

# 負イオン源用アーク放電中の 原子分子過程と負イオン空間分布

---

井上多加志

原子力機構核融合 加熱工学研究Gr.

- 負イオン生成・損失の原子分子過程
- 負イオン源のしくみ
- 大型負イオン源の負イオン一様生成
- プラズマ中の負イオン輸送過程

# 負イオンの生成過程

## 体積生成過程

振動励起状態(高準位)分子を生成した後、解離性付着反応により**負イオン**を生成。



## 表面生成過程

(1990~)

正イオンまたは原子が**低仕事関数**表面(Cs等が付着)に衝突、余剰電子を獲得して**負イオン**を生成。

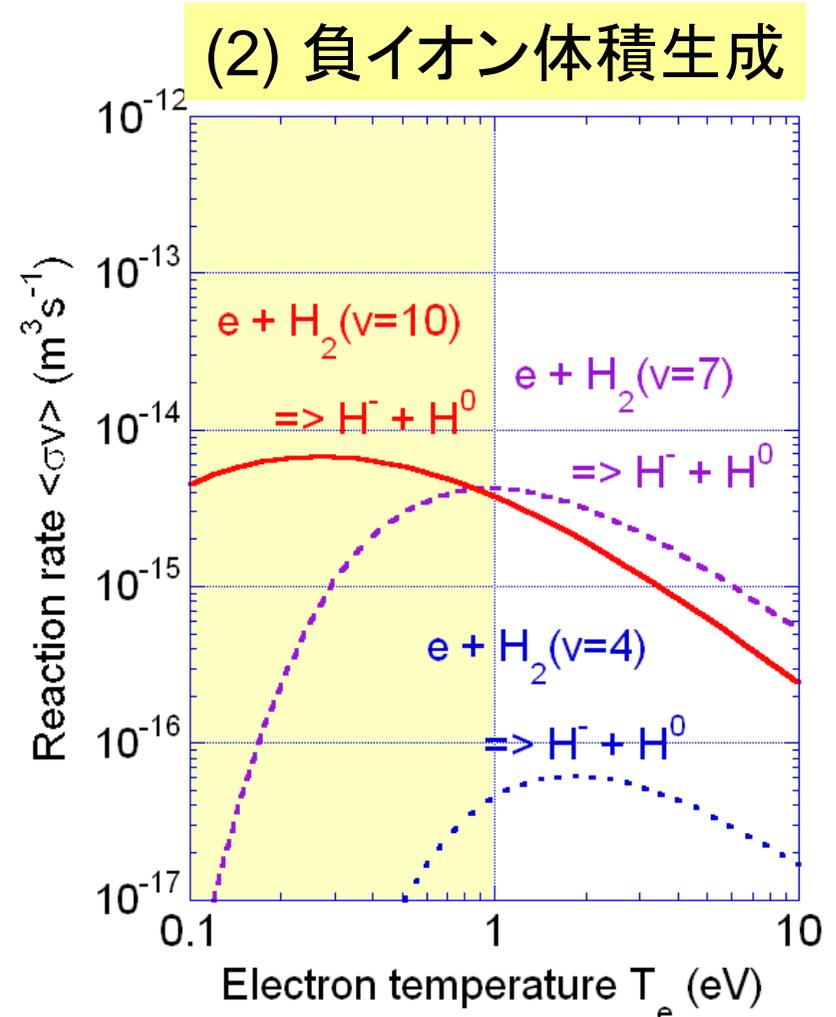
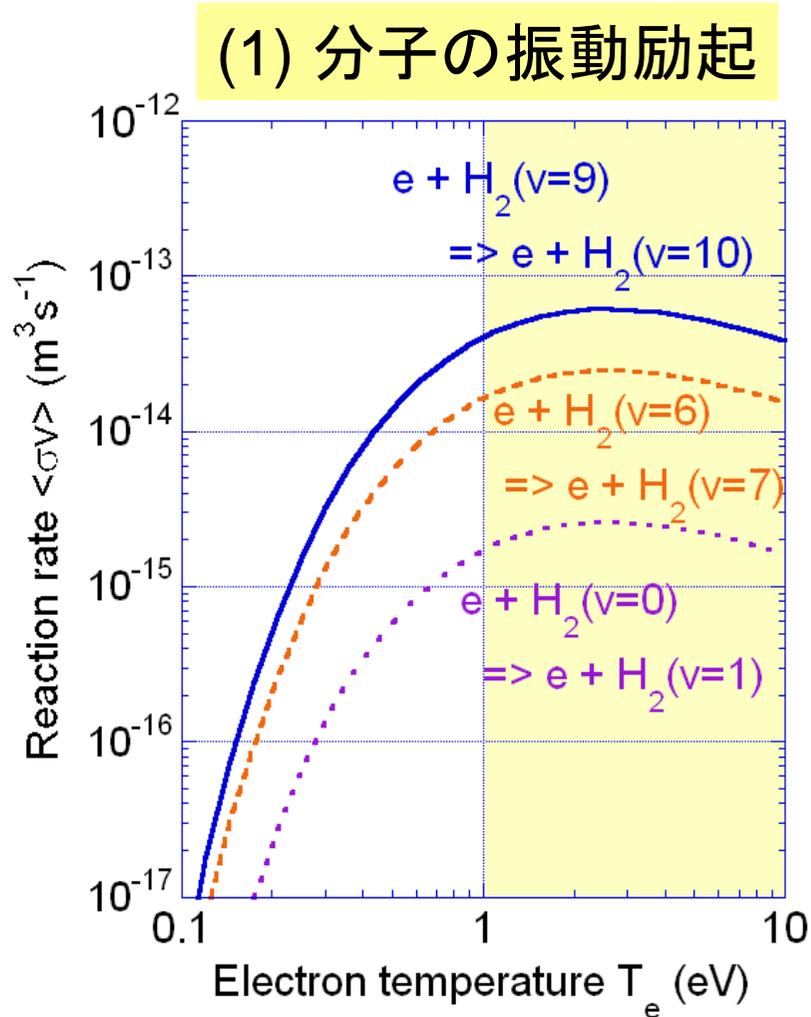


**負イオン生成過程は2段階反応**

# 負イオン体積生成断面積

R. K. Janev *et al.*, "Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas" (Springer, Berlin, 1987)

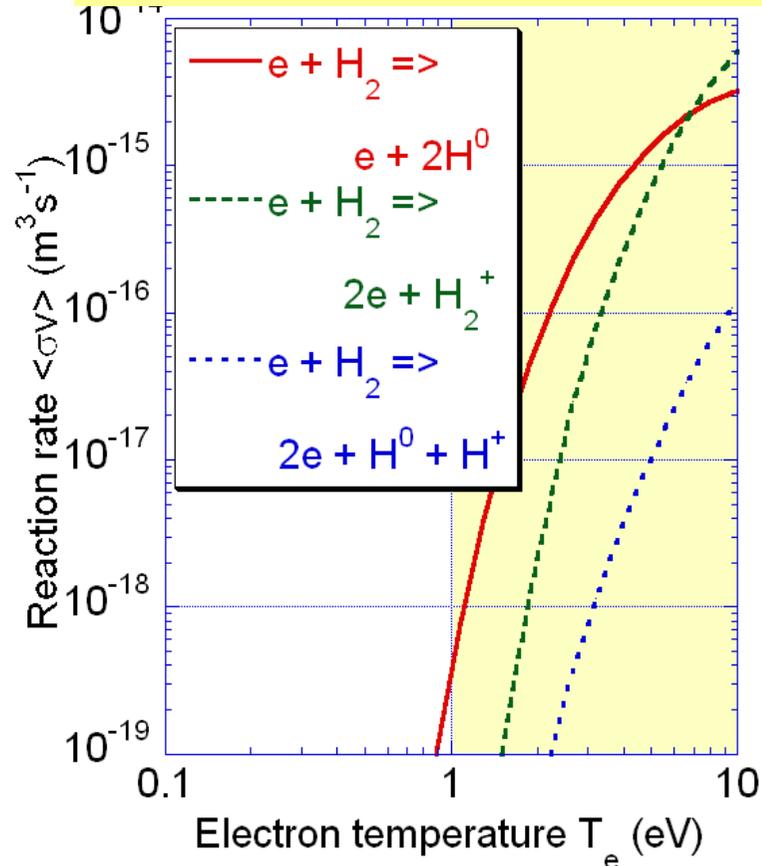
P. T. Greenland and D. Reiter, Juelich Report No. JUEL-3528 (1996).



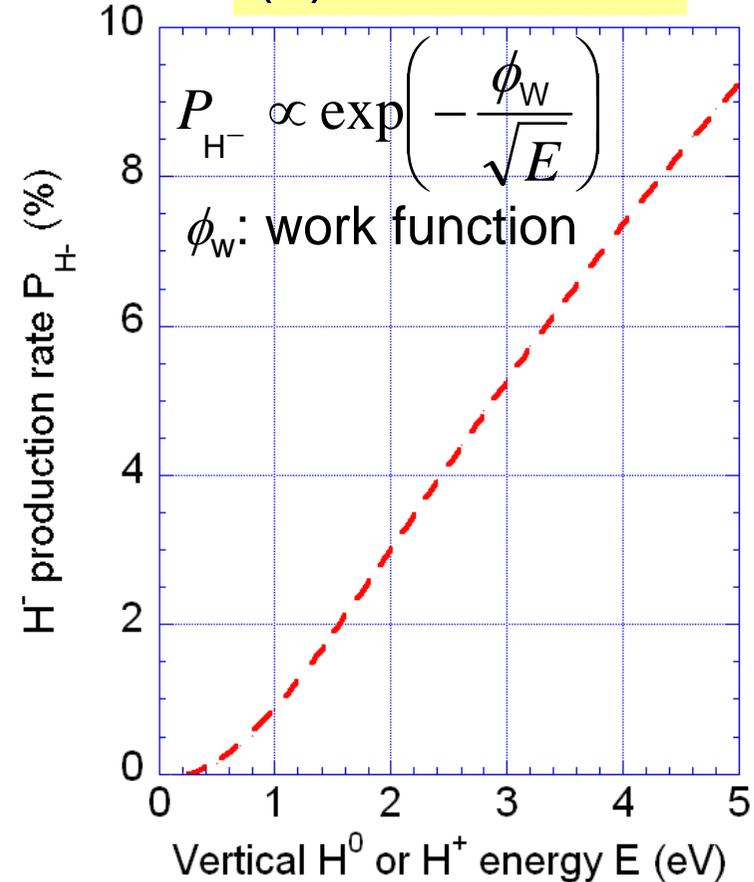
第1段階：高電子温度、第2段階：低電子温度

R. K. Janev et al., "Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas" (Springer, Berlin, 1987).  
B. Rasser et al., Surf. Sci. 118, 697 (1982).

