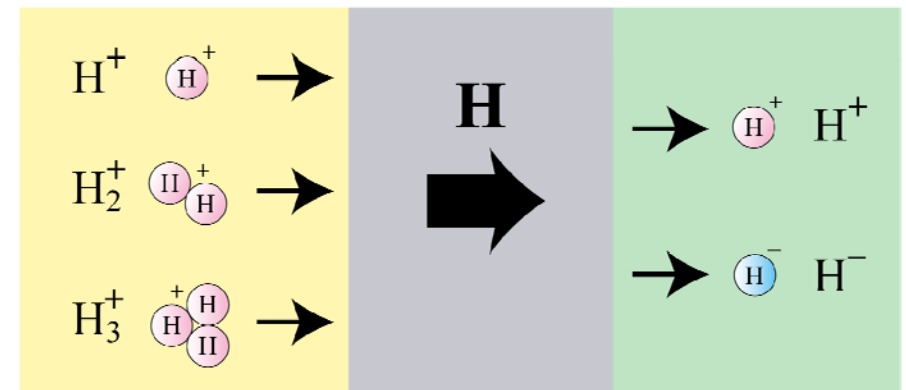


- 分子状正イオンも透過
- 負電荷不足により電子も透過

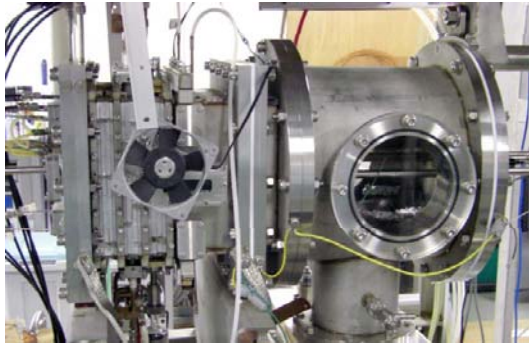
Upstream Plasma

Porous Catalyst

Downstream Plasma



磁気フィルター付直流アーク放電型イオン源の概要



角型真空容器
25 cm × 25 cm

上流域放電プラズマ

$$n_e \sim 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} (P_d = 300 \text{ W})$$

