

Csフリー負イオン生成過程の進展



山口大学 大学院理工学研究科 大原 渡

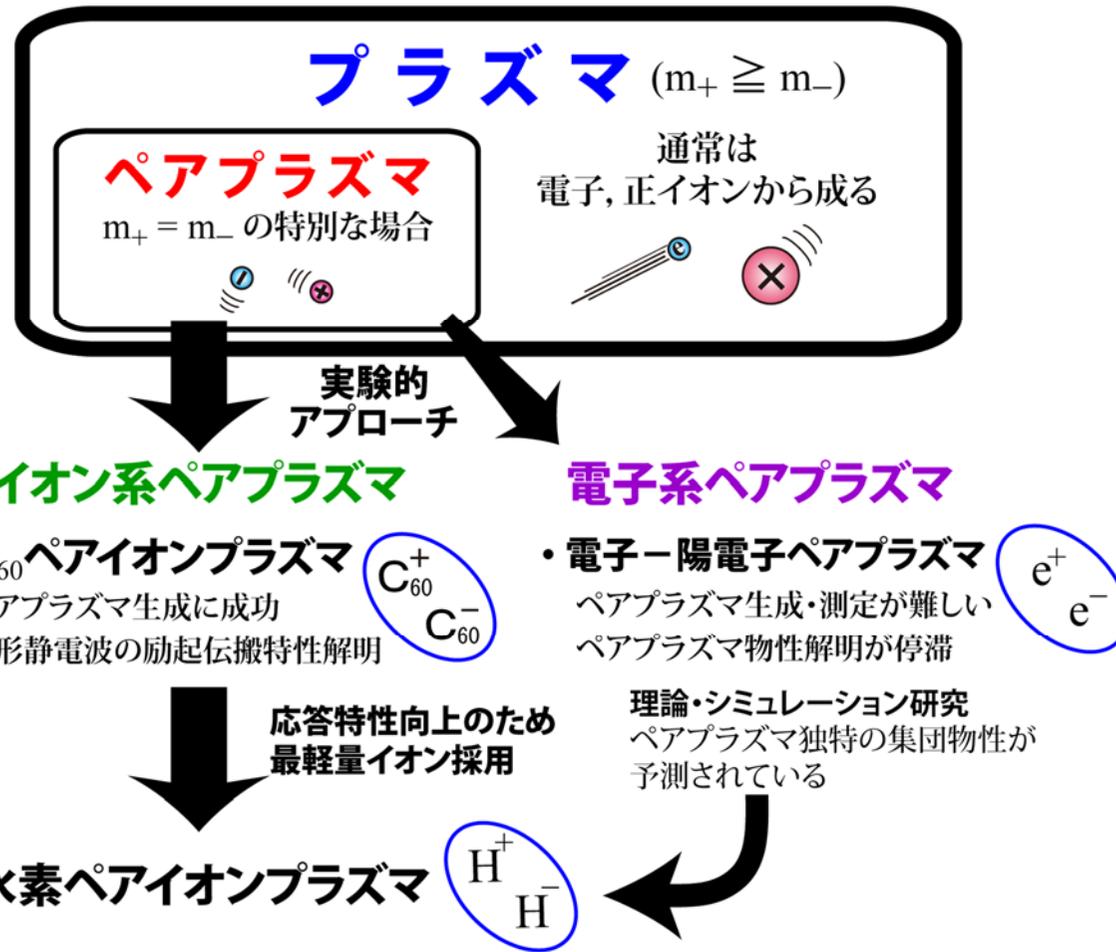
【主な共同研究者】

山口大 日比野徳亮, 樋口剛史, 小林貴一, 太田智喜, 松島祐一郎
核融合研 津守克嘉, 竹入康彦

【キーワード】

- ★ プラズマ支援触媒イオン化
- ★ Ni多孔体触媒, Ni箔触媒
- ★ 脱離イオン化

研究背景



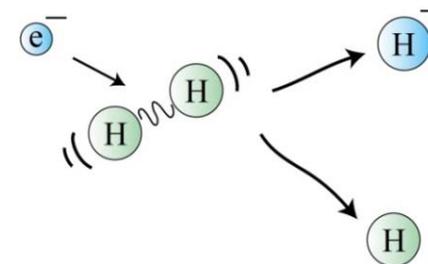
H^+ , H^- 以外のイオンや電子は**不純物**なので,
これらを含まない**独特の** H^+ , H^- の生成法が必要

現在主流の負イオン生成原理

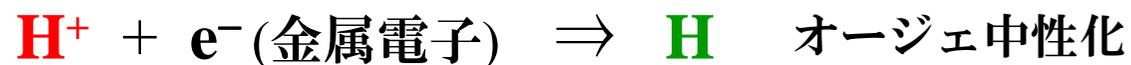
体積生成過程



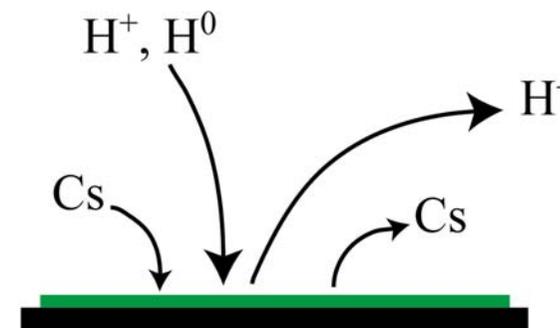
負イオン生成効率があまり高くない



表面生成過程



負イオン生成効率を高くするためには
仕事関数を低くする必要がある

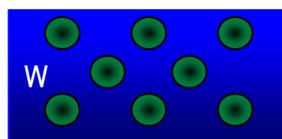


金属表面へのセシウム原子吸着と仕事関数

スライド NIFS 津守克嘉

(A)領域:

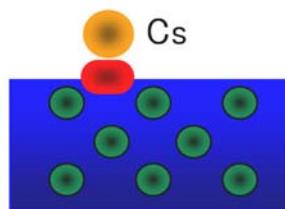
殆どの表面は清浄なW表面に近くCsが吸着した部分の仕事関数のみが低下する。



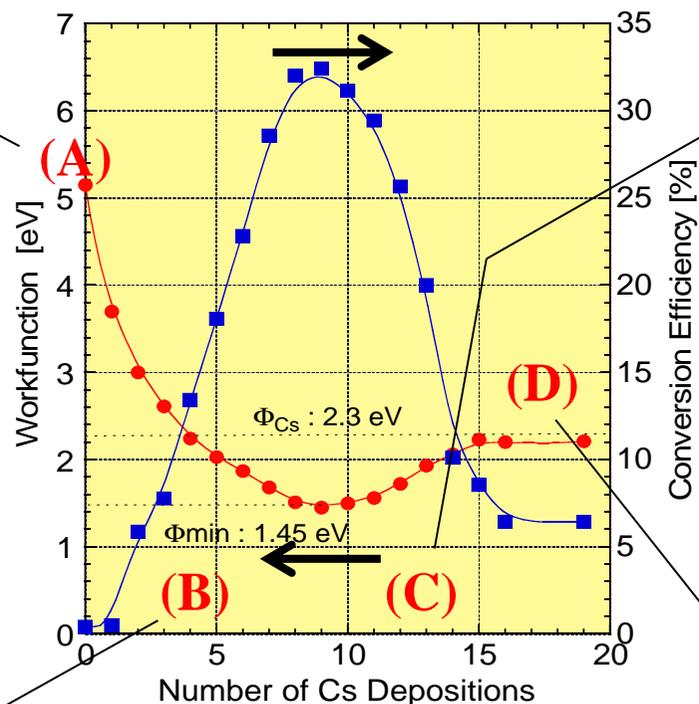
$\theta \sim 0$

(B)領域:

吸着Cs6S電子はW間のバックボンドへ移行し電荷2重層を形成し仕事関数は減少。

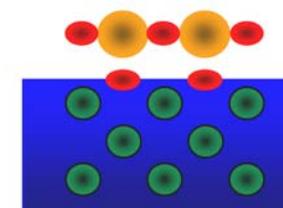


$\theta \leq 0.5$



(C)領域:

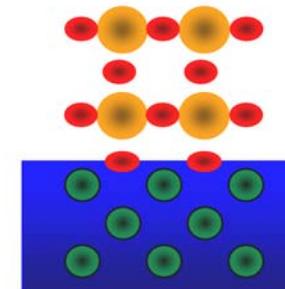
バックボンド電子は隣接のCs間の2次元バンドへ移行し仕事関数は増加。



$\theta > \sim 1.0$

(D)領域:

バックボンド電子Cs層が厚みを増すことによって電子の局在は緩和され仕事関数はさらに増加。

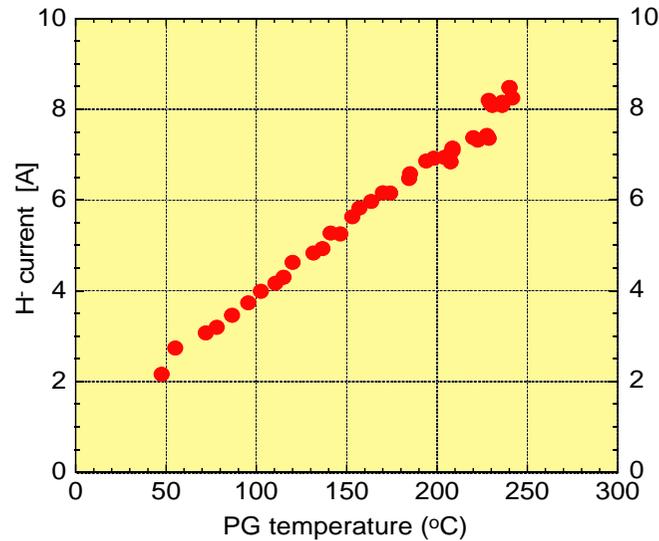


$\theta > \sim 2.0$

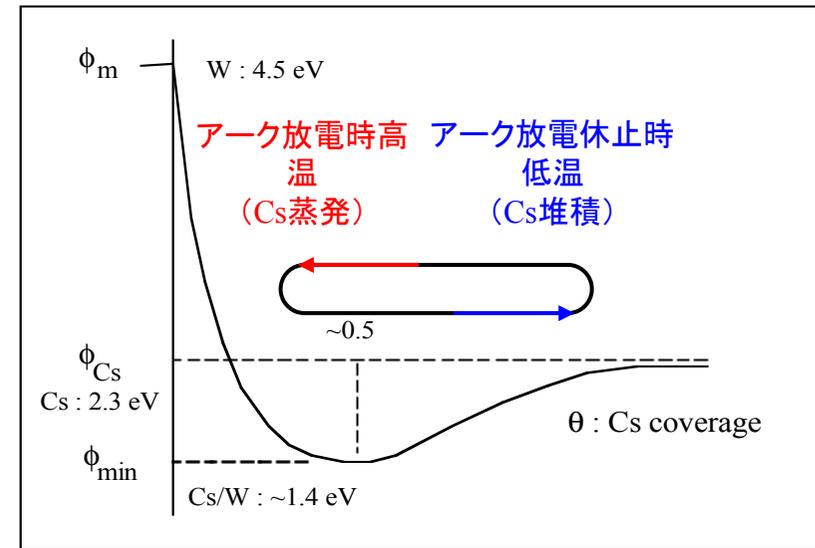
仕事関数の大きさに
負イオン生成効率が
鋭敏に効く

プラズマ電極温度と負イオン生成量

スライド NIFS 津守克嘉



一定アークパワーでの
プラズマ電極温度とH⁻電流量の関係



アーク放電時と休止時での
予想されるCs吸着層の変化

- Csリサイクリングはイオン源プラズマの状態とリンクしている
- Cs添加の過不足の判断は経験に頼らざるをえないこと

オペレーションの複雑さが問題になる
(高効率を維持して長時間運転が可能か?)

Csフリー負イオン生成法の探索と目標値

従来から知られている負イオン生成手法の

長所を生かし (高密度の金属電子を利用)

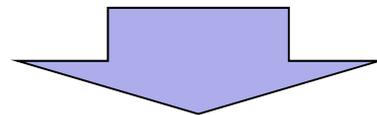
短所を克服する (振動励起分子や仕事関数に依存しない)

という視点で、新たな負イオン生成手法を探った

Csフリーで負イオン生成効率の高い手法を探索

ITER NBI負イオン源

H⁻ 28 mA/cm² プラズマ密度
(10¹³ cm⁻³)



0.28 mA/cm² (10¹¹ cm⁻³)

プラズマ支援触媒イオン化の概要

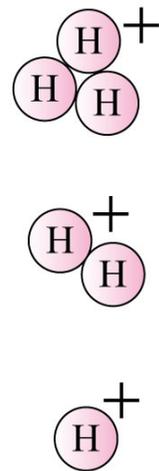
「プラズマ支援触媒イオン化法」

Plasma-Assisted Catalytic Ionization

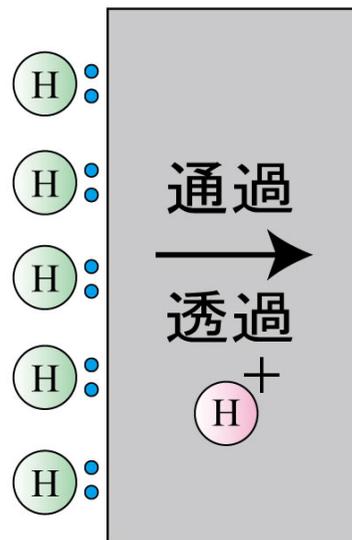
金属触媒に正イオンを照射すると
照射裏面より正負イオンが生成される

Rev. Sci. Instrum. **81** (2010) 023507, **82** (2011) 093503, **83** (2012) 083509

正イオン加速照射
(エネルギー供給)