## (1) 正イオン・原子の生成



## (2) 表面生成率

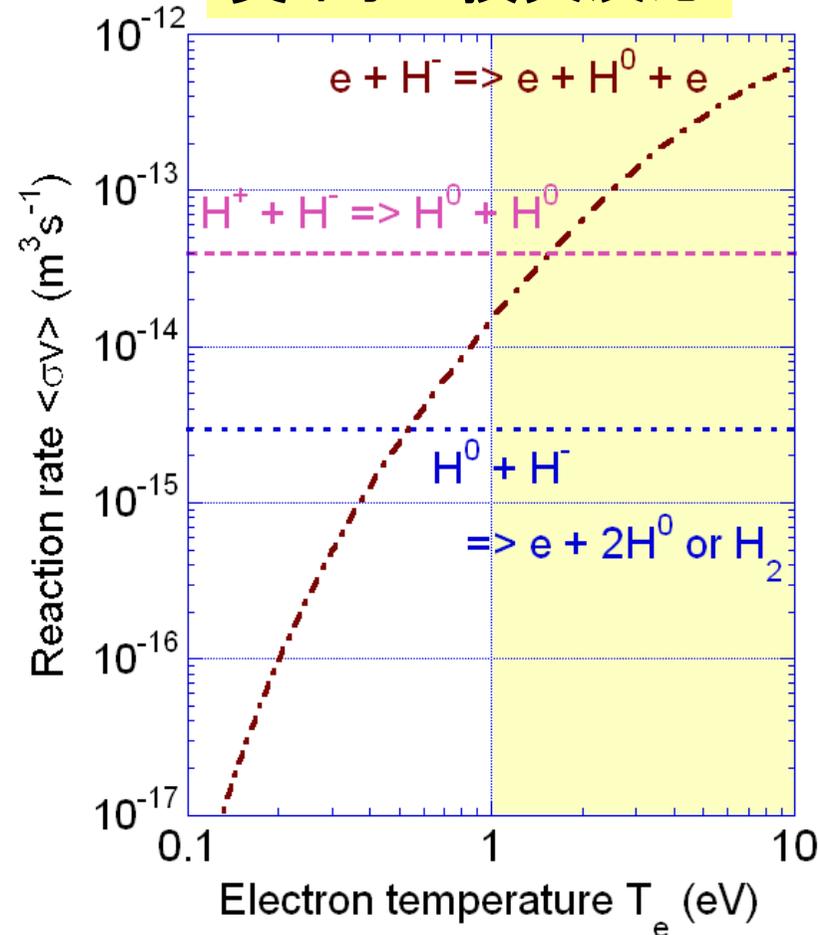


高速電子で分子の解離促進  
 高エネルギー原子を低仕事関数表面に入射

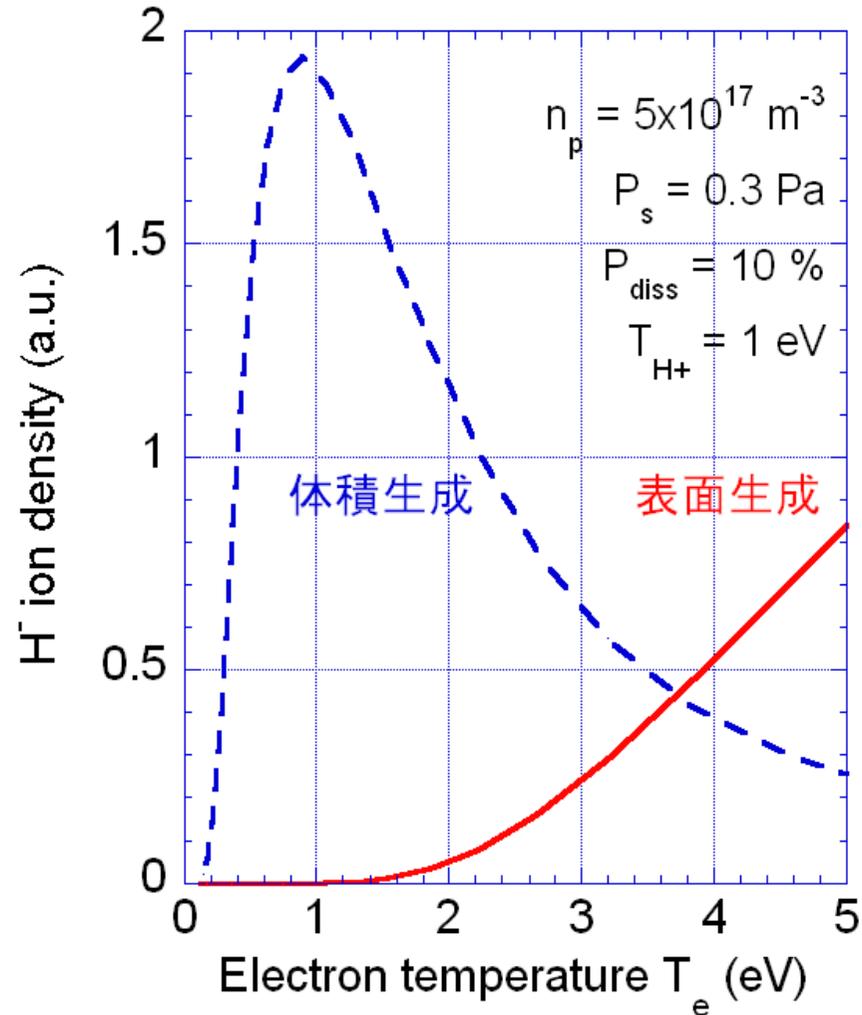
# 負イオン損失断面積

R. K. Janev et al., "Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas" (Springer, Berlin, 1987).  
P. T. Greenland and D. Reiter, Juelich Report No. JUEL-3528 (1996).