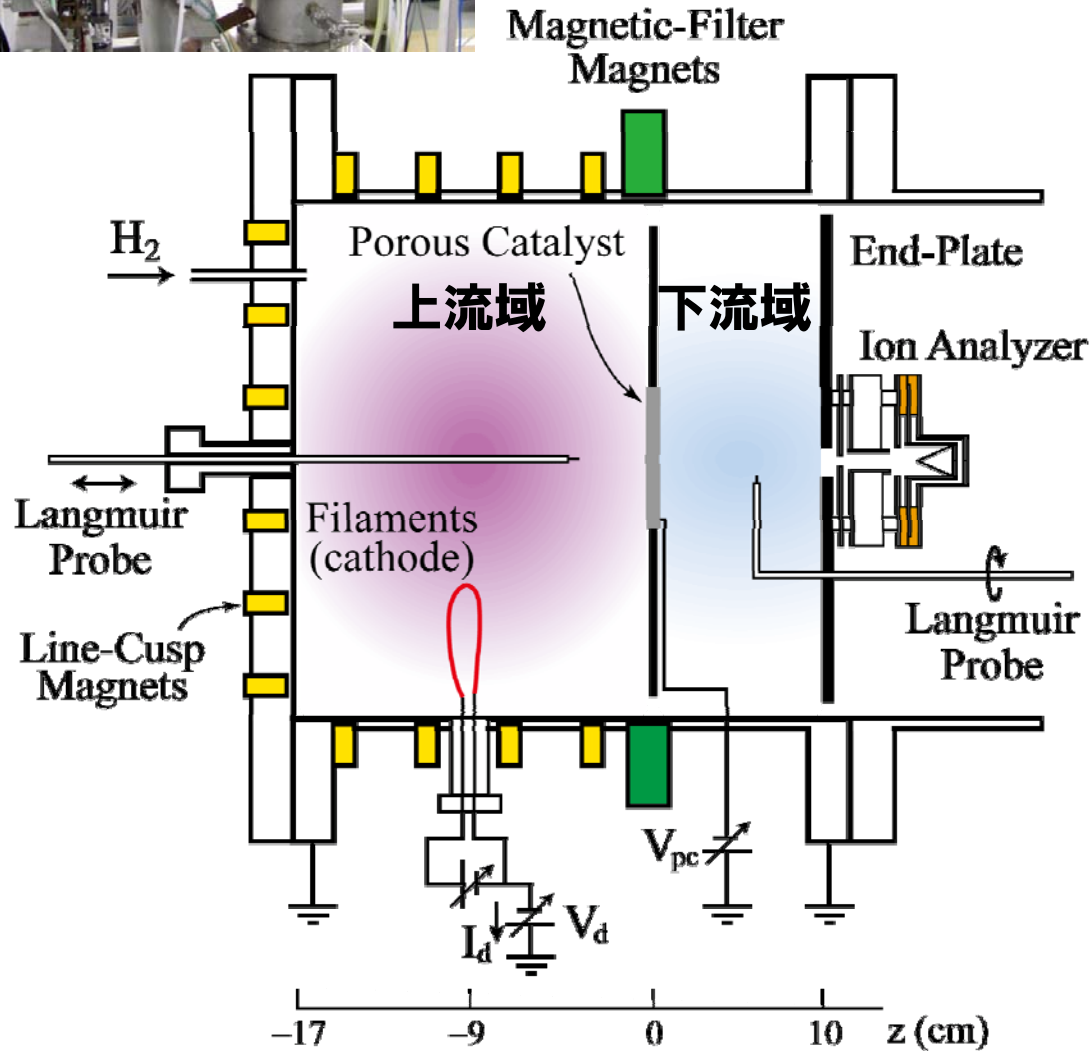
$$T_e \sim 4 \text{ eV}$$

$$\phi_s \sim +9 \text{ V}$$

$$P = 5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$$

Magnetic Filter: $B_{MF} = 0 \sim 15 \text{ mT (center)}$

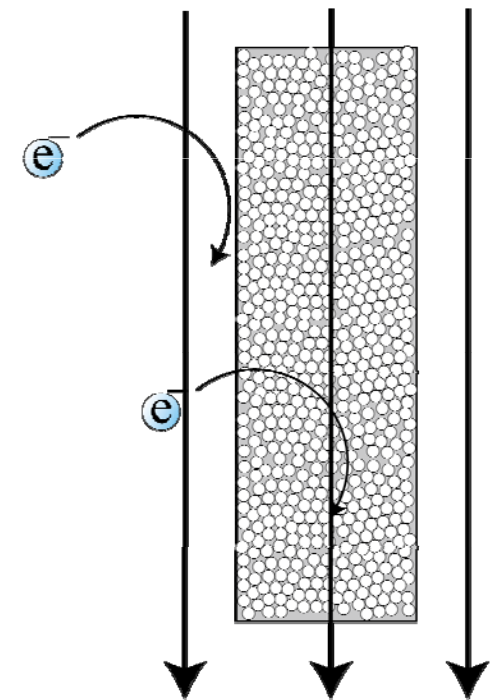
Porous: Ni ($t = 3 \text{ mm}$)