金属触媒



解離吸着

脱離イオン化

Porous Catalyst



実験装置

バケット型直流アーク放電

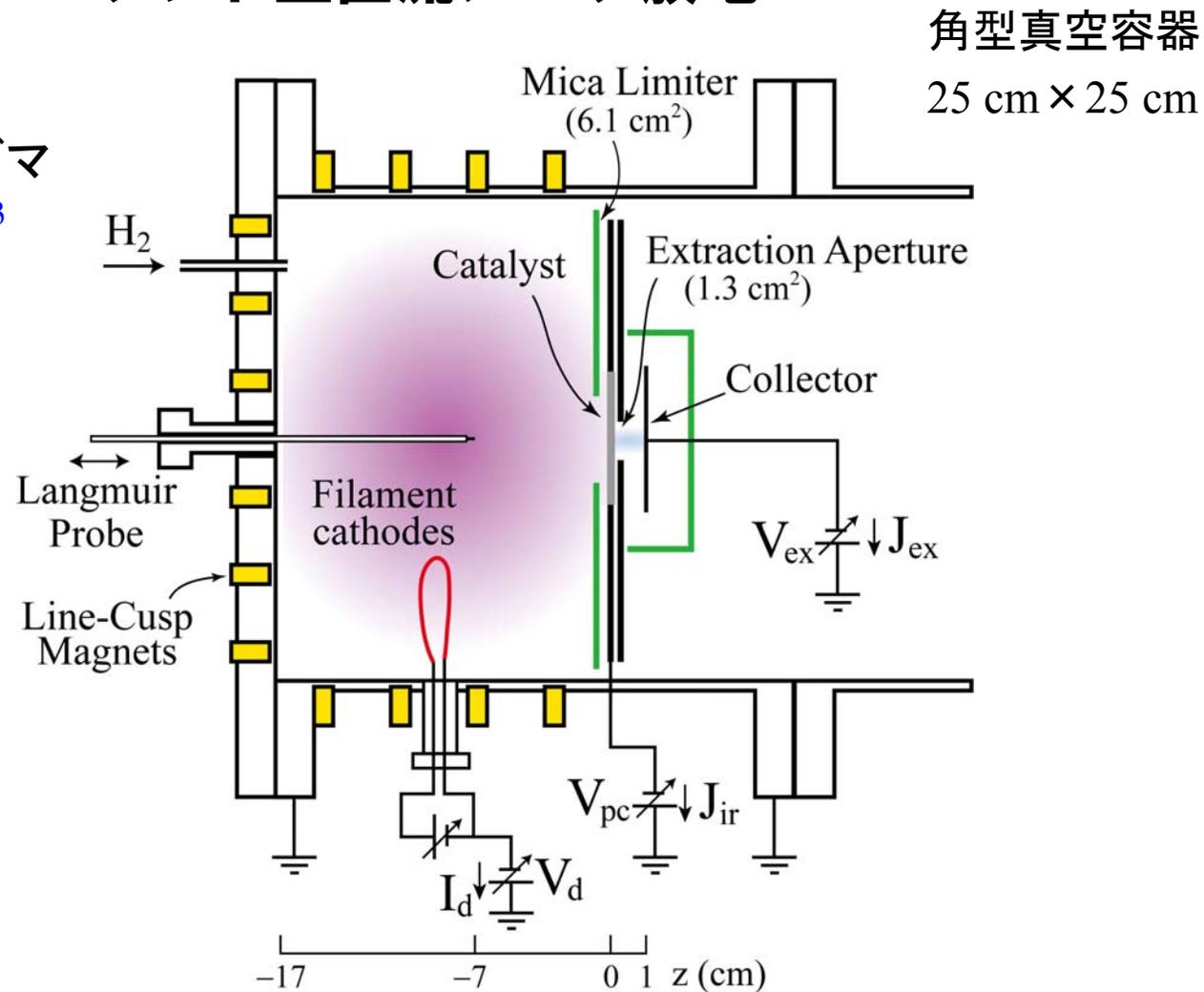
上流域放電プラズマ

$$n_e = 5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$$

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

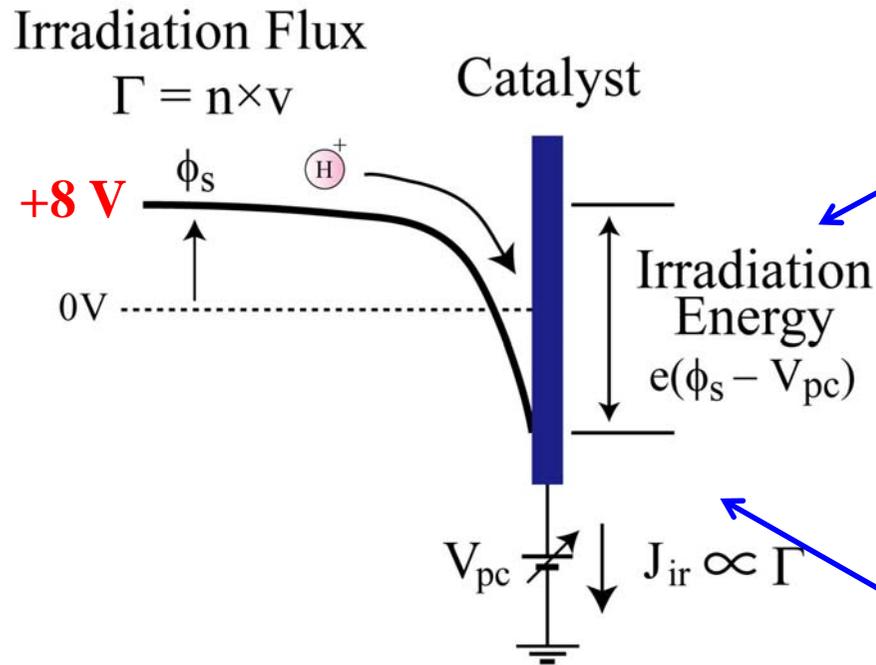
$$\phi_s = +4 \sim +10 \text{ V}$$

$$P = 0.1 \text{ Pa}$$



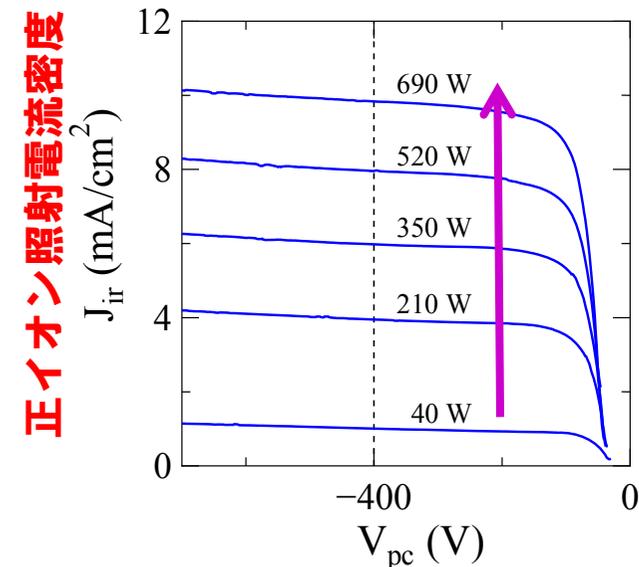
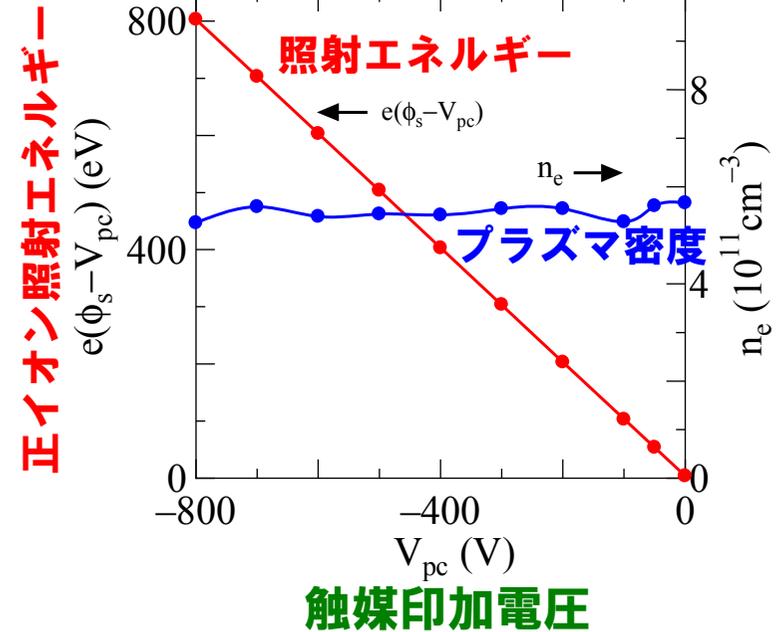
正イオン照射エネルギーと照射電流密度の制御

シースによる正イオンの加速・照射



正イオン照射フラックス $\Gamma = n \times v \propto J_{ir}$

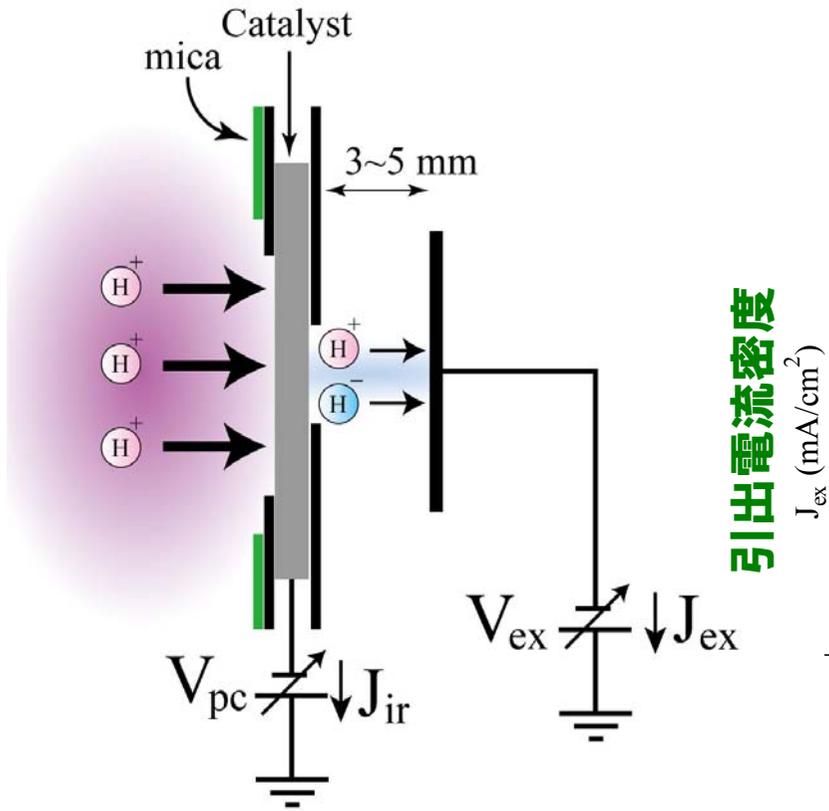
正イオン照射エネルギー $e(\phi_s - V_{pc})$ (eV)