## 負イオン損失反応



損失反応は電子温度と共に急激に増大。

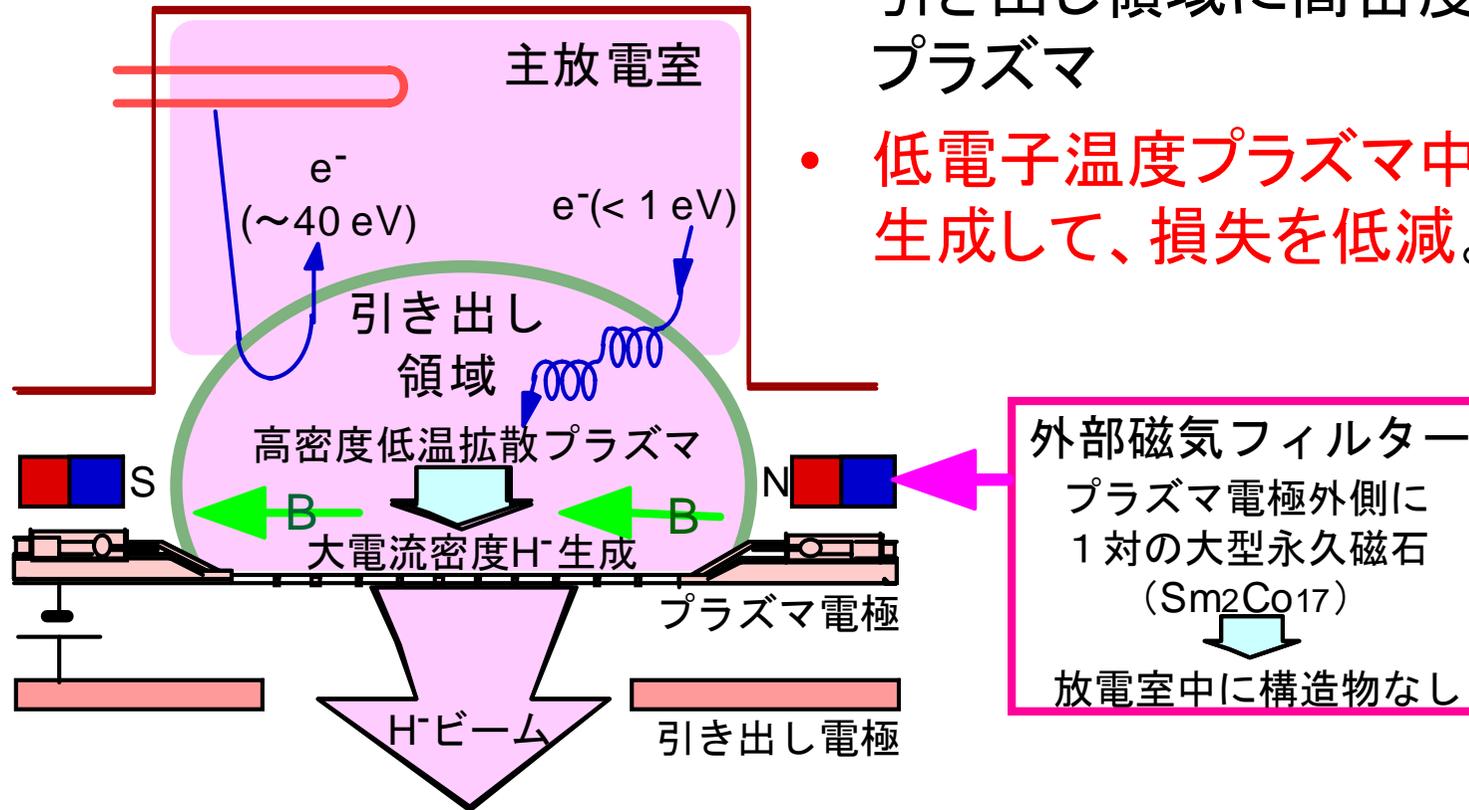


負イオン生成・消滅反応は電子温度依存性が強い。

負イオン体積生成は低電子温度プラズマ中が得策。

# 負イオン源のしくみ

## 磁気フィルター付 負イオン源 (1986-2006)

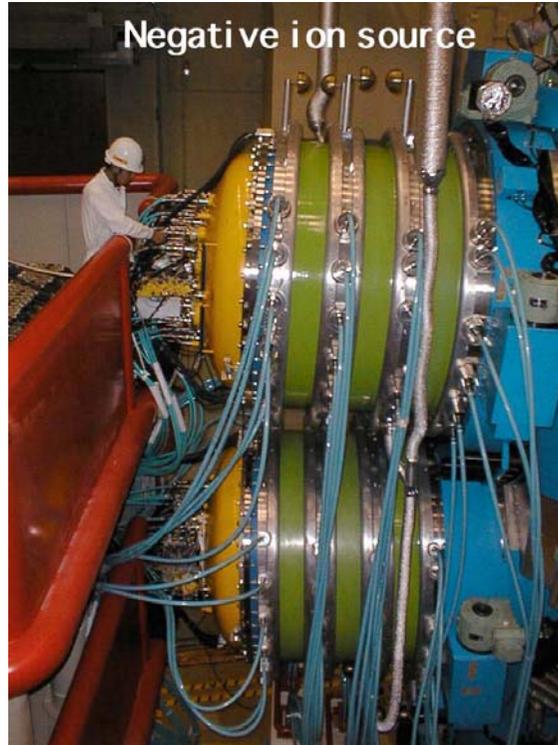


- プラズマ電極外側に置いた一対の磁石により、横磁場を形成。
- 高速電子を主放電室に閉じ込め、
- 引き出し領域に高密度低温拡散プラズマ
- 低電子温度プラズマ中で負イオン生成して、損失を低減。

高速電子による負イオン損失を強く意識した設計

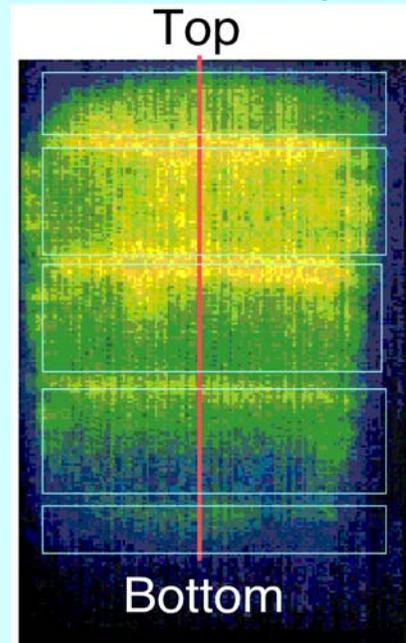
# JT-60U N-NBIの問題点

## JT-60U N-NBI負イオン源

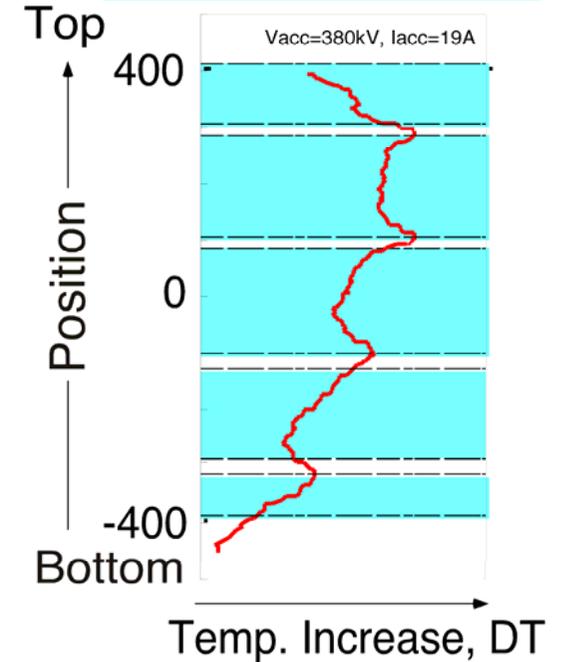


### 負イオン一様性

IR beam footprint



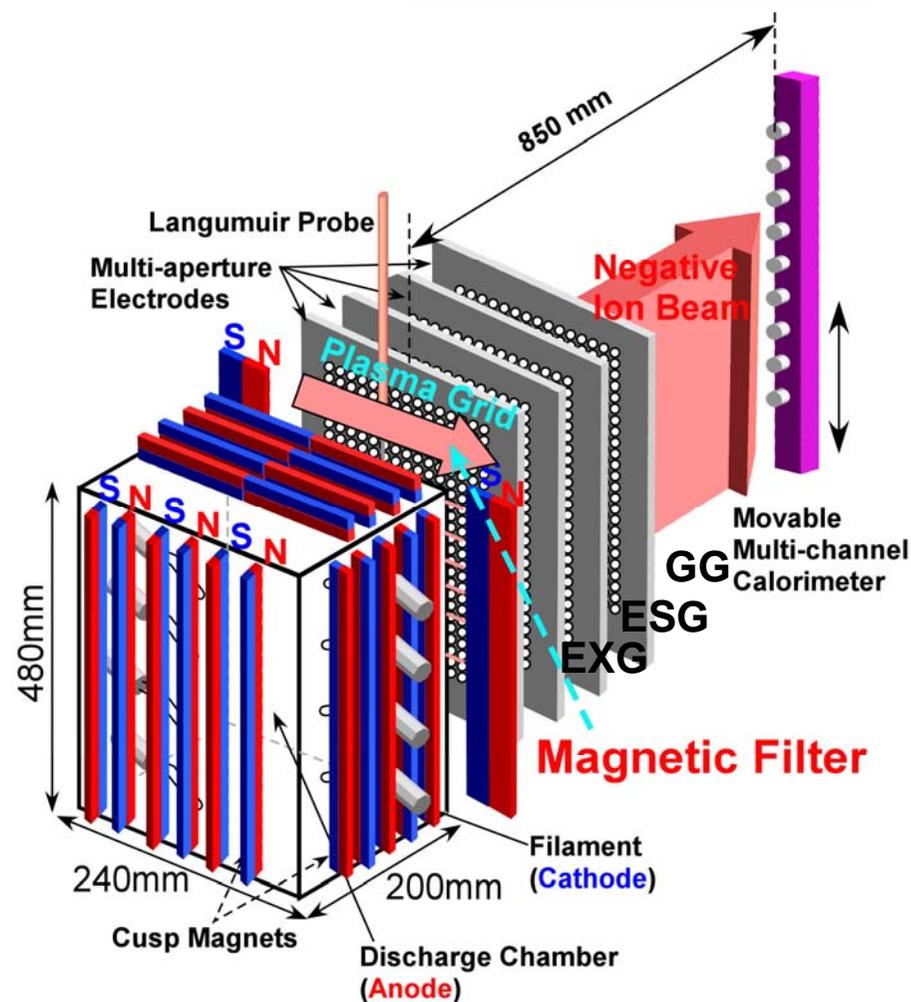
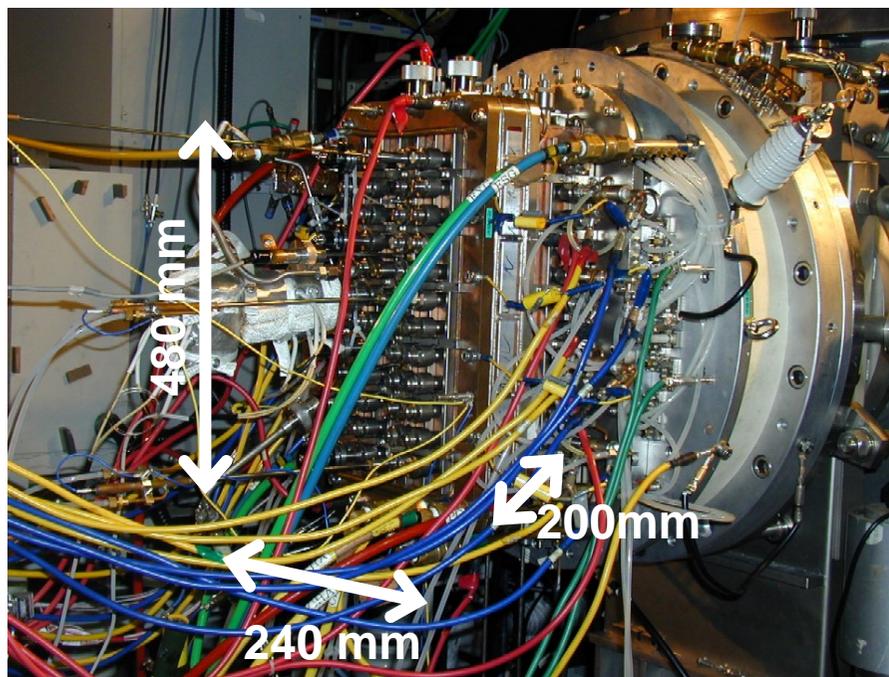
Target temp. profile