Ni多孔体触媒

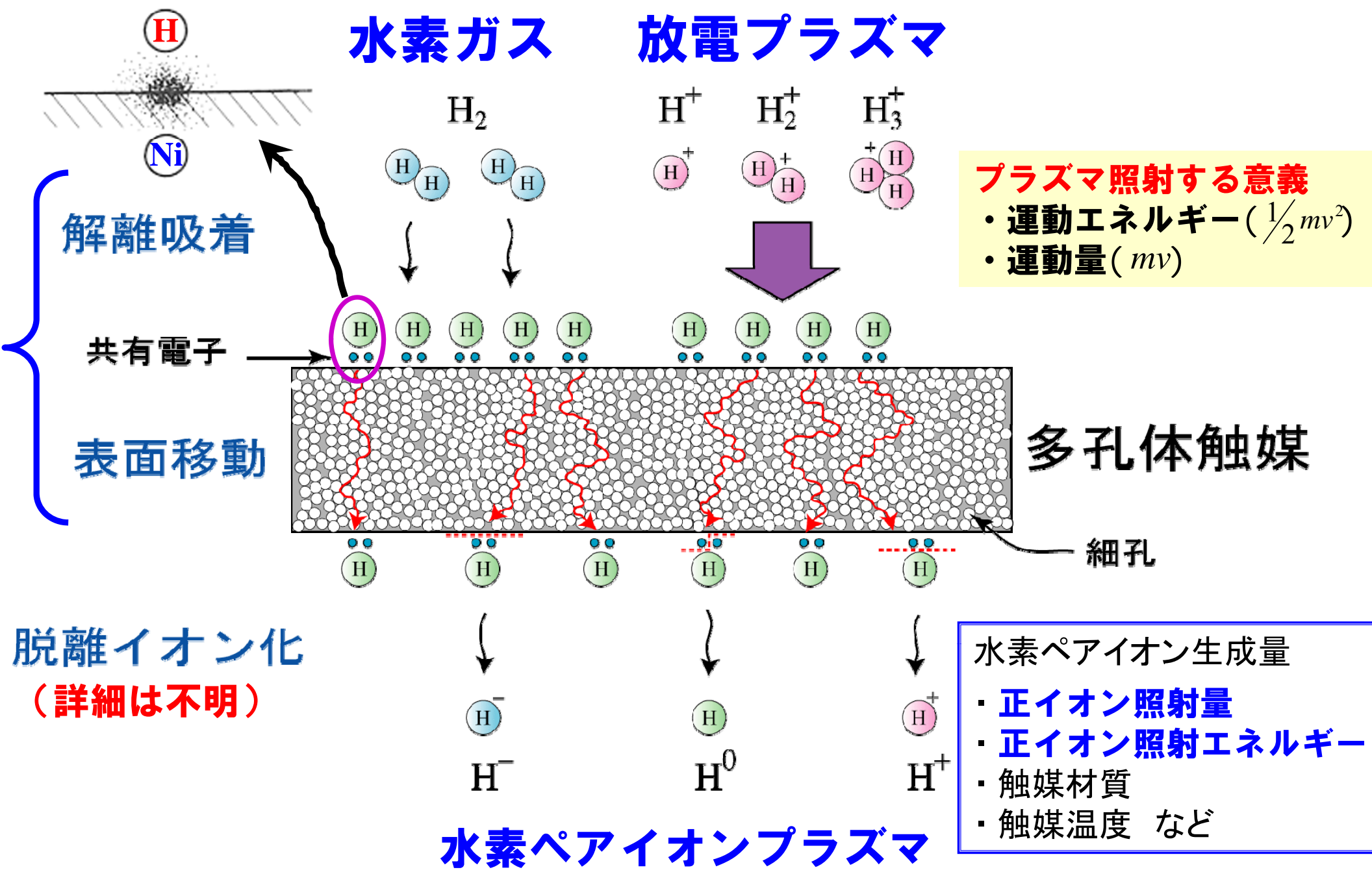


Magnetic Filter