正イオン照射とイオン引出の改善

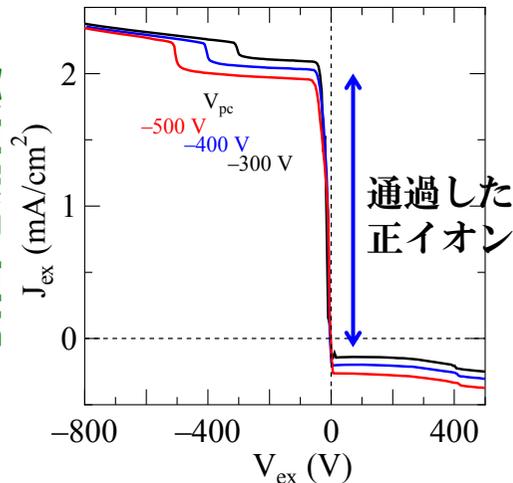
正イオン照射・イオン引出の改善

Ni多孔体触媒を用いた場合

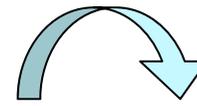


引出電流密度

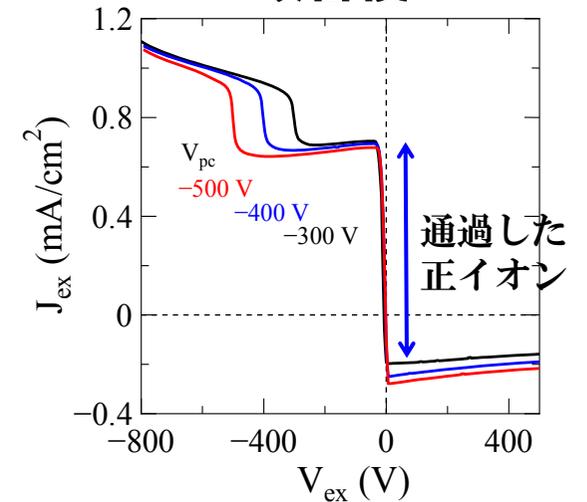
改善前



引出電圧



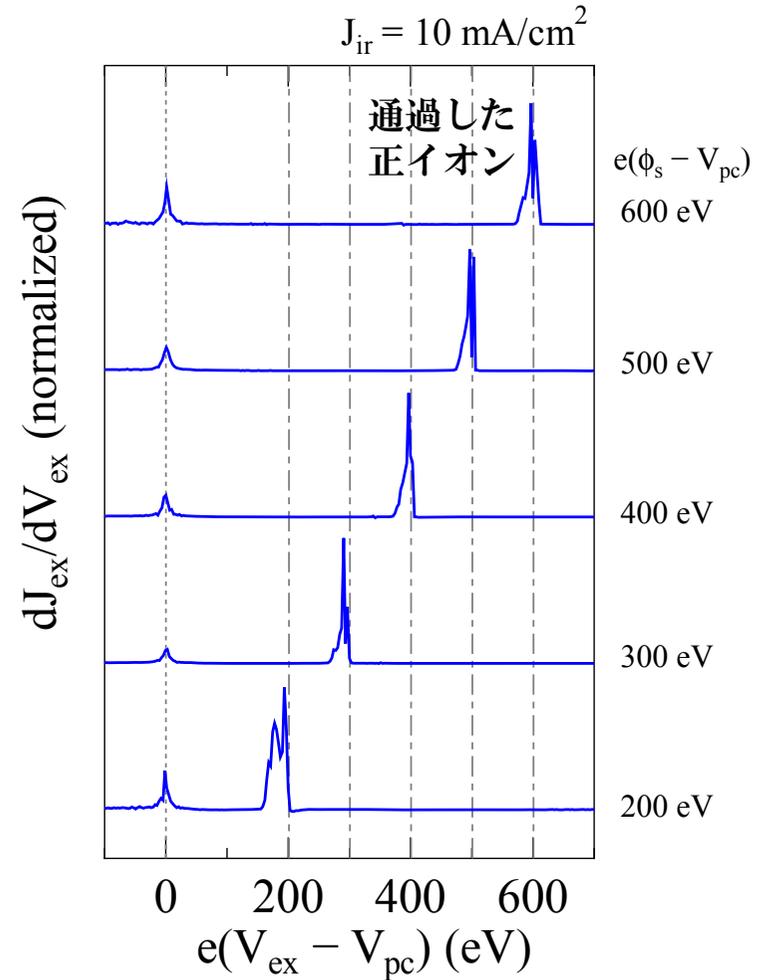
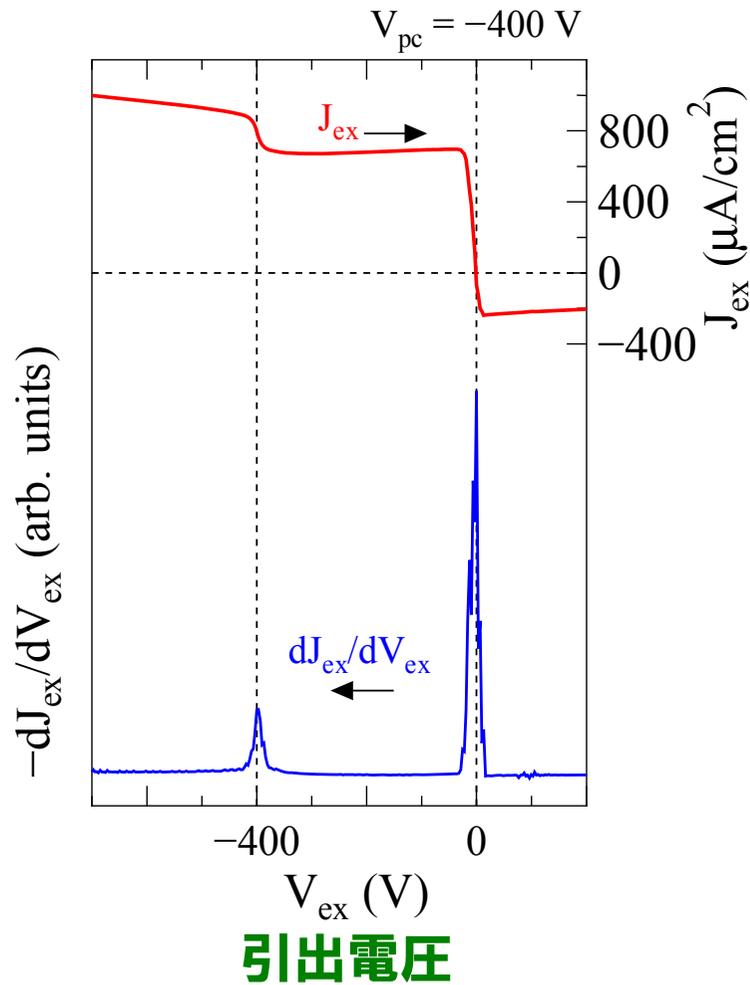
改善後