設計目標  
 ビーム電流: 22 A  
 ビームエネルギー: 500 keV  
 パルス幅: 10秒

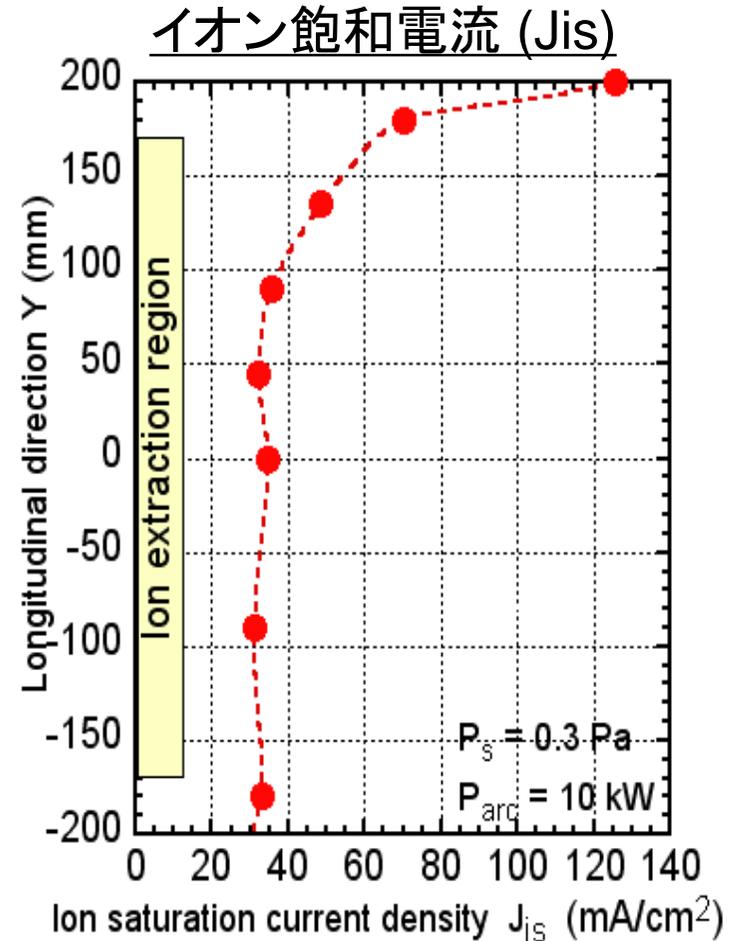
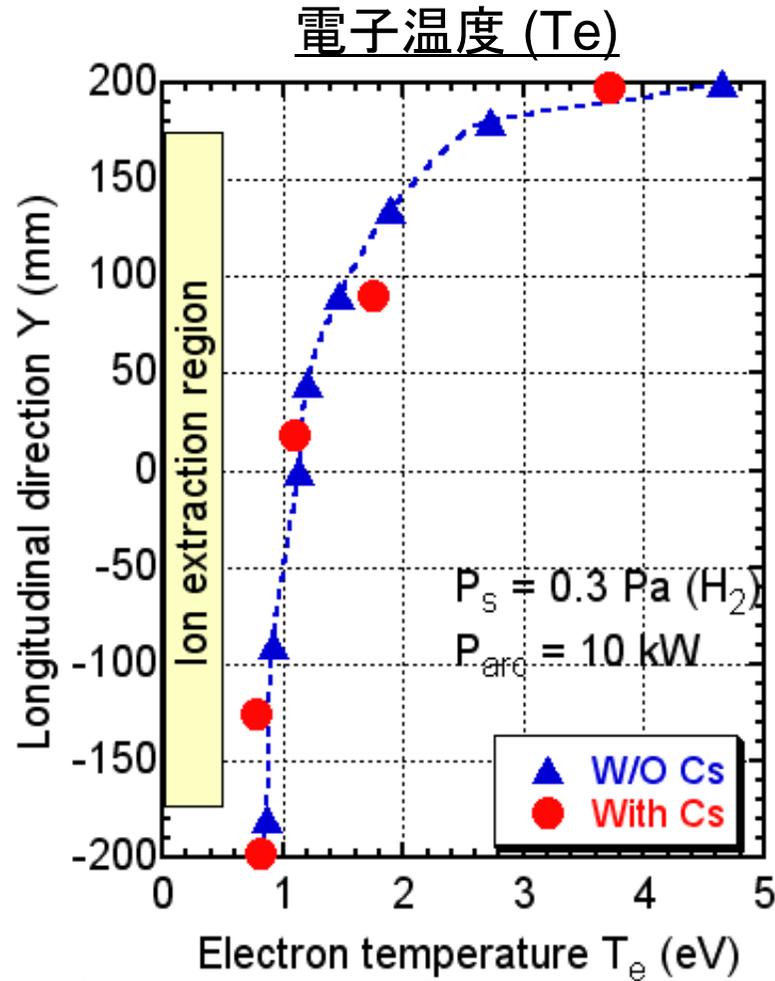
- 上下端セグメントから:  
負イオン出力とっても低い
- 中央部3セグメントから: 強い勾配

# 10 アンペアイオン源



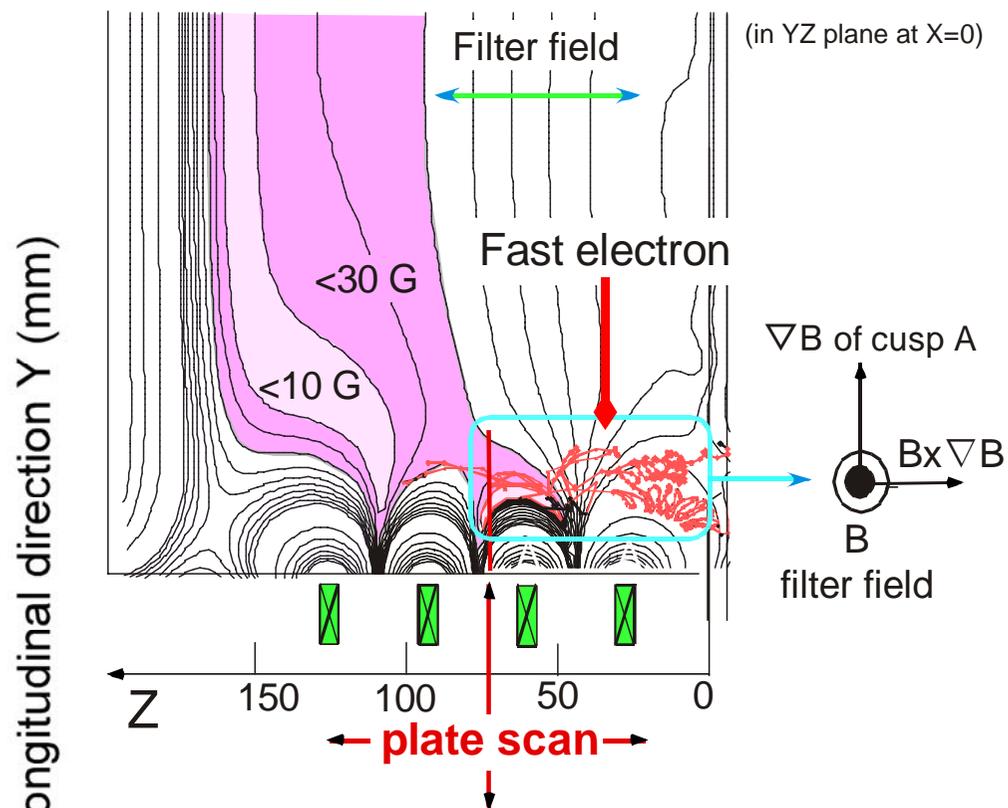
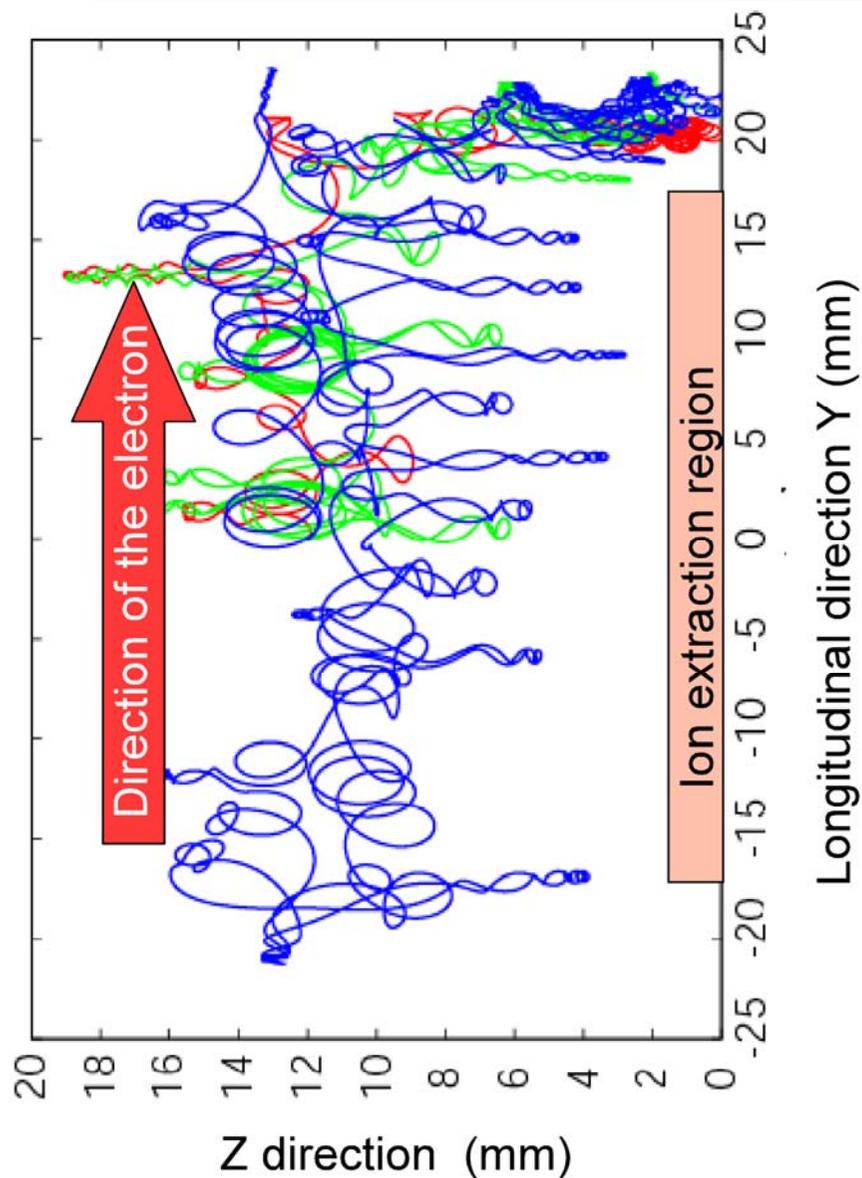
- ▶ プラズマ生成: W-フィラメントを用いたアーク放電 ( $\leq 30$  kW)
- ▶ 放電室内プラズマ計測: 静電プローブ ( $T_e, n_e, j_{is}$ )、レーザー光脱離法 ( $n_{H^-}$ )
- ▶ ビーム計測: 多チャンネルカロリメータ