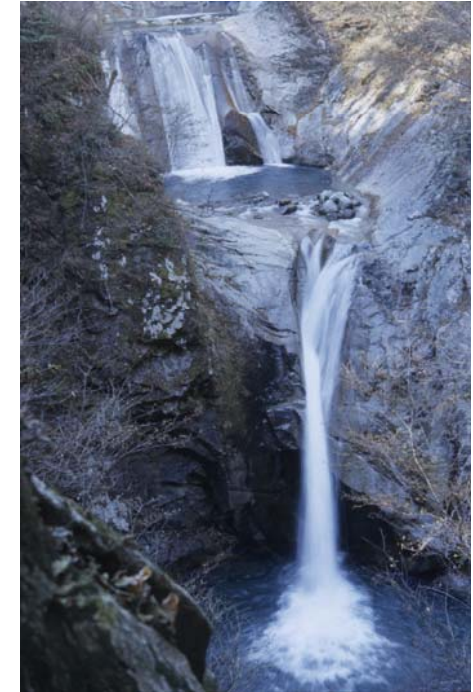
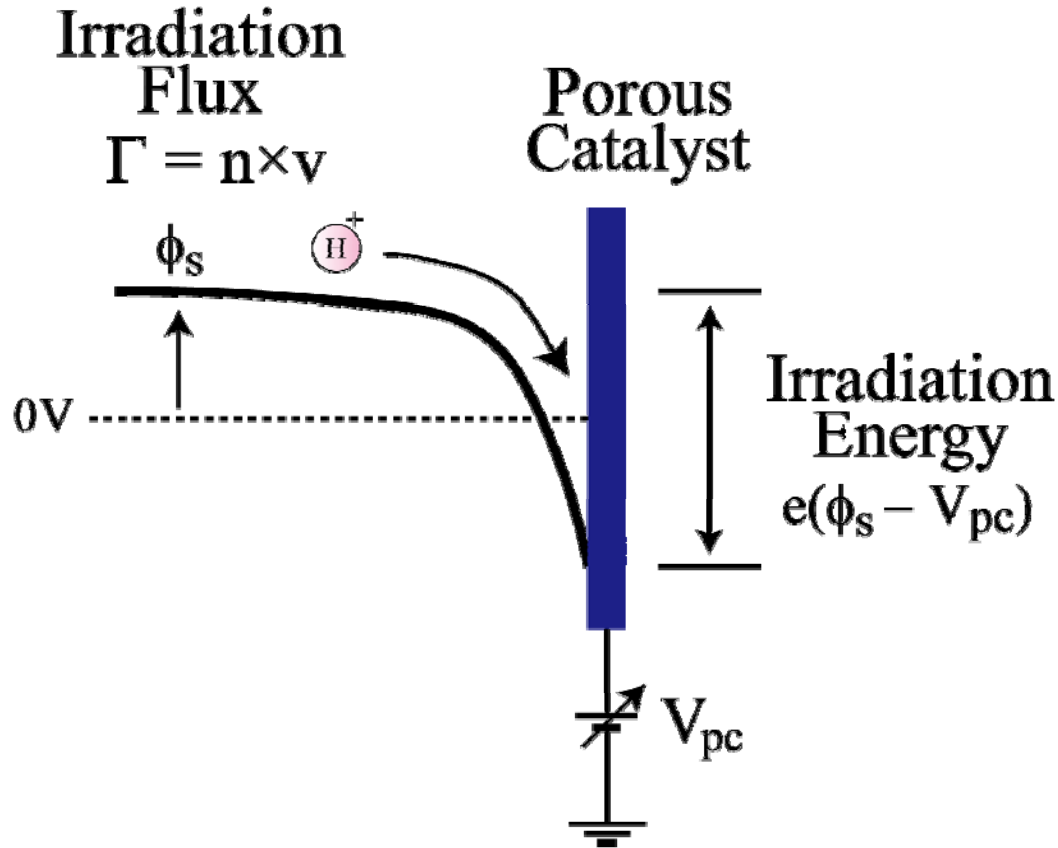
触媒イオン化プロセス