局所的に通過正イオン電流の高い領域を排除して、均一な照射条件で測定できるようになった。

イオンのエネルギー分布

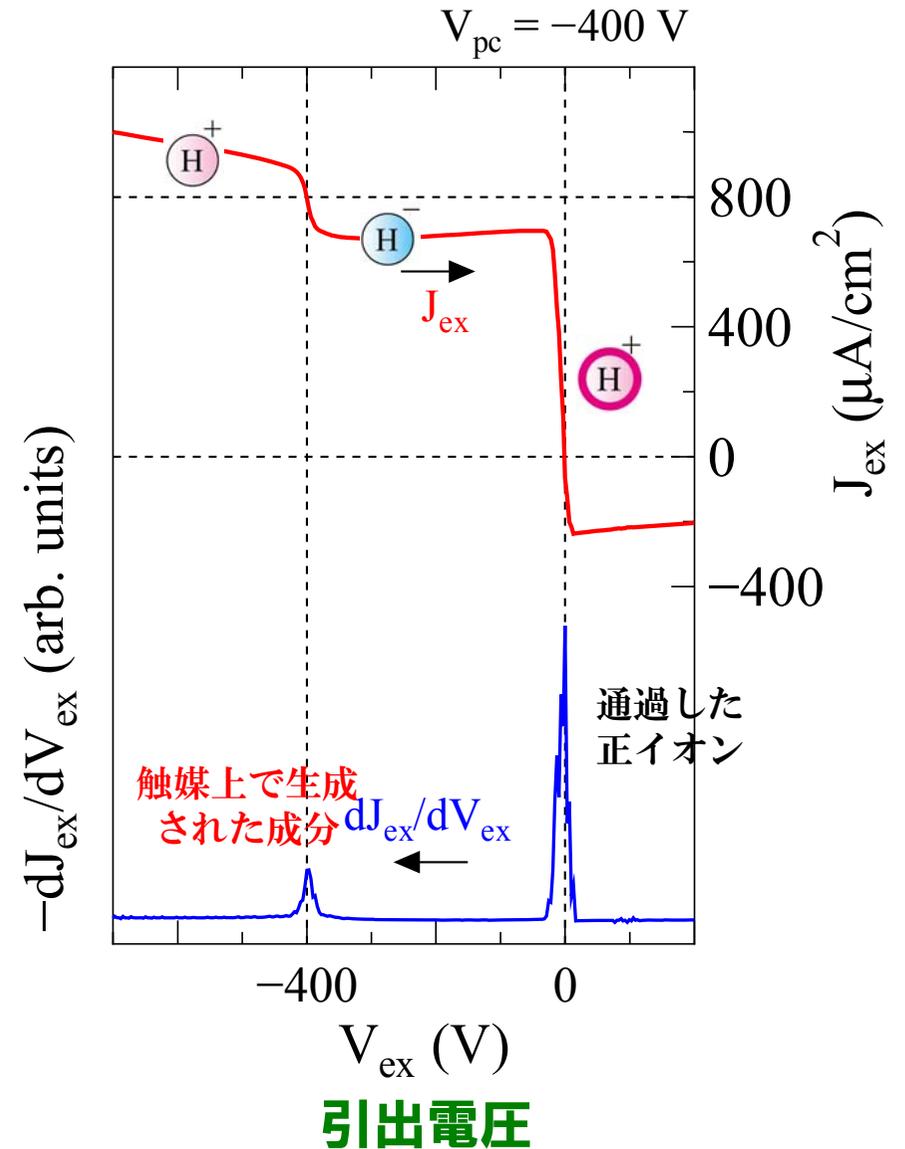
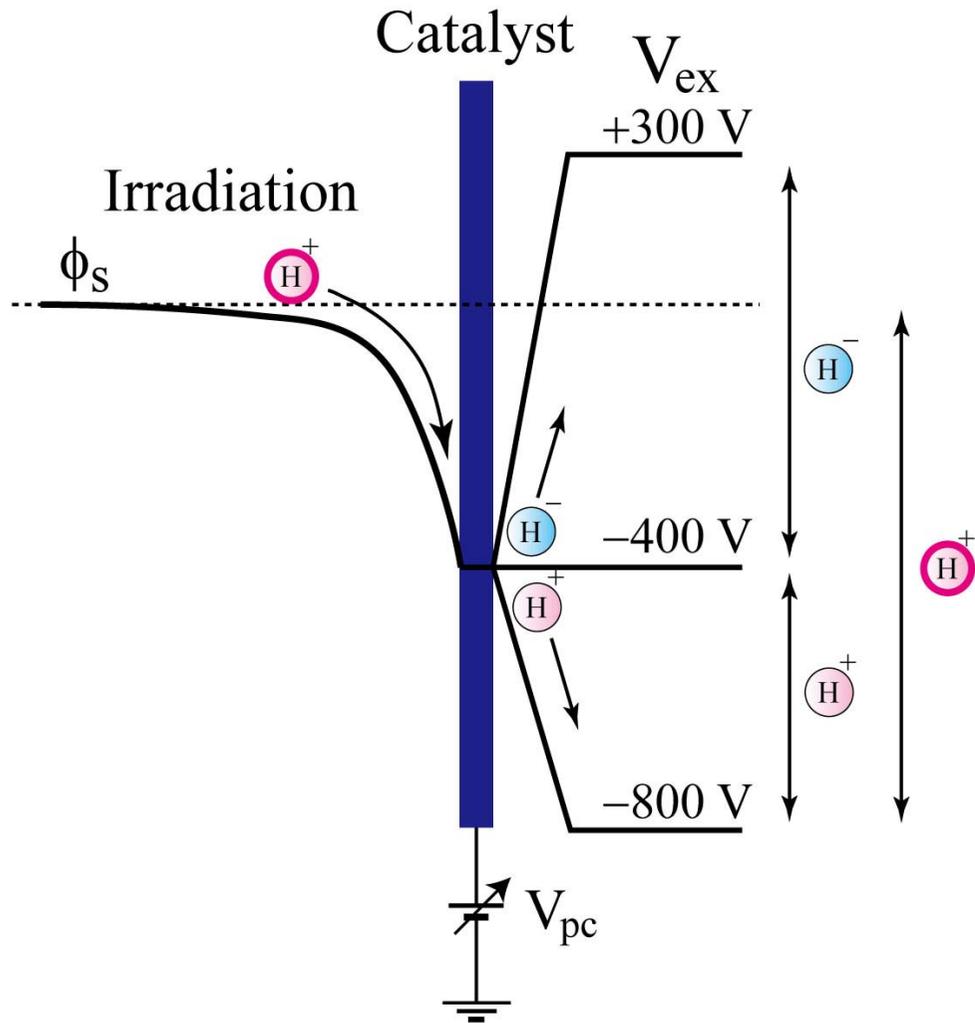
正イオン照射エネルギーを増加させた



触媒表面から離脱する
イオンエネルギー

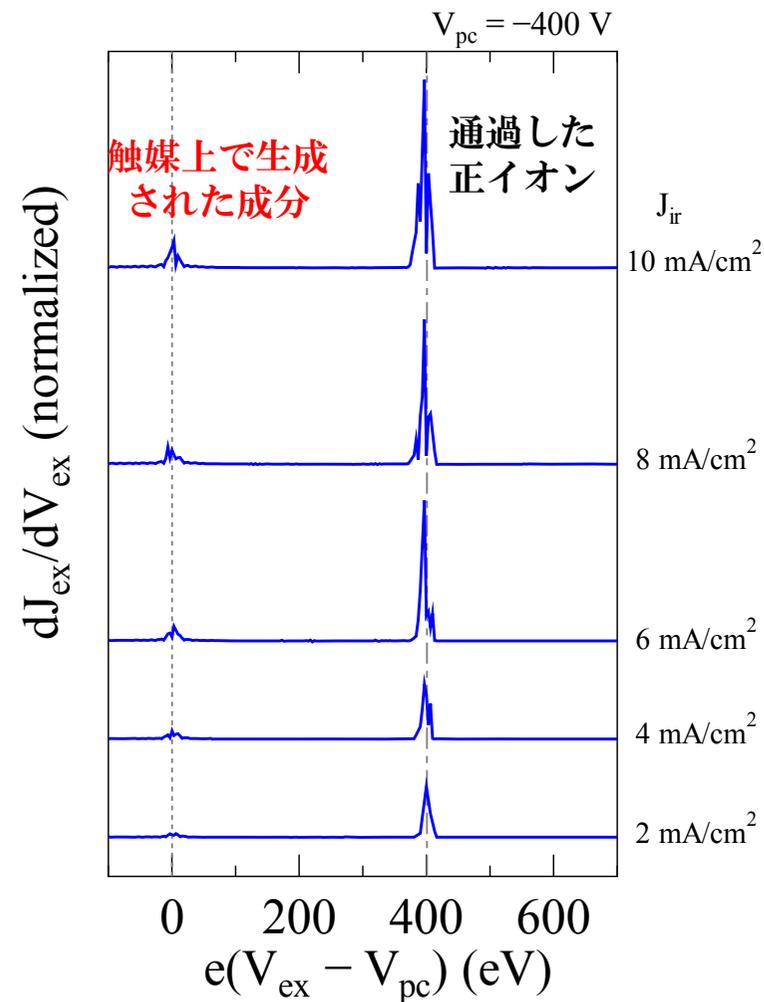
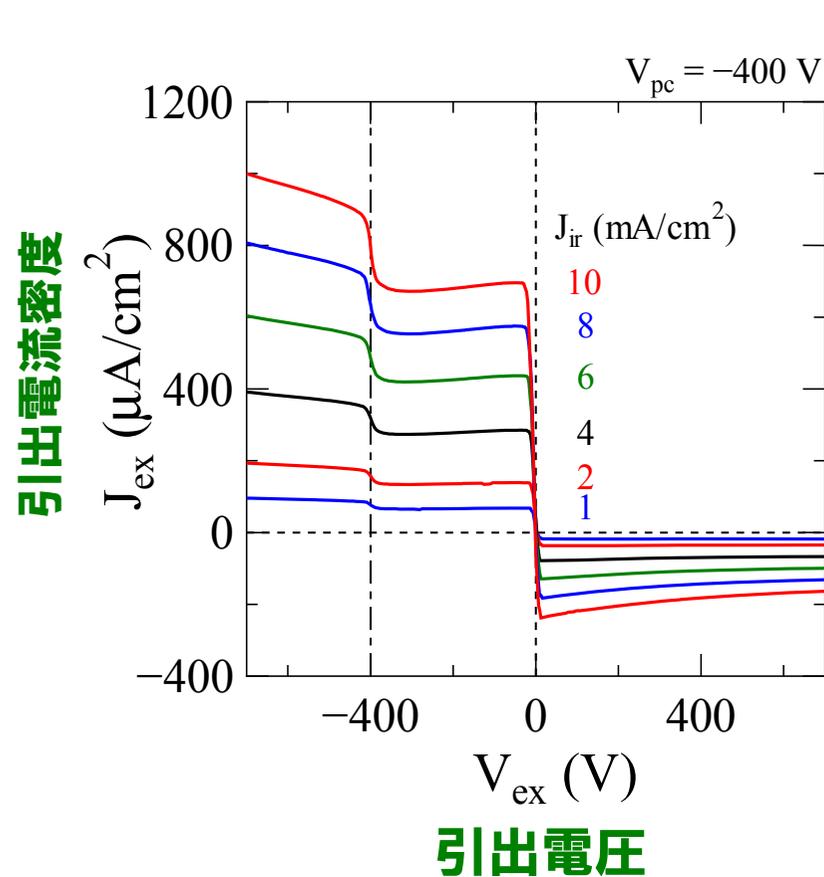
Rev. Sci. Instrum. **83** (2012) 083509