# プラズマパラメータ空間分布



- Cs添加後の $T_e$ 、 $J_{is}$ 分布は添加前と同様、不均一。
- Cs添加後、 $T_e$ 及び $J_{is}$  ( $n_e$ )が高い領域でH<sup>+</sup>ビーム強度も高い。

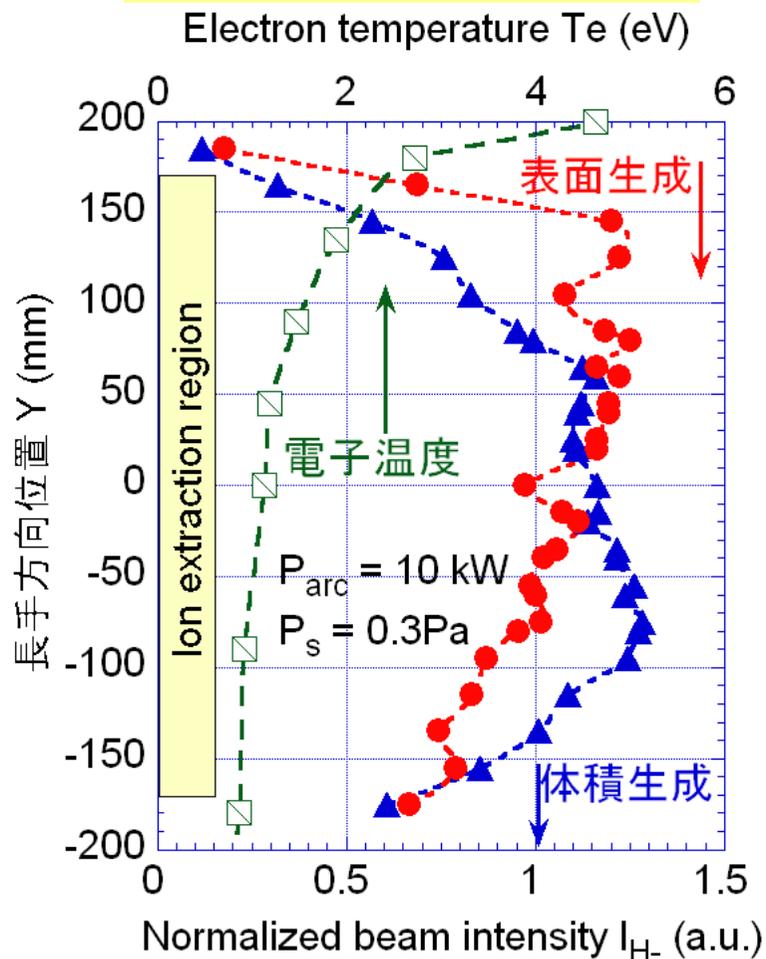
# 高速電子の $B \times \nabla B$ ドリフト



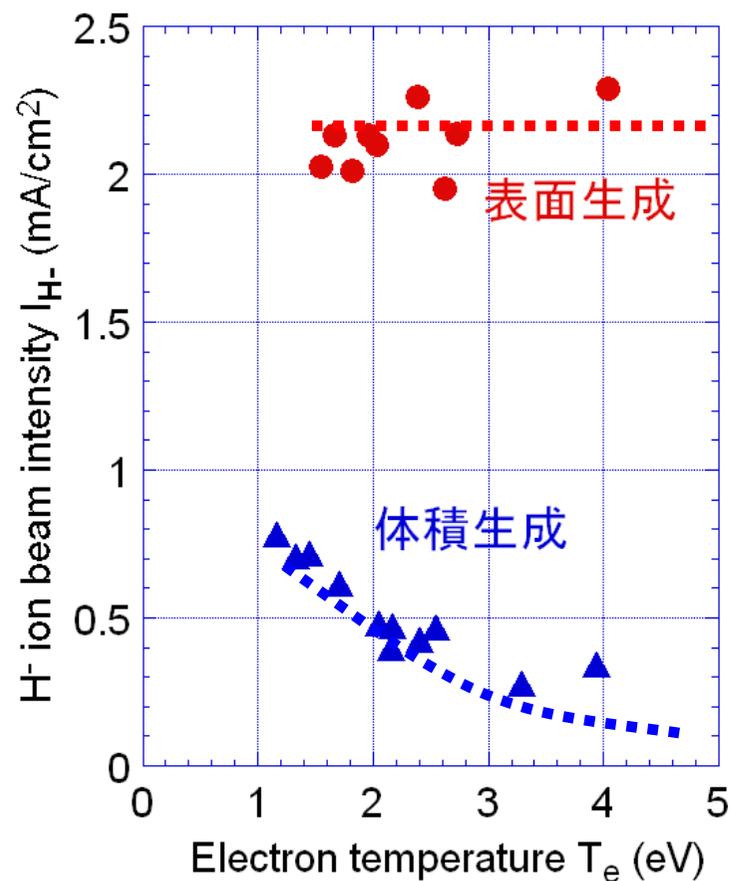
フィラメントから放出された高速電子がフィルター磁場中で  $B \times \nabla B$  ドリフトにより放電容器上部へ。引き出し領域電子温度が局所的に上昇。