既知



正イオン照射量と照射エネルギーの制御

フラックス一定



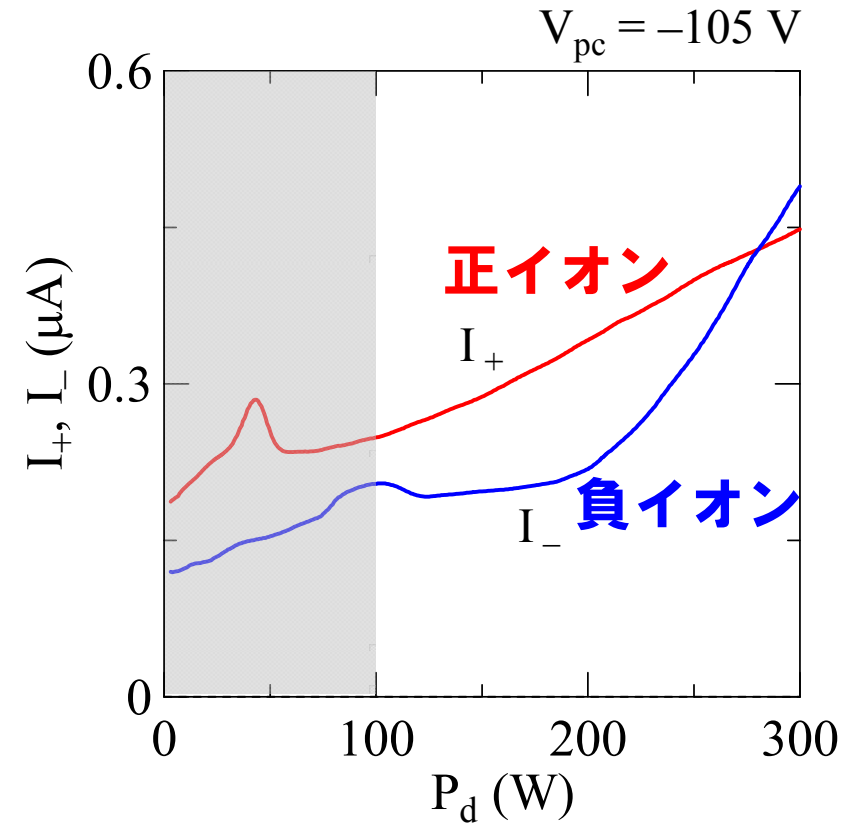
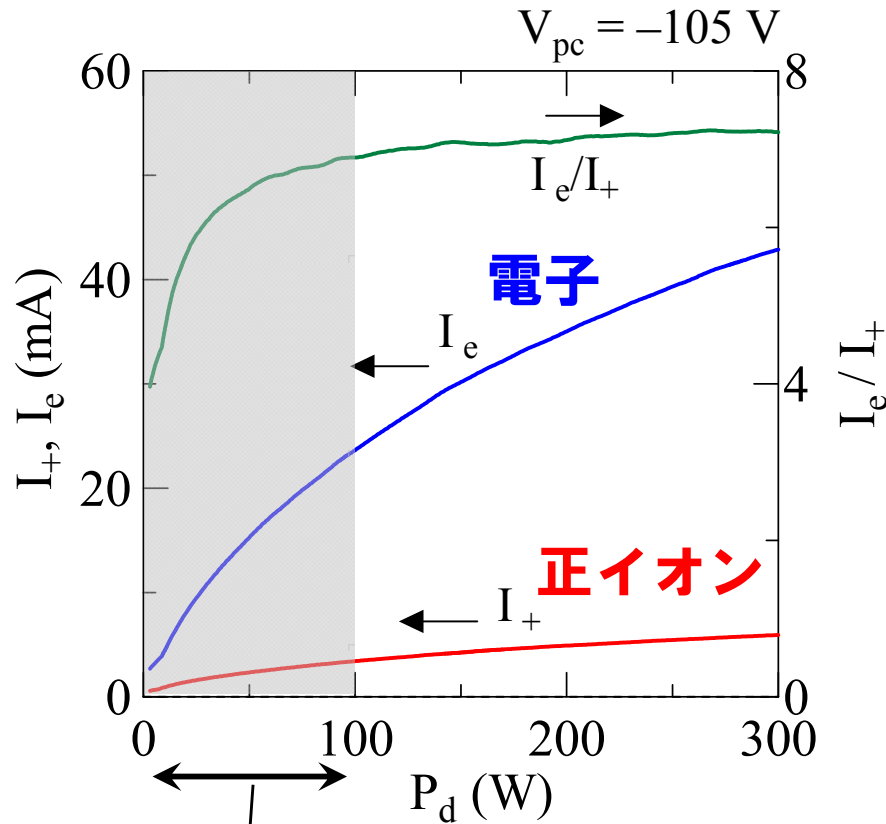
正イオン照射量 $\Gamma = \mathbf{n} \times v$