電位構造と測定されるイオン



正イオン照射電流密度の効果

正イオン照射電流密度 を増加させた

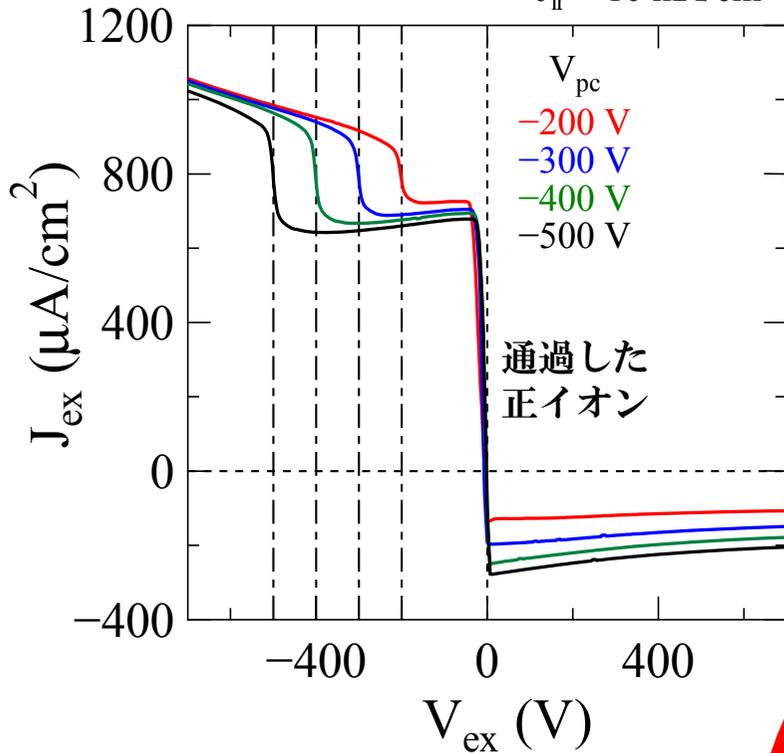


触媒表面から離脱する
イオンエネルギー

触媒形状による違い

Ni多孔体

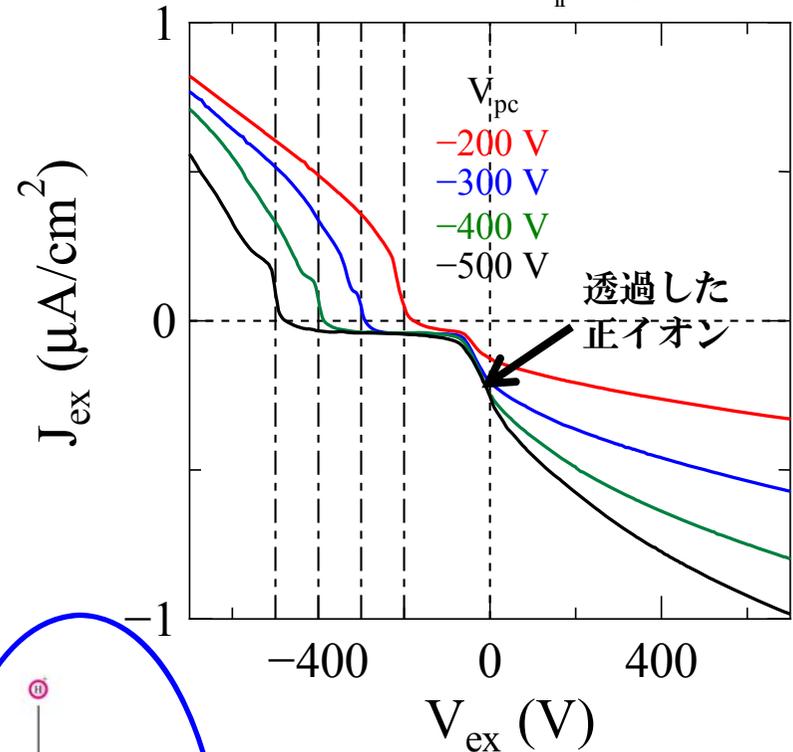
$J_{ir} = 10 \text{ mA/cm}^2$



引出電圧

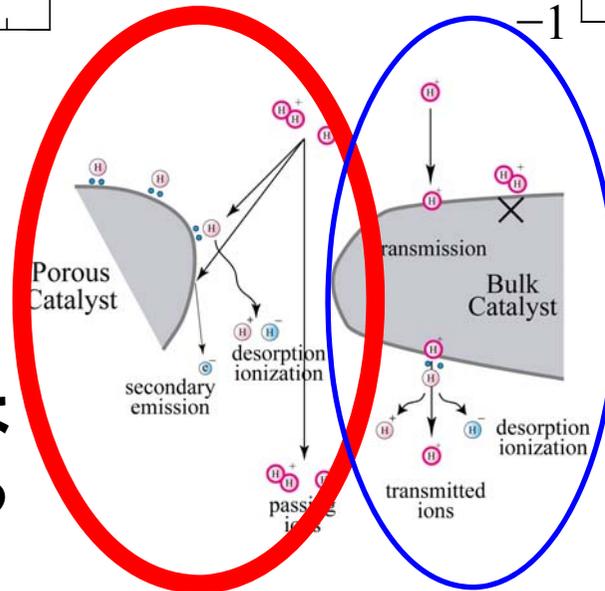
Ni箔 5 μm