# 負イオンビームの空間分布

## 負イオンビーム分布

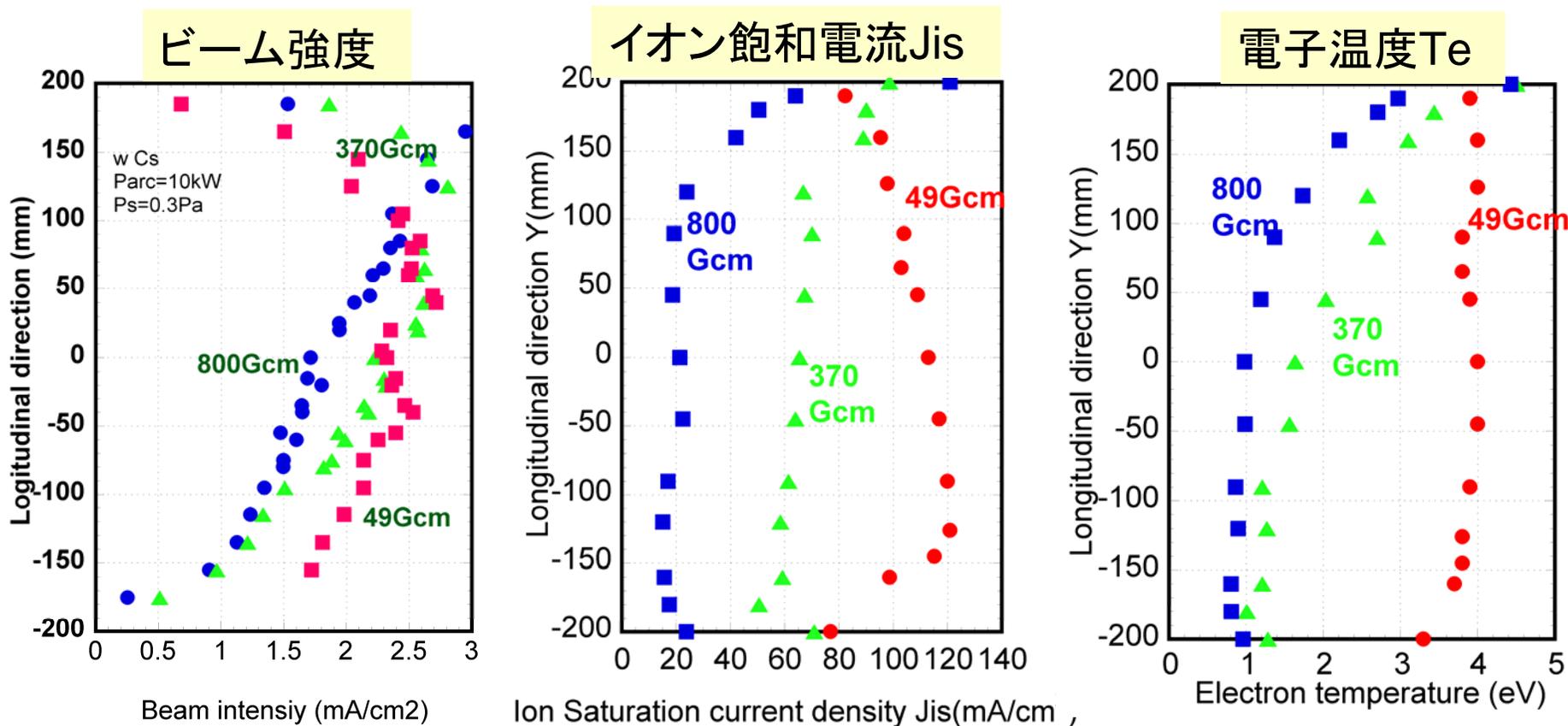


## 負イオンビーム強度の電子温度依存性



Cs添加時、負イオン表面生成は高電子温度プラズマ中で促進される。

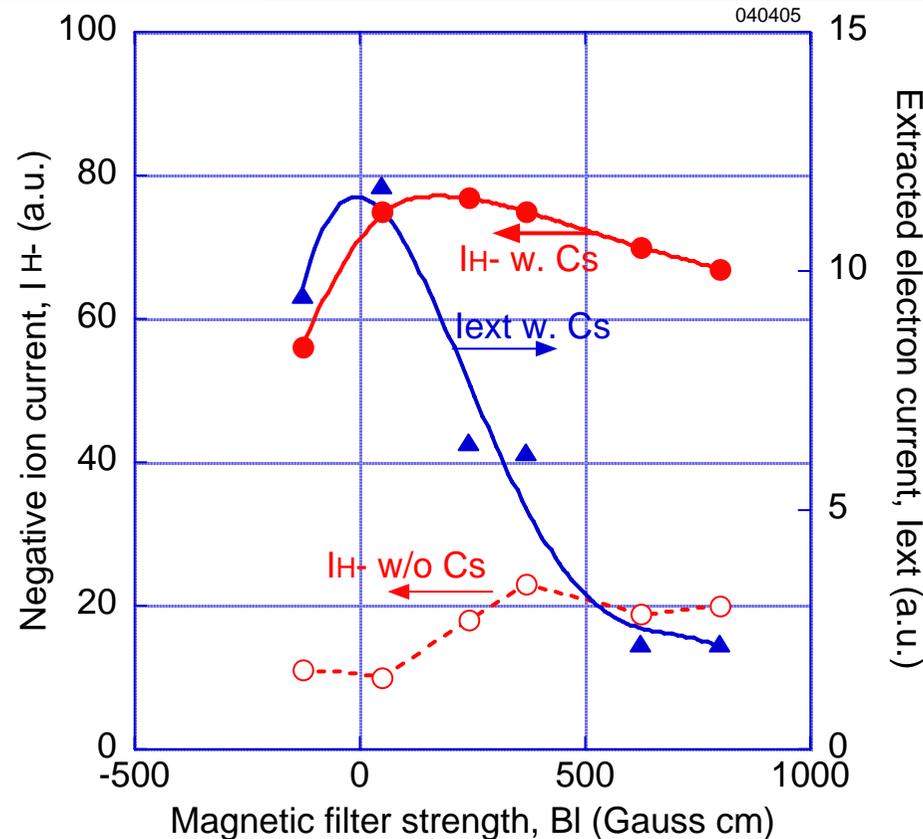
# 磁気フィルター不要説



磁気フィルター強度を弱めると、

- プラズマパラメーター様化、
- 負イオンビーム空間一様性も大幅に改善。

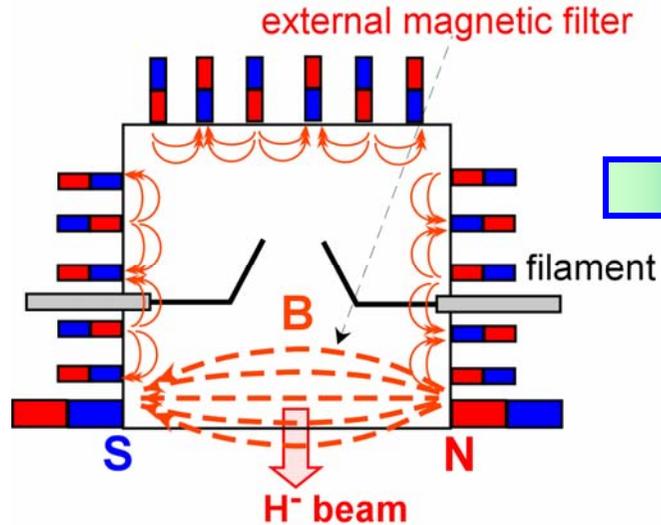
# 負イオン表面生成と磁気フィルター



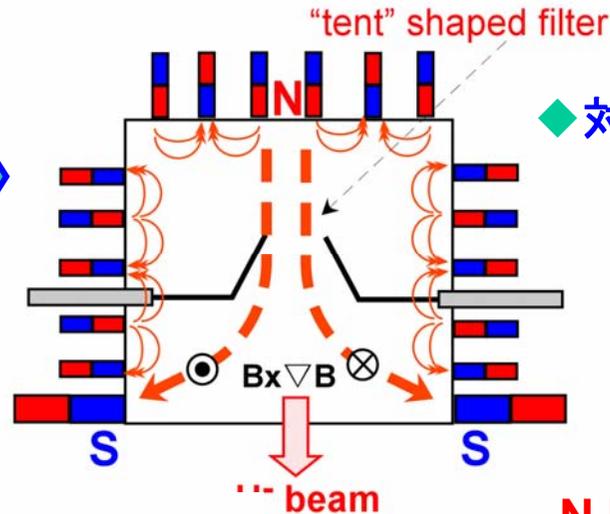
- 磁気フィルター強度依存性は弱い。電子剥離等プラズマ中の反応に依存しない
- 高速電子により電離・解離が促進、 $H^0$  または  $H^+$  から負イオンが表面生成?
- 大量の引き出し電子電流  
何らかの電子抑制が不可欠(磁気フィルター)

# 磁場配位の改良 -テントフィルタ-

従来の負イオン源



テントフィルタ付負イオン源

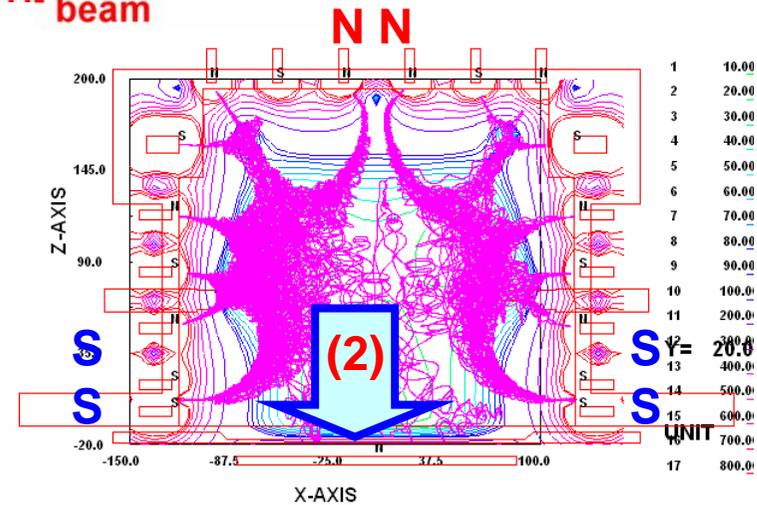
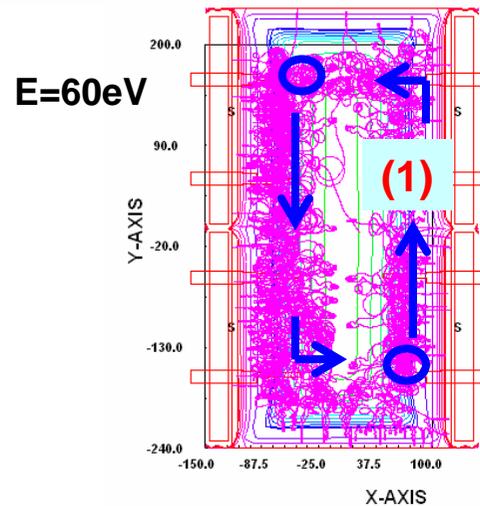


- ◆ 対称なカusp磁石配置
- +
- ◆ テントフィルタ

- ◆ カusp磁石左右異極
- +
- ◆ 外部フィルタ

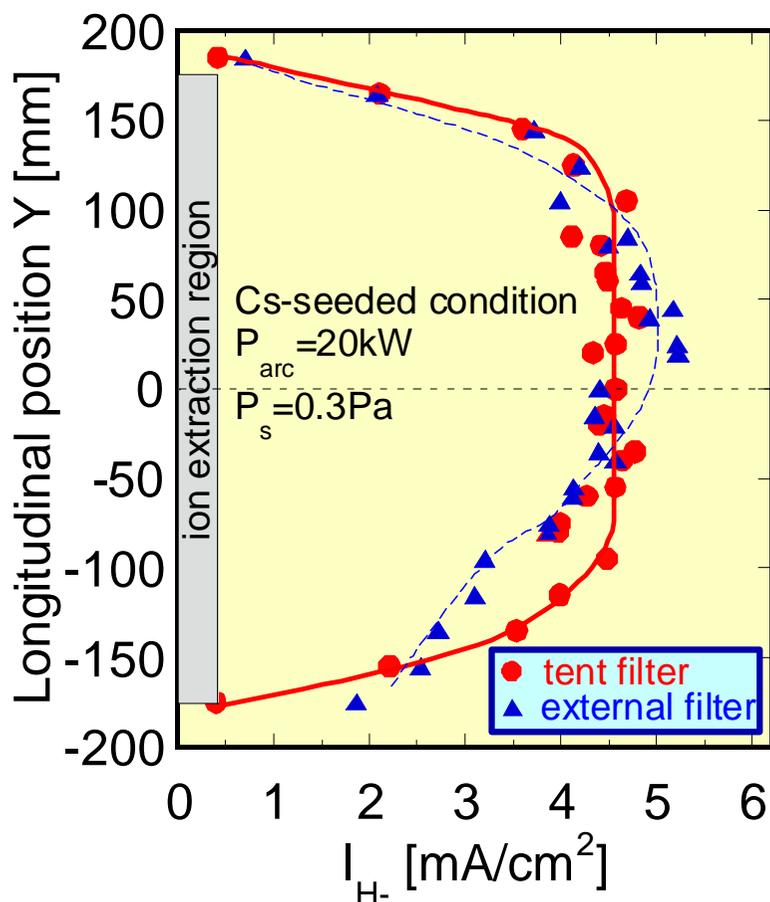
PGを覆う横磁場中で  
高速電子がドリフト

↓  
不均一なソースプラズマ



- (1) 1次電子は、テントフィルタ内で  $B \times \nabla B$  ドリフトにより方位角方向に回転.
- (2) ラーマ半径の大きなイオン, 原子束がPGに入射.