正イオン照射エネルギー $e(\phi_s - \mathbf{V}_{pc})$ (eV)

正イオン照射量と水素ペアイオン生成量の関係

上流域

下流域



この領域は
各種パラメータが
変化しているので
使えない

正イオン照射量は変化

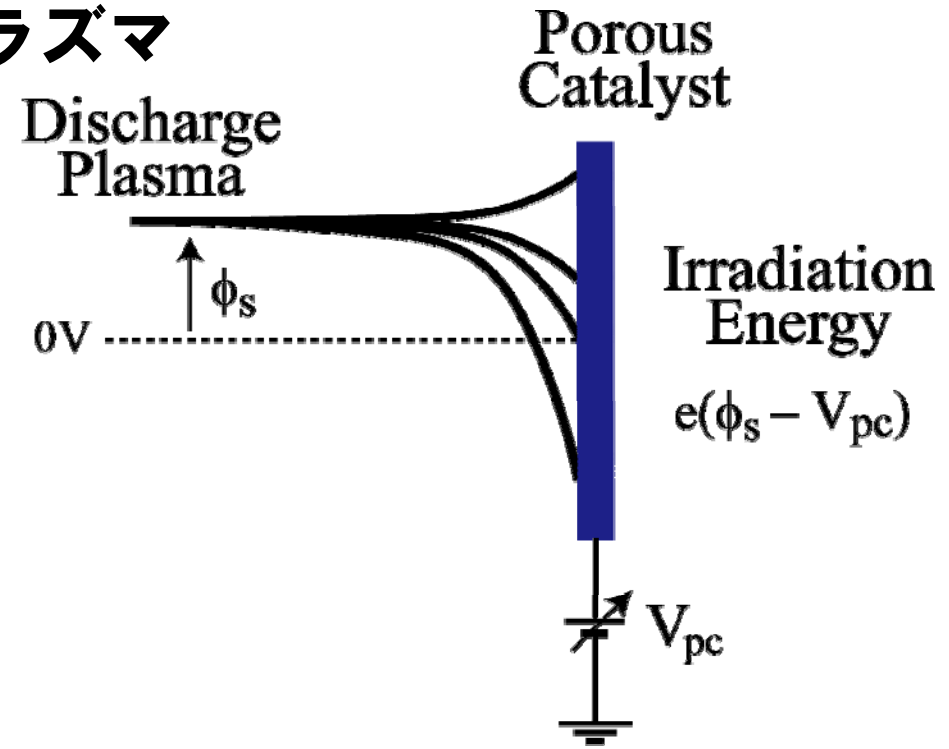
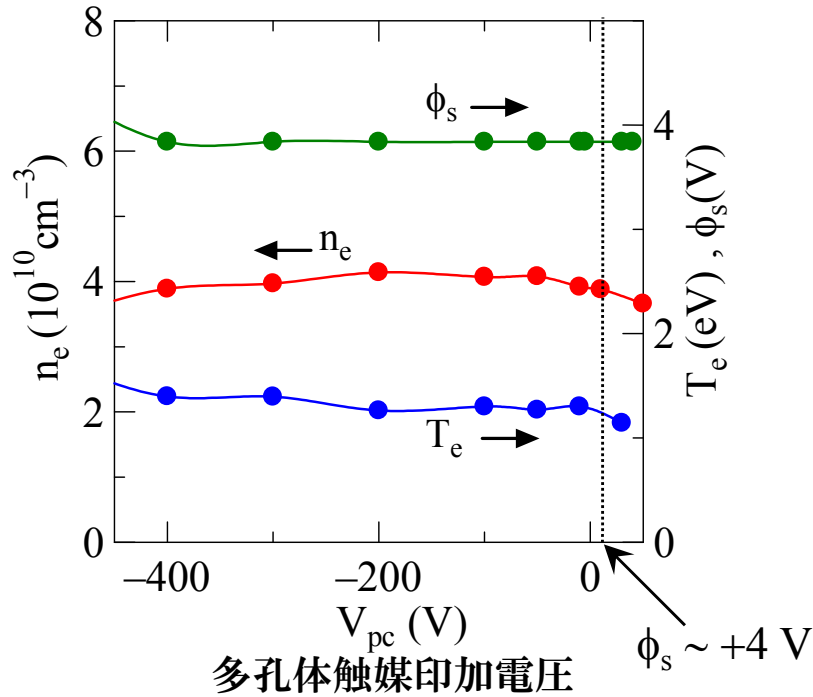
$$\Gamma = n \times v$$