$J_{ir} = 10 \text{ mA/cm}^2$



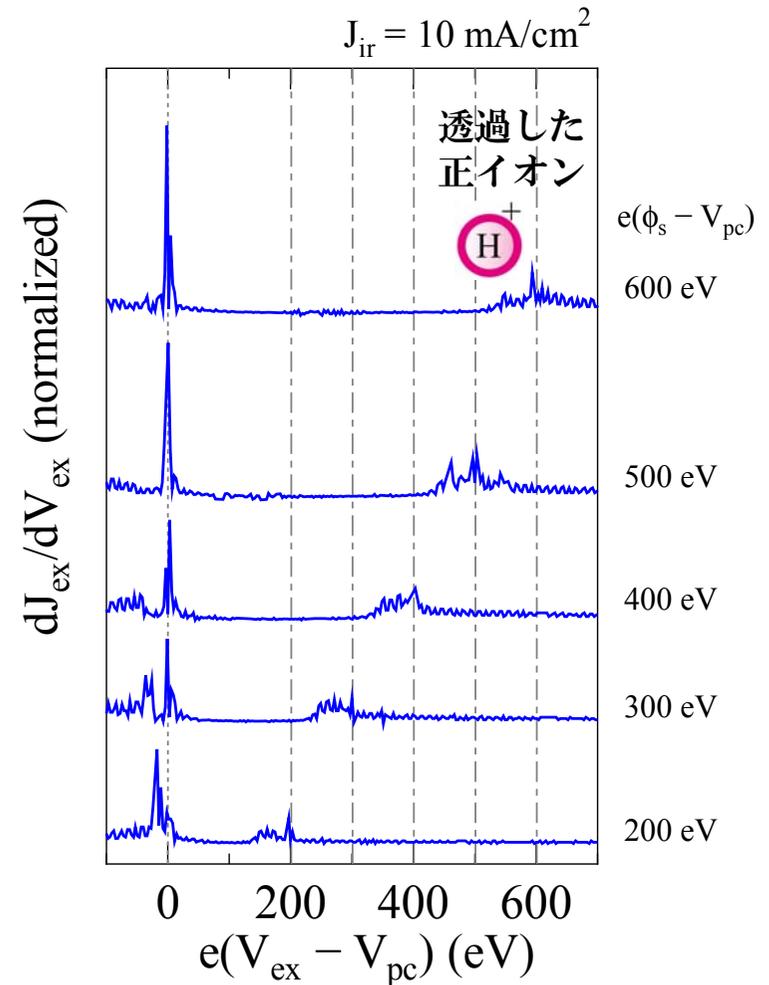
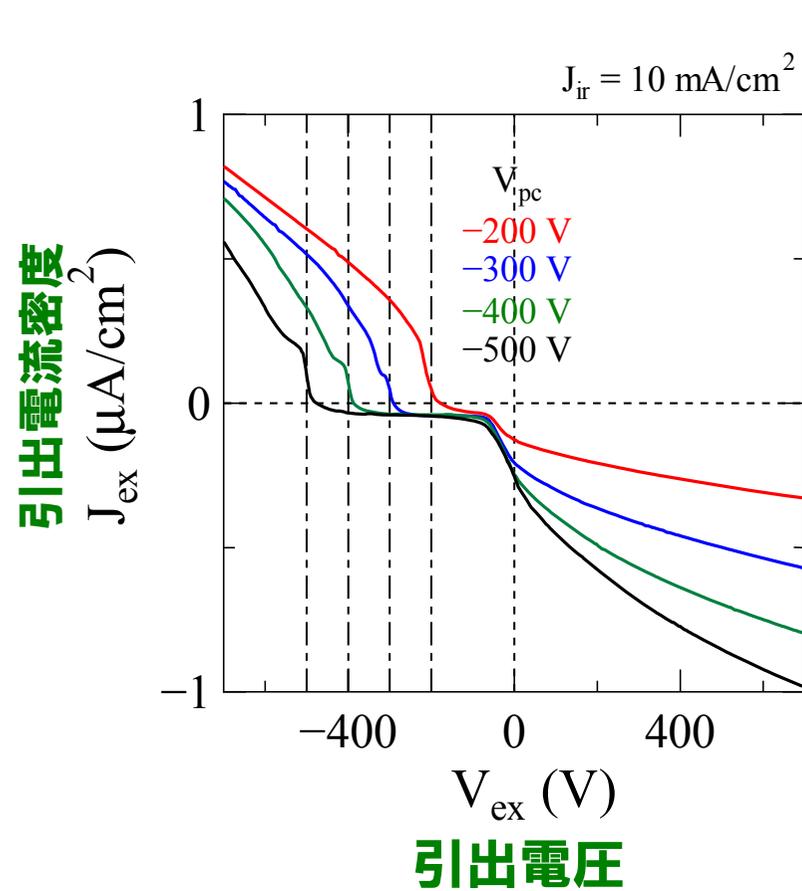
引出電圧

引出電流の大部分は
こちらに依る



正イオン照射エネルギーの効果

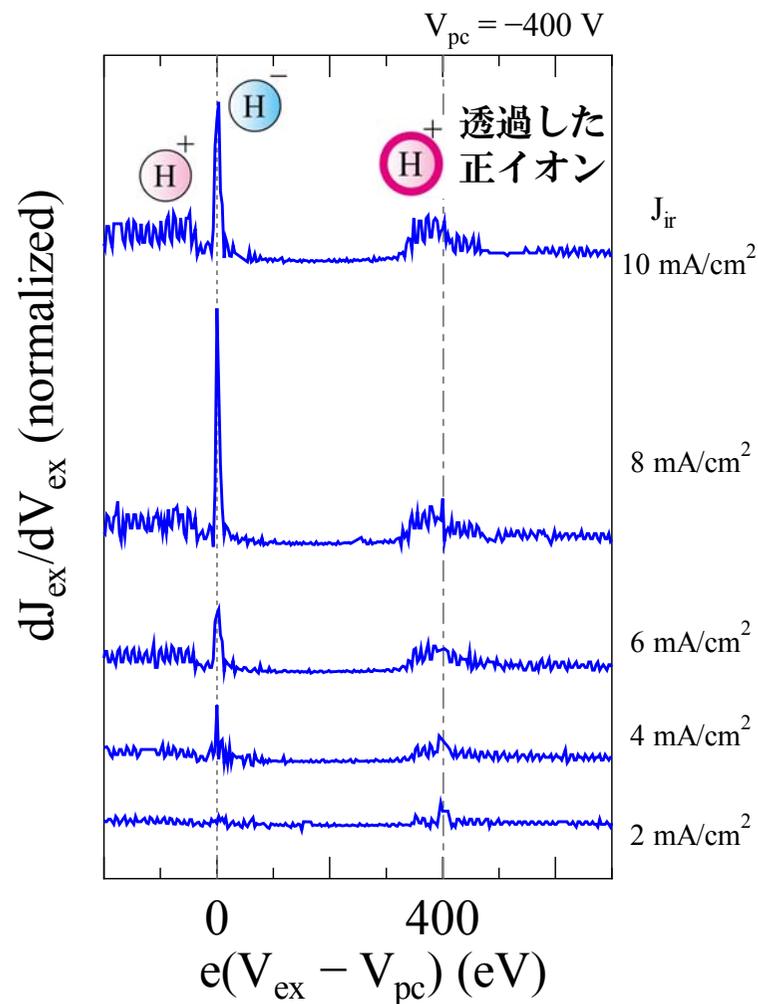
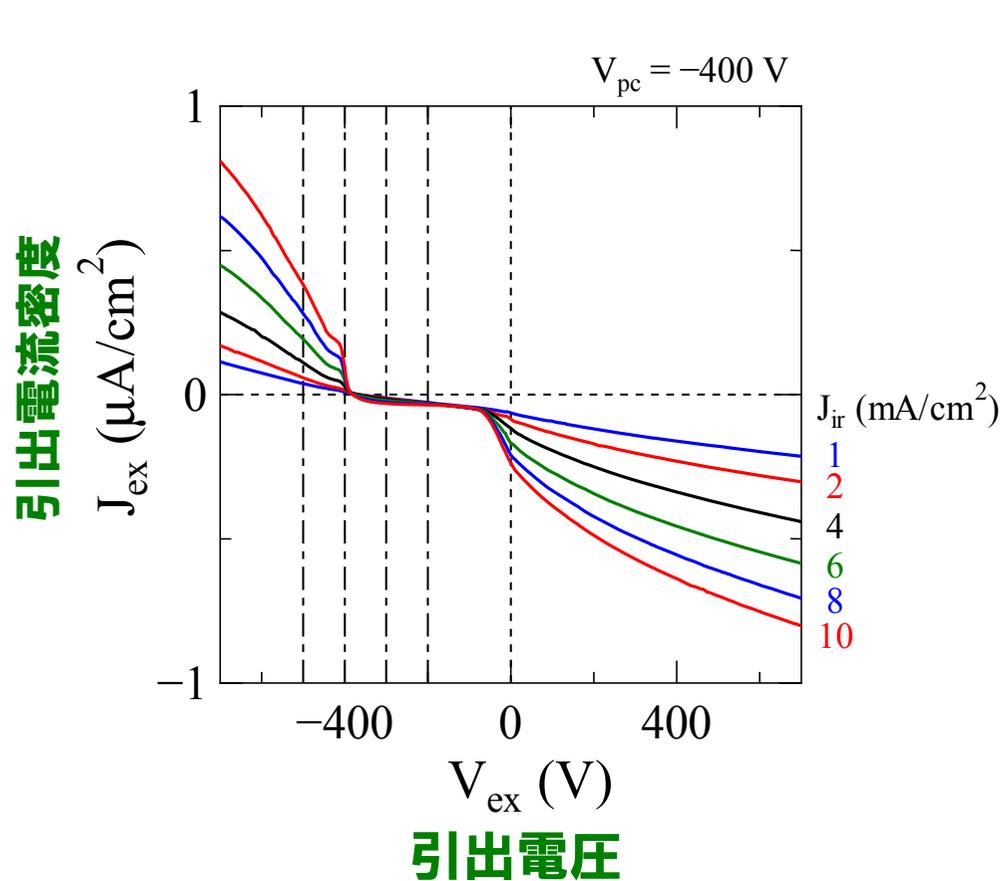
正イオン照射エネルギーを増加させた