# テントフィルタによるビーム一様性改善



	ext. filter	tent filter
$I_{H^-}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	4.3	4.3
Deviation [%]	15.5	7.9
$I_{ext}$ [A]	4.6	6.0

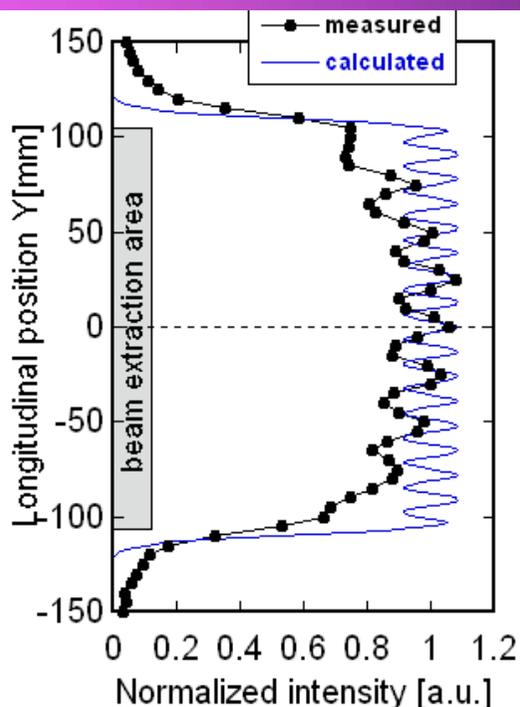
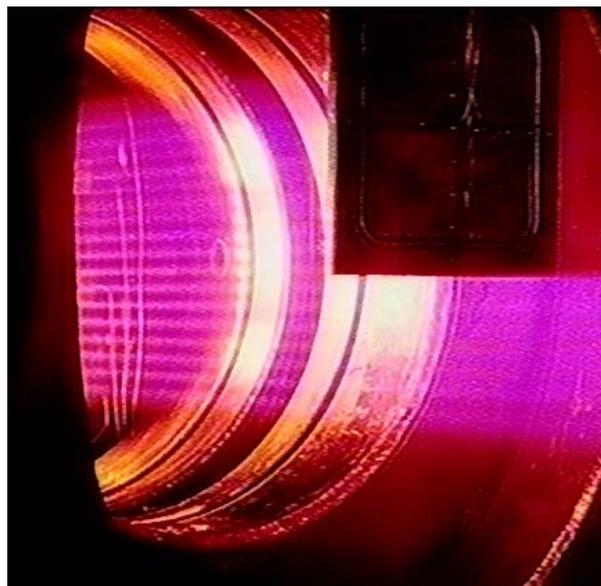
Deviation =  $I_{H^-}$  (標準偏差/平均値)

評価領域:  $Y = \pm 140\text{mm}$

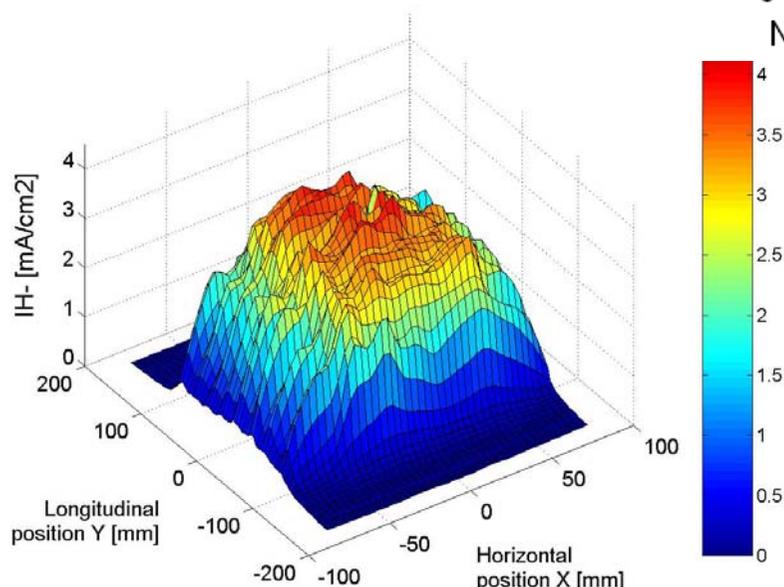
テントフィルタにより、引出し領域のプラズマ分布 ( $T_e > 1\text{eV}$ ) が一様になり、負イオンビームの空間分布の一様な負イオンビームが引き出される。

ITER要求値である Deviation < 10% を達成  
EUから、ITERへの適用にむけた共同研究提案

# ビームレットの特性評価



中央部(-60 mm < Y < 60 mm)から発散角10mradの一樣なビームが引き出された。



**空間的に一樣なビーム発生を実証**

ITER NBIの60cm x 150cmにわたる引き出し面から一樣な負イオンビームが引き出せる見通しを得た。

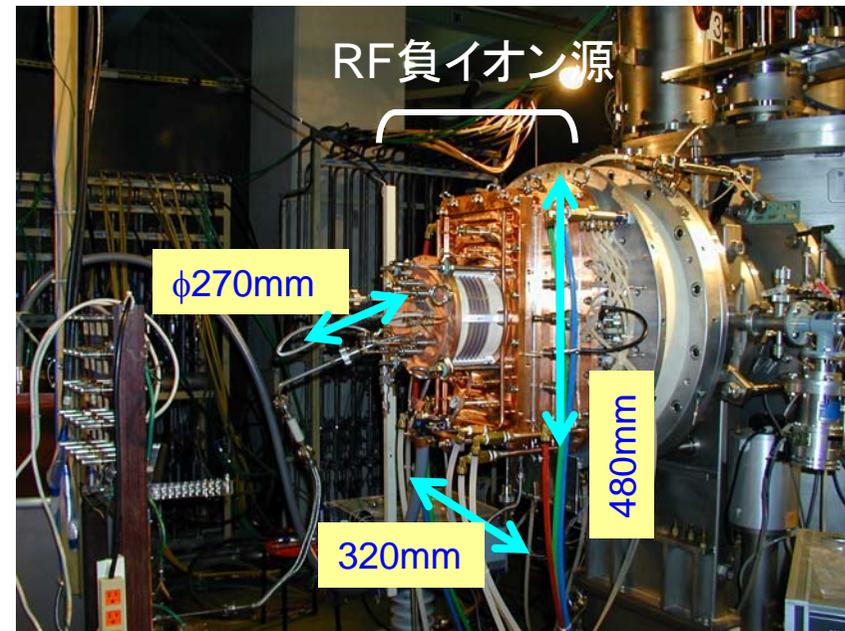
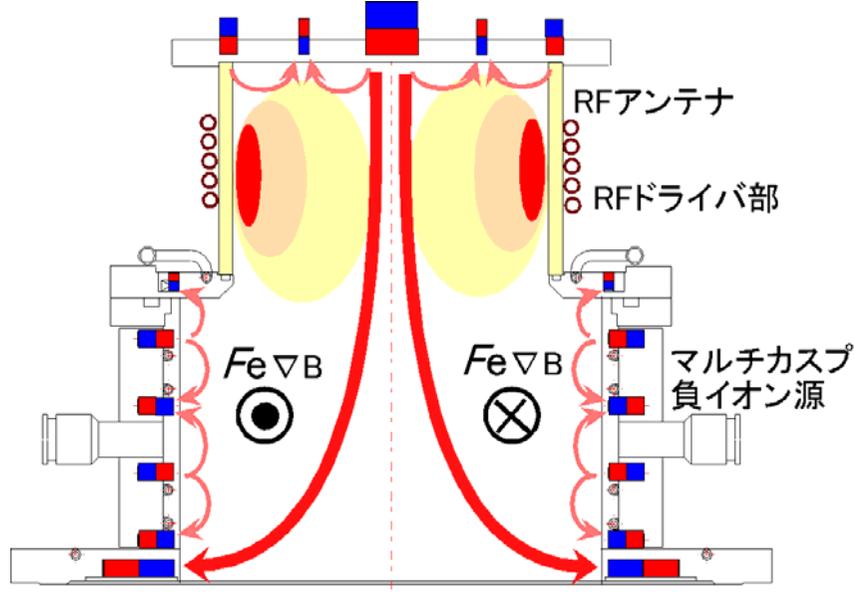
# 高周波負イオン源開発