照射エネルギーは一定

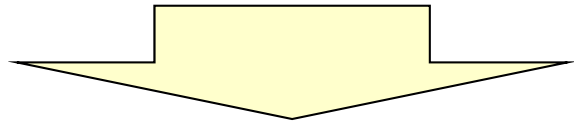
**正イオン照射量に比例して、
水素ペアイオンが生成される**

正イオン照射エネルギーの制御

上流域プラズマ

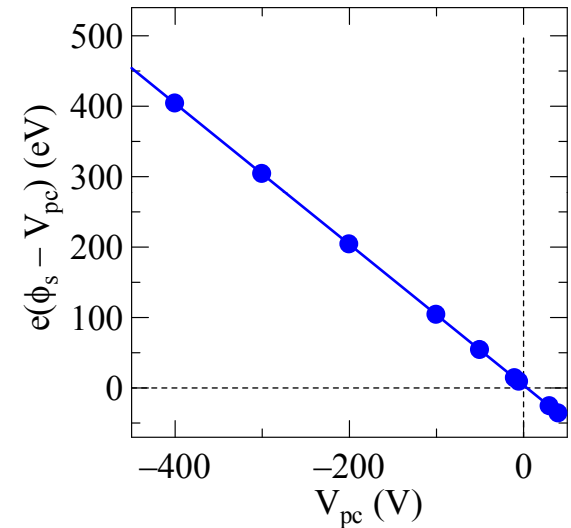


多孔体触媒印加電圧 V_{pc} に依らず、
 プラズマ電位 ϕ_s 、プラズマ密度 n_e はほぼ一定



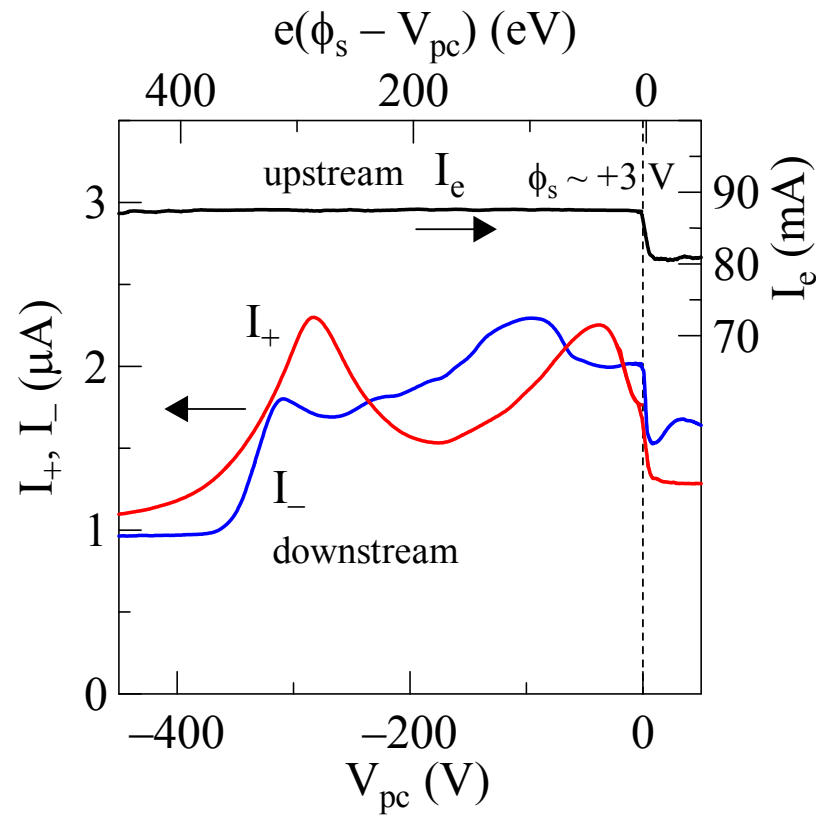
正イオン照射エネルギー $e(\phi_s - V_{pc})$ (eV) **可変**