触媒表面から離脱する
イオンエネルギー

正イオン照射電流密度の効果

正イオン照射電流密度 を増加させた



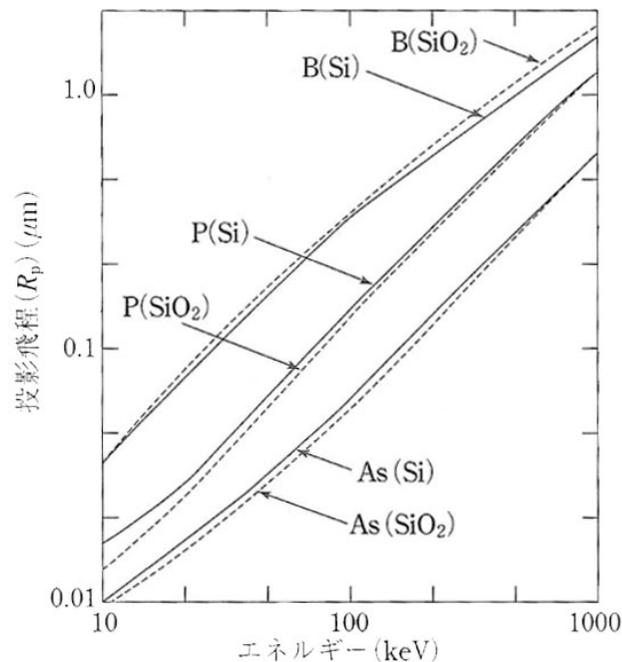
触媒表面から離脱する
イオンエネルギー

イオンインプラントーションの投影飛程

イオンインプラントーション

打ち込まれたイオンは、加速エネルギーと対象物質との衝突散乱による運動量の喪失によって、浸透して停止するまでの深さが決まる。バラつきはほぼガウス分布に従う。

注入深さ (投影飛程)
数 nm 1 ~ 10 keV
< 1 μm 10 ~ 500 keV



イオン照射によるスマートカット技術

2004.9.30 山本春也 他

日本原子力研究所 那珂研究所負イオン源利用

絶縁層状のシリコン薄膜SOI素子の製作に
水素イオンビームを用いた切断手法。
水素脆化現象を利用した水素切断法。

H⁺インプラントーション

Si (200 nm)/SiO₂ (400 nm) : 200 keV

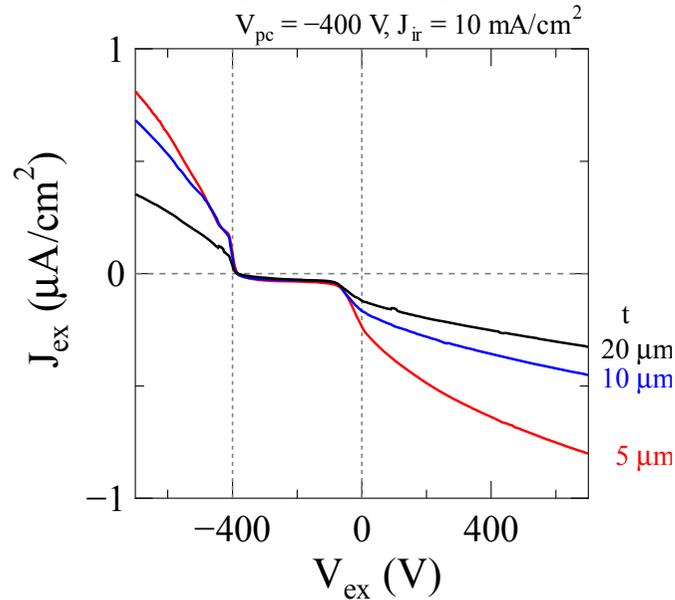
H⁻インプラントーション

Si (10 μm) : 1 MeV

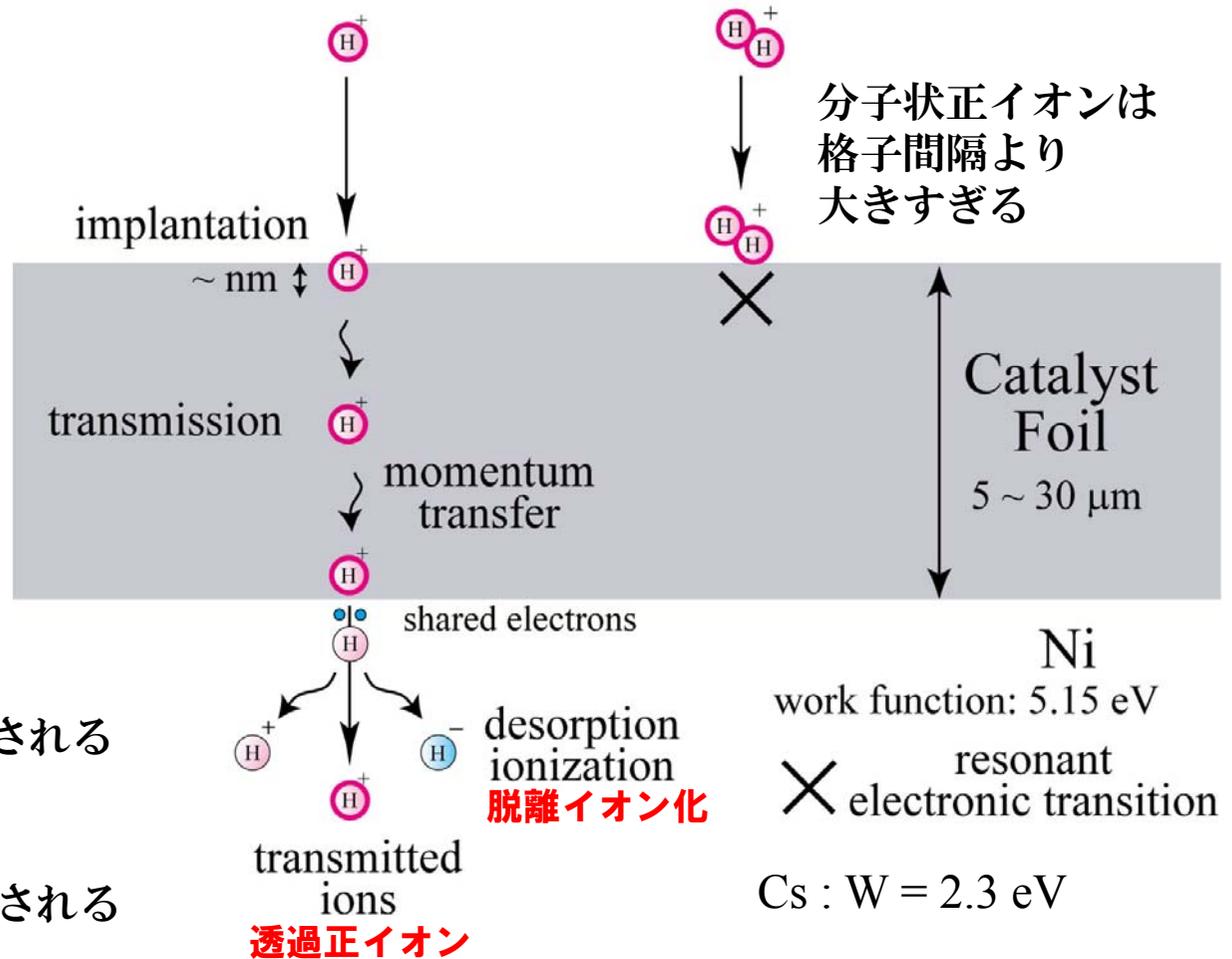
200~600 eV程度の入射エネルギーでは
注入深さはせいぜい **数 nm**

考察：箔触媒を用いた場合のイオン生成機構

箔厚依存性



- (1) 原子状正イオン(プロトン)が注入される
- (2) バルクで運動量が伝達される
- (3) 照射裏面近傍のプロトンが押し出される (透過正イオン)
- (4) 吸着水素原子に透過正イオンが衝突して脱離イオン化により正負イオン生成



Niの仕事関数が大きすぎるため、
共鳴電子遷移する確率は
かなり低いと考えられる

まとめ

Ni多孔体とNi箔を用いた結果を比較することによって、 プラズマ支援触媒イオン化の機構解明を試みた

- ・ 触媒表面から H^+ , H^- が脱離イオン化によって生成されており、その生成量は正イオン照射電流密度に比例する。
- ・ 通過正イオン(多孔体の場合), 透過正イオン(箔の場合)が存在し、吸着する水素原子への衝突によって脱離イオン化がおこる。

負イオン源としての目標

ITER NBI負イオン源

H^- 28 mA/cm² (10^{13} cm⁻³)



0.28 mA/cm² (10^{11} cm⁻³)

多孔体触媒を用いた場合

H^- 0.22 mA/cm² (10^{11} cm⁻³)

ただし、二次電子の有無は確認されていない