## 一様性研究から得た知見

- ▶ テントフィルターで負イオンビーム空間一様性確保
- ▶ 高電子温度プラズマ中でも大量の負イオン表面生成

## MHz帯高周波を用いたRF負イオン源 + テント型磁気フィルター

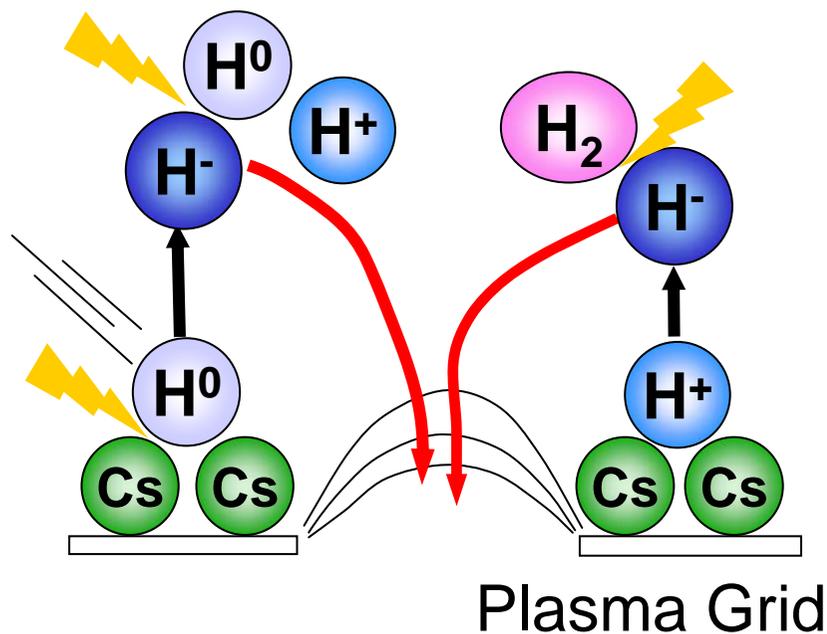
RF負イオン源へのテントフィルターの応用



- ▶ ITER, DEMO NBIに向けたフィラメントレス化、メンテナンス頻度の低減

# 表面生成負イオンの輸送過程

表面生成された負イオンはシースにより壁垂直方向に飛び出す。

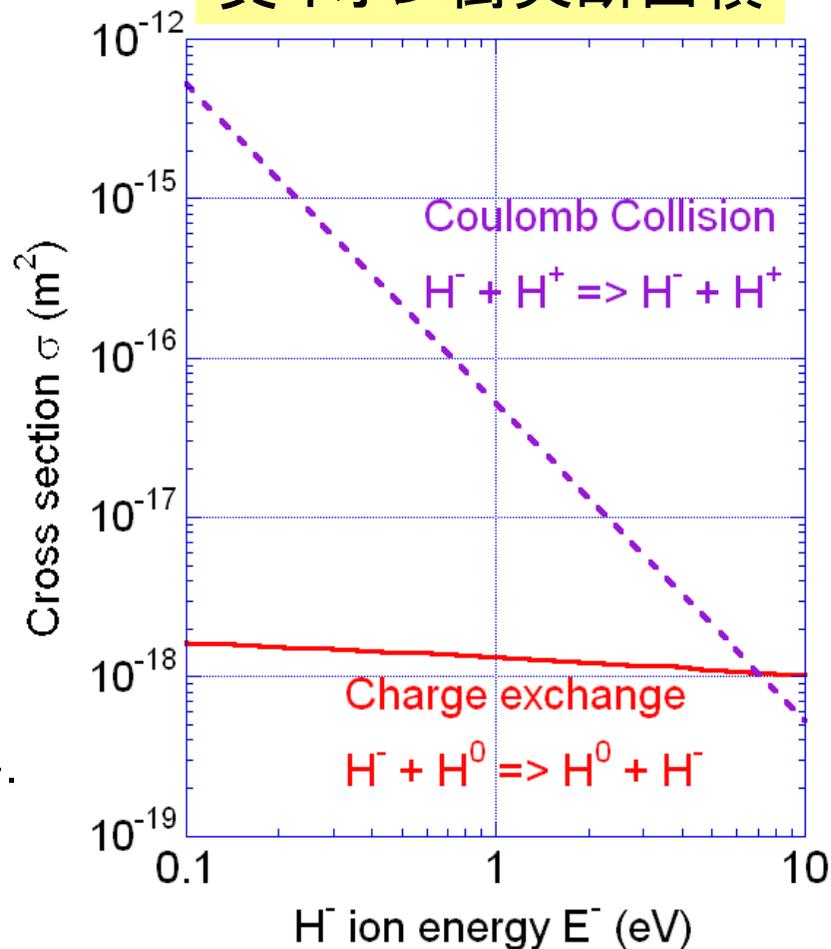


負イオンを孔まで輸送する過程が必要。  
電場？衝突？

負イオン輸送過程の理解には、

負イオンと中性粒子の弾性衝突断面積が不十分

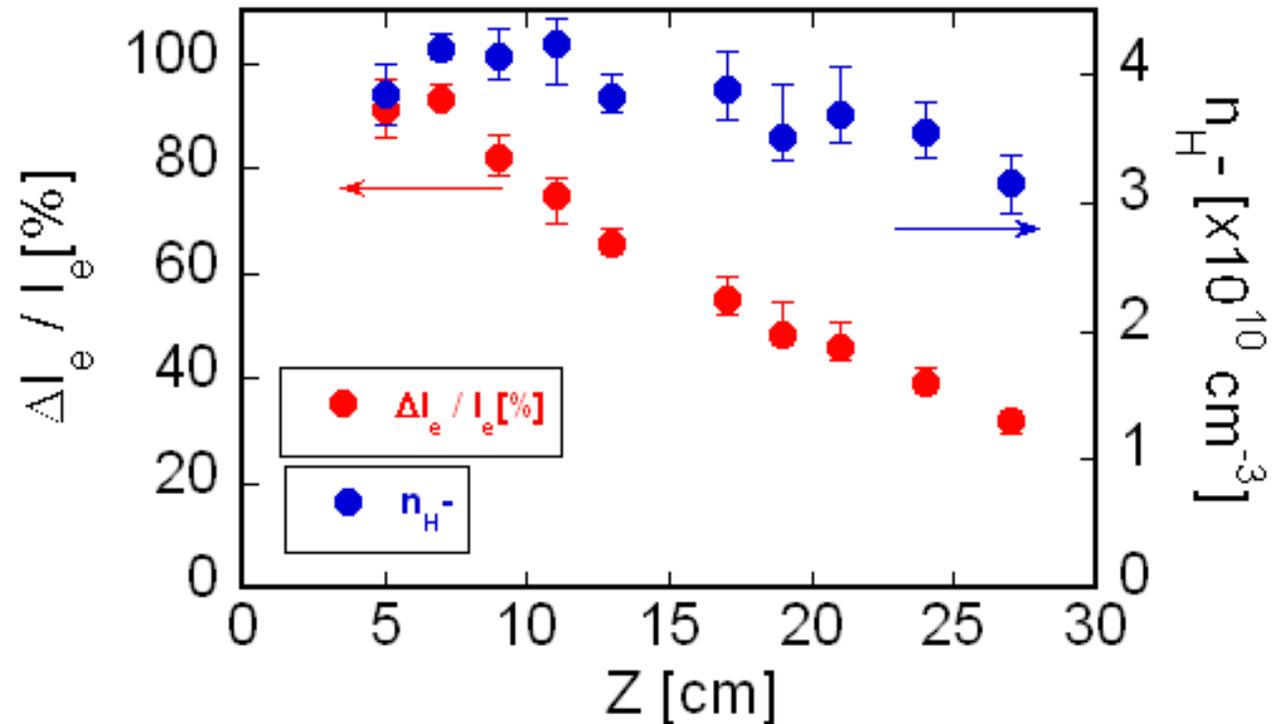
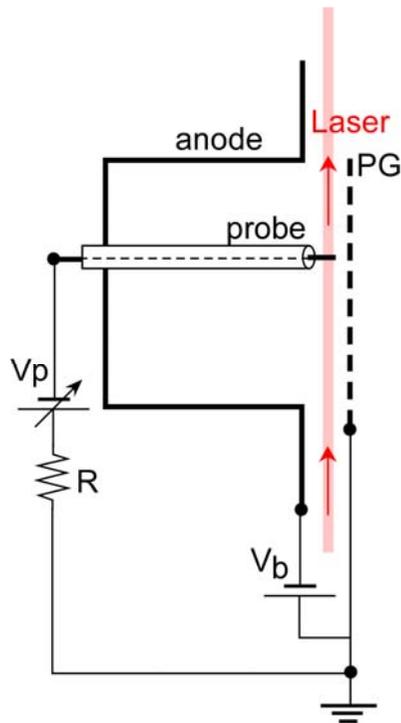
## 負イオン衝突断面積



# 負イオンのZ方向分布

負イオンにレーザーを照射、光脱離電子をプローブで捕集するLPD法を用いて、負イオンのZ方向空間分布を測定

テントフィルタ@10kW,0.3Pa(PG surface at Z=0)



- PG近傍では、負イオンが総負電荷の約50%以上を担う。(?)
- PGから20mmの領域まで負イオンは概ね一様に分布。  
→表面生成負イオン(2 ~ 3 eV?)のsurvival lengthは長い。

- 負イオンの生成・損失反応はプラズマ中の電子温度に強く依存。
  - 体積生成: 低電子温度、
  - 表面生成: 高電子温度、で生成量が増大。
    - 高周波駆動プラズマの負イオン源への応用可能性。
- 高電子温度プラズマ中の負イオン生成
  - 高速電子を局在化させないテントフィルターにより負イオンビーム分布の一様性改善。
- LPD負イオン密度分布計測  
高電子温度プラズマ中での表面生成負イオン(2 ~ 3 eV?)の  
survival length  $\approx$  20 mm.

負イオンの輸送過程の重要性:

高精度の負イオン-中性粒子弾性衝突断面積が必要