正イオン照射量 $\Gamma = n \times v$ **一定**

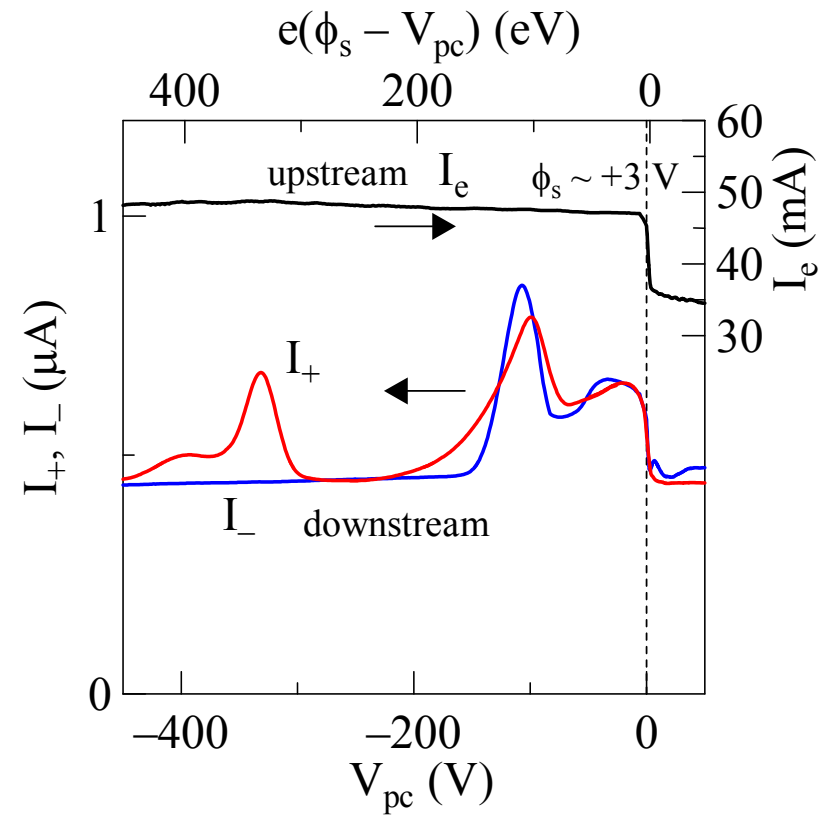


水素ペアイオン生成量の正イオン照射エネルギー依存性

$B_{MF} = 8 \text{ mT}$



$B_{MF} = 12 \text{ mT}$



複数ある特定の正イオン照射エネルギーにおいて、
正イオンまたは負イオンが多く生成される

まとめ

水素ペアイオンプラズマの生成実現，**集団物性の実験的検証**
(H^- の高効率生成，水素ペアイオンの同時・等量生成)

プラズマ支援触媒イオン化法

物理機構（脱離イオン化）の解明

正イオン照射量・照射エネルギー
触媒の材質・温度
触媒活性

Cs/フィラメント無しの H^-/D^- 負イオン源の開発も行っている